

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT ATE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
EN VUE D'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
OPTIONS RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

Étude et simulation de la technique FBMC dans le cadre de la 5G

Réalisé par :
BENYAHIA Mouloud
AMARA Dihia

Encadré par :
Mr.BELLAHSENE Hocine

Membre de jury :

Mr. BERRAH Smail

Mr.KHEIRELINE Abdelkrim

Promotion 2021 - 2022

Remerciements

A l'issus de ce mémoire, nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de réaliser cet humble travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et nos sincères remerciement à Mr.BELLAHSENE en tant que encadrant de mémoire pour son inspiration, son suivi, ces précieux conseils et le temps qu'il nous a consacré.

Nous adressons également nos vifs remerciement aux membres du jury Mr.BERRAH Smail et Mr.KHEIRELINE Abdelkrim d'avoir accepté d'examiner Et de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à nos chères familles pour leur soutien, amour, sacrifices et encouragements, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce projet.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A ma très chère mère

Quoi que je dise je ne saurai pas te remercier comme il se doit et je ne saurai pas exprimer le respect et l'amour que je te porte, tu n'as jamais cessé de me soutenir et de m'encourager, ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force, d'amour et de tendresse.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, tu m'as appris, tu m'as dirigé et tu m'as toujours tiré vers le haut. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mes chers frères **Mecipsa, Ghiles, Koceila** et à ma chère belle-sœur **Mounira**, je vous remercie pour vos aides précieux et pour tous les bienfaits que vous avez pu faire pour moi. Que dieu vous donne santé, bonheur et beaucoup de succès.

A mes chères grands-mères

A mon binôme **Mouloud** ainsi qu'à toute sa famille.

A tous **mes proches** et **mes amis/es**

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

A tous ceux qui m'ont toujours encouragé et étaient à mes cotés.

Je vous dis merci.

Dihia

Dédicace

je dédie ce travail à :

Du profond de mon coeur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers :

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A mon très cher père

Ce travail est dédié à mon père, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A mes chères soeurs et mes chers frères : Kahina, Zahra, Zina, Nassima, Khellaf et Fatah pour leurs encouragements et leur attachement et surtout pour leur patience et leur disponibilité et leur soutien dans les moments les plus difficiles de ma vie.

A ma binome **Dihia** et toute sa famille.

A tous mes amis, qui ont toujours été présents pour moi.

A ceux qui ont veillé pour mon bien-être

A ceux que j'aime et je respecte infiniment

Le jour est venu pour leur dire merci...

Mouloud

Table des matières

Table des matières	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	1
1 La technologie 5G	2
1.1 Introduction	2
1.2 Historique de la norme 5G et ses spécificités	2
1.3 Amélioration apportées par la 5G	3
1.4 L'architecture générale du réseau 5G	4
1.4.1 Architecture Non-Standalone et Standalone	4
1.4.2 Les composants du réseau 5G	4
1.5 Les fréquences attribuées à la 5G	6
1.6 les cas d'usage de la 5G	6
1.7 Les technologies envisagées par les réseaux 5G	8
1.7.1 Les ondes millimétriques	8
1.7.2 Les petites cellules	8
1.7.3 Le Massive MIMO	8
1.7.4 Le Beamforming	9
1.7.5 Le Full duplex	10
1.8 Conclusion	11
2 Massive MIMO Beamforming	12
2.1 Introduction	12
2.2 Technique Massive MIMO	12
2.3 Types de Massive MIMO	12
2.4 Fonctionnement du Massive MIMO	13

2.4.1	Transmission de données en liaison montante	13
2.4.2	Transmission de données en liaison descendante	14
2.5	Estimation du canal	14
2.5.1	Mode TDD (Time Devision Duplex)	14
2.5.2	Mode FDD (Frequency Devision Duplex)	15
2.5.3	Le type d'opération préférable pour Massive MIMO	15
2.6	Concept d'antenne intelligente et beamforming	16
2.6.1	Le beamforming analogique	17
2.6.2	Le beamforming numérique	18
2.6.3	Le beamforming hybride	18
2.7	Les avantages du Massive MIMO	19
2.8	Conclusion	19
3	La technique FBMC	20
3.1	Introduction	20
3.2	Bruits et interférences	20
3.2.1	SNR(Signal to Noise Ratio)	20
3.2.2	BER(Bit Error Rate)	21
3.3	Modulation Multi porteuse MCM	21
3.4	OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	21
3.5	Les limites de l'OFDM	22
3.6	Les bancs de filtres	23
3.7	La technique FBMC	23
3.8	Analyse et synthèse par bancs de filtres	24
3.9	FBMC/OQAM	25
3.9.1	Principe général	25
3.9.2	Au niveau de l'émetteur (pré-traitement OQAM)	26
3.9.3	Au niveau de récepteur (post-traitement OQAM)	27
3.10	Conception du filtre prototype	28
3.11	Densité Spectrale de Puissance (PSD)	28
3.11.1	Densité spectrale de puissance de l'OFDM	28
3.11.2	Densité spectrale de puissance de FBMC	28
3.12	L'efficacité spectrale	29
3.13	Facteur de crête PAPR	29
3.14	Les principales différences entre OFDM et FBMC	30
3.15	La technique RSMA	30

3.16 Conclusion	31
4 Simulation & interprétations des résultats	32
4.1 Introduction	32
4.2 Le logiciel MATLAB	32
4.3 Performances de la FBMC et celle de l'OFDM	32
4.3.1 La densité spectrale de puissance	33
4.3.2 Le spectre des sous-porteuses	37
4.3.3 Efficacité spectrale	40
4.3.4 Facteur de crête (PAPR)	42
4.3.5 Taux d'erreur binaire	42
4.4 Conclusion	43
Conclusion générale	44
A	45
A.1 Historique de la norme 5G et ses spécifités	45
B	47
B.1 Modèle du système Massive MIMO	47
B.2 Contamination des pilotes	48
C	49
C.1 Types de FBMC	49
C.2 Conception du filtre prototype	52
C.3 La technique RSMA	53
Bibliographie	57
Webographie	59

Table des figures

1.1	Performances de la 5G [Ser15].	3
1.2	Architecture 5G NSA et 5G SA [Res].	5
1.3	Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau 5G [Rem].	5
1.4	les fréquences attribuées à la 5G [RS].	6
1.5	Scénarios d'utilisation de l'IMT-2020 [Zha].	7
1.6	la technologie Massive MIMO [5g-].	9
1.7	la technologie Beamforming[Qor].	10
1.8	La technologie Full duplex [CA20].	11
2.1	SU-MIMO.	13
2.2	MU-MIMO.	13
2.3	Transmission en liaison montante et descendante[CA20].	14
2.4	L'avantage de TDD par rapport à FDD pour les utilisateurs mobiles[Ngo15].	16
2.5	Principe d'une antenne intelligente[AOU+15].	17
2.6	Beamforming analogique[MRD16].	17
2.7	Beamforming numérique[MRD16].	18
2.8	Beamforming hybride[SCW20].	18
3.1	Schéma bloc OFDM.	22
3.2	Architecture d'un banc de filtre.	23
3.3	Schéma bloc d'une chaîne de transmission du système FBMC-OQAM.	24
3.4	Banc de filtres à M canaux (a) banc d'analyse (b) banc de synthèse [ACF14].	25
3.5	Répartition des symboles OFDM et FBMC/OQAM selon les sous-porteuses [Bou+14]	26
3.6	Pré-traitement OQAM pour K pair et impair.	26
3.7	Post-traitement OQAM pour K pair et impair.	27
4.1	Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $K=2$	33
4.2	Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $K=3$	34

4.3	Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $K=4$	34
4.4	Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $N=512$	35
4.5	Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $N=1024$	35
4.6	Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $N=2048$	36
4.7	Spectre de sous porteuse pour $M=8$	37
4.8	Spectre de sous porteuse pour $M=16$	37
4.9	Spectre de sous porteuse pour $M=32$	38
4.10	Spectre de sous porteuse pour $M=64$	38
4.11	Spectre de sous porteuse pour $M=128$	39
4.12	L'efficacité spectrale pour $t=50\text{ms}$	40
4.13	L'efficacité spectrale pour $t=200\text{ms}$	40
4.14	L'efficacité spectrale pour $t=700\text{ms}$	41
4.15	L'efficacité spectrale pour $t=1500\text{ms}$	41
4.16	Taux d'erreur binaire en fonction du SNR pour l'OFDM et la FBMC-OQAM.	43
A.1	Calendrier de la 5G au 3GPP [FRA].	45
B.1	Modèle d'un système MIMO massif[Alb+21].	48
B.2	Effet de contamination de pilotes en Massive MIMO[CA20].	48
C.1	Bloc émetteur et récepteur FMT[Far14].	49
C.2	Bloc émetteur et récepteur CMT[Far14].	50
C.3	La représentation de CMT[Far14].	50
C.4	Bloc émetteur et récepteur SMT[Far14].	51
C.5	La représentation de SMT[Far14].	51
C.6	Système MISO à deux utilisateurs exploitant RSMA[Gam+21].	54

Liste des tableaux

3.1	La comparaison entre l'OFDM et l'FBMC [AAQ19].	30
4.1	Paramètres de simulation.	33
4.2	Paramètres de comparaison les résultats en terme d'efficacité spectrale	40
4.3	Comparaison les résultats d'efficacité spectrale	41
4.4	Comparaison du PAPR entre l'OFDM et la FBMC-OQAM.	42
4.5	Comparaison les résultats de Taux d'erreur binaire en fonction de SNR pour l'OFDM et la FBMC-OQAM.	43
C.1	Les coefficients de filtre Phydys dans le domaine fréquentiel[Ram17]	52

Liste des Abbreviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
5G-NR	5G New Radio
5G-AN	5G Access Network
5GC	5G Core
5GS	5G Source
AMF	Access and Mobility Management
AF	Application Function
AFB	Analysis Filter Bank
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BS	Base Station
BER	Bit Error Rate
CU	Central Unit
CMT	Co-sine Modulated Multitone
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
CE	Canal Estimation
CP	Cyclic Prefix
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
CSIT	Channel State Information at the Transmitter
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
CSIT	channel State Information at the Transmitter
DU	Distributed Unit
DL	DownLink
Ds	Data streams
DSP	Power Spectral Density
EPC	Evolved Packet Core
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eNodeB	Evolved Node B

FDD	Frequency Division Duplex
FBMC	Filter Bank Multi Carrier
FFT	Fast Fourier Transform
FMT	Filtered Multi Tone
FDM	Frequency Division Multiplexing
gNodeB	Next Generation NodeB
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
IoT	Internet of Things
IMT	Télécommunications Mobiles Internationales
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ICI	Inter Canal Interference
ISI	Inter Symbol Interference
KPI	Keys Performance Indicators
LTE	Long Term Evolution
MCM	Multi Carrier Modulation
MEC	Mobile Edge Computing
mMTC	Massive Machine Time
mmWave	Millimeter Wave
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multi Input Single Output
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple-Output
MAI	Multiple Access Interface
MATLAB	MATrix LABoratory
NOMA	Non Orthogonal Multiple Acces
NSA	Non Standalone Access
NFV	Network Function Virtualization
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OQAM	Offset Quadrate Amplitude Modulation
OMA	Orthogonal Multiple Access
PDN	Packet Data Network
PCF	Policy Control Function
PSK	Phase Shift Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PHYDYAS	PHYsical layer for DYnamic Spectrum Access
QoS	Quality Of Service
QAM	Quadrate Amplitude Modulation

RF	Radio Frequency
RSMA	Rate Splitting Multiple Access
RS	Rate Splitting
SA	Standalone Access
SMF	Session Management Function
SBA	Service Based Architecture
SIC	Successive Interference Cancellation
SU-MIMO	Single User Multiple Input Multiple Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SFB	Synthesis Filter Bank
SMT	Staggered Multi Tone
SIC	Successive Interference Cancellation
SDMA	Space Division Multiple Access
TMUX	TransMultiplexer
TEB	Taux Erreur Binaire
TDD	Time Division Duplex
UIT	International Telecommunication Union
UIT-R	Union International Telecommunication Radiocommunication
UL	UpLink
UE	User Equipment
UPF	User Plane Function
UDM	Unified Data Management
uRLLC	Ultra Reliable and Low Latency
VSB	Vestigial Side Band

Introduction générale

Les systèmes sans fils 5G sont conçus pour répondre à une multitude de cas d'usage et fournir un débit de données très élevé, une latence ultra faible et une haute efficacité spectrale, pour cela la 5G s'appuie sur une multitude de technologies.

Les techniques multiporteuses sont très influentes dans le développement des technologies de communication sans fil. Aujourd'hui un débat se porte sur le choix d'une modulation à déployer pour les systèmes de communication 5G.

Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) est une technique largement déployée dans les systèmes de communications sans fil, néanmoins elle est confrontée à certaines lacunes telles que les fuites hors bandes causées par l'utilisation d'un filtre rectangulaire et la réduction de l'efficacité spectrale à cause de l'utilisation du préfixe cyclique, par conséquent l'OFDM n'est pas capable de répondre aux exigences de la 5G.

La technique de transmission à bancs de filtres (FBMC) est une multiporteuse alternative à l'OFDM qui contribue à l'optimisation de la couche physique des réseaux 5G. Cette technique offre une meilleure efficacité spectrale grâce à l'utilisation des filtres prototypes bien localisés en temps et en fréquence. En outre, dans FBMC chaque sous porteuse est modulée avec la modulation OQAM afin de conserver l'orthogonalité nécessaire pour que les sous canaux adjacents utilisent la pleine capacité.

Le choix entre différentes techniques de modulation multiporteuses représente un défi pour les concepteurs des technologies émergentes. L'objectif de notre travail est de réaliser une étude et une simulation de la technique FBMC-OQAM et de prouver que cette technique est optimale pour les systèmes 5G et qu'elle est capable de surmonter les limites de l'OFDM. A partir des résultats trouvés il serait possible d'apprécier la raison pour laquelle cette technique a été introduite en 5G. Pour cela nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres.

- Le premier chapitre comprend une présentation générale de la 5G et les modifications qu'elle a apportée aux réseaux cellulaires précédents.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique de la technologie Massive MIMO, au concept du beamforming et ses différentes architectures.
- Dans le troisième chapitre nous allons donner une vue générale sur l'OFDM, puis réaliser une étude complète de la technique FBMC-OQAM. Une introduction au principe de la nouvelle technique d'accès RSMA sera donnée en fin de ce chapitre.
- Dans le quatrième et dernier chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus lors de nos simulations réalisées sous MATLAB où nous avons fait une étude comparative entre les techniques étudiées dans le troisième chapitre en termes de densité spectrale de puissance (PSD), du spectre des sous porteuse, d'efficacité spectrale, du facteur de crête (PAPR) et de taux d'erreur binaire (BER).

Nous terminons ce projet par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1

La technologie 5G

1.1 Introduction

La 5G est une nouvelle génération de normes de téléphonie mobile, ce n'est pas une simple augmentation de débit comme les générations précédentes, mais une nouvelle base technologique développée pour répondre aux besoins croissants des clients et fournir à chacun un accès illimité à l'information et aux discussions virtuelles en même temps, plus rapide et avec une latence fortement réduite, tout en évitant le risque de saturation du réseau lié à l'augmentation des usages numériques (smartphones, tablettes, objets connectés).

Dans ce chapitre nous présentons la cinquième génération de téléphonie mobile en commençant par un bref historique dans le cadre de International Mobile Telecommunications (IMT-2020) et les améliorations qu'elle a apporté. Puis, nous allons donner son architecture réseau, les fréquences qui lui sont allouées, ces différentes catégories d'usages, nous terminons par citer les technologies émergentes de la 5G telles que les ondes millimétriques, les petites cellules, le massive MIMO, le beamforming et le duplex intégral.

1.2 Historique de la norme 5G et ses spécificités

La nouvelle génération de téléphonie mobile est lancée par deux acteurs principaux : l'UIT (Union internationale des télécommunication) et le 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [FRA].

L'UIT est l'agence des Nations Unies spécialisée dans les technologies de l'information et de la communication, qui mène des recherches par l'intermédiaire de son «Working Party 5D». Son sous-groupe traitant des questions techniques et opérationnelles liées aux radiocommunications a été chargé de définir les caractéristiques de la nouvelle norme IMT-2020 en 2013. L'UIT-R vise à achever l'analyse en 2020 [FRA].

Les recherches en parallèle des travaux de l'UIT sont menées par le 3GPP, organisme créé en 1998 qui regroupe sept organismes de normalisation, des centaines d'industriels, des associations et des organismes publics. Il est responsable du dé-

veloppement et de la maintenance des spécifications techniques liées aux normes de téléphonie mobile. Alors que l'UIT définit de nouvelles normes, le 3GPP s'efforce de développer des solutions techniques qui répondent aux objectifs définis par l'UIT[FRA].

La suite de l'historique de la 5G est donnée en Annexe A.

1.3 Amélioration apportées par la 5G

La technologie IMT-2020 de cinquième génération a un énorme potentiel pour transformer la société, visant à répondre à la croissance massive des données et de la connectivité dans la société moderne, à de meilleurs soins de santé, à des villes plus intelligentes, à des industries plus efficaces ; à mesure que l'Internet des objets se développe. Et tout cela est rendu possible grâce à une large gamme de solutions innovantes qui stimulent l'économie moderne. La 5G offre des débits de données plus rapides, des connexions fiables et une faible latence pour les télécommunications mobiles internationales (IMT) [Zha]. la figure ci-dessous représente les principales clés de performances de la 5G par rapport à la 4G :

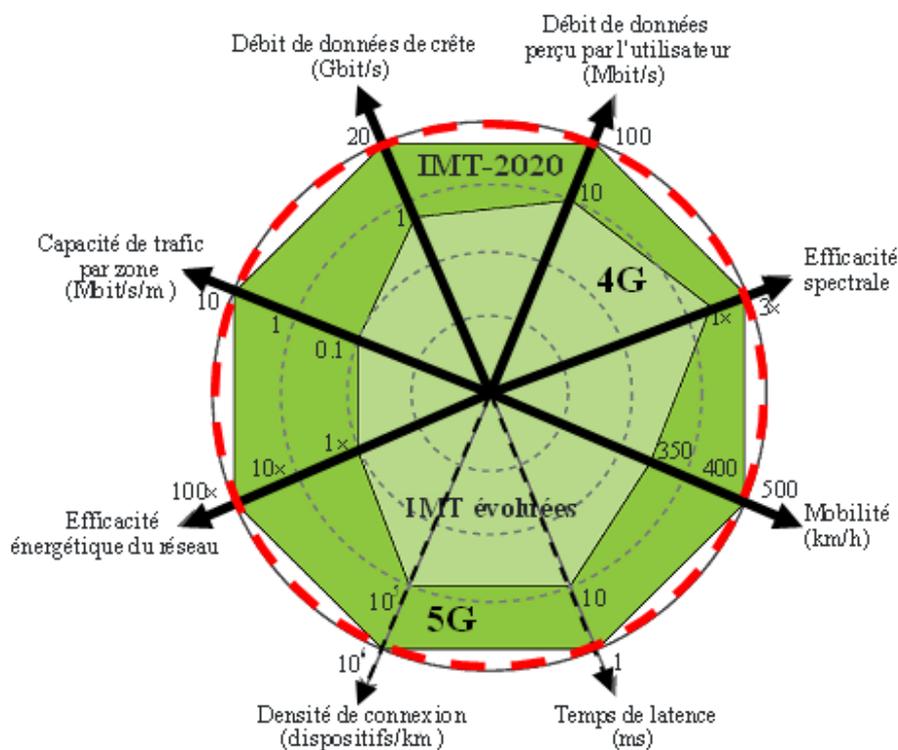


FIGURE 1.1 – Performances de la 5G [Ser15].

Voici les objectifs à atteindre selon les recommandations dans IMT-2020 définis sur 8 KPI (Keys performance Indicators) [Zha] :

- la 5G offre un débit utilisateur et un débit maximal respectivement 10 et 20 fois supérieur à la 4G.
- augmentation de l'efficacité spectrale, trois fois plus grande permettant une utilisation efficace de la bande passante.
- augmentation de la mobilité à 500 km/h afin de satisfaire une certaine performance.
- la latence est divisée par au moins 10 (la latence point à point cible est de 1 ms) ce qui donne l'impression que le réseau est très réactif pour certaines applications.
- augmentation considérable de la densité de connexion (multipliée par 10) : cela permet l'activation de la connectivité de l'internet des objets (IOT) avec peu de complexité.
- 100 fois plus d'efficacité du réseau : réseau énergiquement efficace avec traitement du signal et matériel efficace.
- 100 fois plus de capacité de trafic : réseau dense avec plus de points d'accès.
- une fréquence plus haute, ce qui lui permet à terme de traiter de grandes quantités de données.

1.4 L'architecture générale du réseau 5G

1.4.1 Architecture Non-Standalone et Standalone

La spécification 3GPP pour la 5G indique que le premier mode de déploiement des réseaux et des dispositifs 5G sera non autonome (NSA), c'est-à-dire un "non-standalone access" qui s'appuie sur les installations de réseau 4G existantes pour augmenter progressivement la puissance afin de fournir plus de haut débit [Sfr]. Lorsqu'un appareil fonctionne dans ce mode, il se connecte d'abord à un réseau 4G LTE, et si la 5G est disponible, l'appareil peut l'utiliser pour gagner une bande passante supplémentaire[Rem].

De plus en plus les infrastructures de réseau 5G seront mises en œuvre dans les prochaines années, elles évolueront vers un mode autonome uniquement 5G (SA Standalone Access)[Rem], qui est un réseau 5G avec ses propres installations complètement indépendantes du réseau 4G. La 5G SA offre des améliorations significatives du débit et de la latence et la possibilité de connecter un grand nombre d'appareils IoT, qui sont parmi les principaux avantages de la 5G[Sfr].

1.4.2 Les composants du réseau 5G

Le réseau central 5G prend en charge les fonctions avancées du réseau 5G et est l'un des trois composants de base du système, également appelé 5GS (source). Les deux autres composants sont l'équipement utilisateur (UE) et le réseau d'accès 5G (réseau d'accès 5G-AN), qui se compose du réseau d'accès radio de nouvelle génération (NG-RAN) utilisant la nouvelle interface radio 5G (NR) [Rem].

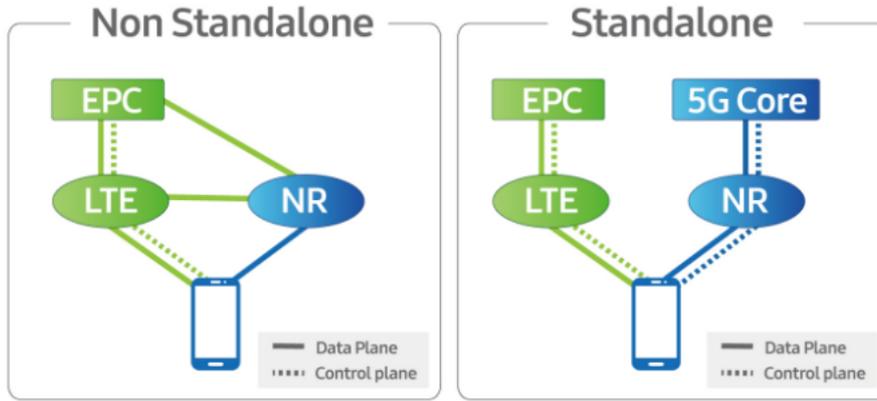


FIGURE 1.2 – Architecture 5G NSA et 5G SA [Res].

Le cœur 5G adopte une architecture basée sur le service (SBA) basée sur le cloud, qui prend en charge l'authentification des appareils inter-connectés, la sécurité, la gestion des sessions et l'agrégation du trafic, et nécessite une interconnexion complexe des fonctions réseau. Un réseau 5G se compose d'un réseau d'accès 5G (AN) et d'un réseau central 5G [Rem].

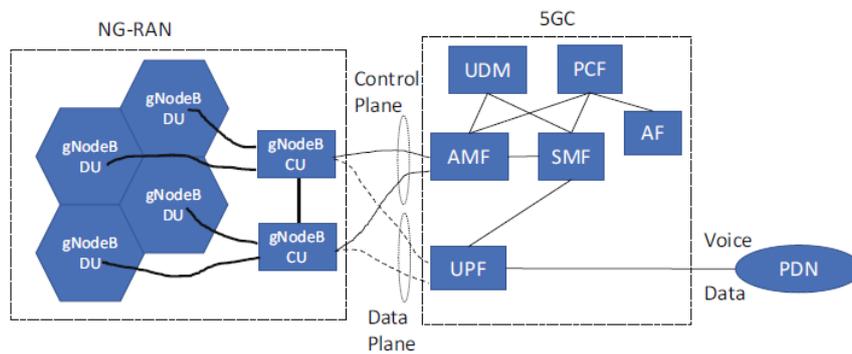


FIGURE 1.3 – Schéma fonctionnel de l'architecture du réseau 5G [Rem].

Le schéma fonctionnel de l'architecture du réseau de la cinquième génération de téléphonie cellulaire est illustré dans la figure (1.3). Le cœur de la 5G (5GC Core) a remplacé l'EPC (Evolved Packet Core); le réseau d'accès radioélectrique de prochaine génération (NG-RAN Next-Generation Radio Access Network) se compose d'un groupement d'unités distribuées (DU) et d'unités centralisées (CU); le gNodeB a remplacé l'eNodeB. De plus, il est essentiel pour la 5G d'offrir une architecture flexible et évolutive. Dans ce cas, la combinaison de DU et de CU a été introduite pour prendre en charge diverses options de division du RAN afin d'extraire les avantages ci-dessus. Les fonctionnalités de la 5GC sont les suivantes [VDP19] :

- Fonction de gestion d'accès et de la mobilité (**AMF Access and Mobility Management Function**) : assure le chiffrement, l'intégrité, l'authentification, l'autorisation et la gestion de mobilité d'accès.
- Fonction de gestion de session (**SMF Session Management Function**) : assure l'attribution de l'adresse IP aux UE, sélection et contrôle de l'UPF, le

roaming, etc.

- Gestion des données unifiées (**UDM Unified Data Management**) : gestion des abonnements, des données utilisateur, l'enregistrement et la gestion de la mobilité, etc.
- Fonction de contrôle de la politique (**PCF Policy Control Function**) : mettre en œuvre des règles de politique pour les fonctions de CP, etc.
- Fonction plan d'utilisateur (**UPF User Plane Function**) : réalise le point d'interconnexion externe au réseau de données, l'application de la politique de QoS dans le plan utilisateurs, etc.
- Fonction d'application (**AF Application Function**) : Fonction spécifiée et déployée par l'opérateur pour des services spécifiques.

1.5 Les fréquences attribuées à la 5G

Pour que la 5G prenne en charge un trafic accru et un débit plus élevé, des technologies de spectre plus efficaces utilisant plus de fréquences que les systèmes précédents seront nécessaires[ITU]. Pour ce faire, la 5G utilise de nouvelles bandes de fréquences qui sont divisées en deux groupes. Le premier comprend la bande 5G Sub-6. Le second, comprend les ondes mmWave [Fra].

5G sub-6 fait référence aux fréquences utilisées en dessous de 6 GHz. Ces fréquences permettent une meilleure portée que mmWave, mais avec un débit maximal inférieur. Ils comprennent la bande médiane entre 3,4 et 3,8 GHz, qui est une nouvelle bande de fréquences pour la 5G, et la bande de fréquences inférieure, qui a une plus grande portée est utilisée par la 4G LTE [Fra].

Les ondes millimétriques, ou mmWave, sont des nouvelles gammes de fréquences pour la 5G, situées dans le spectre entre 24 GHz et 300 GHz, qui offrent un meilleur débit au détriment de la portée et de la capacité à traverser les murs [Fra]. La figure 1.4 représente le spectre alloué à la 5G.

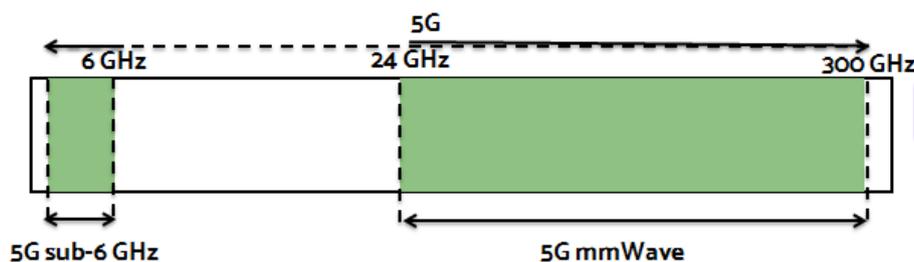


FIGURE 1.4 – les fréquences attribuées à la 5G [RS].

1.6 les cas d'usage de la 5G

Parmi les nombreux usages qui peuvent s'appuyer sur la norme 5G, l'UIT en a défini trois : les communications de type machine à machine (mMTC), les communications à ultra haut débit (eMBB) et Communication ultra-fiables et à faible

latence (uRLLC). L'objectif de cette catégorisation des usages en trois catégories est d'associer à chaque catégorie les besoins du réseau en termes de performances et de qualité de service [Cas].

Les cas d'utilisation de la 5G sont définis selon les trois catégories suivantes :

- ◊ **L'eMBB** (enhanced Mobile Broad Band), c'est-à-dire des communications mobiles ultra haut débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert[Anf].
- ◊ **L'mMTC** (massive Machine Type Communication), c'est-à-dire les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Cette dernière est la Capacité à gérer un grand nombre de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transférer par communication est généralement limitée, et La vitesse de transfert n'est pas limitée. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services[Anf].
- ◊ **L'uRLLC** (ultra Reliable and Low latency Communication), Dans les communications dites critiques, la fiabilité et le temps de réponse sont critiques. L'application phare de cette catégorie est la voiture autonome, mais les communications pour la sécurité et les services médicaux d'urgence (chirurgie à distance) sont également intéressantes. Il ne doit y avoir aucune panne ou interruption de communication et la transmission doit être aussi rapide que possible [Anf].

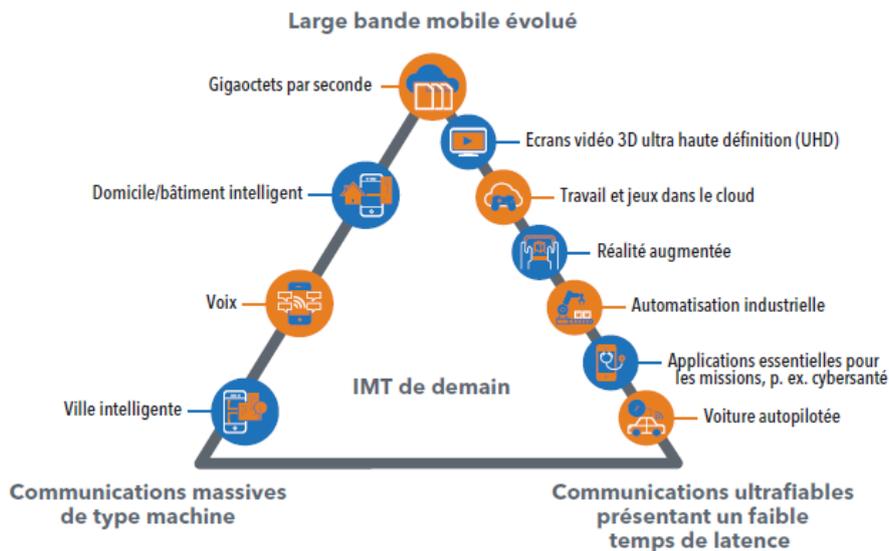


FIGURE 1.5 – Scénarios d'utilisation de l'IMT-2020 [Zha].

1.7 Les technologies envisagées par les réseaux 5G

Les nouveaux systèmes radio 5G font appel à des fréquences de diffusion ultra-hautes pour transférer de grandes quantités de données, en raison de la perte de propagation élevée de ces fréquences dites ondes millimétriques, les techniques de formation de faisceaux et le massive MIMO sont essentielles pour augmenter l'efficacité spectrale et fournir une couverture rentable et fiable[Met]. Les principes de ces nouvelles technologies seront développés ci-dessous :

1.7.1 Les ondes millimétriques

Auparavant, les fréquences inférieures à 6 GHz sont utilisées pour la communication cellulaire, les fréquences supérieures sont principalement utilisées pour d'autres services tels que l'imagerie médicale, la télédétection par micro-ondes et la radio-astronomie. L'augmentation massive du trafic de données a congestionné le spectre des radio-fréquences. Le résultat est que la bande passante est limitée pour un utilisateur, ce qui entraîne une connexion plus lente et peu fiable. Une façon de résoudre ce problème consiste à utiliser une fréquence supérieure à 6 GHz pour la communication sans fil, le choix fut alors porté sur les ondes millimétriques dont les fréquences sont comprises entre 30 GHz et 300 GHz, celles-ci peuvent fournir une bande passante dix fois supérieure à celle de l'ensemble de la bande cellulaire 4G. Cependant, elles ne conviennent pas aux applications à longues portées, ne peuvent pas pénétrer dans les bâtiments et les obstacles et ont tendance à être absorbées par la pluie. Afin de résoudre ces problèmes, d'autres technologies sont nécessaires [CA20].

1.7.2 Les petites cellules

Travailler avec des ondes d'une longueur millimétrique permet d'avoir des antennes de quelques centimètres qui pourront être placées plus facilement dans des espaces urbains denses ou en intérieur, cela conduit à réduire les cellules à moins d'une centaine de mètres pour couvrir les petites zones géographiques, le débit de chaque antenne pourra ainsi être partagé entre moins d'utilisateurs et donc éviter la saturation du réseau. Les petites cellules jouent un rôle important dans la fourniture d'un haut débit mobile et d'une latence ultra-faible pour la 5G. Celles-ci peuvent être divisées en microcellules, femtocellules et picocellules en fonction de la zone de couverture et du nombre d'utilisateurs qu'elles peuvent prendre en charge [CA20][BOU].

1.7.3 Le Massive MIMO

Massive MIMO est l'avancée des systèmes MIMO contemporains utilisés dans les réseaux sans fil actuels qui regroupent des centaines, voire des milliers d'antennes à la station de base et dessert des dizaines d'utilisateurs simultanément utilisant les mêmes ressources temporelles et fréquentielles. Les antennes supplémentaires utilisées par le massive MIMO aident à concentrer l'énergie dans une région plus petite de l'espace pour fournir une meilleure efficacité spectrale et un meilleur débit. À me-

sure que le nombre d’antennes augmente dans un tel système, les faisceaux rayonnés deviennent plus étroits et focalisés dans l’espace, augmentent le débit pour l’utilisateur souhaité et réduisent les interférences avec l’utilisateur voisin. Les systèmes massifs MIMO envisagent une formation de faisceaux et un décodage précis avec des algorithmes plus simples et éventuellement linéaires. Cependant, des techniques de traitement de signal efficaces doivent être utilisées aux deux extrémités pour surmonter la complexité de la surcharge de signalisation [HF17][CA20].

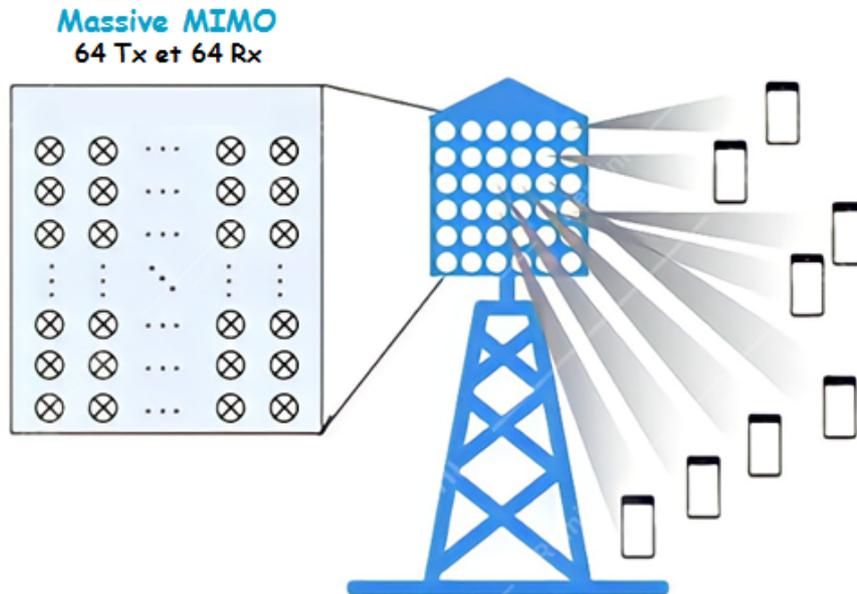


FIGURE 1.6 – la technologie Massive MIMO [5g-].

1.7.4 Le Beamforming

Le beamforming, également connue sous le nom de filtrage spatial ou formation de faisceaux, est une technique qui aide les stations de base à trouver des chemins appropriés pour fournir des données aux utilisateurs. Il permet aux signaux de plusieurs antennes d’être focalisés en un faisceau puissant, minimisant l’énergie dans les lobes latéraux à l’extrémité de l’émetteur. Du côté de la réception, la formation de faisceaux fait référence à un type de multiplexage spatial qui combine les signaux reçus et les superpose dans une certaine direction, et rejette les signaux de toute autre direction et les considère comme interférences. Cette technologie présente plusieurs avantages pour les réseaux 5G. Pour les systèmes MIMO massifs, le beamforming contribue à améliorer l’efficacité spectrale et pour les ondes millimétriques, il contribue à améliorer le débit de données.

Dans un système massive MIMO, la station de base peut envoyer des données aux utilisateurs à partir de différents chemins, et la formation de faisceaux synchronise ici les échanges de paquets et les heures d’arrivée, permettant à plusieurs utilisateurs d’envoyer des données simultanément. Étant donné que les ondes millimétriques ne peuvent pas pénétrer les obstacles et ne parcourent pas de plus longues distances en

raison de leurs longueurs d'onde plus courtes, le beamforming aide ici à envoyer des faisceaux concentrés vers les utilisateurs[CA20][HF17].

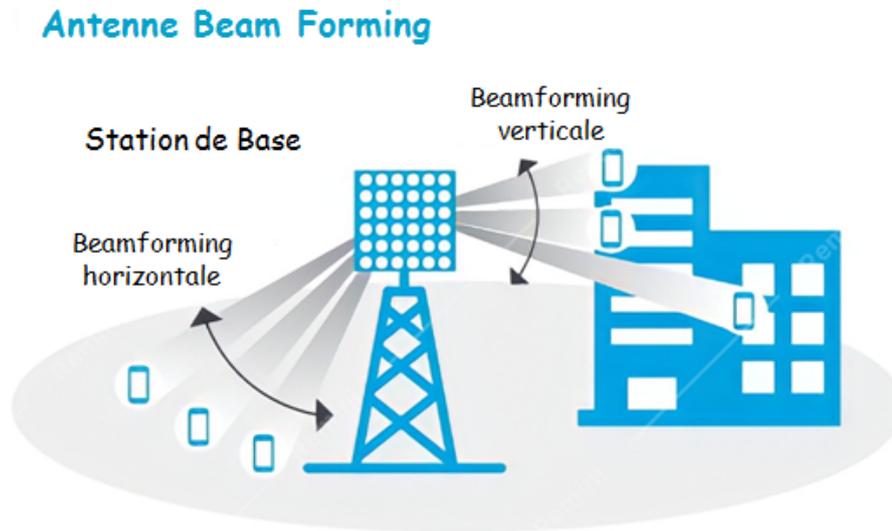


FIGURE 1.7 – la technologie Beamforming[Qor].

1.7.5 Le Full duplex

Auparavant, les stations de base et les téléphones portables reposent sur des émetteurs-récepteurs qui doivent se relayer pour transmettre et recevoir des informations sur la même fréquence, ou fonctionner sur des fréquences différentes si un utilisateur souhaite transmettre et recevoir des informations en même temps.

Avec la 5G, un émetteur-récepteur peut émettre et recevoir des données en même temps, sur la même fréquence (voir figure1.8). Cette technologie est connue sous le nom de duplex intégral (full duplex), et elle peut doubler la capacité des réseaux sans fil au niveau de leur couche physique la plus fondamentale. L'un des inconvénients de cette technologie est qu'elle augmente les interférences de signal, à travers un écho gênant[NC].

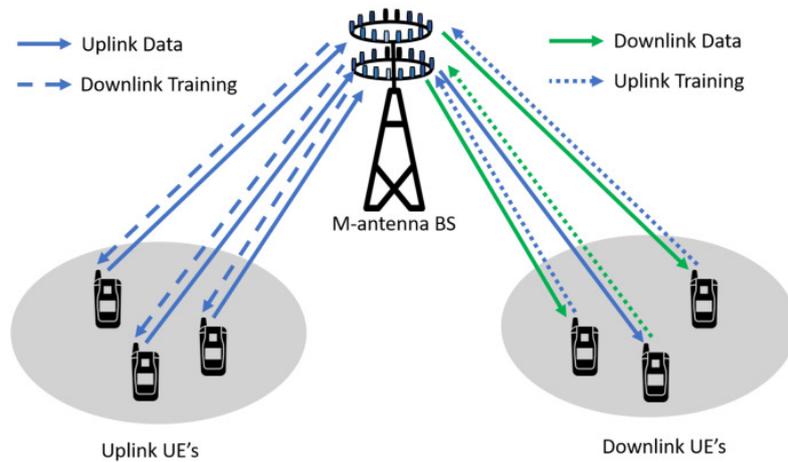


FIGURE 1.8 – La technologie Full duplex [CA20].

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons supervisé la cinquième génération de réseaux cellulaires, son architecture de base, les améliorations apportées par la 5G afin de répondre à une multitude de cas d'usages. Nous avons également cité les différentes technologies envisagées par celle-ci. La 5G s'appuie sur les ondes millimétriques. Comme elles ont une faible portée, cela nécessite l'installation de petites cellules dans des zones très denses. Cette technologie repose également sur les systèmes Massive MIMO pour toucher un plus grand nombre d'utilisateurs et émettre un signal ciblé à chacun grâce au beamforming. Ses systèmes seront étudiés minutieusement dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Massive MIMO Beamforming

2.1 Introduction

Avec l'augmentation considérable d'objets connectés, des améliorations en termes de débit, latence et bande passante sont nécessaires. Par conséquent, les systèmes de communication de cinquième génération (5G) utilisent la technologie Massive MIMO qui est basée sur l'installation d'un grand nombre d'antennes de petite taille à l'émission. Ces antennes sont dites intelligentes car grâce à la technique beamforming, elles sont capables d'émettre et de diriger le signal dans une direction précise et au besoin de chaque utilisateur, ce qui permet d'atteindre une efficacité spectrale et une capacité plus élevées.

2.2 Technique Massive MIMO

La technologie Massive MIMO est l'une des technologies les plus prometteuses dans les systèmes de réseaux 5G, dans un système massive MIMO de grandes quantités d'antennes (des centaines voire des milliers) connectées à une station de base fonctionnent simultanément pour beaucoup moins de terminaux (des dizaines ou des centaines) en utilisant des ressources de temps et de fréquence similaires. Les systèmes massive MIMO peuvent multiplier par 10 ou plus la capacité des systèmes de communication sans fil en raison de leurs caractéristiques. Cependant, l'utilisation d'un grand nombre d'antennes entraîne des problèmes d'interférence, qui peuvent être atténués en utilisant des antennes directives[Lar+14][Ali+17].

2.3 Types de Massive MIMO

Single User- Multiple input multiples output(SU-MIMO) : Un système MIMO mono-utilisateur est un système de multiplexage spatial où, à un instant donné, la transmission sur une ressource de fréquence donnée ne peut se faire qu'entre une station de base et un équipement utilisateur, comme le montre la figure 2.1. L'objectif de SU-MIMO est de permettre la maximisation du débit de données de l'utilisateur. Il peut être mis en œuvre à la fois dans la liaison descendante et dans la

liaison montante. Avec le MIMO mono-utilisateur, l'UE a donc besoin de plusieurs antennes pour tirer parti du multiplexage spatial[Mor22].

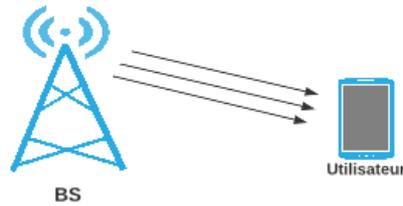


FIGURE 2.1 – SU-MIMO.

Multi User - Multiple Input Multiple Output Un système MIMO multi-utilisateurs, contrairement à un système SU-MIMO, est un système où, à un instant donné, la transmission sur une ressource de fréquence donnée peut se situer entre une station de base et plusieurs équipements utilisateurs (figure 2.2). L'objectif de MU-MIMO est l'augmentation du débit cellulaire total, c'est-à-dire de la capacité. Il ne nécessite qu'une seule antenne au niveau de l'équipement utilisateur. Son système est aussi un système de multiplexage spatial, mais ici les antennes sont essentiellement réparties sur plusieurs équipements utilisateurs. MU-MIMO peut être mis en œuvre à la fois en liaison montante et en liaison descendante[Mor22].

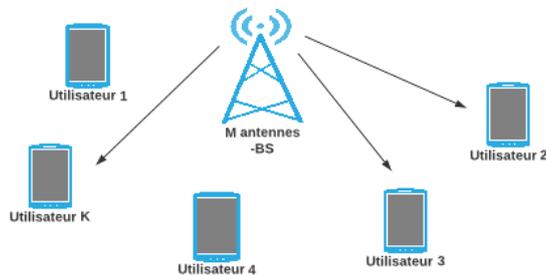


FIGURE 2.2 – MU-MIMO.

2.4 Fonctionnement du Massive MIMO

2.4.1 Transmission de données en liaison montante

Une partie de l'intervalle de cohérence est utilisée pour la transmission de données en liaison montante. Dans ce cas, tous les K utilisateurs transmettent leurs données à la station de base dans la même ressource temps-fréquence. Puis, la station de base utilise l'estimation de canal et la combinaison linéaire pour détecter les signaux transmis par tous les utilisateurs[Ngo15].

2.4.2 Transmission de données en liaison descendante

Dans la liaison descendante, la station de base transmet des signaux à tous les K utilisateurs dans la même Ressource temps-fréquence. Plus précisément, la station de base utilise ses estimations de canal en combinaison avec les symboles destinés aux K utilisateurs, afin de créer M signaux précodés qui seront ensuite envoyés à M antennes [Ngo15].

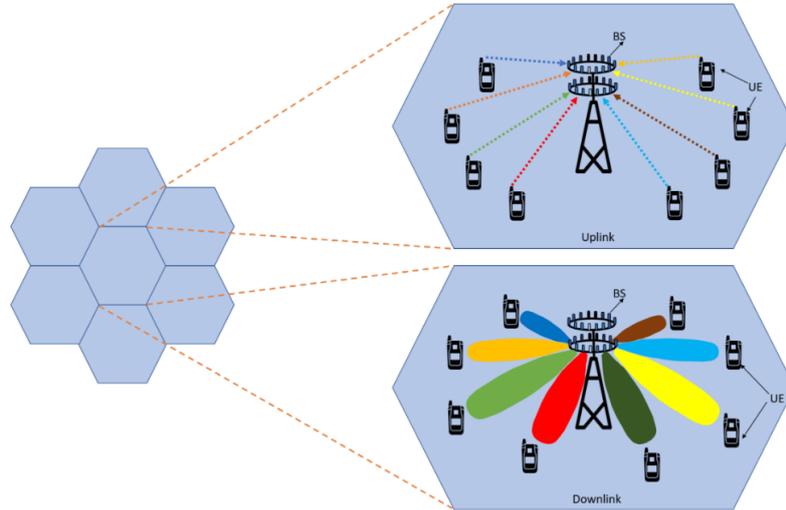


FIGURE 2.3 – Transmission en liaison montante et descendante [CA20].

Le modèle du système massive MIMO est donné en Annexe C.2

2.5 Estimation du canal

Pour la détection et le décodage du signal, le massive MIMO s'appuie sur les informations d'état du canal (CSI) qui est l'information sur l'état de la liaison de communication entre l'émetteur et le récepteur. Si le CSI est parfait, les performances du massive MIMO augmentent linéairement avec le nombre d'antennes émettrices ou réceptrices [CA20].

2.5.1 Mode TDD (Time Division Duplex)

En TDD, les transmissions en liaison montante et en liaison descendante sont effectuées sur la même bande de fréquence, mais à des intervalles de temps différents.

- ◇ **Transmission en liaison montante** : K utilisateurs envoient K séquences pilotes orthogonales vers la station de base, cette dernière estime le canal sur la base des signaux pilotes reçus. Cette opération nécessite au minimum l'utilisation de K canaux.
- ◇ **Transmission en liaison descendante** : la station de base a besoin du CSI pour précoder les signaux transmis afin de s'assurer que chaque utilisateur récupère ses propres données. En raison de la réciprocité des canaux, le canal estimé par la station de base au niveau de la liaison montante est utilisé pour

précoder les symboles de transmission. Les limitations du temps de cohérence du canal peuvent créer un problème de contamination de pilotes lorsque les séquences pilotes employées par les utilisateurs des cellules voisines ne sont plus orthogonales à celles de la cellule[Cha19].

La contamination des pilotes est expliqué en Annexe B.2

2.5.2 Mode FDD (Frequency Devision Duplex)

Dans les systèmes FDD, la liaison montante et la liaison descendante utilisent deux bandes de fréquences différentes pour estimer le canal correspondant. Dans ce cas, les canaux de liaison montante et de liaison descendante ne sont pas réciproques.

- ◇ **Transmission en liaison montante** : même procédure qu'en TDD et ce processus nécessite l'utilisation de K canaux.
- ◇ **Transmission en liaison descendante** : Les M antennes de la station de base transmettent M séquences pilotes orthogonales à K utilisateurs, chaque utilisateur estime le canal en fonction du signal pilote reçu, puis il renvoi l'estimation de canal à la station de base via un canal de commande[Cha19].

2.5.3 Le type d'opération préférable pour Massive MIMO

Avec FDD, la surcharge d'estimation de canal dépend du nombre d'antennes M de Station de base. Par contre, avec TDD, la surcharge d'estimation de canal est indépendante de M . Dans Massive MIMO, M est grand, et par conséquent, le fonctionnement TDD est préférable. Par exemple, supposons que l'intervalle de cohérence est $T = 200$ symboles, dans les systèmes FDD, le nombre d'antennes BS et le nombre d'utilisateurs sont contraints par $M+K < 200$, alors que dans les systèmes TDD, la contrainte sur M et K est $2K < 200$. Avec TDD, ajouter plus d'antennes n'affecte pas les ressources nécessaires pour l'estimation du canal[Ngo15].

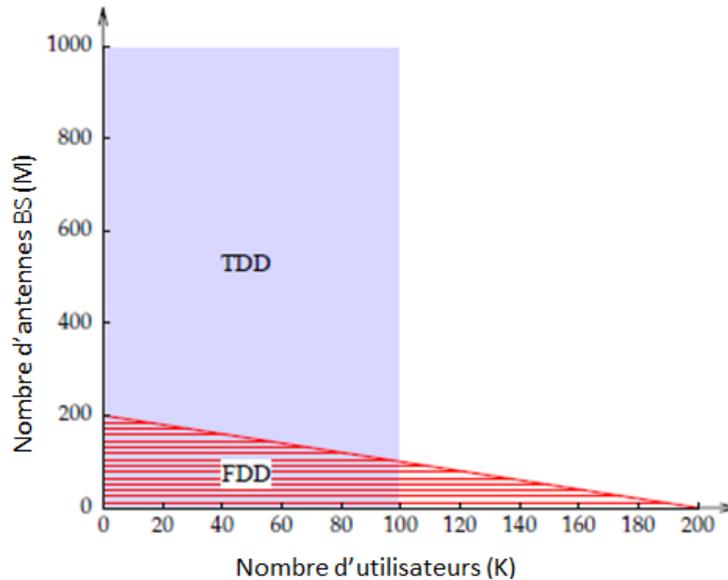


FIGURE 2.4 – L’avantage de TDD par rapport à FDD pour les utilisateurs mobiles[Ngo15].

La figure 2.4 montre l’énorme avantage du TDD par rapport au FDD pour les utilisateurs mobiles. L’axe vertical est le nombre d’antennes de station de base et l’axe horizontal est le nombre d’utilisateurs. La région bleue montre les dimensions du système pouvant être obtenues avec TDD par rapport à la région rouge beaucoup plus petite pour FDD.

2.6 Concept d’antenne intelligente et beamforming

Les antennes intelligentes sont des réseaux d’antennes avec des algorithmes intelligents de traitement du signal intégrés pour identifier une signature de signal spatial telle que la direction d’arrivée du signal qui est utilisée pour calculer les vecteurs de formation du faisceau, ou pour suivre et localiser le faisceau de l’antenne sur les cibles mobiles. Cette technologie peut considérablement améliorer les performances et l’économie du système sans fil pour un ensemble de potentiels utilisateurs. Elle permet aux opérateurs de réseaux cellulaires et de boucle locale sans fil de réaliser une augmentation significative dans la qualité du signal, la capacité du réseau et la couverture[AOU+15].

La figure 2.5 montre le principe de la technologie d’antennes intelligentes comparé à celui de la technologie standard.

La formation de faisceaux peut être réalisée en assemblant les éléments dans un réseau organisé, dans lequel les faisceaux dirigés vers une direction spécifique sont ajoutés et les autres faisceaux sont négligés. Il existe principalement trois catégories d’architectures de formation de faisceaux qui sont couramment explorées : la formation de faisceau analogique, la formation de faisceau numérique et la formation de faisceau hybride[Ali+17].

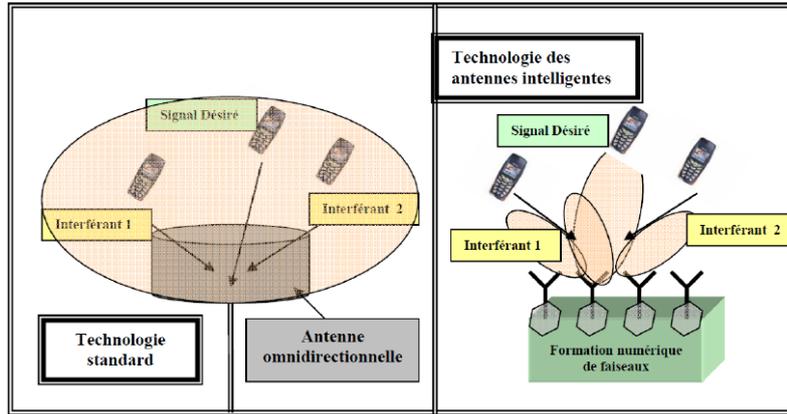


FIGURE 2.5 – Principe d’une antenne intelligente[AOU+15].

2.6.1 Le beamforming analogique

Dans la formation de faisceau analogique, les phases du signal transmis sont contrôlées à l’aide de déphaseurs. Dans un tel système, N antennes sont fournies à une station de base avec une seule chaîne RF pour transmettre un seul flux de données au terminal utilisateur qui se compose de M antennes avec une seule chaîne RF[LH22]. Le beamforming analogique a une structure matérielle simple qui facilite sa mise en œuvre. D’autre part, il souffre d’une perte de performances importante car seulement les phases des signaux d’émission sont variées mais pas leur amplitudes. En conséquence, il n’est pratiquement pas mis en œuvre dans les technologies cellulaires massive MIMO (figure 2.6)[MRD16].

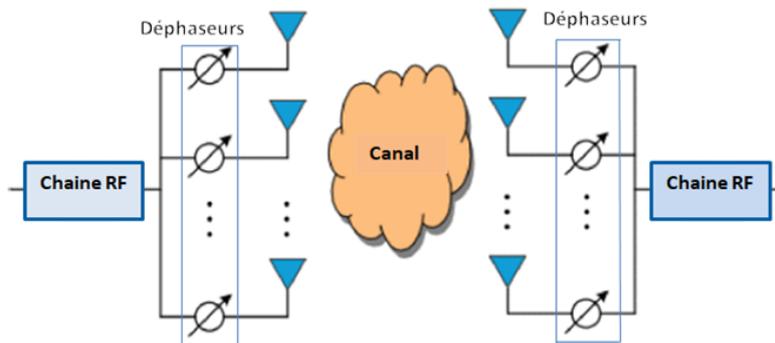


FIGURE 2.6 – Beamforming analogique[MRD16].

2.6.2 Le beamforming numérique

Dans les architectures de formation de faisceaux réalisées typiquement dans le domaine numérique, toutes les techniques de traitement du signal sont exécutées en bande de base [Gao+16], comme illustré dans la figure 2.7, ce qui permet de contrôler à la fois les phases et les amplitudes des signaux pour détecter et éliminer les interférences au préalable. Dans la formation de faisceau numérique, chaque élément d'antenne nécessite une chaîne RF dédiée, ce qui permet une grande flexibilité du système. Cependant, ce dernier souffre d'une grande complexité et d'une conception très coûteuse [Keb+22].

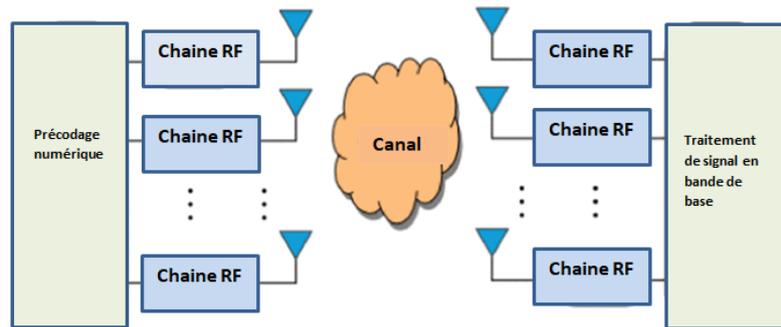


FIGURE 2.7 – Beamforming numérique [MRD16].

2.6.3 Le beamforming hybride

La formation de faisceau analogique souffre de pertes de performances, tandis que la formation de faisceau numérique est complexe et très coûteuse. Par conséquent, une solution optimale est requise, qui combine les avantages de formation de faisceau analogique et numérique appelée formation de faisceau hybride, illustrée dans figure 2.8.

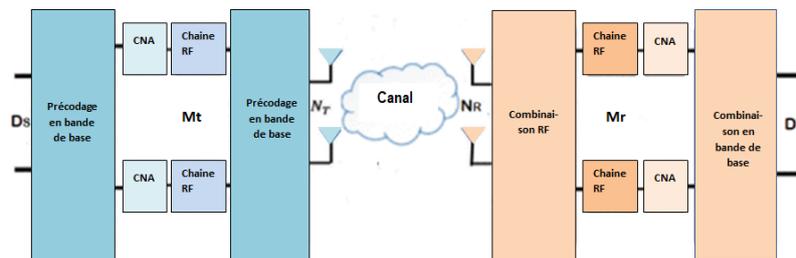


FIGURE 2.8 – Beamforming hybride [SCW20].

La formation de faisceau hybride est une bonne technique pour améliorer considérablement l'efficacité spectrale et énergétique des systèmes massive MIMO fonctionnant dans la bande des ondes millimétrique [Ahm+18]. Les architectures de formation de faisceaux hybrides peuvent être classées en architectures de formation de faisceaux entièrement connectées et partiellement ou sous-connectées. Dans une conception entièrement connectée, chaque chaîne RF est liée aux antennes de chaque

station de base via des déphaseurs, tandis que dans une architecture sous-connectée, chaque chaîne RF est connectée à un seul sous-ensemble d'antennes de station de base[LH22].

2.7 Les avantages du Massive MIMO

- **Efficacité spectrale** : Massive MIMO offre une efficacité spectrale supérieure en permettant à son réseau d'antennes de focaliser des faisceaux étroits vers un utilisateur.
- **Efficacité énergétique** : Comme le réseau d'antennes est focalisé dans une petite section spécifique, il nécessite moins de puissance rayonnée et réduit les besoins en énergie dans les systèmes massive MIMO.
- **Débit de données élevé** : le gain du réseau et le multiplexage spatial fournis par le massive MIMO augmentent le débit de données et la capacité des systèmes sans fil.
- **Suivi de l'utilisateur** : étant donné que le massive MIMO utilise des faisceaux de signal étroits vers l'utilisateur, le suivi des utilisateurs devient plus fiable et précis.
- **Moins d'évanouissement** : Le grand nombre d'antennes réparties au niveau du récepteur rend le massive MIMO résistant à l'évanouissement.
- **Faible consommation d'énergie** : Massive MIMO est construit avec des amplificateurs linéaires ultra-faibles, ce qui élimine l'utilisation d'équipements électroniques encombrants dans le système. Ainsi, la consommation énergétique peut être considérablement réduite.
- **Faible latence** : Massive MIMO réduit la latence sur l'interface hertzienne.
- **Robustesse** : Les systèmes Massive MIMO sont robustes contre les interférences involontaires.
- **Fiabilité** : Un grand nombre d'antennes en massive MIMO offre plus de gain de diversité, ce qui augmente la fiabilité de la liaison.
- **Sécurité améliorée** : Massive MIMO offre plus de sécurité physique au moyen des canaux orthogonaux de la station mobile et des faisceaux étroits.
- **Traitement linéaire peu complexe** : un plus grand nombre d'antennes de station de base rend les détecteurs de signal simples et les précodeurs optimaux pour le système[CA20].

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié une multitudes de technologies nécessaires pour surmonter les problèmes des ondes millimétriques, nous avons alors mis en valeur les larges potentiels de Massive MIMO qui est une technologie prometteuse pour répondre aux exigences de conception des systèmes 5G, son système nécessite l'estimation du canal pour améliorer la qualité de transmission, nous avons aussi présenté le concept d'une antennes intelligentes et les différentes architectures du beamforming, sachant que l'architecture hybride est préférable car elle combine les avantages du beamforming analogique et le beamforming numérique.

Chapitre 3

La technique FBMC

3.1 Introduction

En raison de l'augmentation du nombre d'utilisateurs et d'appareils demandant un haut débit et une bande passante élevée, plusieurs méthodes de modulation ont été développées au fil des années. La modulation multiporteuse est la plus répandue car elle contribue énormément au développement des systèmes filaires et sans fil, il existe plusieurs techniques de cette modulation, parmi les plus utilisées, on cite l'OFDM qui est une forme d'onde largement utilisée dans les systèmes de communication numérique tel que 4G LTE. Cependant, elle est confrontée à certaines lacunes telles que la réduction de la bande passante due à l'utilisation du préfixe cyclique et les fuites hors bande causées par le filtre à fenêtre rectangulaire. Par conséquent, l'OFDM n'est pas approprié pour les systèmes 5G, pour répondre aux exigences de celle-ci, les lacunes de l'OFDM sont surmontées par une technique multiporteuse à banc de filtre dite FBMC et cela grâce à l'absence du CP, à une mise en œuvre différente des filtres prototypes et à l'utilisation d'une modulation d'amplitude en quadrature(OQAM) offrant une meilleure efficacité de la bande passante.

Dans ce chapitre, nous commençons par donner une petite définition de la modulation multiporteuse, avant de présenter le système OFDM, ensuite nous allons étudier la technique FBMC en expliquant le rôle de chacun des composants de son bloc principal, puis étudier la modulation OQAM et les filtres prototypes, nous finirons par une présentation d'une nouvelle technique d'accès appelée RSMA.

3.2 Bruits et interférences

3.2.1 SNR(Signal to Noise Ratio)

Le SNR est un facteur principal dans la transmission de données, il est défini comme le rapport de la puissance d'un signal à la puissance du bruit indésirable.

$$SNR = \frac{Puissance(signal)}{Puissance(bruit)} \quad (3.1)$$

Dans le cas général il est exprimé en décibels comme suit :

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P(signal)}{P(bruit)} \quad (3.2)$$

3.2.2 BER(Bit Error Rate)

Dans un Système de transmission numérique le BER est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits total transmis. C'est un paramètre important car il fournit une mesure de la qualité du système de communication.

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre total de bits transmis}} \quad (3.3)$$

3.3 Modulation Multi porteuse MCM

Les modulations multiporteuses (MCM) sont des méthodes de transmission de données envoyées sur plusieurs porteuses. Lorsque la transmission globale est reçue, le récepteur doit alors réassembler les données à partir des composantes reçus sur les porteuses individuelles. les systèmes MCM ont moins de sensibilité aux interférences causées par le bruit impulsionnel et aux interférences entre symboles par rapport aux systèmes à porteuse unique. Ils sont également résistants aux évanouissements à bande étroite et aux effets de trajets multiples[Con]. Il existe différentes techniques de transmissions multiporteuses telles que l'OFDM, la GFDM et la FBMC. Dans ce qui suit, nous allons étudier en premier temps l'OFDM et par la suite la technique à banc de filtres (FBMC).

3.4 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

L'OFDM est une technique de transmission multiporteuse qui utilise plusieurs fréquences pour transmettre simultanément plusieurs signaux en parallèle. Chaque signal est modulé avec une sous-porteuse correspondante, les fréquences de ses sous-porteuses sont très proches et se chevauchent dans le domaine fréquentiel, mais n'interfère pas entre elles car les sous-porteuses sont orthogonales. Dans un système OFDM, le flux de données d'origine à haut débit binaire est divisé en un ensemble de sous-flux à faible débit, chacun étant modulé sur une sous-porteuse par PSK ou QAM[NGJ06].

En raison des composantes de trajets multiples, des interférences entre symboles peuvent se produire, pour les éliminer, il faut introduire un intervalle de garde Tg (préfixe cyclique) d'une durée supérieure à la durée de propagation du retard maximal $Tmax$ issus de trajets multiples $Tg > Tmax$. Cet intervalle de garde est ajouté au début de chaque symbole OFDM, la durée du symbole Ts est donc $Ts = Tu + Tg$, avec Tu est la longueur de symbole utile [NGJ06].

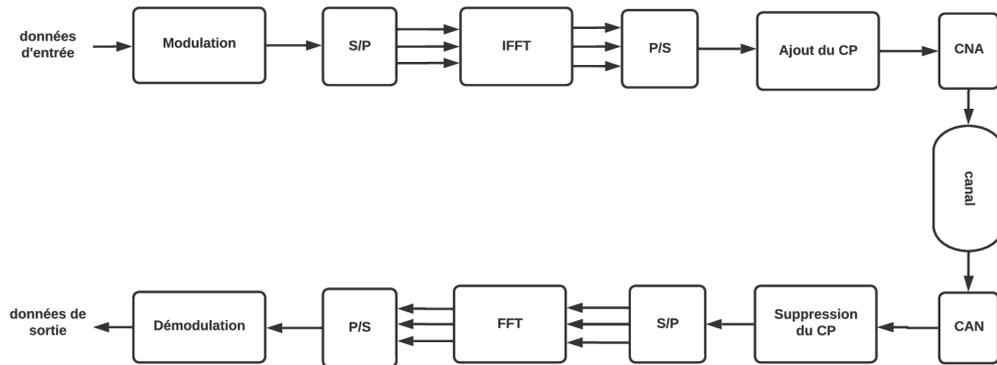


FIGURE 3.1 – Schéma bloc OFDM.

Au niveau de l'émetteur, le flux binaire d'entrée série est divisé en plusieurs sous-flux parallèles par le convertisseur série-parallèle, ces sous-flux sont regroupés et mappés sur des symboles de données à valeurs complexes, puis subissent une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT), qui les transforme du domaine fréquentiel au domaine temporel, le bloc IFFT module les symboles de données sur de nombreux signaux porteurs orthogonaux, qui passent ensuite par un convertisseur parallèle-série, la sortie de ce bloc est la somme des signaux porteurs modulés sur lesquels le CP (préfixe cyclique) est ajouté, ce dernier agit comme une bande de garde pour réduire les interférences inter symboles (ISI) entre les signaux OFDM. Le signal de sortie est transmis via le canal après une conversion en signal analogique [AAA19].

Au niveau du récepteur, une opération inverse est réalisée, le signal analogique est reconverti en numérique, le CP est supprimé. Le signal résultant est converti en signaux de sous-porteuse parallèles, le bloc FFT (Fast Fourier Transform) effectue la transformation dans le domaine fréquentiel, les symboles de données parallèles sont convertis en série [AAA19].

3.5 Les limites de l'OFDM

- ▷ Une réduction de l'efficacité spectrale en raison de l'utilisation du préfixe cyclique (CP).
- ▷ Des niveaux élevés de fuites spectrales causés par le fenêtrage rectangulaire utilisé par le filtre.
- ▷ Interférences entre les bandes adjacentes non synchronisées créant une perturbation [Kun+19].

3.6 Les bancs de filtres

Les bancs de filtres sont des outils du traitement de signal qui permettent d'obtenir une représentation d'une information contenue dans un signal, cette représentation reste du domaine temporel. L'idée de base est d'obtenir une série de signaux représentatifs d'une bande de fréquences du signal original, Le signal est filtré par un ensemble de M filtres passe-bandes à supports séparés, ce qui permet d'obtenir M signaux correspondant chacun à une partie du spectre du signal original[pra], voir la figure 3.2 :

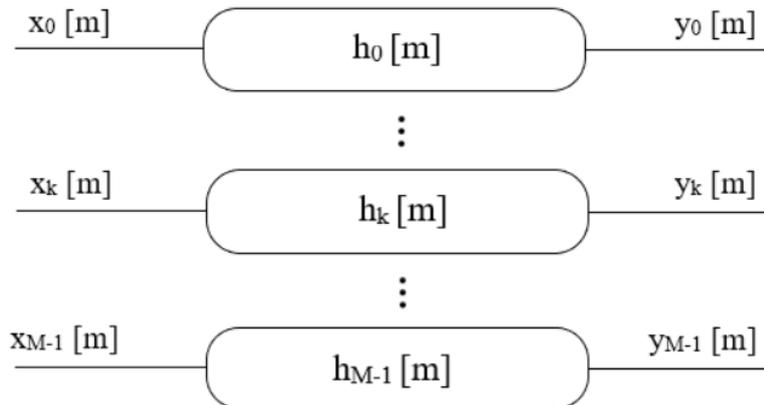


FIGURE 3.2 – Architecture d'un banc de filtre.

3.7 La technique FBMC

La FBMC (Filter Bank Multi Carrier) fonctionne comme l'OFDM mais se compose d'un bloc supplémentaire, qui est le bloc de traitement principal de FBMC, appelé TransMULTipleXer (TMUX). Celui-ci se compose des blocs pré/post-traitement, de la modulation d'amplitude en quadrature décalée (OQAM) et des bancs de filtres de synthèse / analyse[AAA19]. Les bancs de filtres de la FBMC offrent de bonnes propriétés de localisation temporelle et fréquentielle et réduisent les lobes secondaires, ce qui garantit d'éviter les interférences entre symboles (ISI) et entre porteuses (ICI) sans l'utilisation du préfixe cyclique nécessaire pour les systèmes basés sur l'OFDM. La FBMC a une meilleure utilisation de la capacité du canal disponible et est capable d'offrir des débits de données plus élevés dans une bande passante donnée, c'est-à-dire qu'elle a un niveau d'efficacité spectrale élevé[ele]. La FBMC devient plus performante en la combinant avec la modulation OQAM et considérée comme une solution alternative à l'OFDM en améliorant ces points faibles.

la figure 3.3 illustre le système FBMC-OQAM qui se compose de :

- Du côté de l'émetteur FBMC, le flux de données entrant subit un pré-traitement OQAM suivie d'une conversion série-parallèle, ensuite passe à travers le banc de filtres de synthèse constitué d'un bloc IFFT et un bloc de filtres polyphasés afin de moduler les données sur des sous-porteuses, un convertisseur parallèle-série est utilisé pour obtenir le symbole multiporteuse FBMC qui

est envoyé sur le canal [KS17].

- Du côté du récepteur c'est l'opération opposée qui se réalise. Le signal de sortie du canal est converti sous forme parallèle par un convertisseur série-parallèle et passe à travers le banc de filtres d'analyse constitué d'un bloc de filtres polyphasés et un bloc FFT. Ensuite il est à nouveau converti sous forme série par un convertisseur parallèle-série [KS17]. Puis subit le post-traitement OQAM et enfin les bits de données sont récupérés à la sortie du récepteur.

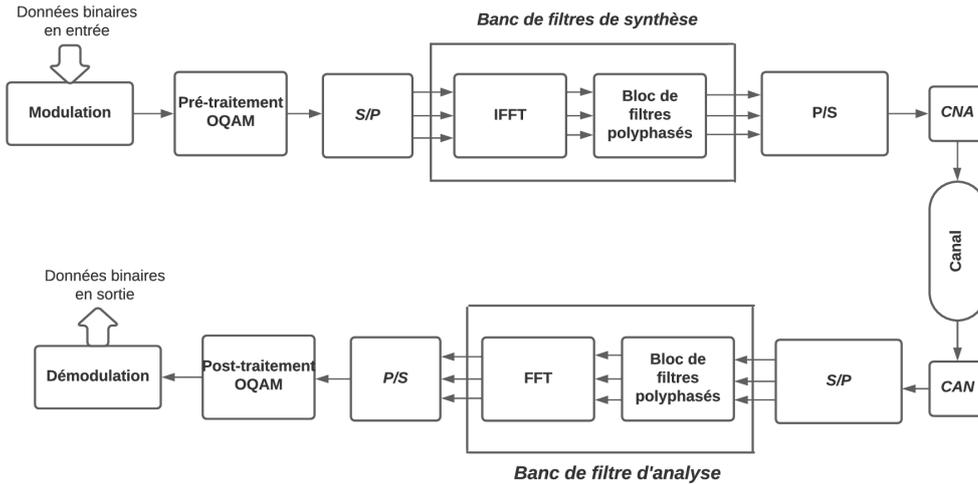


FIGURE 3.3 – Schéma bloc d'une chaîne de transmission du système FBMC-OQAM.

Les types de FBMC sont donné en Annexe C.1

3.8 Analyse et synthèse par bancs de filtres

Un banc de filtres est un ensemble de filtres, avec une entrée ou une sortie commune [Bek07]. Ces deux cas sont représentés sur la figure 3.4 .

- ▷ Le système de la figure 3.4 (a) est appelé banc de filtres d'analyse (AFB), les filtres $H_k(z)$ sont des filtres d'analyse situés au niveau du récepteur. Ce banc de filtres décompose le signal $x(n)$ en M signaux $v_i(n)$ appelés signaux de sous-bandes.
- ▷ Le système de la figure 3.4 (b) est appelé banc de filtres de synthèse (SFB), les filtres $F_k(z)$ sont des filtres de synthèse situés au niveau de l'émetteur. Ce banc de filtres combine les M signaux $w_k(n)$ en un seul signal $y(n)$ [Bek07].

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 re-combine les signaux de sous-bandes traités pour construire le signal de sortie $y(n)$ [Bek07].

L'opération inverse associe le filtre (SFB) et le filtre (AFB), d'où la configuration synthèse-Analyse de FBMC est appelée un système Trans-multiplexeur [Bek07].

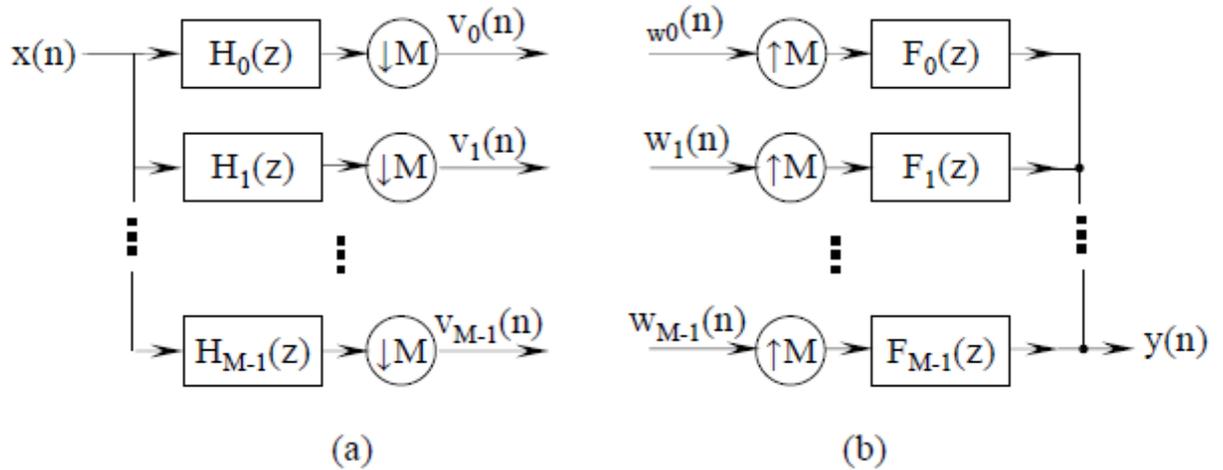


FIGURE 3.4 – Banc de filtres à M canaux (a) banc d'analyse (b) banc de synthèse [ACF14].

3.9 FBMC/OQAM

3.9.1 Principe général

En FBMC, malgré le gain obtenu par le filtrage, les sous-canaux adjacents ne conservent plus l'orthogonalité des porteuses. Alors, l'OQAM (Offset Quadrature Modulation) est choisie comme une solution alternative au QAM, où les parties réelles et imaginaires des symboles de données sont décalées de la moitié de la période d'un symbole et sont transmises séparément et alternativement sur les sous-porteuses [Bel+10]. Le principe de FBMC-OQAM consiste à diviser le débit de transmission en M flux indépendants en utilisant M sous-porteuses. Une condition d'orthogonalité est introduite entre les sous-porteuses pour garantir que les symboles transmis arrivent au récepteur sans ISI et ICI [Zha10].

la figure 3.5 illustre la répartition des symboles selon les sous-porteuses pour les modulations OFDM et FBMC/OQAM [Bou+14].

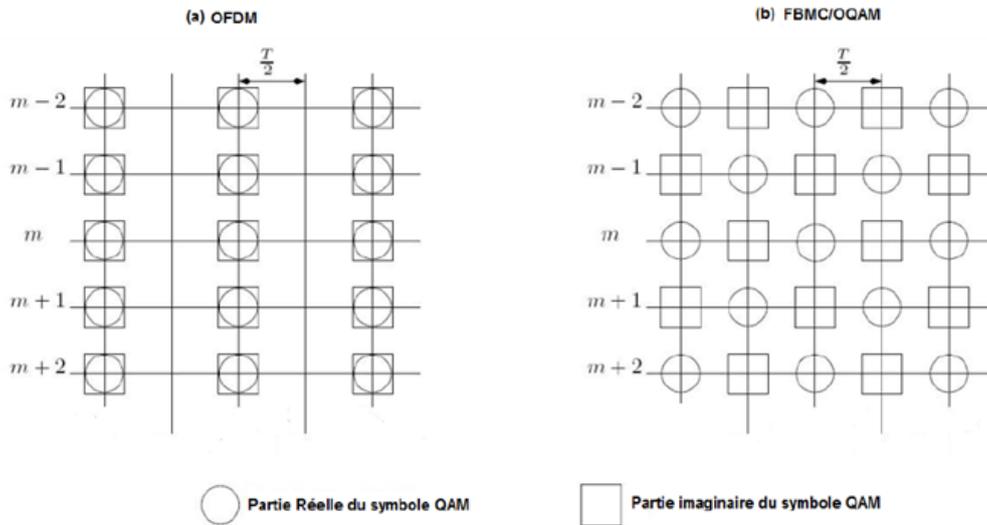


FIGURE 3.5 – Répartition des symboles OFDM et FBMC/OQAM selon les sous-porteuses [Bou+14]

3.9.2 Au niveau de l'émetteur (pré-traitement OQAM)

Comme le montre le schéma de la figure 3.6, le bloc pré-traitement OQAM se compose de deux opérations :

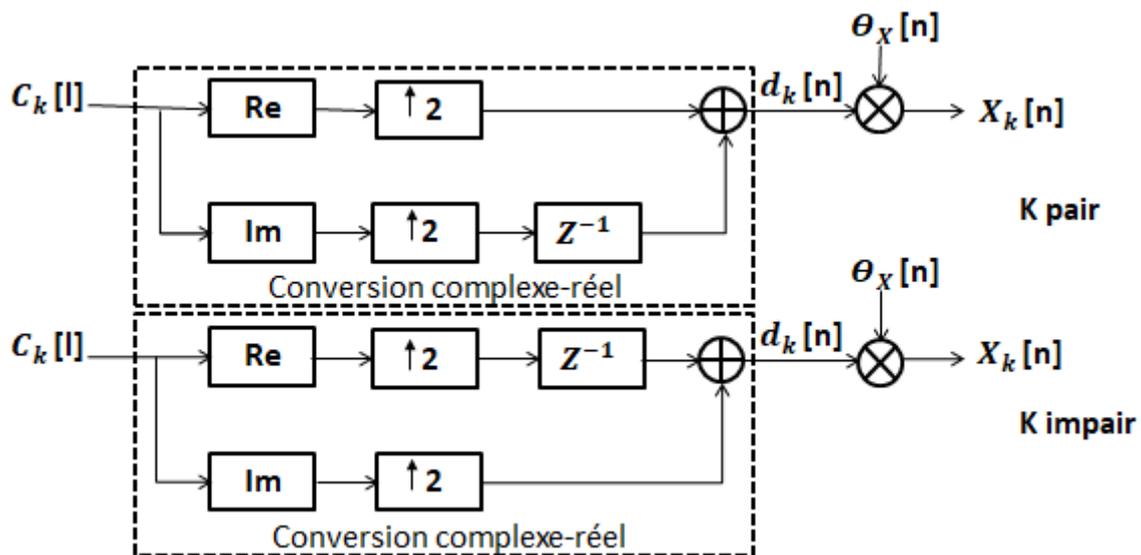


FIGURE 3.6 – Pré-traitement OQAM pour K pair et impair.

La première opération [Vih+09] : 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 séparés pour former deux nouveaux symboles $d_k[n]$ et $d_k[n + 1]$:

$$d_k[n] = \begin{cases} \text{Re}(C_k[l]), & \text{si } k \text{ pair} \\ \text{Im}(C_k[l]), & \text{si } k \text{ impair} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$d_k[n+1] = \begin{cases} \text{Im}(C_k[l]), & \text{si } k \text{ pair} \\ \text{Re}(C_k[l]), & \text{si } k \text{ impair} \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec :

- ◇ $T = \frac{1}{\Delta f}$ représente la période du signal.
- ◇ Δf : L'espace entre les sous-porteuses.
- ◇ l : L'indice d'échantillon à l'entrée du bloc pré-traitement OQAM et la sortie du bloc post-traitement OQAM.
- ◇ n : l'indice d'échantillon à la sortie du bloc pré-traitement OQAM et l'entrée du bloc post-traitement OQAM.

La seconde opération [Vih+09] : est une multiplication par $\theta_k[n]$.

$$\theta_k[n] = j^{k+n} \quad (3.6)$$

Les données à la sortie du bloc OQAM pré-traitement, peuvent s'exprimer comme suit :

$$x_k[n] = d_k[n]^* \theta_k[n] \quad (3.7)$$

3.9.3 Au niveau de récepteur (post-traitement OQAM)

Comme le montre le schéma de la figure 3.7, le bloc post-traitement OQAM se compose également de deux opérations principales :

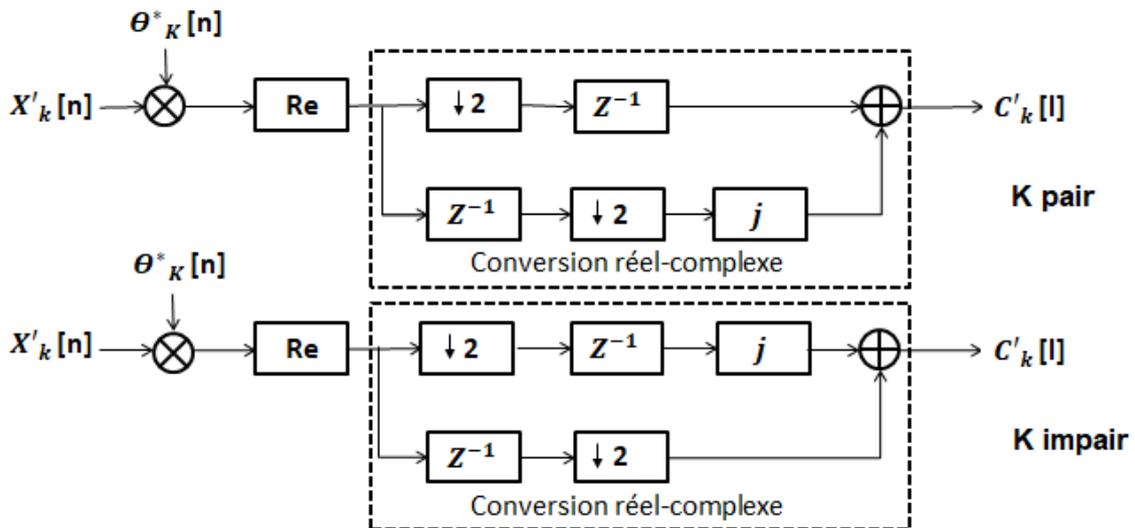


FIGURE 3.7 – Post-traitement OQAM pour K pair et impair.

La première opération [Vih+09] : 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 seconde opération [Vih+09] : est la conversion réelles/complexe dans laquelle deux symboles réels successifs (où l'un des symboles est multiplié par j) forment un symbole complexe noté $C'_k[l]$ qui est défini par :

$$C'_k[l] = \begin{cases} d'_k[n] + jd'_k[n+1], & \text{si } k \text{ pair} \\ d'_k[n+1] + jd'_k[n], & \text{si } k \text{ impair} \end{cases} \quad (3.8)$$

3.10 Conception du filtre prototype

L'une des principales capacités des filtres prototypes est de permettre la mise en forme des impulsions pour répondre aux exigences spectrales souhaitées. Dans l'OFDM, le filtre prototype est conçu à l'aide de la méthode de fenêtrage en utilisant un filtre prototype de fenêtre rectangulaire. Dans la FBMC, le filtre prototype est conçu avec la méthode d'échantillonnage fréquentiel[AAA19].

La suite est donnée en Annexe C.2

3.11 Densité Spectrale de Puissance (PSD)

La densité spectrale de puissance est la mesure du contenu de puissance du signal transmis par rapport à la fréquence. Sa fonction montre l'intensité de la variation de l'énergie du signal en fonction de la fréquence. La DSP est utilisée pour caractériser le signal large bande[AAA19].

3.11.1 Densité spectrale de puissance de l'OFDM

La densité spectrale de puissance OFDM est donnée par[AAA19] :

$$\Phi_{OFDM}(f) = (\sigma_{x^2}/T) \sum P_T(f_k/M)^2 \quad (3.9)$$

3.11.2 Densité spectrale de puissance de FBMC

La densité spectrale de puissance FBMC est donnée par[AAA19] :

$$\Phi_{FBMC}(f) = (\sigma_{x^2}/T) \sum H(f_k/M)^2 \quad (3.10)$$

où :

- σ_{x^2} est la variance de la moyenne nulle et des symboles d'entrée non corrélés.
- f_k la fréquence porteuse du $k^{\text{ème}}$ signal porteur.
- M est le nombre de sous-porteuses.

3.12 L'efficacité spectrale

L'efficacité spectrale est le débit d'information qui peut être transmis sur une bande passante donnée dans un système de communication spécifique [Hu+19]. D'une autre manière nous pouvons dire que c'est le nombre de données binaires envoyés sur le canal de communication. Elle détermine si la bande passante est utilisée de façon optimale et s'exprime en (bits/s/Hz)

3.13 Facteur de crête PAPR

Le terme PAPR indique si un signal a une valeur de crête élevée bien supérieure à sa valeur moyenne. Le PAPR peut être défini comme le rapport de la puissance maximale d'un échantillon d'un signal transmis donné à la puissance moyenne du signal. Pour un signal transmis x_n , le PAPR est défini comme [VCS14] :

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |x_n|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2} \quad (3.11)$$

Où : N est la longueur du signal transmis.

L'équation 3.11 s'exprime en dB comme suit :

$$PAPR(dB) = 10 \log_{10}(PAPR) \quad (3.12)$$

Les performances PAPR du système peuvent être analysées à l'aide de la fonction de distribution cumulative complémentaire (CCDF) qui donne la probabilité que PAPR dépasse un seuil donné [VCS14].

3.14 Les principales différences entre OFDM et FBMC

Les principales différences entre OFDM et FBMC sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Propriété	OFDM	FBMC
Extension du préfixe cyclique	Préfixe cyclique requis, ce qui réduit la bande passante.	Préfixe cyclique non requis, ce qui améliore la bande passante.
Lobes latéraux	Lobes latéraux larges.	Lobes latéraux bas.
Effet Doppler	Très sensible au décalage de fréquence porteuse.	Moins sensible et donc performant de manière significative avec un grand nombre d'utilisateurs.
Synchronisation	Pour une détection correcte, l'annulation de l'interférence d'accès multiple (MAI) doit être effectuée au niveau du récepteur.	MAI est réprimé grâce à une excellente localisation en fréquence des sous-porteuses.
Systèmes MIMO	Grande flexibilité.	Flexibilité limitée.
Détection du spectre	Performances de détection de spectre dégradées en raison d'un problème de fuite spectrale.	Haute résolution de détection de spectre.
Complexité informatique.	très faible complexité.	grande complexité.

TABLE 3.1 – La comparaison entre l'OFDM et l'FBMC [AAQ19].

3.15 La technique RSMA

L'accès multiple à répartition de débit (RSMA) est une nouvelle technique récemment étudié qui s'est avéré optimale par rapport aux techniques d'accès conventionnelles.

Le RSMA est un schéma d'accès multiple basé sur le concept de répartition de débit (RS) et de précodage linéaire pour les communications multi-utilisateurs multi-antennes. RSMA divise les messages utilisateur en parties communes et privées, puis encode les parties communes en un ou plusieurs flux communs et les parties privées en flux séparés. Les flux sont précodés à l'aide des informations d'état de canal disponibles au niveau de l'émetteur (CSIT), les flux sont ensuite superposés et transmis via le canal Multi-Input Multi-Output (MIMO) ou Multi-Input Single-Output (MISO) [Cle+16]. Tous les récepteurs décodent ensuite le ou les flux communs, effectuent une annulation successive des interférences (SIC) puis décodent leurs flux privés respectifs [Diz+20].

Le concept de RSMA est développé en Annexe C.3

3.16 Conclusion

Au long de ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques de base d'émission et de réception de la multiporteuse FBMC et ses performances, en déduisant les améliorations qu'elle apporte par rapport à l'OFDM.

En effet FBMC est une évolution de l'OFDM, où la principale différence des deux schémas est le remplacement des blocs "IFFT plus CP ajouté" et "FFT plus CP supprimé" requis dans l'OFDM par des bancs de filtres de synthèse et d'analyse respectivement.

La technique FBMC-OQAM apporte une grande efficacité spectrale. Cependant, le filtrage par sous porteuse est plus long et nécessite un traitement OQAM.

Dans le dernier chapitre, nous allons réaliser des simulations avec le logiciel MATLAB pour faire une analyse comparative des performances de l'OFDM et de la FBMC.

Chapitre 4

Simulation & interprétations des résultats

4.1 Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous consacrons ce chapitre aux résultats obtenus lors de nos simulations réalisées sous le logiciel MATLAB comme outil de programmation. Nous examinons la comparaison entre la simulation d'une chaîne de communication basée sur FBMC-OQAM et celle basée sur l'OFDM qui sont représentées respectivement par les figures 3.3 et 3.1, en matière de densité spectrale de puissance (PSD), le spectre des sous porteuse, l'efficacité spectrale, le facteur de crête (PAPR) et le taux d'erreur binaire (BER). Afin de démontrer que FBMC est capable de surmonter les limites de l'OFDM.

4.2 Le logiciel MATLAB

MATLAB est l'abréviation de Matrix laboratory. Il s'agit d'un langage de programmation développé par MathWorks pour le calcul numérique. Il possède diverses fonctions telles que l'analyse et la visualisation de données, le développement d'algorithmes ou d'applications. MATLAB permet des manipulations matricielles, le traçage des fonctions et des données, la mise en œuvre d'algorithmes et la création d'interfaces utilisateur.

4.3 Performances de la FBMC et celle de l'OFDM

Cette section est consacrée à la comparaison de deux formes d'onde, la FBMC-OQAM et l'OFDM, basée sur l'étude de leurs performances en variant certains paramètres représenté sur le tableau 4.1.

paramètres	Valeurs
le nombre de points (FFT)	512/1024/2048
Intervalle de garde	212
Nombre de symboles	100
Facteur de chevauchement (K)	2/3/4
Ordre de modulation	2-QAM/4-QAM
Coefficients de filtrage	$H(1)=0.791/H(2)=0.707/H(3)=0.235$
Nombre de sous-porteuses (M)	8/16/32/64/128
La durée du Burst (t)	50/200/700/1500

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

4.3.1 La densité spectrale de puissance

Dans cette partie nous comparons les performances des deux chaînes de transmission multiporteuses en termes de densité spectrale de puissance (PSD), ce qui nous donnera une idée de l'importance de l'influence des lobes latéraux, qui affectent les symboles adjacents dans le domaine fréquentiel.

En premier temps nous fixons le nombre de points de transformée de Fourier rapide (FFT) à 1024 et nous varions le facteur de chevauchement à $K=2$, $K=3$ et $K=4$, on obtient les résultats illustrés dans les figures 4.1, 4.2 et 4.3 respectivement :

Pour le facteur de chevauchement $K=2$:

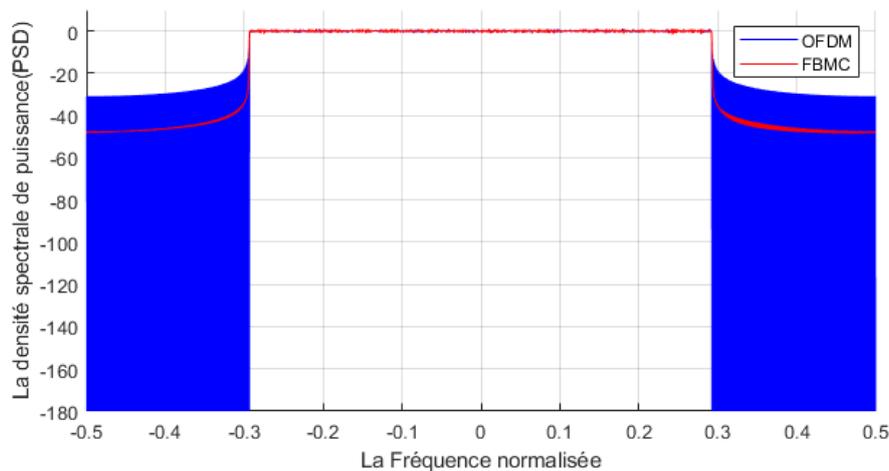


FIGURE 4.1 – Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $K=2$.

Pour le facteur de chevauchement $K=3$:

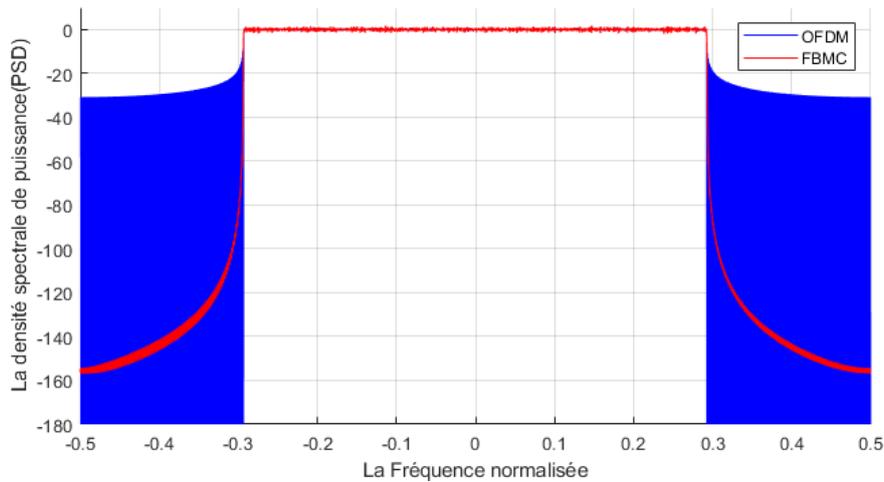


FIGURE 4.2 – Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $K=3$.

Pour le facteur de chevauchement $K=4$:

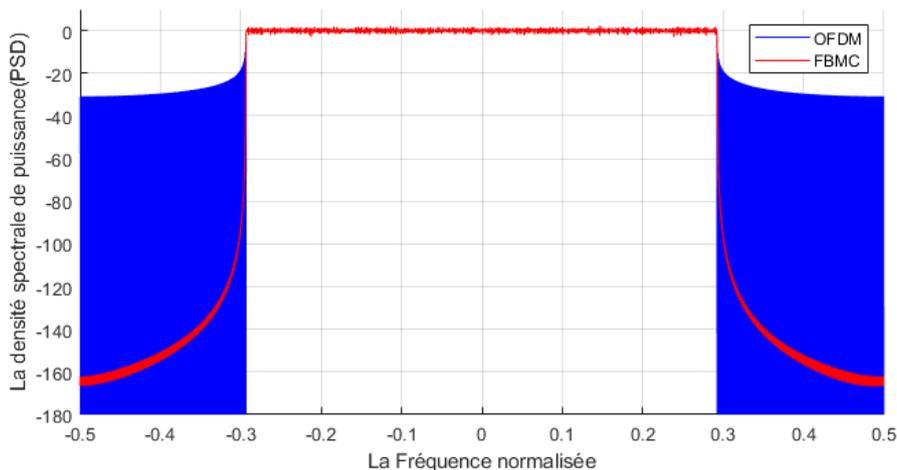


FIGURE 4.3 – Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $K=4$.

À partir de ces figures, nous constatons que la PSD de l'OFDM est fixée à -30 dB pour les trois valeurs de K , tandis que la PSD des lobes latéraux de FBMC est variable en fonction du facteur K .

On remarque qu'en augmentant la valeur du facteur de chevauchement, la valeur de la PSD diminue, comme le montre la figure 4.1, la valeur de la PSD est à -50 dB pour une valeur de $K=2$, à -150 dB pour $K=3$ (figure 4.2) et à -160 dB pour $K=4$ (figure 4.3). Par conséquent, FBMC a une faible fuite hors bande et des lobes latéraux moindre par rapport à l'OFDM, ce qui permet une meilleure utilisation du spectre.

Par la suite, nous fixons le facteur de chevauchement à $K=4$, et nous analysons l'effet de la variante en nombre de points de transformée de Fourier rapide (FFT) à 512 et 1024 et 2048 sur la DSP, on obtient respectivement les figures 4.4, 4.5 et 4.6 illustrées ci-dessous :

Pour le nombre FFT=512 :

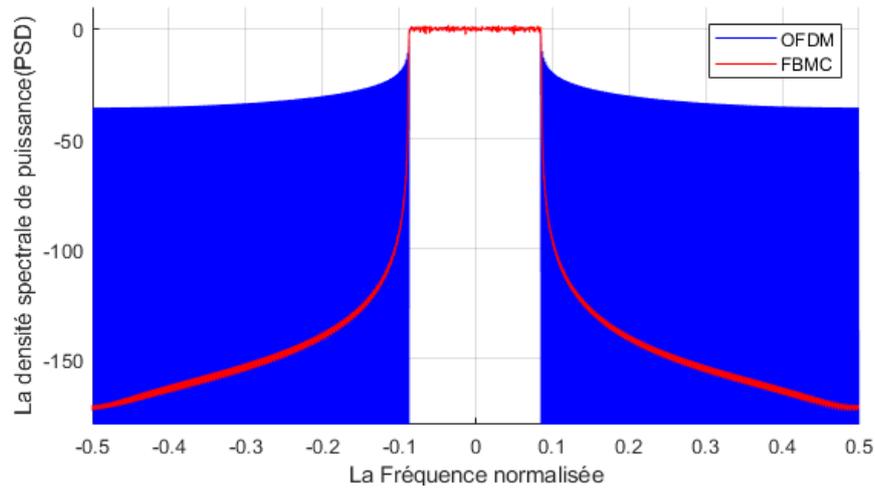


FIGURE 4.4 – Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $N=512$.

Pour le nombre FFT=1024 :

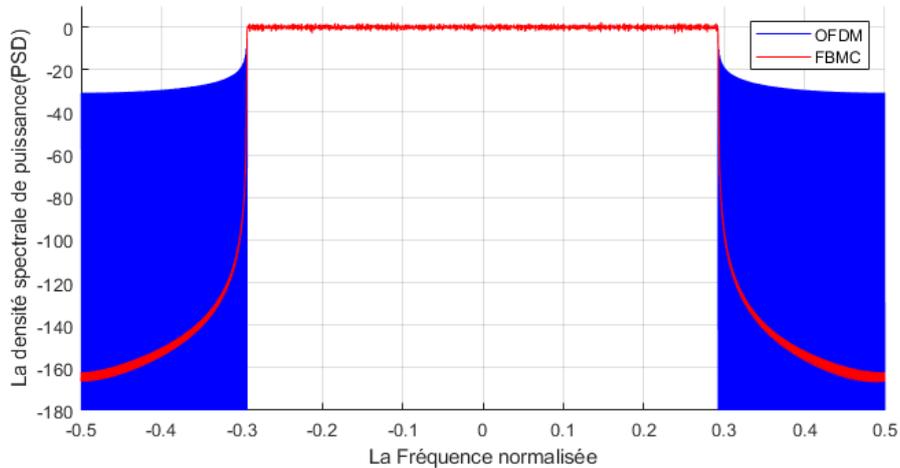


FIGURE 4.5 – Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour $N=1024$.

Pour le nombre FFT=2048 :

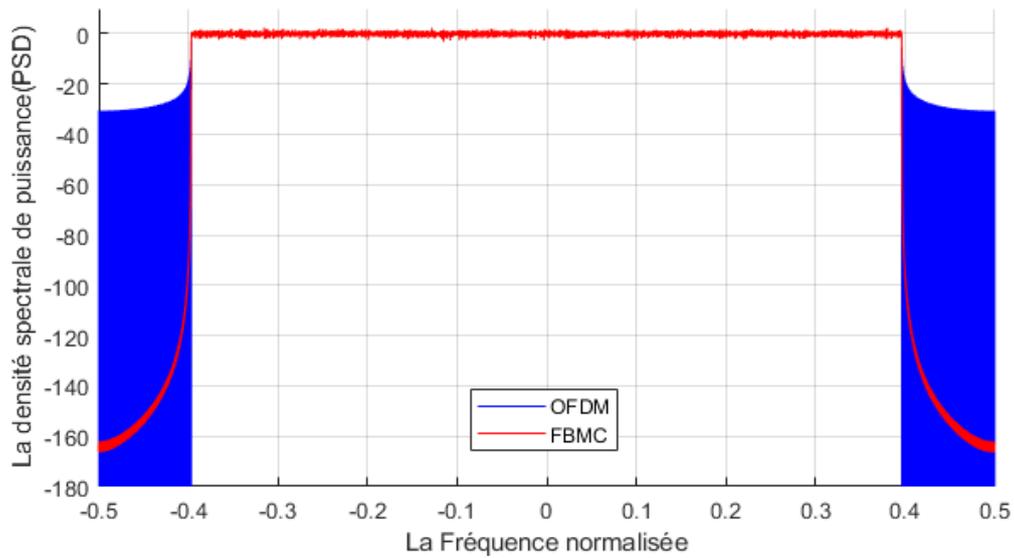


FIGURE 4.6 – Densité spectrale de puissance FBMC et OFDM pour N=2048.

À partir des figures, nous déduisons que la variation du nombre des points de la FFT influe sur les largeurs des lobes principaux et secondaires pour les deux modulations multiporteuses et sur la DSP des lobes secondaires de FBMC.

En augmentant le nombre FFT (N), nous observons que la largeur des lobes secondaires diminue ce qui amène à l'augmentation de la largeur du lobe principal dans les deux types de modulation. D'autre part la DSP reste dans tout les cas fixe à -30 dB pour l'OFDM, tandis que cette dernière varie pour la FBMC, elle est de -180 dB pour un nombre FFT égale à 512 (figure 4.4), de -160 dB pour $N=1024$ et $N=2048$ (figure 4.5 et 4.6).

4.3.2 Le spectre des sous-porteuses

Dans cette section nous étudions le spectre de sous-porteuses. Pour cela nous faisons varier le nombre de sous-canaux (M) et fixer le facteur de chevauchement à $K=4$. Les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes :

Pour 8 sous canaux :

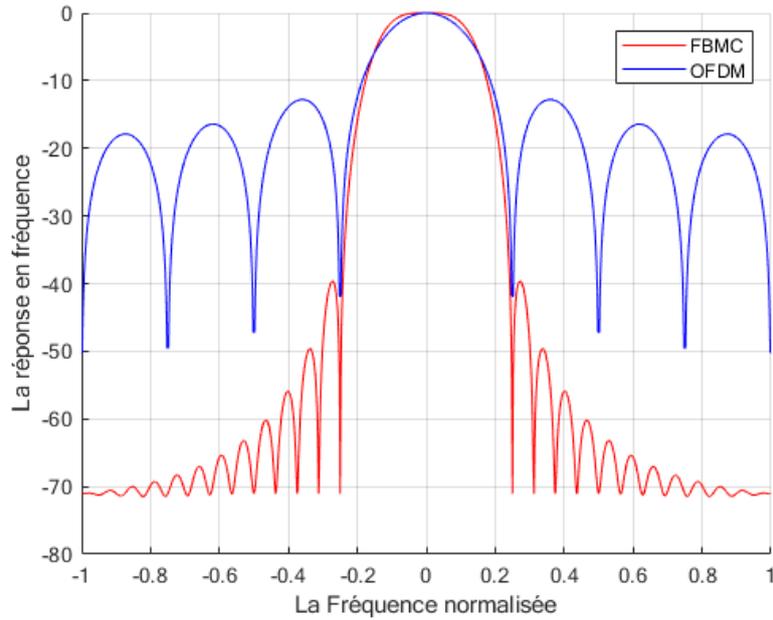


FIGURE 4.7 – Spectre de sous porteuse pour $M=8$.

Pour 16 sous canaux :

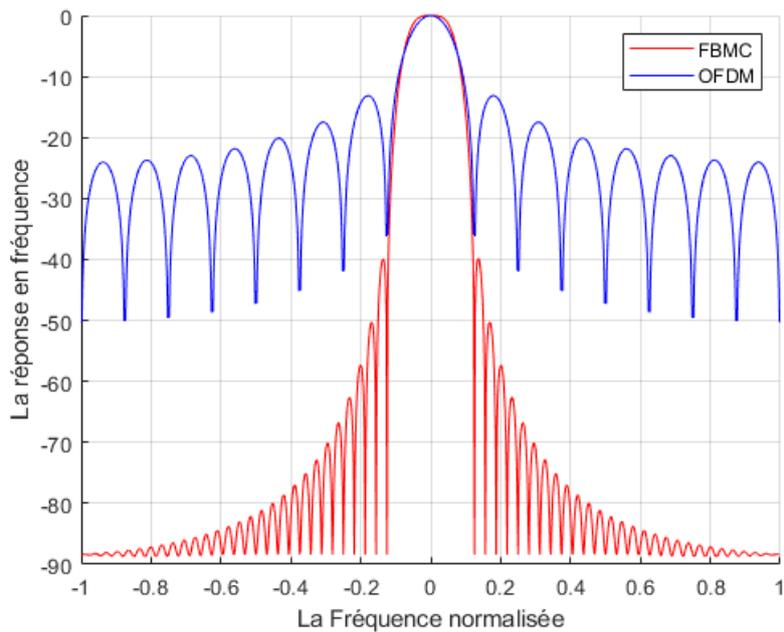


FIGURE 4.8 – Spectre de sous porteuse pour $M=16$.

Pour 32 sous canaux :

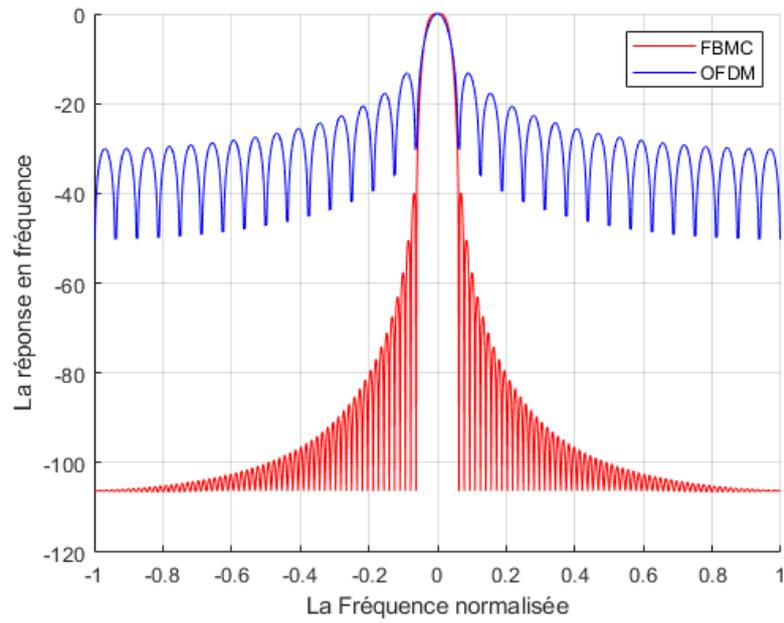


FIGURE 4.9 – Spectre de sous porteuse pour M=32.

Pour 64 sous canaux :

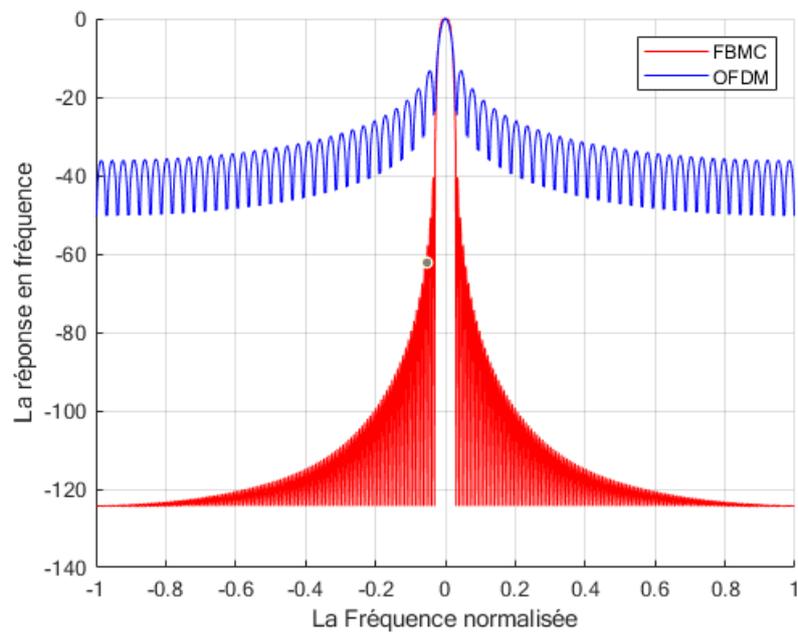


FIGURE 4.10 – Spectre de sous porteuse pour M=64.

Pour 128 sous canaux :

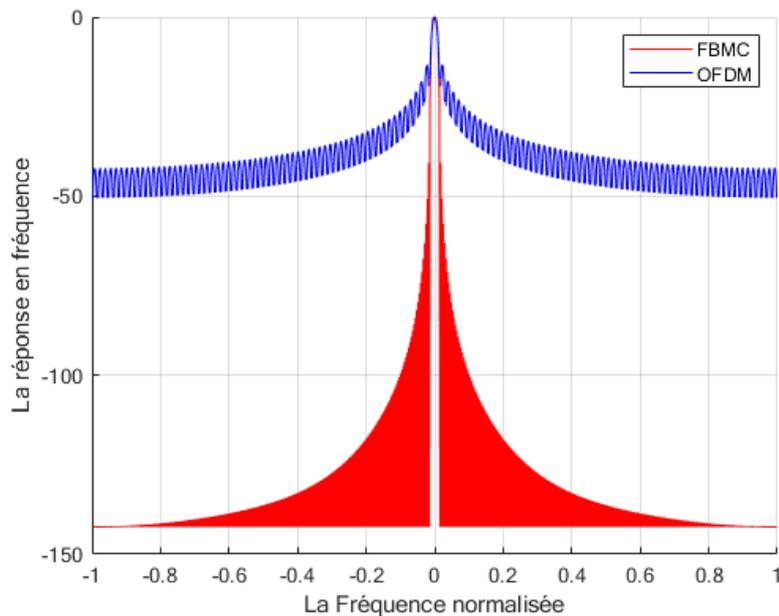


FIGURE 4.11 – Spectre de sous porteuse pour M=128.

En comparant les figures, on constate une différence remarquable entre les lobes latéraux de FBMC et ceux d'OFDM, le premier lobe latéral est environ à -40db en FBMC et environ à -15db en OFDM. En effet, ceci est dû à la différence d'utilisation des filtres prototypes dans les deux techniques de modulation. En effet dans FBMC, chaque sous-canal est filtré individuellement par des filtres prototypes bien formés contrairement à l'OFDM où tous les sous-canaux sont filtrés ensemble par le filtre prototype. En conséquence, dans FBMC les sous-porteuses sont bien formées et ont des lobes latéraux très faibles par rapport à l'OFDM ce qui conduit à une plus grande efficacité spectrale et une résistance contre les interférences interporteuses(ICI).

Les figures montrent aussi qu'en augmentant le nombre de sous-canaux (M), la largeur des lobes latéraux diminue de plus en plus en s'éloignant du lobe principal.

4.3.3 Efficacité spectrale

Dans cette section, nous comparons entre OFDM et FBMC en termes de performances de l'efficacité spectrale en fonction de la durée du burst. pour cela nous faisons varier la durée du burst de $t=50$ ms, $t=180$... à $t=1500$ ms. Nous appliquons les paramètres du tableau 4.2 pour obtenir les figures suivantes :

Paramètres	K	Taille du filtre	Taille du CP	FFT
Valeurs associées	4	43	43	1024

TABLE 4.2 – Paramètres de comparaison les résultats en terme d'efficacité spectrale

Pour $t=50$ ms :

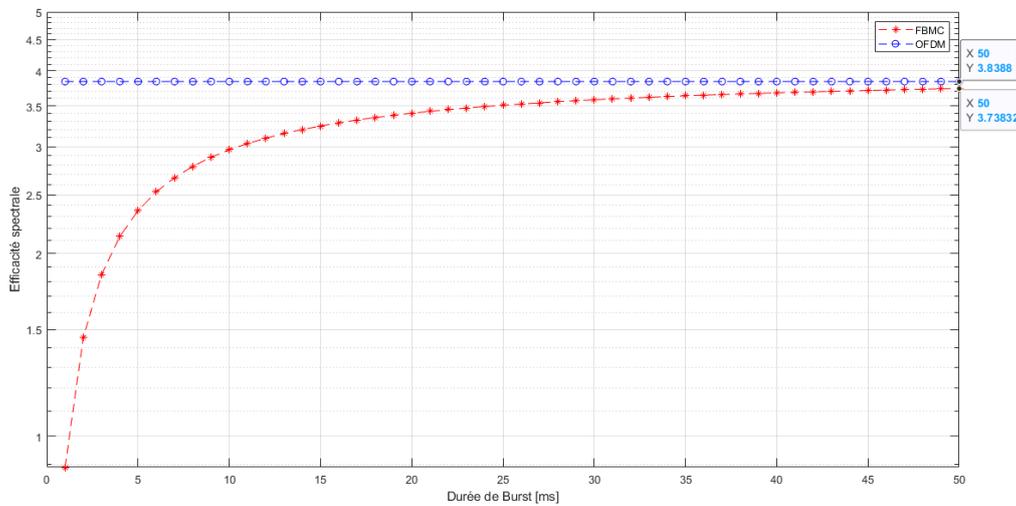


FIGURE 4.12 – L'efficacité spectrale pour $t=50$ ms.

Pour $t=200$ ms :

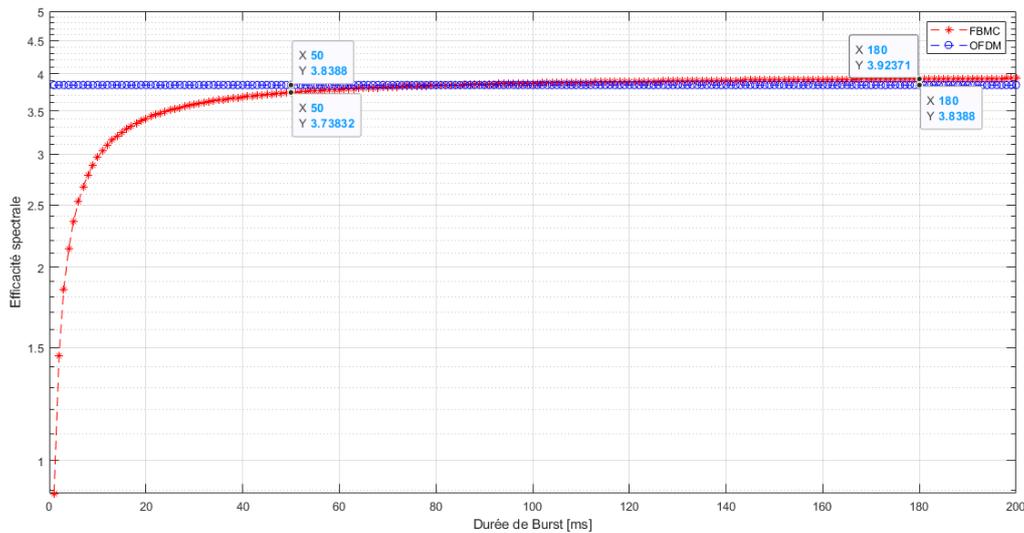


FIGURE 4.13 – L'efficacité spectrale pour $t=200$ ms.

Pour $t=700\text{ms}$:

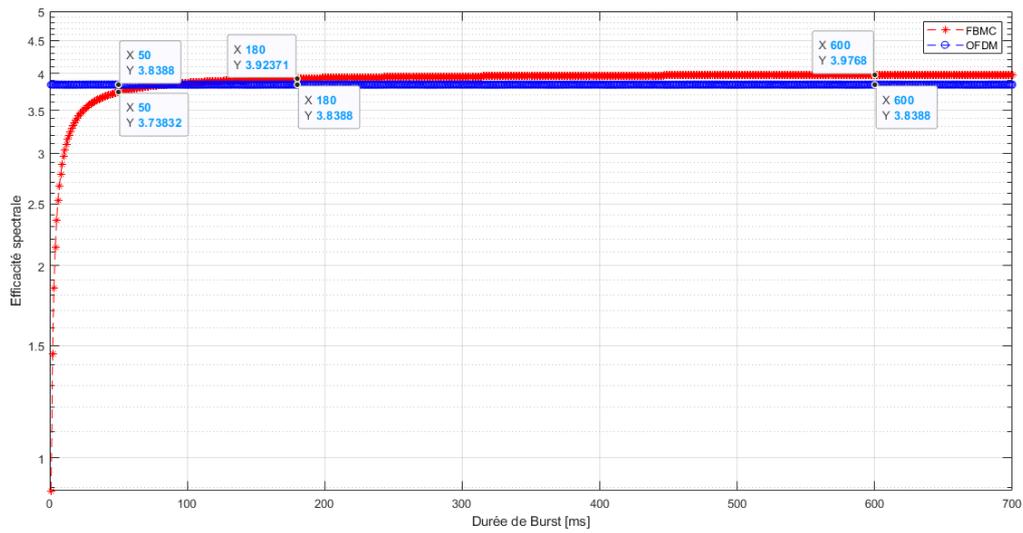


FIGURE 4.14 – L'efficacité spectrale pour $t=700\text{ms}$.

Pour $t=1500\text{ms}$:

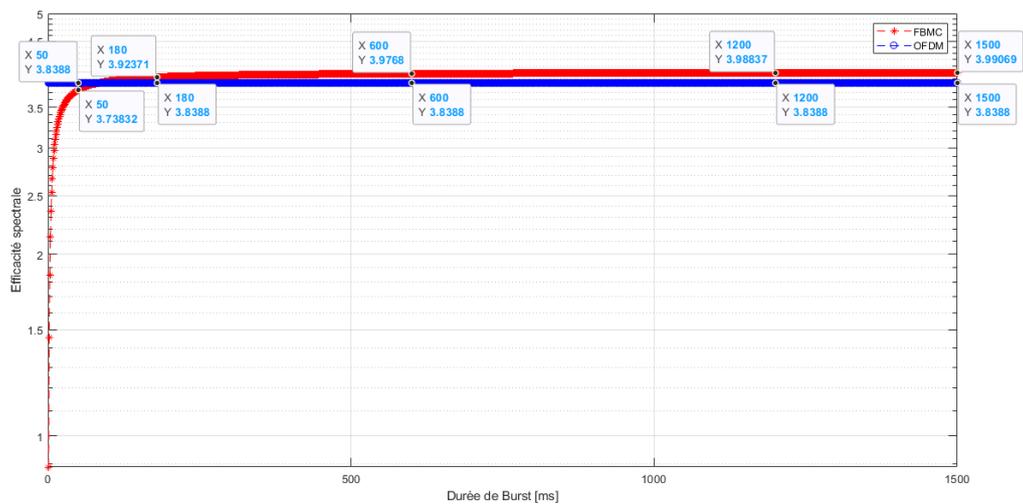


FIGURE 4.15 – L'efficacité spectrale pour $t=1500\text{ms}$.

La technique		L'efficacité spectrale	
		OFDM	FBMC
Les instants	50	3,8388	3,73832
	180	3,8388	3,92371
	600	3,8388	3,9768
	1200	3,8388	3,98837
	1500	3,8388	3,99069

TABLE 4.3 – Comparaison les résultats d'efficacité spectrale

D'après ces figures, nous constatons qu'en augmentant la durée du burst, la valeur d'efficacité spectrale pour la technique OFDM reste toujours fixe à 3,8388 bits/s/hz et meilleure à celle de FBMC-OQAM jusqu'à 83ms. En augmentant la durée du burst, à partir de cette valeur(83ms), la technique FBMC-OQAM offre de meilleurs résultats que l'OFDM. En effet, la différence d'efficacité spectrale entre l'OFDM et FBMC-OQAM augmente de 0,08491 bits/s/hz à t=180ms, jusqu'à 0,15189 bits/s/hz à t=1500ms. De ce fait la technique FBMC offre de meilleurs performances sous certaines conditions et spécialement lorsque la durée du burst est supérieure à 83ms.

4.3.4 Facteur de crête (PAPR)

Dans cette partie, nous comparons entre le PAPR de FBMC et celui d'OFDM, nous obtenons le tableau 4.4.

La technique	PAPR (db)
OFDM	8.8843
FBMC-OQAM	16.0267

TABLE 4.4 – Comparaison du PAPR entre l'OFDM et la FBMC-OQAM.

Étant donné que OFDM et FBMC sont des formes spéciales de technologie de modulation multiporteuse, ce qui les rend produire inévitablement un PAPR élevé. Comme le montre le tableau 4.4, le PAPR du FBMC-OQAM est supérieur à celui de l'OFDM. Des rapports de puissance crête/moyenne plus élevés peuvent entraîner une forte consommation d'énergie. Par conséquent, une réduction de ce facteur s'avère nécessaire.

4.3.5 Taux d'erreur binaire

Afin de compléter notre travail, nous évaluons la variation du taux d'erreur binaire en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) pour les deux techniques OFDM et FBMC-OQAM. Le résultat obtenu durant cette simulation est montré dans la figure 4.16.

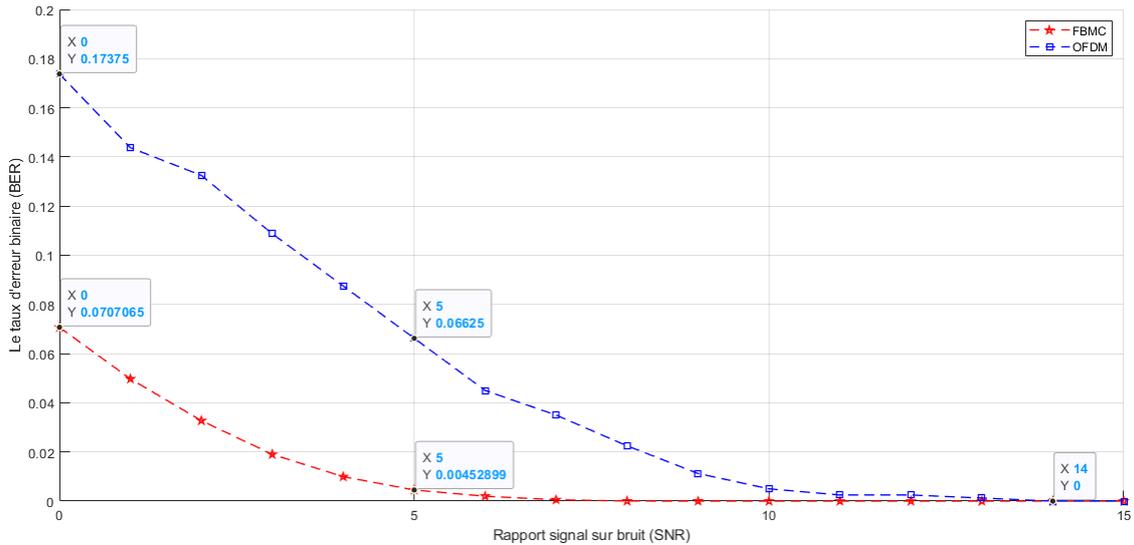


FIGURE 4.16 – Taux d’erreur binaire en fonction du SNR pour l’OFDM et la FBMC-OQAM.

À partir de la figure 4.16, nous constatons que le BER de FBMC-OQAM est inférieur à celui de OFDM, au début de la simulation, pour un SNR=0, le BER de FBMC-OQAM qui est de 0,0707065 dB est inférieur à celui de l’OFDM qui est de 0,17375 dB. Au court de cette simulation le BER diminue progressivement jusqu’à 0 dB pour les deux techniques. Cela est synthétisé par les valeurs donné dans le tableau 4.5.

SNR (dB) \ La technique	Taux d’erreur binaire	
	OFDM	FBMC
0	0,17375	0,0707065
5	0,06625	0,00452899
14	0	0

TABLE 4.5 – Comparaison les résultats de Taux d’erreur binaire en fonction de SNR pour l’OFDM et la FBMC-OQAM.

4.4 Conclusion

Durant ce chapitre nous avons mené une étude comparative entre la technique OFDM et FBMC-OQAM. Les simulations ont démontré la supériorité des performances de la FBMC-OQAM par rapport à l’OFDM en termes de densité spectrale de puissance, spectre de sous porteuses, efficacité spectrale et de taux d’erreur binaire. Néanmoins, FBMC-OQAM souffre d’un facteur de crête ou d’un PAPR élevé par rapport à l’OFDM. En conséquence, la FBMC-OQAM est plus avantageuse que l’OFDM mais l’un de ces inconvénients majeurs est un PAPR élevé pour cela des algorithmes sont nécessaires pour le réduire car il joue un rôle important pour l’efficacité du système.

Conclusion générale et perspectives

L'immense nombre d'utilisateurs et d'appareils demandant un débit de données, une vitesse et une bande passante élevés ont attiré l'attention sur la modulation multiporteuse car celle-ci contribue énormément au développement des systèmes sans fil.

L'objectif principal de ce travail était d'étudier la technique FBMC et de démontrer qu'elle est prometteuse pour les systèmes 5G, pour cela nous avons évalué les performances de FBMC par rapport à l'OFDM dans un environnement de simulation.

Nous avons alors effectué une analyse comparative entre les deux schémas sur la base de certains paramètres : densité spectrale de puissance (PSD), spectre de sous porteuses, l'efficacité spectrale, facteur de crête (PAPR) et taux d'erreur binaire (BER).

En termes de densité spectrale de puissance les résultats ont prouvés que le schéma FBMC est bien meilleur que l'OFDM, la bande passante est alors utilisée efficacement.

En termes de formes d'onde des sous-porteuses, les lobes latéraux du FBMC se désintègrent plus rapidement que ceux de l'OFDM, ce qui réduit la probabilité d'ISI ou d'ICI.

L'utilisation du préfixe cyclique dans OFDM réduit l'efficacité de la bande passante alors que dans FBMC le CP est inutile. Ceci permet à cette technique un gain en bande passante très important par rapport à celles dites classiques à savoir l'OFDM.

A partir des résultats trouvés nous avons montré que la FBMC offre de meilleures performances que l'OFDM et qu'elle est capable de surmonter les lacunes de celle-ci.

Cependant, comme toute autre technique FBMC-OQAM souffre d'un facteur de crête (PAPR) élevé. Pour réduire celui-ci plusieurs méthodes et algorithmes seront nécessaires. De plus, FBMC souffre d'une grande complexité d'implémentation.

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à une nouvelle technique d'accès (RSMA) prometteuse pour la 5G qui permet d'optimiser son efficacité spectrale avec une faible complexité de calcul.

Pour cela, dans un futur proche, nous nous intéresserons aux méthodes de réduction de PAPR dans les systèmes FBMC. Nous proposons également de combiner les avantages de FBMC et de RSMA pour une meilleure performance des systèmes de la 5G et au delà.

Annexe A

A.1 Historique de la norme 5G et ses spécificités

La rédaction de la Release 15 de la première norme 3GPP liée à la 5G s'est achevée en juin 2018 et la définition de la nouvelle architecture (Phase 2) a débuté en décembre 2016. En mars 2017, la recherche d'une nouvelle interface radio, connue sous le nom de NR pour New Radio, a commencé. La première version de la norme a été validée en septembre 2018 en réponse aux demandes urgentes des eMBB, et la deuxième version (3GPP Release 16) a été publiée en mars 2020[FRA]. La figure 1.1 représente le calendrier de la 5G au 3GPP.

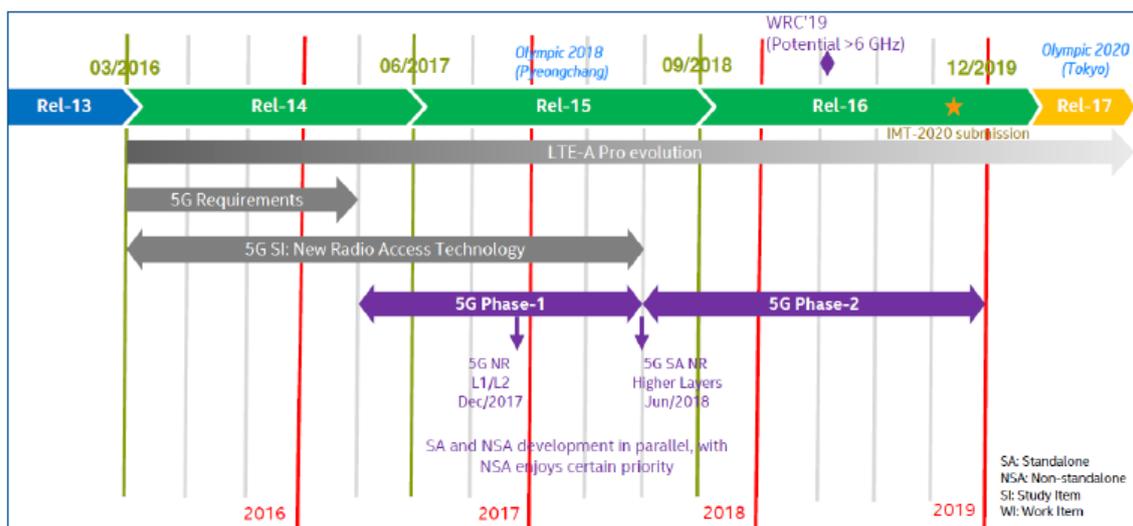


FIGURE A.1 – Calendrier de la 5G au 3GPP [FRA].

Il est à noter que le passage d'une génération à la suivante se fait progressivement. Le LTE continuera d'évoluer en parallèle avec le NR, et les deux standards seront probablement très complémentaires dans un premier temps. En particulier, pour certains des premiers déploiements 5G, LTE devrait rester le maître du réseau et contrôler les antennes NR. De plus, certains objectifs 5G peuvent être atteints grâce à des fonctionnalités ou des technologies mises en œuvre dans les versions 13, 14 et 15 du 3GPP qui ne seront pas spécifiques à la 5ème génération, mais représentent plutôt la 4G (parfois appelée version 4.9G ou LTE Advanced Professional) [FRA].

Par conséquent, le premier réseau 5G largement déployé sera probablement un réseau 4.9G, utilisant l'agrégation de transporteurs, le MIMO massif ou le NFV. Ces

technologies seront abordées plus loin, mais représentent une évolution de quatrième génération, la véritable transition vers la 5G, pour les technologies de rupture telles que les porteuses NR en bande millimétrique, NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) ou MEC (Mobile Edge Computing) peuvent être atteint.

En plus de cette course commerciale, les constructeurs ont généralement le soutien des pays hôtes, notamment ceux des États-Unis, du Japon ou de la Corée du Sud, qui souhaitent démarrer au plus vite la définition et les essais de la technologie 5G afin de prendre un leadership technologique. A cet égard, l'avancée des premiers déploiements annoncés en Corée du Sud (déploiement 5G lors des Jeux olympiques d'hiver de PyeongChang 2018) ou au Japon (déploiement 5G lors des Jeux olympiques d'été de Tokyo 2020) laisse penser que ces déploiements n'utiliseront qu'une fraction de la technologie 5G. Une petite partie s'appuiera plutôt sur la technologie 4.9G ou pré-5G [FRA].

Annexe B

B.1 Modèle du système Massive MIMO

Dans ce qui suit, nous présentons un aperçu du modèle du système en liaison descendante pour massive MIMO. On suppose qu'une seule BS avec M antennes de transmission qui servent N terminaux de réception à antenne unique, où $N \leq M$. Un canal qui indique les coefficients à travers N terminaux reçus et M antennes émettrices, est pris en compte. En mode TDD, la transmission DL a la même matrice de canal \mathbf{H} que la transmission UL, dans le temps de cohérence du canal, en raison de la réciprocité du canal. La matrice de canaux $a_n \in \mathbb{C}^{M \times N}$ peut être représenté comme :

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & h_{M3} \cdots & h_{MN} \end{pmatrix}, \mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N} \quad (\text{B.1})$$

Pour la transmission DL, les données à venir Pour $s = [a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ passent dans une étape de précodage au niveau de la BS. Les M antennes BS forment leur vecteur précodé en convertissant a dans $M \times 1$ vecteur comme $s = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ puis l'envoi séparément à chaque terminal de N terminaux reçus via le canal. Avec l'hypothèse d'un CSI parfait et d'une synchronisation au niveau de la BS, le précodeur peut être exploité pour diriger le signal transmis vers son terminal de réception spécifié[Alb+21]. La figure B.1 montre le modèle du système massive MIMO avec M antennes d'émission et N terminaux de réception et indique également la position du bloc de précodage.

Le vecteur reçu aux terminaux récepteurs est $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ qui est affecté par les effets de canal et le bruit. Le vecteur $N \times 1$ du signal reçu à la BS peut être représenté comme :

$$y = H^T x + n, \quad y \in \mathbb{C}^{N \times 1} \quad (\text{B.2})$$

où : n est le vecteur de bruit gaussien blanc additif[Alb+21].

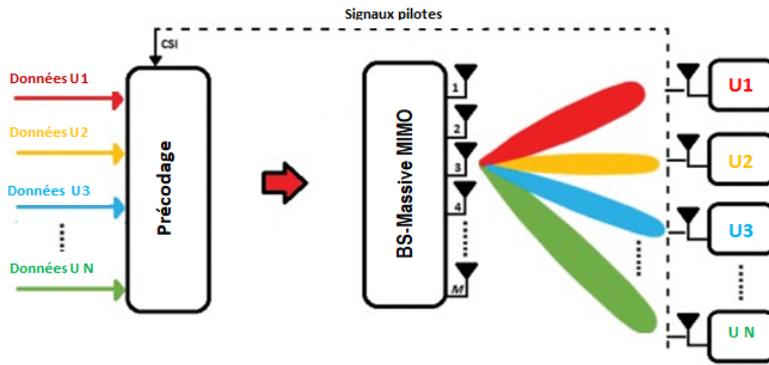


FIGURE B.1 – Modèle d'un système MIMO massif[Alb+21].

B.2 Contamination des pilotes

Dans les systèmes massive MIMO, la station de base a besoin de la réponse de canal du terminal utilisateur pour obtenir l'estimation du canal. Le canal de liaison montante est estimé par la station de base lorsque le terminal utilisateur envoie des signaux pilotes orthogonaux à la station de base. De plus, à l'aide de la propriété de réciprocité de canal du massive MIMO, la station de base estime le canal de liaison descendante vers le terminal utilisateur. Si les signaux pilotes dans la cellule concernée et les cellules voisines sont orthogonaux, la station de base obtient l'estimation précise du canal. Cependant, le nombre de signaux pilotes orthogonaux dans une bande passante et une période données est limité, ce qui oblige à réutiliser les pilotes orthogonaux dans les cellules voisines. La station de base recevra alors une combinaison de réponse de canal de la cellule d'origine et des cellules voisines causant des interférences. Ce phénomène est connu sous le nom de contamination des pilotes qui limite le débit et réduit la performance du système[CA20].

Comme le montre la figure B.2, pendant la liaison descendante, la station de base forme un faisceau vers l'utilisateur dans sa cellule d'origine et vers les utilisateurs indésirables dans les cellules voisines.

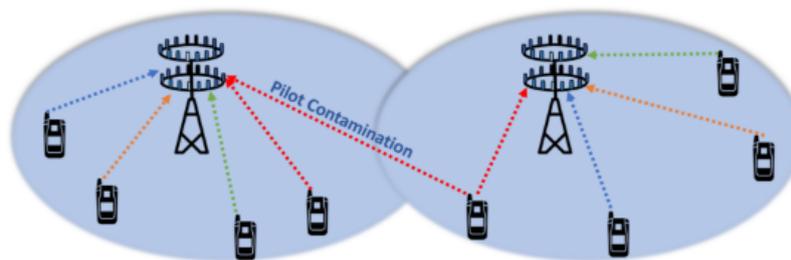


FIGURE B.2 – Effet de contamination de pilotes en Massive MIMO[CA20].

Annexe C

C.1 Types de FBMC

Dans cette section, trois types de systèmes de communication FBMC seront introduits, nommé FMT (Filtered Multi Tone), CMT (Co-sine Modulated Multitone) et SMT(Staggered Multi Tone).

Principe de la FMT

Les formes d'onde FMT sont synthétisées selon la méthode conventionnelle de multiplexage par répartition en fréquence (FDM). Les canaux de sous-porteuse n'ont pas de chevauchement, et donc les ICI sont négligeables grâce à l'utilisation de filtres bien conçus. Le système FMT n'utilise pas d'intervalle de garde, il est donc nécessaire d'utiliser la méthode conventionnelle de filtrage de Nyquist à racine carrée qui est utilisée dans les communications à porteuse unique pour combattre l'ISI[ACF14]. L'espacement des sous-porteuses est égal à $(1 + \alpha/T)$, où α est le facteur d'atténuation du filtre prototype, de ce fait la FMT est moins efficace en terme de bande passante [Far14]. La figure C.1 représente le bloc émetteur (SFB) et récepteur (AFB) du système FMT :

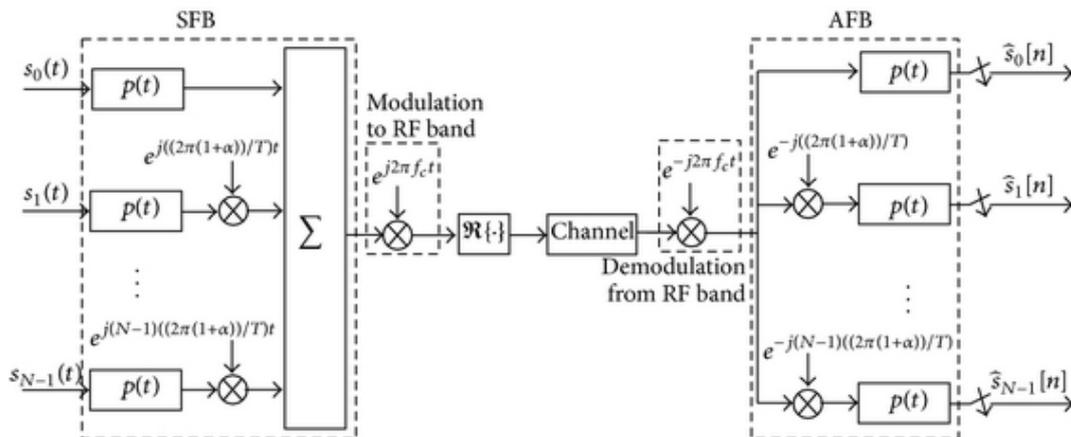


FIGURE C.1 – Bloc émetteur et récepteur FMT[Far14].

Principe de la CMT

La forme d'onde CMT est une modulation multiporteuse qui transmet des symboles de données modulés en amplitude (PAM). Pour atteindre l'efficacité maximale de la bande passante, ces symboles sont distribués avec une densité de deux symboles par unité de surface, cela équivaut à un symbole complexe par unité de surface. Un déphasage de 90 degrés est introduit sur les porteuses des symboles adjacents et une modulation de bande latérale résiduelle (VSB) est appliquée pour faire face à l'espacement des porteuses $F=1/2T$ [Far14]. Comme le montre la figure (C.2).

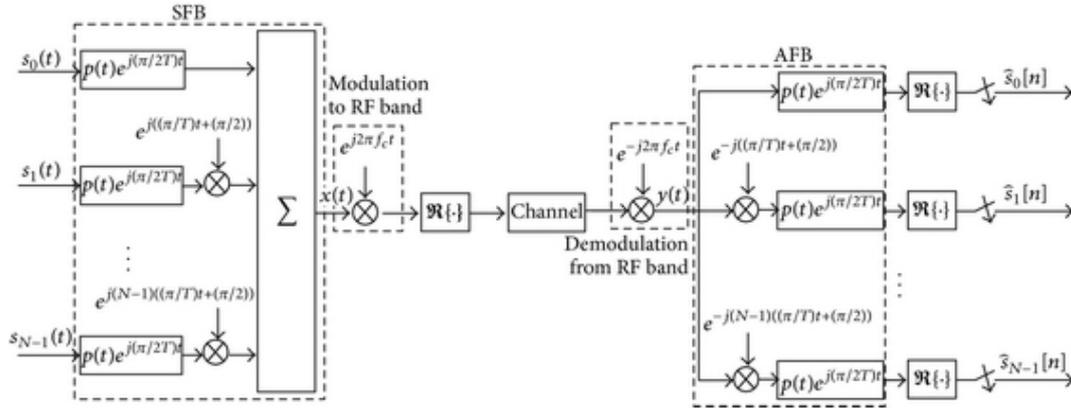


FIGURE C.2 – Bloc émetteur et récepteur CMT [Far14].

La figure C.3 représente la constellation de CMT en temps et en fréquence :

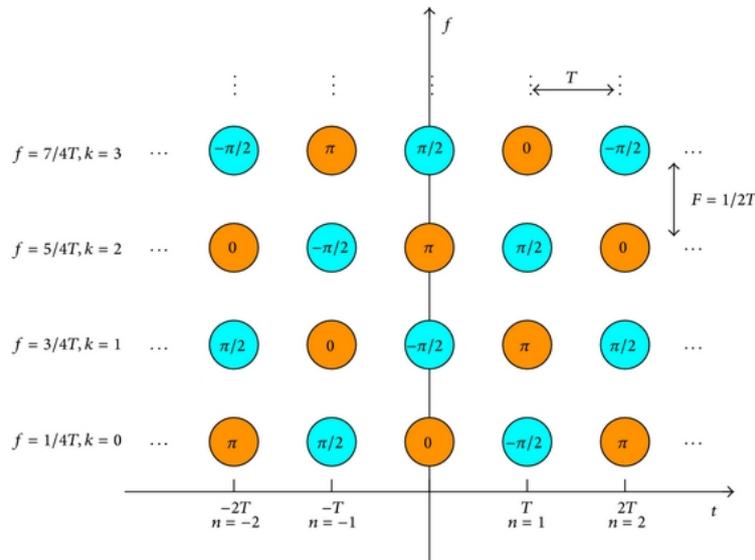


FIGURE C.3 – La représentation de CMT [Far14].

Principe de SMT

La forme d'onde SMT peut être considérée comme une alternative au CMT. Sa représentation est obtenue par un décalage de fréquence des points vers le bas de $1/4T$, en mettant à l'échelle l'axe des temps d'un facteur $\frac{1}{2}$ et l'axe des fréquences d'un facteur 2. Ici les symboles PAM (Pulse Amplitude Modulation) sont espacés de $T/2$ et les sous-porteuses sont espacées de $1/T$, voir figure C.4. En SMT, chaque paire de symboles adjacents est traitée comme des parties réelles et imaginaires d'un symbole QAM (Quadrature Amplitude Modulation) et chaque symbole de données appartient à une constellation QAM et donc l'ensemble des symboles représente une constellation Offset QAM qui est une modulation multiporteuse à symboles décalés [Far14]. Comme le montre la figure C.4.

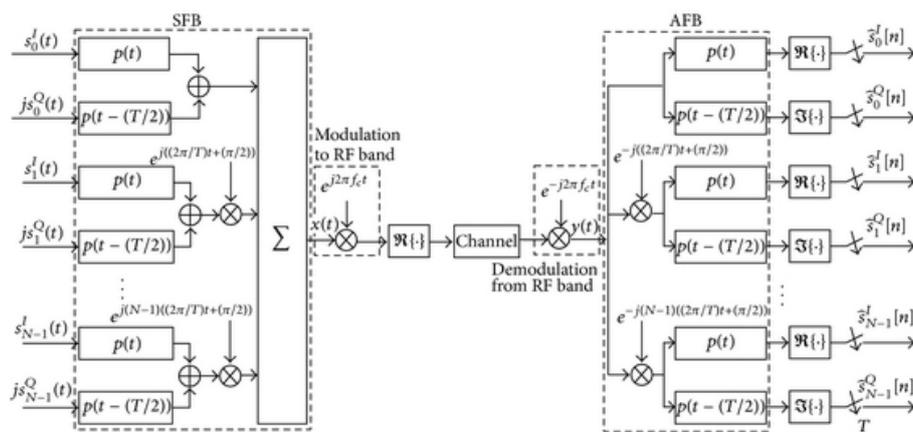


FIGURE C.4 – Bloc émetteur et récepteur SMT [Far14].

La figure C.5 représente le bloc émetteur et récepteur du système SMT :

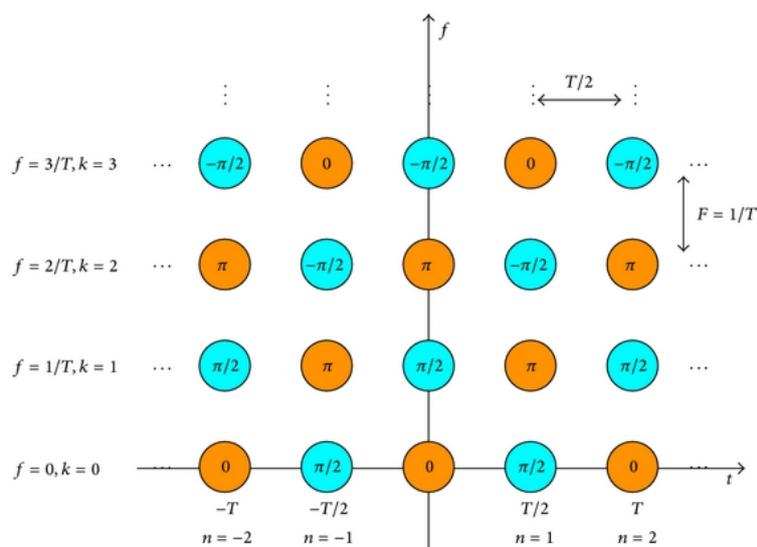


FIGURE C.5 – La représentation de SMT [Far14].

C.2 Conception du filtre prototype

La conception d'un bon filtre prototype est la clé pour assurer de bonnes performances des systèmes de communication OQAM-FBMC car il est conçu pour une bonne localisation spectrale[SGA13]. Généralement, les travaux se concentrent sur la FBMC en utilisant des filtres prototypes avec facteur de chevauchement $K = 4$ car c'est la valeur optimale en termes de suppression de bande latérale[And21].

En supposant que le filtre prototype conçu est un banc de filtres PHYDYAS, Dans ce dernier les critères de Nyquist sont satisfaits en tenant compte des coefficients de fréquence et en imposant la condition de symétrie, les coefficients de fréquence du demi-filtre de Nyquist pour le facteur de chevauchement $K = 2, 3$ et 4 sont donnés dans le tableau suivant[BSB21] :

K	H_0	H_1	H_2	H_3
1	1	-	-	-
2	1	0.707106	-	-
3	1	0.911438	0.411438	-
4	1	0.971960	0.707106	0.235147

TABLE C.1 – Les coefficients de filtre Phydyas dans le domaine fréquentiel[Ram17]

La réponse en fréquence de ce filtre est obtenu à partir des coefficients de fréquence à l'aide de la fonction d'interpolation [BSB21] :

$$H(f) = \sum_{k=-K+1}^{K-1} H_k \frac{\sin(\pi(MKf - k))}{MK \sin(\pi(MKf - k))} \quad (C.1)$$

- $H(f)$: la réponse fréquentielle.
- $h(t)$: la réponse temporelle.
- H_k : le coefficient du filtre prototype.
- K : le facteur de chevauchement.
- M : le nombre de sous-canaux.
- k : l'indice de sous-porteuse.

Dans le domaine temporel, cela donne :

$$h(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k \cos\left(2\pi \frac{kt}{Kt}\right) \quad (C.2)$$

Dans le domaine discret, une forme proche du filtre prototype pour un facteur de chevauchement $K = 4$ est exprimé comme :

$$h[m] = H_0 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k H[k] \cos\left(\frac{2\pi k}{KM}(m+1)\right) \quad (C.3)$$

Où :

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 0, 1, \dots \\ K = 4 \\ H_0 = 1 \\ H_1 = 0.9719598 \\ H_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ H_3 = \sqrt{1 - H_1^2} \end{array} \right. \quad (\text{C.4})$$

C.3 La technique RSMA

Le principal avantage de la RSMA est de gérer de manière flexible les interférences en permettant à celles-ci d'être partiellement décodées et partiellement traitées comme du bruit. En conséquence RSMA surpasse les schémas d'accès multiples existants tels que l'accès multiple par division spatiale (SDMA), l'accès multiple non orthogonal (NOMA) et l'accès multiple orthogonal (OMA). Ainsi, RSMA est une technique d'accès multiples prometteuse pour la 5G et au-delà [Diz+20].

RSMA est une technique générale et efficace qui a des formes spéciales de SDMA et de NOMA. Notamment, SDMA utilise un schéma de précodage linéaire pour distinguer les utilisateurs dans le domaine spatial et dépend entièrement du traitement de toute interférences multi-utilisateurs résiduelle sous forme de bruit. D'autre part, NOMA repose sur le principe du codage par superposition à l'émetteur et suppression successive des interférences au récepteur (SIC) [Gam+21].

RSMA est considérée comme le pont entre SDMA et NOMA avec une faible complexité de calcul.

Dans cette configuration, les utilisateurs sont superposés dans le domaine de puissance qui repose sur le regroupement et l'ordre des utilisateurs pour imposer à certains utilisateurs de meilleures conditions de canal pour décoder et annuler complètement les interférences créées par d'autres utilisateurs [Gam+21].

Pour illustrer le concept de RSMA, considérons la liaison descendante d'un système MISO à deux utilisateurs avec une seule BS qui est équipée de N_t antennes d'émission pour la communication avec deux utilisateurs à antenne unique [Gam+21].

Les utilisateurs visés par les signaux sont notés W_1 et W_2 de sorte que chaque message est partagé en deux parties reconnues comme communes et flux privés : $\{W_1^{12}, W_1^1\}$ et $\{W_2^{12}, W_2^2\}$ pour l'utilisateur-1 et l'utilisateur-2, respectivement. Le flux communs $\{W_1^{12}, W_2^{12}\}$ sont combinés et codés ensemble en tant que S_{12} via un livre de codes partagé par les deux utilisateurs. Plus tard, S_{12} sera décodé par les deux utilisateurs. Les valeurs privées, $\{W_1^1, W_2^2\}$, sont codés séparément dans S_1 pour l'utilisateur-1 et S_2 pour l'utilisateur-2, respectivement. L'ensemble flux de données, $s = [s_{12}, s_1, s_2]^T$, sont précodés linéairement via le vecteur de précodage $P = [p_{12}, p_1, p_2]$

avec : $p_{12}, p_1, p_2 \in \mathbb{C}^{N_t 1}$.

Par conséquent, le signal transmis est exprimé par :

$$x = P_s = p_{12}s_{12} + p_1s_1 + p_2s_2, \text{ avec } x \in \mathbb{C}^{N_t 1}.$$

Côté utilisateur, le premier utilisateur par exemple, le flux commun est décodé en \widehat{W}_{12} en considérant la valeur privée comme un bruit. Après cela, \widehat{W}_{12} est post-traité

via le bloc SIC pour extraire la valeur privée \widehat{W}_1^1 . Enfin, le récepteur utilisateur combine decode les valeurs \widehat{W}_1^1 et \widehat{W}_1^{12} pour reconstruire son message d'origine comme illustré à la figure C.6 [Gam+21].

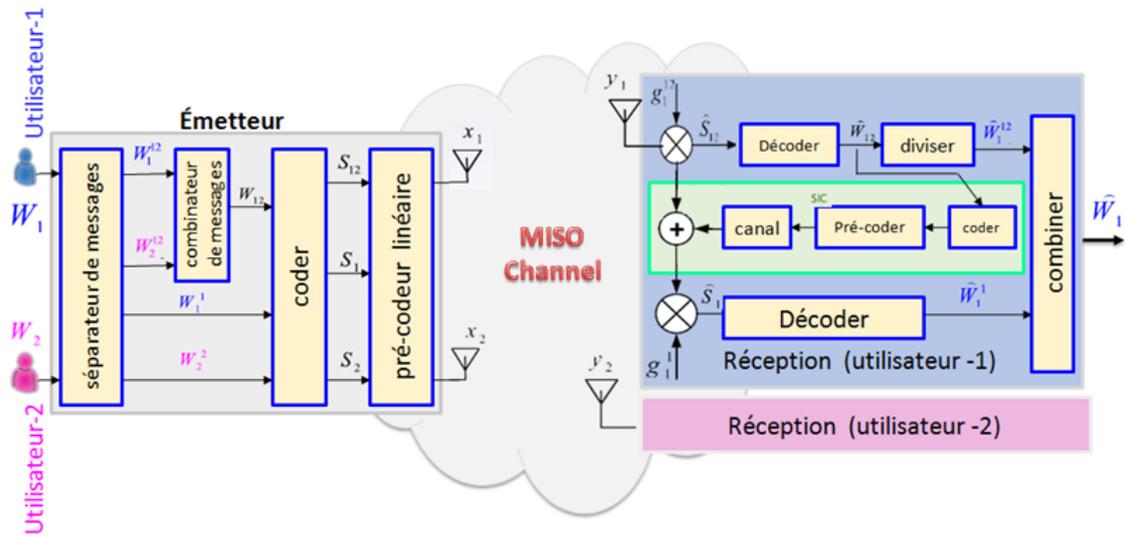


FIGURE C.6 – Système MISO à deux utilisateurs exploitant RSMA [Gam+21].

Bibliographie

- [NGJ06] D NOGULIC, M GADZE et A JANKOVIC. « Multicarrier modulation in advanced wireless communication systems ». In : *Proceedings ELMAR 2006*. IEEE. 2006, p. 175-179.
- [Vih+09] Ari VIHOLAINEN et al. « Prototype filter design for filter bank based multicarrier transmission ». In : *2009 17th European Signal Processing Conference*. IEEE. 2009, p. 1359-1363.
- [Bel+10] Maurice BELLANGER et al. « FBMC physical layer : a primer ». In : *PHYDYAS, January 25.4* (2010), p. 7-10.
- [SGA13] Alphan SAHIN, Ismail GUVENC et Huseyin ARSLAN. « A survey on multicarrier communications : Prototype filters, lattice structures, and implementation aspects ». In : *IEEE communications surveys & tutorials* 16.3 (2013), p. 1312-1338.
- [ACF14] Pooyan AMINI, Rong-Rong CHEN et Behrouz FARHANG-BOROUJENY. « Filterbank multicarrier communications for underwater acoustic channels ». In : *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 40.1 (2014), p. 115-130.
- [Bou+14] Hanen BOUHADDA et al. « Theoretical analysis of BER performance of nonlinearly amplified FBMC/OQAM and OFDM signals ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2014.1 (2014), p. 1-16.
- [Far14] Behrouz FARHANG-BOROUJENY. « Filter bank multicarrier modulation : A waveform candidate for 5G and beyond ». In : *Advances in Electrical Engineering* 2014 (2014).
- [Lar+14] Erik G LARSSON et al. « Massive MIMO for next generation wireless systems ». In : *IEEE communications magazine* 52.2 (2014), p. 186-195.
- [VCS14] Nisha VARGHESE, Job CHUNKATH et VS SHEEBA. « Peak-to-average power ratio reduction in FBMC-OQAM system ». In : *2014 Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications*. IEEE. 2014, p. 286-290.
- [Ngo15] Hien Quoc NGO. *Massive MIMO : Fundamentals and system designs*. T. 1642. Linköping University Electronic Press, 2015.
- [Ser15] M SERIES. « IMT Vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond ». In : *Recommendation ITU 2083* (2015), p. 21.

- [Cle+16] Bruno CLERCKX et al. « Rate splitting for MIMO wireless networks : A promising PHY-layer strategy for LTE evolution ». In : *IEEE Communications Magazine* 54.5 (2016), p. 98-105.
- [Gao+16] Xinyu GAO et al. « Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays ». In : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 34.4 (2016), p. 998-1009.
- [MRD16] Shahid MUMTAZ, Jonathan RODRIGUEZ et Linglong DAI. *MmWave massive MIMO : a paradigm for 5G*. Academic Press, 2016.
- [Ali+17] Ehab ALI et al. « Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G : overview, classification, and trends for future research ». In : *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* 18.6 (2017), p. 753-772.
- [HF17] Noha HASSAN et Xavier FERNANDO. « Massive MIMO wireless networks : An overview ». In : *Electronics* 6.3 (2017), p. 63.
- [KS17] Parnika KANSAL et Ashok Kumar SHANKHWAR. « FBMC vs OFDM waveform contenders for 5G wireless communication system ». In : *Wireless Engineering and Technology* 8.4 (2017), p. 59-70.
- [Ram17] Ali Jasim RAMADHAN. « Implementation of 5G FBMC PHYDYAS prototype filter ». In : *International Journal of Applied Engineering Research* 12.23 (2017), p. 13476-13481.
- [Ahm+18] Irfan AHMED et al. « A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G : Architecture and System Model Perspectives ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 20.4 (2018), p. 3060-3097.
- [AAQ19] Thierry Blaise Taih Coffi AKA, Amevi ACAKPOVI et Kester QUIST-APHETSI. « Performance Evaluation of FBMC Compared to OFDM by Simulation with Matlab ». In : *2019 International Conference on Computing, Computational Modelling and Applications (ICCA)*. IEEE. 2019, p. 51-518.
- [AAA19] Joseph Kweku ARTHUR, Thierry Blaise Taih Coffi AKA et Amevi ACAKPOVI. « Comparative analysis of orthogonal frequency division modulation and filter bank-based multicarrier modulation ». In : *2019 International Conference on Communications, Signal Processing and Networks (ICCSPN)*. IEEE. 2019, p. 1-10.
- [Hu+19] Jingying HU et al. « Performance Analysis of OFDM and FBMC ». In : *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. T. 677. 3. IOP Publishing. 2019, p. 032001.
- [Kun+19] Srikanth KUNDRAPU et al. « Characteristic analysis of OFDM, FBMC and UFMC modulation schemes for next generation wireless communication network systems ». In : *2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. IEEE. 2019, p. 715-721.
- [VDP19] Mojtaba VAEZI, Zhiguo DING et H Vincent POOR. *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*. T. 159. Springer, 2019.

- [CA20] Robin CHATAUT et Robert AKL. « Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction ». In : *Sensors* 20.10 (2020), p. 2753.
- [Diz+20] Onur DIZDAR et al. « Rate-splitting multiple access : A new frontier for the PHY layer of 6G ». In : *2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall)*. IEEE. 2020, p. 1-7.
- [SCW20] Prateek Saurabh SRIVASTAV, Lan CHEN et Arfan Haider WAHLA. « On the performance of efficient channel estimation strategies for hybrid millimeter wave MIMO system ». In : *Entropy* 22.10 (2020), p. 1121.
- [Alb+21] Mahmoud A ALBREEM et al. « Overview of precoding techniques for massive MIMO ». In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 60764-60801.
- [BSB21] MY BENDIMERAD, S SENHADJI et FT BENDIMERAD. « Prototype Filters and Filtered Waveforms for Radio Air-Interfaces : A Review ». In : *arXiv preprint arXiv :2104.01373* (2021).
- [Gam+21] Safaa GAMAL et al. « Multiple access in cognitive radio networks : from orthogonal and non-orthogonal to rate-splitting ». In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 95569-95584.
- [Keb+22] Tewelgn KEBEDE et al. « Precoding and Beamforming Techniques in mmWave-Massive MIMO : Performance Assessment ». In : *IEEE Access* 10 (2022), p. 16365-16387.
- [LH22] Gayatri D LONDHE et Vaibhav S HENDRE. « Review on Beamforming Techniques for Millimeter Wave Massive MIMO ». In : *Proceedings of the International e-Conference on Intelligent Systems and Signal Processing*. Springer. 2022, p. 291-303.
- [NC] A NORDRUM et K CLARK. « IEEE Spectrum Staff.(2017)‘5G Bytes : Full Duplex Explained’ ». In : *IEEE Spectrum* 1 ().

Webographie

- [5g-] 5G-INDONESIA. *Penjelasan Lengkap Massive MIMO 5G*. URL : <https://www.5g-indonesia.com/2020/08/penjelasan-lengkap-massive-mimo-5g.html>.
- [Anf] ANFR. *Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G*. URL : <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expance/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf>.
- [BOU] LOUIS BOURDEAUT. *Les ondes millimétriques et la 5G : une nouvelle dimension pour la téléphonie mobile*. URL : <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2021/06/les-ondes-millimetriques-et-la-5g-une-nouvelle-dimension-pour-la-telephonie-mobile/>.
- [Cas] Clement CASCARINO. *5G, la pièce manquante à nos écosystèmes numériques*. URL : <https://www.digitalcorner-wavestone.com/2018/04/5g-piece-manquante-a-nos-ecosystemes-numeriques/>.
- [Con] TechTarget CONTRIBUTOR. *multi-carrier modulation (MCM)*. URL : <https://www.techtarget.com/whatis/definition/multi-carrier-modulation-MCM>.
- [ele] ELECTRONICSNOTES. *Filter Bank Multicarrier Modulation, FBMC Tutorial*. URL : <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/multicarrier-modulation/fbmc-filter-bank-multicarrier.php>.
- [FRA] RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. *LES ENJEUX DE LA 5G*. URL : https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-enjeux-5G_mars2017.pdf.
- [Fra] FRANDROID. *Réseaux 5G, déploiement, fonctionnement, usages et smartphones compatibles en france*. URL : https://www.frandroid.com/telecom/488716_reseau-5g-tout-ce-qui-va-changer-quels-usages-et-pourquoi-la-technologie-est-importante.
- [ITU] ITU. *5G – Les technologies mobiles de cinquième génération*. URL : <https://www.itu.int/fr/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>.
- [Met] METASWITCH. *What is 5G beamforming, beam steering and beam switching with massive MIMO*. URL : <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo>.

- [pra] j PRADO. *Bancs de filtres*. URL : <https://studylibfr.com/doc/968674/polycopi%C3%A9--bancs-de-filtres->.
- [Qor] QORVO. *How Carrier Networks Will Enable 5G*. URL : <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/how-carrier-networks-will-enable-5g>.
- [Rem] Harald REMMERT. *Qu'est-ce que l'architecture de réseau 5G ?* URL : <https://fr.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>.
- [Res] RESEAU5G. *L'ARCHITECTURE 5G*. URL : <http://www.reseau5g.info/le-deploiement-de-la-5g/>.
- [RS] ROHDE et SCHWARZ. *Avantages des solutions de test Rohde and Schwarz 5G*. URL : https://www.rohde-schwarz.com/cz/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/cellular-standards/5g-test-and-measurement/embb/5g-wideband-signals/5g-wideband-signals_229599.html.
- [Sfr] SFRBUSINESS. *COMPRENDRE LES TERMES ET LES DÉFINITIONS DE LA 5G*. URL : <https://www.sfrbusiness.fr/a-propos/reseaux-haut-debit/definitions-5g/>.
- [Zha] Houlin ZHAO. *ouvrir la voie à la 5G*. URL : https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2017/2017-02/2017_ITUNews02-fr.pdf.

Résumé

Le passage à une nouvelle génération des systèmes de communication radio mobiles (5G) est le seul moyen de répondre aux besoins actuels des utilisateurs et de l'industrie exigeant un débit de données plus élevé, une meilleure qualité de service et une faible latence. Face à cette demande la 5G exploite une multitude de nouvelles technologies, d'équipements compatibles et de techniques habilitantes. La 5G utilise des systèmes de transmission de type massive MIMO composés d'un grand nombre d'antennes à l'émission assurant un débit et une efficacité spectrale accrus. Ces antennes sont dites intelligentes car grâce au beamforming elles sont capables de concentrer les signaux dans des directions spécifiques produisant ainsi un gain d'énergie significatif. De plus de nouvelles formes d'onde sont nécessaires pour répondre à ces défis, car le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) n'est pas efficace en raison de sa fuite spectrale et de l'inefficacité de sa bande passante due à l'utilisation du préfixe cyclique (CP). La multiporteuse à bancs de filtres (FBMC) est l'une des meilleures concurrentes qui surpasse les limites de l'OFDM en utilisant des filtres prototype et une modulation d'amplitude en quadrature décalée (OQAM). En outre une nouvelle technique d'accès a été développée dans le cadre de la 5G appelée accès multiple à répartition de débit (RSMA) qui est plus puissante pour les systèmes multi-antennes. Le but de ce travail est d'étudier la technique FBMC et de montrer qu'elle est susceptible de répondre aux exigences de la 5G, pour cela nous réaliserons une étude et une simulation comparative entre OFDM et FBMC-OQAM. Des paramètres tels que la densité spectrale de puissance (PSD), le spectre de sous-porteuses, l'efficacité spectrale, le facteur de crête (PAPR) et le taux d'erreur binaire (BER) seront comparés.

Abstract

Moving to a new generation of mobile radiocommunication systems (5G) is the only way to meet the current needs of users and industry requiring higher data rate, better quality of service and low latency. In response to this demand, 5G exploits a multitude of new technologies, compatible equipments and enabling techniques. 5G uses massive MIMO transmission systems composed of a large number of Transmit antennae providing increased data rate and spectral efficiency. These antennas are said to be intelligent because thanks to beamforming they are able to concentrate signals in specific directions thus producing a significant energy gain. In addition, new waveforms are needed to meet these challenges. because Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is not effective because of its spectral leakage and the inefficiency of its bandwidth due to the use of the cyclic prefix (CP). Multi Carrier Filter Bank (FBMC) is one of the best competitors that surpasses the limits of OFDM by using prototype filters and Offset Quadrature Amplitude Modulation (OQAM). Moreover, a new access technique has been developed as part of 5G called Rate Splitting Multiple Access (RSMA) that is more powerful for multi-antenna systems, this one consequently offers improved data rate and less complexity. The purpose of this work is to study the FBMC technique and show that it is likely to meet the requirements of 5G, for this we will carry out a study and a comparative simulation between OFDM and FBMC-OQAM. Parameters such as power spectrum density (PSD), subcarrier spectrum, spectral efficiency, peak to average power ratio (PAPR) and binary error rate (BER) will be compared.