



République Algérienne Démocratique et Populaire

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



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de**

MASTER ACADEMIQUE

**Domaine : Technologie
Filière : Télécommunications
Spécialité : Systèmes de télécommunications**

Thème

**ETUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTES
FORMES D'ONDES DE LA 5^{ÈME} GÉNÉRATION**

Présenté Par :

AOUADI Mohammed Said, DERDAKH Larbi et GHERAISSA Idris

Devant les jurys :

KHELIL Abdelatif	MCA	Encadreur
GHENDIR Said	MCA	Président
HIMA Abdelkader	MAA	Examineur

2019-2020

Dédicace

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

Je dédie ce mémoire à :

A ma famille

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

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

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

Remerciement

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

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

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

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

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

Résumé :

Ce travail présente une comparaison entre les performances des formes d'onde 5G sur un canal à évanouissement rapide (Véhicule A). La forme d'onde a toujours été un facteur critique pour répondre aux exigences de la prochaine génération en tenant compte des nouveaux défis qui sont présentés et attendus dans le futur. Pour répondre aux nouvelles demandes soulevées par l'avènement de l'Internet des objets (IoT) et la diversité des services nécessaires aux utilisateurs de la prochaine génération (5G), FBMC-OQAM est étudié. Une comparaison est effectuée avec l'OFDM conventionnel et l'OFDM filtré basé sur la densité spectrale de puissance (PSD) et le taux d'erreur binaire (BER). Les trois filtres prototypes : RRC, Phydyas et Hermite sont utilisés pour le FBMC et le filtre Sinc avec fenêtre de Hamming est utilisé pour le F-OFDM. Les résultats de la simulation confirment que le FBMC-OQAM présente le meilleur BER et l'efficacité spectrale sur OFDM et F-OFDM.

Mots clés : 5G, F.O, OFDM, FBMC, UFMC, GFDM, DSP, F-OFDM, FBMC-OQAM, BER.

Abstract:

This work presents a comparison between performances of 5G waveforms over a fast fading channel (Vehicular A). The waveform has always been a critical factor in meeting the next generation's requirements by taking into account the new challenges that are presented and expected in the future. To meet the new demands raised by the advent of the Internet of Things (IoT) and the diversity of services needed by next generation users (5G), FBMC-OQAM is studied. A comparison is performed with conventional OFDM and Filtered OFDM based on Power Spectral Density (PSD) and Bit Error Rate (BER). The three prototype filters: RRC, Phydyas and Hermite are used for FBMC and Sinc filter with Hamming window is used for F-OFDM. The simulation results confirm that the FBMC-OQAM present the best BER and spectral efficiency over OFDM and F-OFDM.

Keywords: 5G, F.O, OFDM, FBMC, UFMC,GFDM, DSP , F-OFDM,

ملخص:

يقدم هذا العمل مقارنة بين أداء أشكال موجة G5 على قناة (Véhicule A). لطالما كان شكل الموجة عاملاً حاسماً في تلبية متطلبات الجيل القادم مع الأخذ في الاعتبار التحديات الجديدة التي يتم تقديمها والمتوقعة في المستقبل. لتلبية الطلبات الجديدة التي أثارها ظهور إنترنت الأشياء (IoT) وتنوع الخدمات التي يحتاجها مستخدمي الجيل القادم ، يتم تقديم FBMC-OQAM. تم إجراء مقارنة مع OFDM التقليدي و F-OFDM بناءً على الكثافة الطيفية للقوة (PSD) ومعدل خطأ البتات (BER). يتم استخدام المرشحات النموذجية الثلاثة: RRC و Phydyas و Hermite من أجل FBMC ويستخدم مرشح Sinc مع نافذة Hamming لـ F-OFDM. تؤكد نتائج المحاكاة أن FBMC-OQAM يعرض أفضل معدل BER وكفاءة طيفية على OFDM و F-OFDM.

Table des Matières

<i>Dédicace</i>	I
<i>Remerciement</i>	II
Résumé :.....	III
Table des Matières	III
LISTE DES FIGURE	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES ACRONYMES	XIII
INTRODUCTION GENERALE	2

CHAPITRE I LE RESEAU 5G

I.1. Introduction :.....	5
I.2. Evolution des différentes générations vers la cinquième génération :.....	5
I.3. Objectifs de la technologie 5G.....	6
I.4. Les indicateurs de performance :.....	7
I.5. Structure de la trame 5G :.....	8
I.5.1. Bloc de ressources NR :.....	9
I.5.2. Bande passante du canal 5G NR :	9
I.6. Architecture de la 5G :.....	10
I.6.1. Applications :.....	11
I.6.2. Le service innovant :.....	11
I.7. La virtualisation (Radio Hyper-Connecté) :.....	12
I.7.1. Ondes millimétriques :.....	12
I.7.2. Inconvénients des ondes millimétriques :.....	13
I.7.3. Les communications full duplex :	13
I.7.4. Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) :	13

I.8. Formes d'ondes spécifiques pour la 5G :	14
I.9. Technique d'accès :	15
I.9.1. Multiplexage NOMA :	15
I.10. Modulations:	16
I.11. Conclusion :	16

CHAPITRE II LES FORMES D'ONDES CONDIDATES POUR 5G

II.1. Introduction :	18
II.2. Classification des formes d'ondes multi-porteuses:	18
II.3. Caractéristiques des formes d'ondes multi-porteuses:	19
II.3.1. Facteur de crête (PAPR) :	19
II.3.2. Rayonnements hors bande (Out Of Band (O.O.B)):	19
II.4. Technique OFDM:	20
II.4.1. Principe et fonctionnement de l'OFDM :	20
II.4.2. Orthogonalité des sous-porteuses :	22
II.4.3. Préfixe cyclique :	23
II.4.4. Implantation numérique de l'OFDM :	24
II.4.5. Limitations de l'OFDM :	25
II.5. Technique FBMC :	26
II.5.1. Introduction :	26
II.5.2. Bancs de filtres :	26
II.5.3.Principe générale:	27
II.5.4.FBMC/OQAM:	28
II.6.Technique UFMC:	31
I.6.1.Modèle de système UFMC:	31
II.6.2.Structure d'émetteur UFMC :	32
II.6.3.Structure d'un récepteur UFMC :	33
II.6.4.Conception du filtre pour UFMC :	34
II.7.Technique F-OFDM :	35

II.7.1.Architecture de la F-OFDM :	35
II.7.2.Structure d'émetteur-récepteur F-OFDM:	36
II.8.Technique GFDM :	38
II.8.1.Principe de GFDM :	38
II.8.2.Description mathématique :	40
II.8.3.Les caractéristiques de GFDM :	40
II.9.Conclusion :	41
CHAPITRE III SIMULATIONS ET RÉSULTATS	
III.I .Introduction:	43
III.2.Modèle de simulation :	435
III3. Simulation et résultats:	45
III.3.1. Taux d'erreur binaire (BER):	46
III.3.2. Densité spectrale de puissance (DSP):	47
III.4. Conclusion :	48
CONCLUSION GENERALE	50
Bibliographies	52

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I Le RESEAU 5G

Figure I- 1 : Vision globale des objectifs fixés par la 5G à l’horizon 2020 [4]	7
Figure I- 2 : Organisation des trames dans la 5G-NR	8
Figure I- 3 : Espacement des SP pour chaque numéologie.....	9
Figure I- 4 : Bande passante du canal de la 5G [7]	10
Figure I- 5 : Architecture de la 5G [8]	10
Figure I- 6 : Domaines d’application de l’IoT	11
Figure I- 7 : Ondes millimétriques	12
Figure I- 8 : La technologie Full Duplex.....	13
Figure I- 9 : Massive MIMO	14
Figure I- 10 : NOMA ET OMA	15

CHAPITRE II LES FORMES D’ONDES CONDIDATES POUR 5G

Figure II- 1 : Principe de l’OFDM	20
Figure II- 2 : Schéma de principe d’un modulateur	21
Figure II- 3 : Schéma du principe du démodulateur OFDM	22
Figure II- 4 : Principe du préfixe cyclique	23
Figure II- 5: Intervalle de garde des symboles OFDM	23
Figure II- 6 : Modulateur OFDM numérique.	25
Figure II- 7 : Démodulateur OFDM numérique.....	25
Figure II- 8 : Architecture d’un banc de filtre.	26
Figure II- 9 : Configuration du system sous-band et de trans-multiplexeur [20].....	27
Figure II- 10 : Schéma block Filter Bank Multi Carrier FBMC[21].....	27
Figure II- 11 : Architecture d’un émetteur FBMC	28
Figure II- 12 : Architecture d’un récepteur FBMC	28
Figure II- 13 Répartition des symboles OFDM et FBMC/OQAM selon les sous- porteuses.....	29
Figure II- 14 : Réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS avec M=16.....	30
Figure II- 15 : Un émetteur-récepteur à porteuse multiples avec des bancs de filtres	31
Figure II- 16 montre le schéma fonctionnel de l’émetteur-récepteur UFMC [31].....	32
Figure II- 17 Structure générale de l’émetteur UFMC.....	33
Figure II- 18 : Structure générale du récepteur UFMC	34
Figure II- 19 : la réponse temporelle et fréquentielle du filtre	35
Figure II- 20 : émetteur F-OFDM	36

LISTE DES FIGURES

Figure II- 21 : Récepteur F-OFDM	37
Figure II- 22 : Réponse impulsionnelle du filtre	38
Figure II- 23 : Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM [38].	39
Figure II- 24 : Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé [39].....	39
CHAPITRE III SIMULATIONS ET RÉSULTATS	
Figure III- 1 : modèle de simulation de technique FBMC-OQAM[40]	43
Figure III- 2: Modèle de modulation de technique F-OFDM[41].....	44
Figure III- 3 : Comparaison BER entre OFDM,F-OFDM et FBMC-OQAM pour 64 QAM[42]	45
Figure III- 4 :ComparaisonBERentreOFDM,F-OFDM et FBMC-OQAM pour 256 QAM[43] ..	45
Figure III- 5 : ComparaisonPSDentreOFDM,F-OFDM et FBMC-OQAM pour filtre RRC[44] .	46
Figure III-6:Comparaison DSP entre OFDM, F-OFDM et FBMC-OQAM pour filtre PHYDAS[45].....	47
Figure III- 7 : Comparaison PSD entre OFDM, F-OFDM et FBMC-OQAM pour filtre Hermite.[46]	47

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

N°	Tableau	Page
I-1	Description détaillée des diverses générations précédentes	5
I-2	Les huit indicateurs de performance comparés entre 4G et 5G	7
II-1	Classification des FO candidates en fonction de la condition d'orthogonalité.	18
II-3	Résumé des éléments de conception possibles	33
III.1	Paramètres de simulation	48

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES ACRONYMES

➤ ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
➤ LTE	Long Term Evolution
➤ LTE-A	Long Term Evolution - Advanced
➤ WLAN	wireless local-area network.
➤ WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
➤ DAB	Digital Audio Broadcasting
➤ DVBT	Digital Audio Broadcasting Terrestrial
➤ 1G	1 ^{ère} Génération
➤ 2G	2 ^{ème} Génération
➤ 3G	3 ^{ème} Génération
➤ 4G	4 ^{ème} Génération
➤ 5G	5 ^{ème} Génération
➤ DSP	Densité Spectrale de Puissance
➤ FDMA	Frequency Division Multiple Access
➤ TVHD	High Definition Television
➤ MIMO	Multiple-in, Multiple-out
➤ IMT	International Mobile Telecommunications
➤ UIT-R	International Telecommunication Union Radiocommunication
➤ IoT	Internet of things
➤ KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
➤ UIT	Union Internationale de Telecommunication
➤ UL	Up link
➤ DL	Down Link
➤ NR	New Radio
➤ RB	Ressource Bloc
➤ SP	Sous porteuse
➤ WIFI	Wireless Fidelity
➤ QoE	Quality of Experience
➤ FDD	Frequency Division Duplexed
➤ TDD	Time Division Duplexed
➤ NOMA	Non-orthogonal multiple access
➤ SCAM	Service Common Application Model
➤ CDMA	Code Division Multiple Access
➤ QAM	Quadrature Amplitude Modulation
➤ OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
➤ FO	Forme D'onde
➤ FBMC	filter bank multi carrier
➤ F-OFDM	Filtred- Orthogonal Frequency Division Multiplexing

LISTE DES ACRONYMES

➤ GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
➤ UFMC	Universal Filtered Multi Carrier
➤ CP	Préfixe cyclique
➤ GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
➤ OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
➤ WOLA	WebSphere Optimized Local Adapter
➤ WCP-COQAM	Windowed Cyclic Prefix
➤ PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
➤ AP	Port Adapter
➤ O.O.B	Out Of Band
➤ ICI	Inter-Carrier Interfaces
➤ ISI	Inter-symbol Interference
➤ ZP	Zero Padding
➤ IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
➤ FFT	Fast Fourier Transform
➤ FIR	Flight Information Region
➤ AFB	Analysis Filter Bank
➤ SFB	Sequential Frequency Band
➤ ITT	International Telephone and Telegraph

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement de nouvelles technologies de réseau mobile est toujours en progression. Dans un monde fortement interconnecté, la demande de protocoles de communication de plus en plus efficaces et performants est inévitable. Ainsi, de nombreux acteurs de télécommunications se préparent pour être les premiers à offrir à leurs clients la connexion ultra-rapide de la 5ème génération.

Le développement de cette nouvelle génération de réseaux radio-mobiles se base sur plusieurs technologies clés. L'une de ces technologies est le développement de nouvelles formes d'onde post-OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

La forme d'onde est une composante essentielle de toute technologie de communication. Il existe deux catégories principales de formes d'onde : i) formes d'onde à porteuse unique, ii) formes d'onde à porteuses multiples. Le système cellulaire 4G (LTE) utilise une forme d'onde à porteuses multiples. Ces formes d'onde à porteuses multiples sont également utilisées dans les normes ADSL, de réseau local sans fil (WLAN), de WiMAX, de diffusion audio numérique (DAB) et de diffusion numérique terrestre (DVBT).

En règle générale, les formes d'onde à porteuse unique ont un rapport de puissance crête sur moyenne (PAPR) faible, ce qui les rend écoénergétiques - adaptées aux scénarios de couverture limitée et à l'allongement de la durée de vie de la batterie des équipements de l'utilisateur. D'autre part, les formes d'onde multi-porteuses offrent une efficacité spectrale élevée, une allocation de ressources flexible dans le domaine des fréquences et, éventuellement, une intégration facile avec la technologie multi-antennaire. Ce sont là les principales clés de la 5G.

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement des formes d'onde candidates à une utilisation dans la 5G. Principalement cinq formes d'ondes sont étudiées : la CP-OFDM (Cyclic Prefix- OFDM), la FBMC (Filter Bank Multi-Carrier) et l'UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier). la F-OFDM (Filtered- OFDM), la GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing)

Notre travail est structuré comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale des nouvelles technologies radio-mobile de la 5ème génération. Dans ce contexte nous présentons un historique de l'évolution des réseaux mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G. Par la suite, nous développons les points essentiels de la 5G. Nous terminerons ce chapitre par une présentation des technologies clés des réseaux 5 G.

Le deuxième chapitre présente une étude des formes d'onde CP-OFDM, FBMC, F-OFDM, GFDM et UFMC. Dans ce cadre nous présentons les principales caractéristiques de ces formes d'onde, notamment le facteur de crête (PAPR) et le rayonnement hors bande (OOB). Les différents émetteurs-récepteurs utilisés pour chaque forme d'onde sont aussi exposés.

Dans le troisième chapitre, nous comparons les performances du FBMC-OQAM avec l'OFDM et l' F-OFDM. Pour cela, nous utilisons la densité spectrale de puissance (PSD) et le taux d'erreur binaire (BER) comme métriques pour atteindre notre objectif.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Enfin, nous concluons notre mémoire par une conclusion générale avec quelques perspectives.

CHAPITRE I

Le RESEAU

5G

CHAPITRE I :Le RESEAU 5G**I.1. Introduction :**

La technologie dans le domaine de la téléphonie mobile n'a pas cessé de se développer depuis plusieurs décennies, poussée par l'évolution des modes de vie et la demande des individus. En effet, le comportement des individus en société n'a fait qu'évoluer, et l'utilisation de leurs téléphones portables aussi. C'est pourquoi de nombreux spécialistes et ingénieurs ont travaillé ardemment pour faciliter nos transferts de données. Par conséquent, à l'ère de la mondialisation où plus de la moitié des échanges se font par itinérance, il est impossible pour nous de communiquer autrement que par réseau internet. Celui-ci est devenu indispensable puisqu'il nous permet d'effectuer des achats en ligne, faire de nombreuses recherches quelconques et de nombreuses autres options.

Dans ce chapitre nous présentons un bref historique de l'évolution des réseaux mobiles à partir de la première génération jusqu'à la cinquième génération (5G). Une attention plus particulière est portée sur la 5G avec la présentation des technologies clés pour cette nouvelle évolution des réseaux mobiles.

I.2. Evolution des différentes générations vers la cinquième génération :

En seulement 20 ans, le monde a connu un changement profond en passant par les quatre générations. Ces générations font référence à un changement soit de débit, de technologie, de fréquence, de capacité de donnée, de latence.

- La technologie 1G étaient analogiques avec très faibles niveaux d'efficacité et de sécurité, basé sur la communication du circuit et modulé en fréquence avec l'accès multiple de division de fréquence (FDMA).
- La 2G est une technologie numérique qui prend en considération nouvelles fonctionnalités on cite la messagerie texte et les communications à bas débit « 1G et 2G donnent finalement l'accès à la téléphonie mobile a tout le monde ».
- Pareillement, la 3G fournit un taux de transmission de données à haute vitesse allant jusqu'à 14 Mb/s, une capacité accrue et amélioré grâce à l'utilisation de commutation de paquets [1].
- La technologie LTE est considérée comme la technologie 4G release 10. Elle repose sur une technologie entièrement IP capable de fournir des débits de donnée allant jusqu'à 1Gbps via l'utilisation d'une nouvelle technique d'accès OFDM qui lutte contre les interférences. Cette technologie offre des divers services multimédia la télévision mobile, TVHD, la radiodiffusion vidéo numérique. La technologie LTE-Advanced est l'évolution du réseau LTE de la 4G. Parmi les caractéristiques de cette technologie : des améliorations dans les réseaux hétérogènes, l'agrégation de porteuses, l'émission et la réception multipoints coordonnés, l'utilisation de la technologie d'antenne MIMO.

• La 4G actuellement se dirige vers la phase de normalisation, donc, il faut déjà réfléchir à introduire une nouvelle technologie sous le nom « 5G » qui est tout à fait différente des anciennes générations. Puisque le volume de données mobiles n’a cessé d’évoluer d’une façon exponentielle au cours de ces dernières années où l’immense nombre de transferts de données entre les utilisateurs était un sujet de recherche primordial depuis le début des années 2000.

• En effet, Les prévisions sur le nombre d'appareils connectés d'ici 2021 prévoient qu'il y aura 1,5 appareil Mobile par habitant [2], autrement dit que la croissance du nombre d'appareils mobiles dépassera le nombre de personnes sur terre en 2021. Cette augmentation du aux besoins des utilisateurs à transmettre en termes de débit de plus en plus élevés.

Le tableau I.1 contient une description détaillée des diverses générations déjà cité précédemment.

Génération	Acronyme	Description	Intitulé	Débit indicatif (download) en bits/s
1G	Radiocom 2000		Radiocom 2000 (analogique) de France Télécom, SFR2000 de SFR	analogique
2G	GSM	Échanges de type voix uniquement	Global System for Mobile Communication	9,05 kbps
2.5G	GPRS	Échange de données ou (exclusif) voix	Global Packet Radio Service	171,2 kbps
2.75G	EDGE	Basé sur réseau GPRS existant	Enhanced Data Rate for GSM Evolution	384 kbps
3G	UMTS	Voix + données	Universal Mobile Telecommunications System	144 kbps rurale, 384 kbps urbaine, 1,9 Mbps point fixe
3.5G	HSPA	Évolution de l'UMTS	High Speed Packet Access (HSDPA/HSUPA)	14,4 Mbps
3.75G	HSPA+ Dual Carrier	Évolution de l'UMTS	High Speed Packet Access +	42 Mbps
4G	LTE		Long Term Evolution	150 Mbps
4G ou 4G+	LTE-Advanced	Agrégation de spectre	Long Term Evolution Advanced	1 Gbps à l'arrêt, 100 Mbps en mouvement

Tableau I- 1 : Description détaillée des divers générations précédentes [3]

I.3. Objectifs de la technologie 5G

Cadre de développement futur des IMT en 2020 (figure I-2) et au-delà où une description détaillée est fournie dans la Recommandation UIT-R, selon laquelle les IMT devraient Continuer à contribuer à la réalisation des objectifs suivants :

- ✓ Le temps de latence de bout en bout est réduit d'un facteur 10, le niveau de latence est inférieur à 1 milliseconde.
- ✓ Débit élevé, 1000 fois supérieur par unité de surface (1 Gb par seconde)

- ✓ Les appareils à faible consommation d'énergie ont une durée de vie de la batterie 10 fois plus longue et une consommation d'énergie moindre
- ✓ Augmentation de 10 fois la densité de connexion : connectivité Internet (IoT)
- ✓ Peu complexe et surcharge de signal.
- ✓ Triple efficacité du spectre : utilisation optimisée de la bande passante - Réseau économe en énergie
- ✓ La capacité de trafic a été multipliée par 100 : réseaux denses avec plus de points d'accès partout.

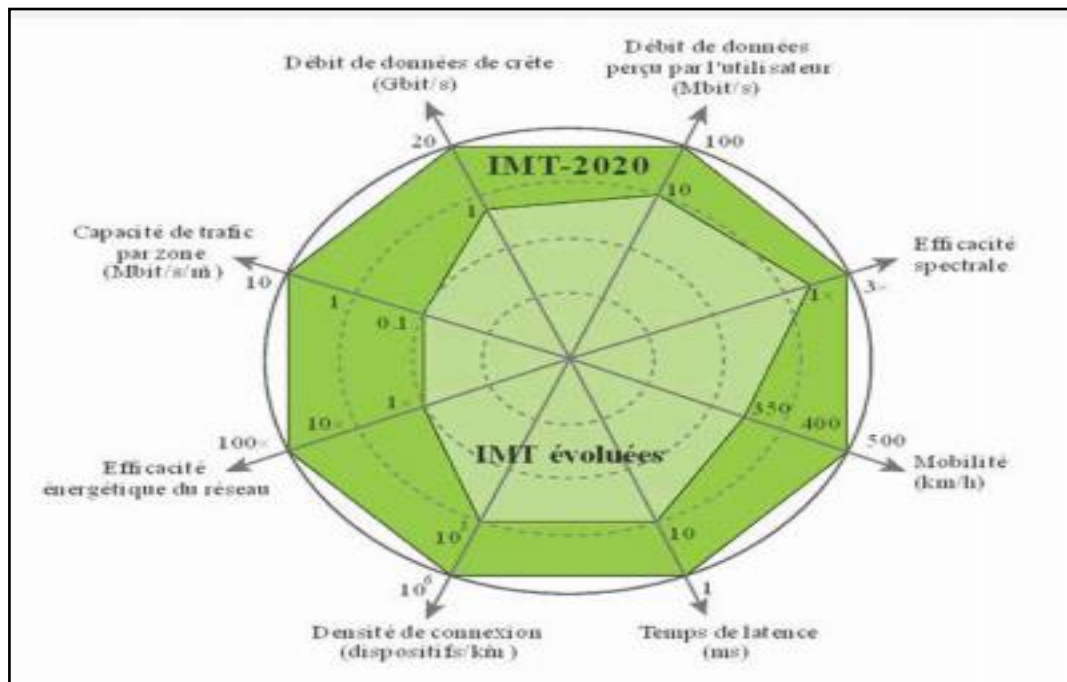


Figure I- 1 : Vision globale des objectifs fixés par la 5G à l'horizon 2020 [4]

I.4. Les indicateurs de performance :

L'UIT a désigné huit indicateurs de performance (KPI), quantifié et mesuré les caractéristiques du système IMT-2020 dans la cinquième génération où cinq nouveaux indicateurs ont été définis et qui sont encore à l'étude : Fiabilité, temps d'interruption de la mobilité, bande passante et l'efficacité spectrale [5].

Le tableau 2 compare les huit indicateurs de performance entre la 4G et la 5G.

Performances/Génération	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale	1x	3x
Vitesse (km/h)	350	500
Latence (ms)	10	1
Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km ²)	10 ⁵	10 ⁶
Efficacité énergétique du réseau	1x	100x
Débit sur une zone (Mbit/s/m ²)	0.1	10

Tableau I.2 : Les huit indicateurs de performance comparé entre 4G et 5G [5]

I.5. Structure de la trame 5G :

Les transmissions sur la liaison descendante (DL) et montante (UL) sont organisées en trames où la durée est de 10 ms, ce qui est illustré dans la figure 2, chacune étant divisée en 10 sous-trames de 1 ms. La longueur du slot change en fonction de l'intervalle des sous-porteuses où elle diminue toute fois l'espacement des sous-porteuses s'élargie. Par contre dans le LTE, il n'y a qu'un seul type d'espacement des sous-porteuses égale à 15 kHz.

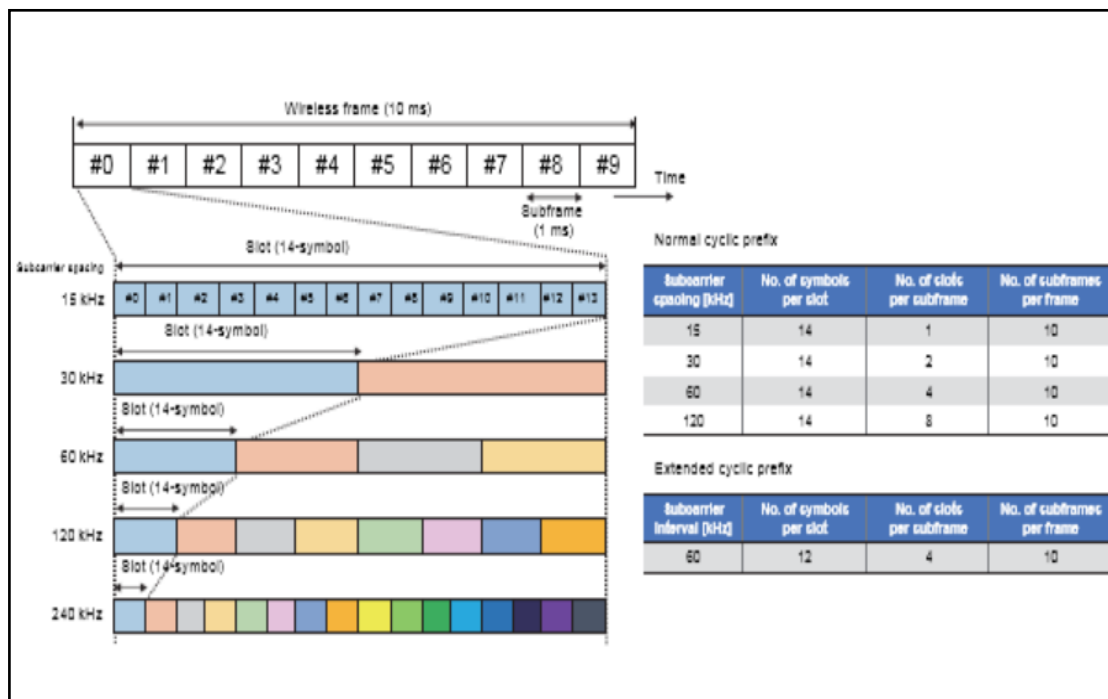


Figure I- 2 : Organisation des trames dans la 5G-NR [5]

I.5.1. Bloc de ressources NR :

Un bloc de ressources NR (RB) est composé généralement de 14 symboles dans le domaine temporel et de 12 sous-porteuses dans le domaine fréquentiel. En fait, RB est réglé sur 180 KHz dans LTE, mais dans NR, il n'est pas fixe où il varie en fonction de l'intervalle de sous-porteuse. La figure 3 montre l'espacement des SP pour chaque numérogie [6].

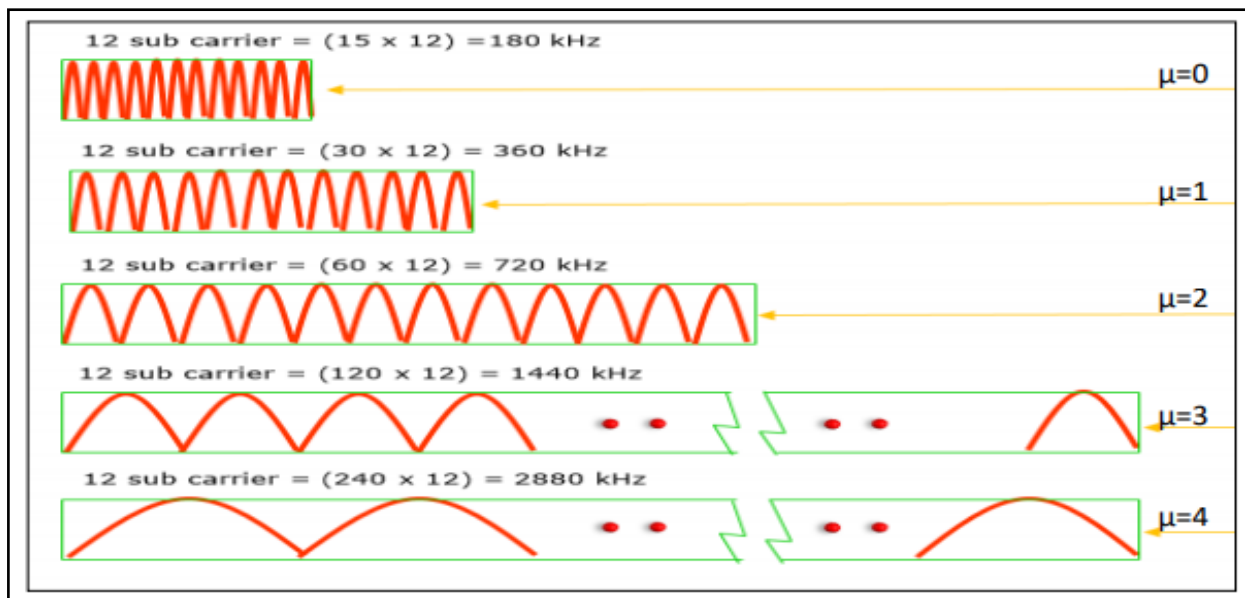


Figure I- 3 : Espacement des SP pour chaque numérogie [6]

I.5.2. Bande passante du canal 5G NR :

Le NR exige l'utilisation d'une largeur de canal de 100 MHz dans la bande de fréquences inférieure à 6 GHz et avec une bande allant à l'environ de 400 MHz dans la gamme des ondes millimétriques. NR est conçu à fournir une efficacité accrue de bande passante allant jusqu'à 90% du LTE (10% de la bande de garde est gaspillée). Chaque numérogie définit le nombre de RB tout en prenant en considération de la largeur de ce dernier. Pour les blocs de ressources, la bande passante du canal peut être calculée, par exemple, en utilisant la formule suivante :

Bande passante du canal

$$(CBW) = N_RB \times N_SP \times \Delta f + 2x BG \quad (1)$$

Avec :

CBW : la bande passante de canal

N_RB : Nombre de ressource block

N_SP : Nombre de sous porteuse égale à 12

BG : la bande de garde

La figure 4 présente la bande passante du canal de la 5G.

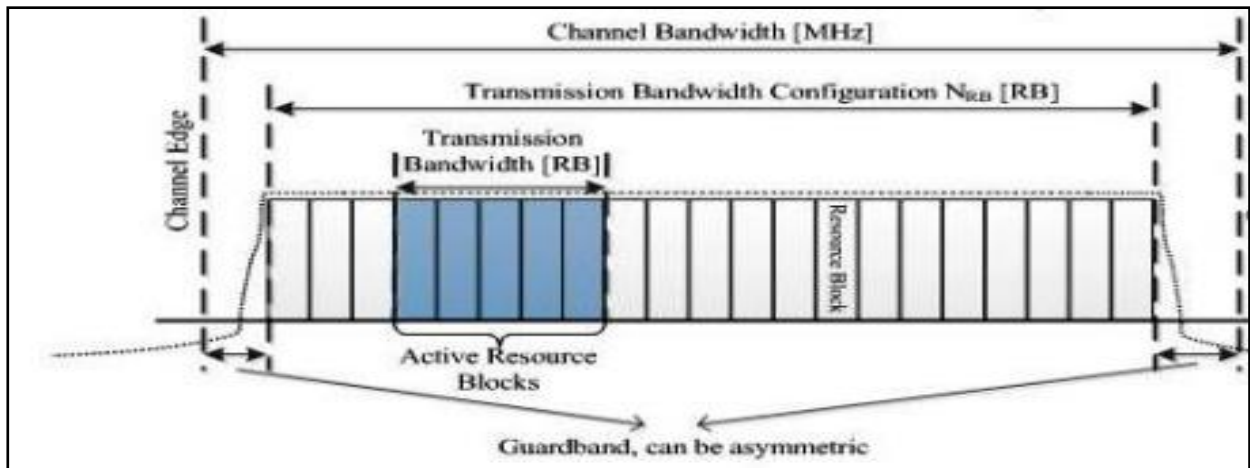


Figure I- 4 : Bande passante du canal de la 5G [7]

I.6. Architecture de la 5G :

L'architecture 5G présentée dans la figure I-5 est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « Applications », « Forwarding » et « La virtualisation », que nous allons décrire dans les sous sections en détail.

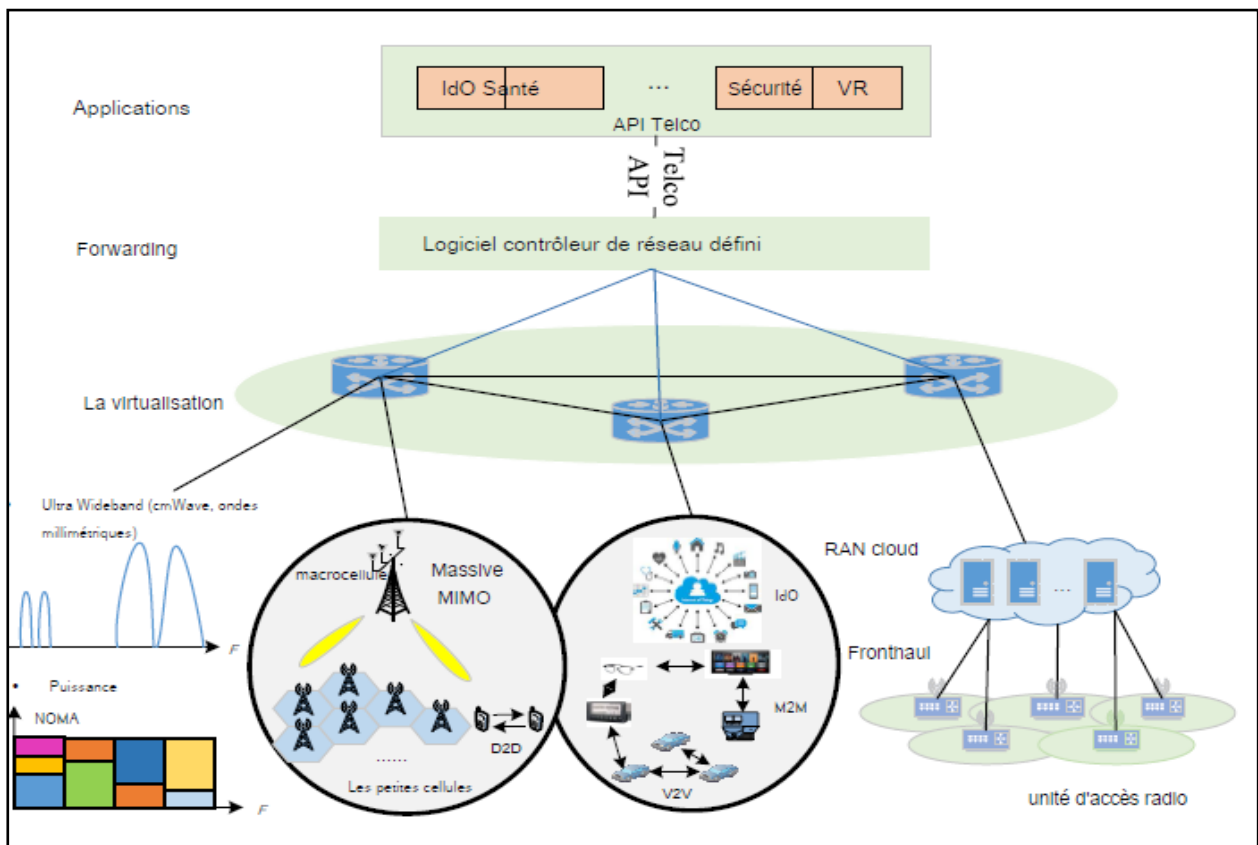


Figure I- 5 : Architecture de la 5G [8]

I.6.1. Applications :

C'est la couche supérieure qui inclut des divers services innovants. La technologie 5G vient de pénétrer dans chaque élément : le développement de la société future et la mise en place d'un écosystème d'information multidimensionnel centré et unifié pour tous. Elle dépassera les limites de temps et d'espace, permettant une expérience utilisateur interactive immersive. La 5G fait raccourci également la distance avec une intégration transparente entre les personnes et tous les objets tout en établissant une interconnexion disponible, facile et intelligente partout et à tout moment. Son application va faire de la vraie zone Wifi mondiale. En effet, la 5G nous offre de concrétiser notre vision : « L'information est juste devant vous et à la portée de main, et tout sera connecté ». Les services 5G fournissent une expérience utilisateur extrêmement fiable. Le streaming vidéo en ultra-haute définition va être un des services dominants qui offre des expériences utilisateur virtuelles telles que le streaming vidéo multi-view, aussi les hologrammes. Comme montre la figure 6 la 5G nous offre, au plus de la fiabilité, une bande passante assez élargie qui facilite la tâche du contrôle des robots à distance et des divers services d'Internet des objets (IoT) [9].

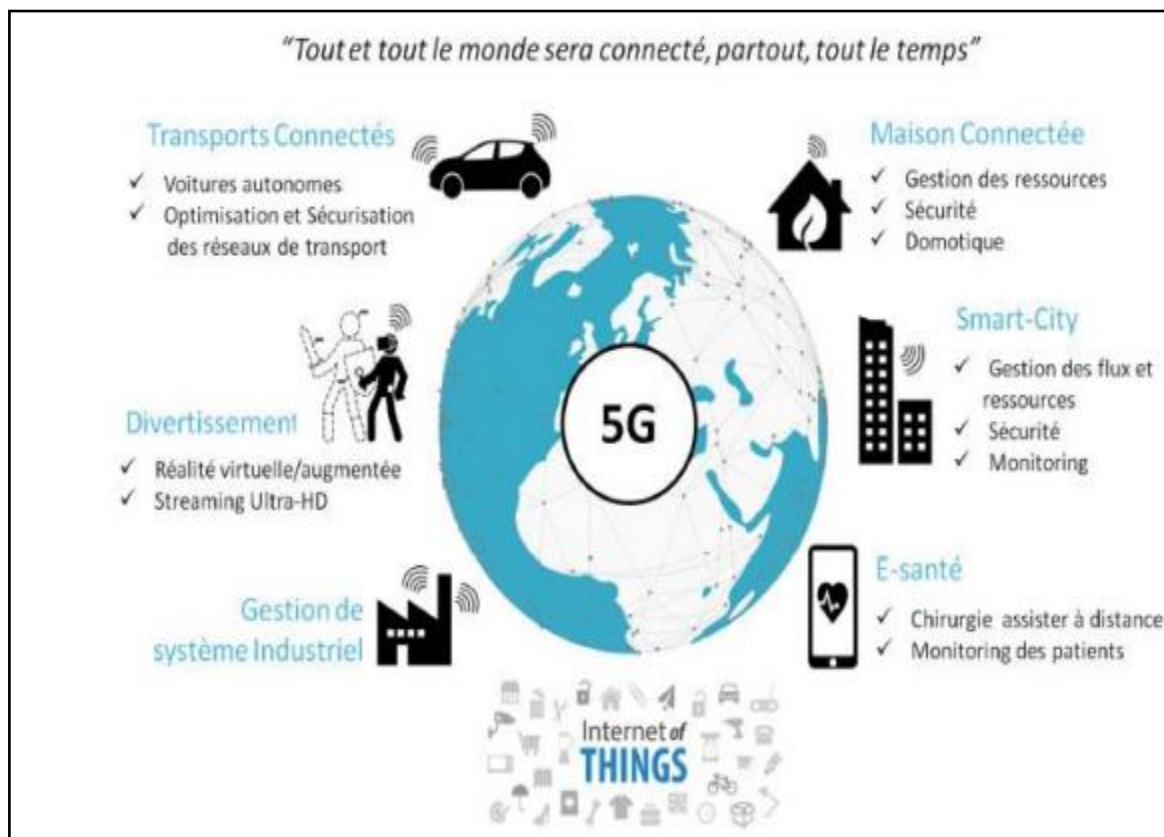


Figure I- 6 : Domaines d'application de l'IoT [9]

I.6.2. Le service innovant :

Est la couche supérieure qui inclut des services 5G innovants. Basé sur des capacités d'infrastructure 5G différenciées, les services 5G seront en mesure d'offrir une expérience utilisateur hautement fiable et immersive. En particulier, le streaming vidéo en ultra- haute définition finira par devenir des services dominants offrant des expériences utilisateur virtuelles

telles que le streaming vidéo multi-view et même les hologrammes. De plus, la bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront l'émergence de services de contrôles à distance et de services d'Internet des objets (IoT) essentiels à la mission[10].

I.7. La virtualisation (Radio Hyper-Connecté) :

C'est la couche inférieure qui fournit une quantité importante de données à la couche intermédiaire de manière efficace et transparente. En raison de l'énorme trafic et des exigences strictes de latence, cette couche inclut de nouvelles technologies de réseau qui sont en cours d'étude par les organismes de recherche, on trouve :

I.7.1. Ondes millimétriques :

La 5G est basé sur l'harmonisation du spectre, comme présenté dans la figure 7. Elle utilise les basses fréquences ($f < 1$ GHz) des hautes fréquences ($1 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$) et, pour la première fois des fréquences très hautes, dites « millimétriques » ($f > 6 \text{ GHz}$). Le nom d'onde millimétrique fait référence à tous les composants présents dans le spectre de 30 à 300 GHz et à une longueur d'onde compris entre 1 et 100 mm. Toutefois, le trafic de données mobiles et le nombre d'appareils connectés continuent de croître, le spectre devient de plus en plus encombré. Il peut fournir une telle réserve de spectre, son utilisation doit développer toutes les technologies nécessaires, réduire les coûts au minimum et consommer de l'énergie d'une manière compatible avec le terminal. Par rapport aux technologies 2G, 3G et 4G, et les ondes millimétriques peuvent fournir des débits plus élevés. L'introduction des communications à ondes millimétriques dans la nouvelle génération est un pilier important. À mesure que la bande passante augmente, la capacité du réseau augmente et la latence diminue. Cela offre une meilleure QoE aux utilisateurs des services en temps réel [11].

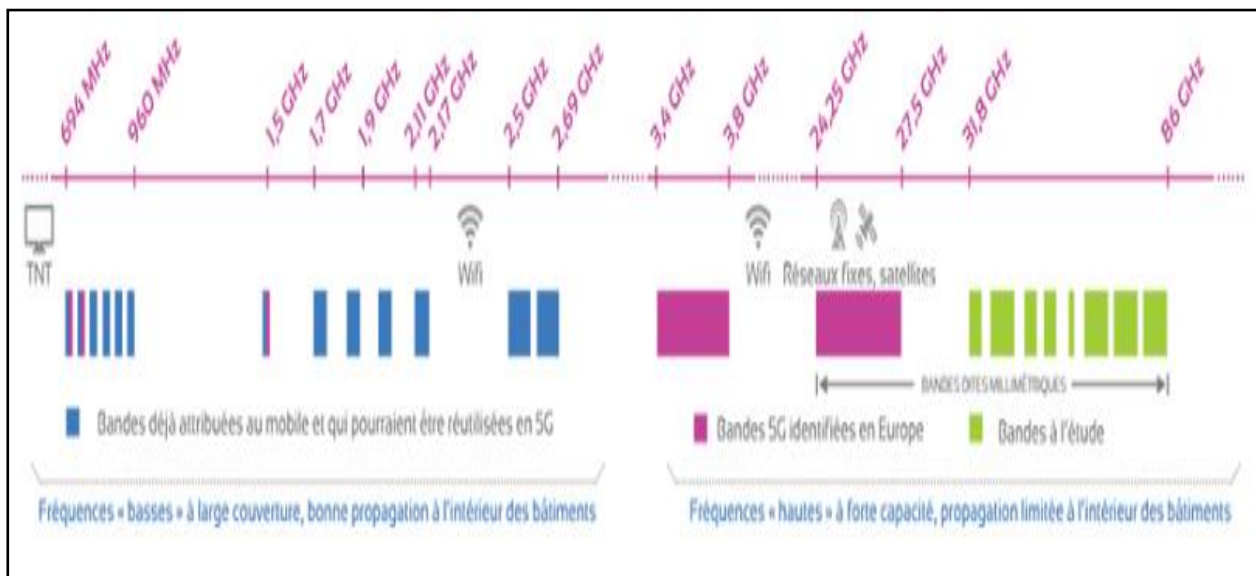


Figure I- 7 : Ondes millimétriques [11]

I.7.2. Inconvénients des ondes millimétriques :

- ✓ Forte atténuation : susceptibles d'être bloquées par divers objets dans l'environnement
- ✓ La portée limitée allant jusqu'à 200 à 300 mètres
- ✓ Atténuation importante : Le path-loss, en espace libre croît avec le carré de la fréquence ajoute 20 dB de perte de puissance du signal.

I.7.3. Les communications full duplex :

Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception fonctionne en mode semi-duplex soit d'utiliser différentes bandes de fréquence FDD, duplexage par répartition en fréquence. Il est nécessaire d'utiliser deux canaux sur la liaison montante (UP) et un autre canal sur la liaison descendante (DL) ou soit d'utiliser le TDD (time division duplexing) à des instants différents. Le full duplex est conçu pour permettre la transmission et les réceptions simultanées des données. Ces deniers sont reportés sur même canal qui est relativement court avec même fréquence, au même moment comme présenté dans la figure I-8. Ce duplex 5G offre les a avantages suivants :

- ✓ Efficacité spectrale.
- ✓ Nouvelle solution de relais
- ✓ Filtrage moins complexe
- ✓ Coordination améliorée des interférences : annulation de l'effet d'auto-interférence[12].

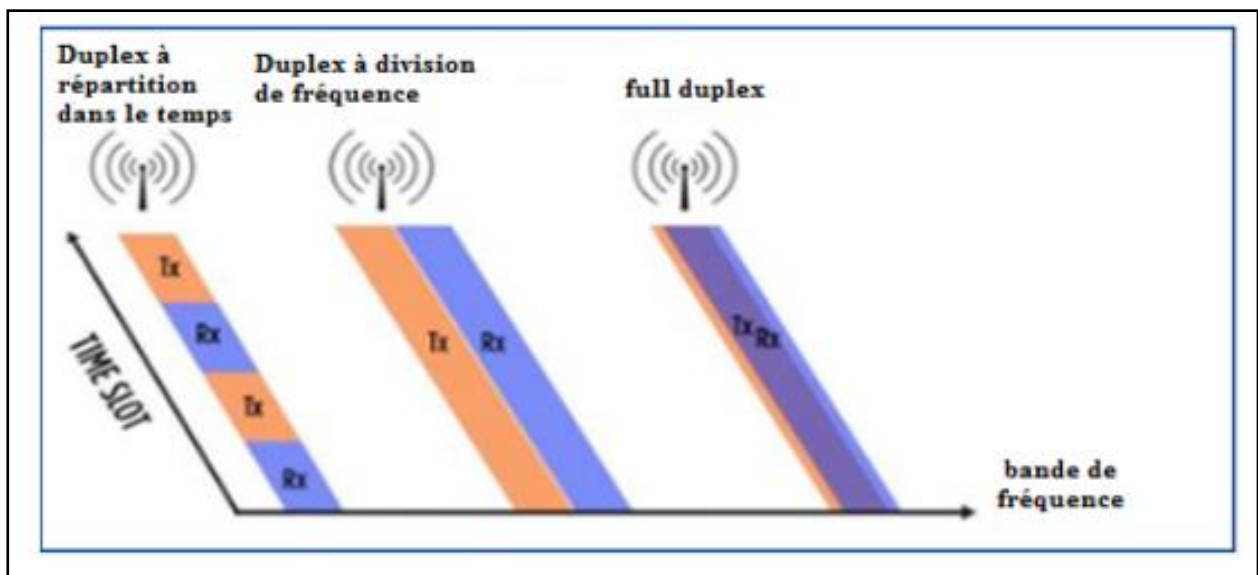


Figure I- 8 : La technologie Full Duplex [12]

I.7.4. Massive MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs) :

La technologie se caractérise par l'utilisation d'un grand nombre de macro antennes intelligents situé sur le même panneau (actuellement de 8 à 128 antennes) comme illustre la figure I-9. Suite à l'utilisation des fréquences > 6 GHz le nombre d'antenne augmente de plus dans le but

d'augmenter le trafic avec un débit important. Chaque terminal reçoit toute la bande passante, ce qui simplifie les accès multiples. Par conséquent, les systèmes MIMO à grande échelle peuvent être construits en utilisant des composants peu coûteux à faible consommation d'énergie.

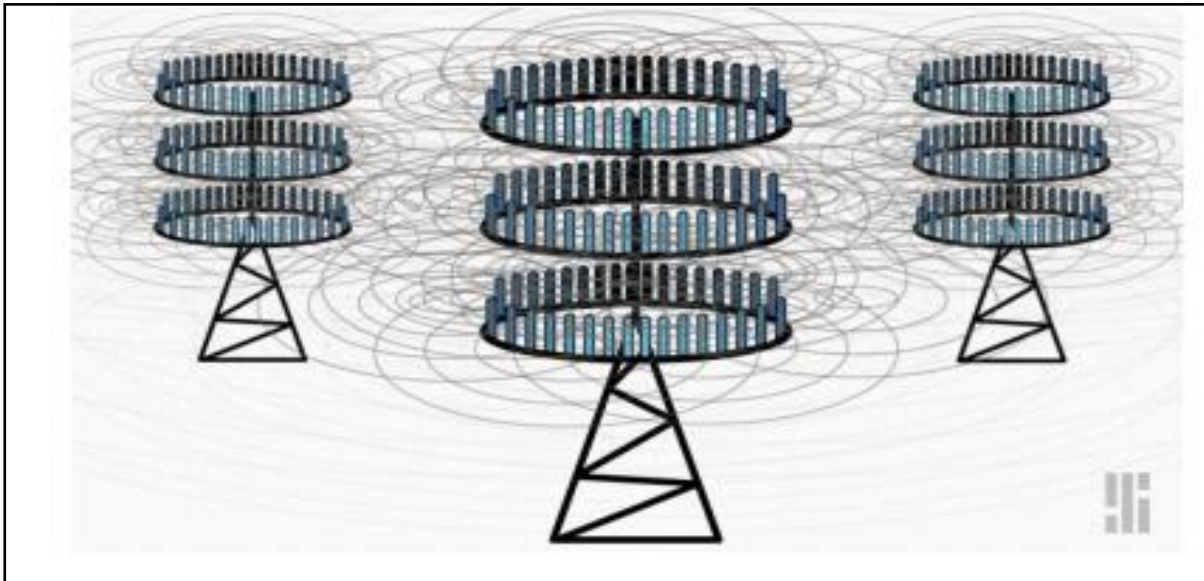


Figure I- 9 : Massive MIMO [12]

I.8. Formes d'ondes spécifiques pour la 5G :

Bien que la couche physique de la 4G utilise la technologie basée sur le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM), la forme d'onde OFDM elle-même présente certains défauts. Par exemple :

1. De grandes fuites hors bande, par conséquent, un intervalle de garde du spectre plus long est nécessaire.
2. Pour éviter les interférences entre les porteuses, une synchronisation est nécessaire entre les nœuds de transmission. Dans le réseau hiérarchique, les stations de base ayant une couverture différente doivent être synchronisées.

Parce que les scénarios d'application de la 5G sont bien plus complexes que la 4G, sa latence et le nombre de ses besoins d'accès sont très stricts.

Cependant, la caractéristique de fuite de l'OFDM et sa synchronisation stricte ne peuvent pas s'adapter à un accès rapide asynchrone pour les entreprises en temps réel et à une utilisation efficace du spectre non continu. Maintenant que la 5G est étudiée, il y a une excellente opportunité de considérer les formes d'onde optimales qui servent à utiliser jusqu'à au moins 2040.

Ciblant les inconvénients de l'OFDM, de nombreuses formes d'onde alternatives ont été proposées.

- Filter Bank based Multi-Carrier (FBMC) : son principe de base est de divisé le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuse qui sont très étroites et les filtrés individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale.
- Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) : Il diffère de FBMC, au lieu de filtré chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bande qu'il filtrera. Ensuite, on peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles.
- Generalized Frequency division Multiplexing (GFDM) : Est une technique de transmission multi-porteuse flexible qui présente de nombreuses similitudes avec OFDM. La principale différence est que les porteurs ne sont pas orthogonaux entre eux. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne.

I.9. Technique d'accès :

I.9.1. Multiplexage NOMA :

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

Le NOMA donne une meilleure performance dans les aspects de l'efficacité spectrale, la latence et de l'égalité de l'utilisateur, ce qui offre une solution prometteuse pour les questions fondamentales dans les exigences du réseau de communication 5G. Toutefois, en raison de l'interférence mutuelle existant entre les utilisateurs dans le système NOMA, les interférences devraient être gérées pendant la transmission [13].

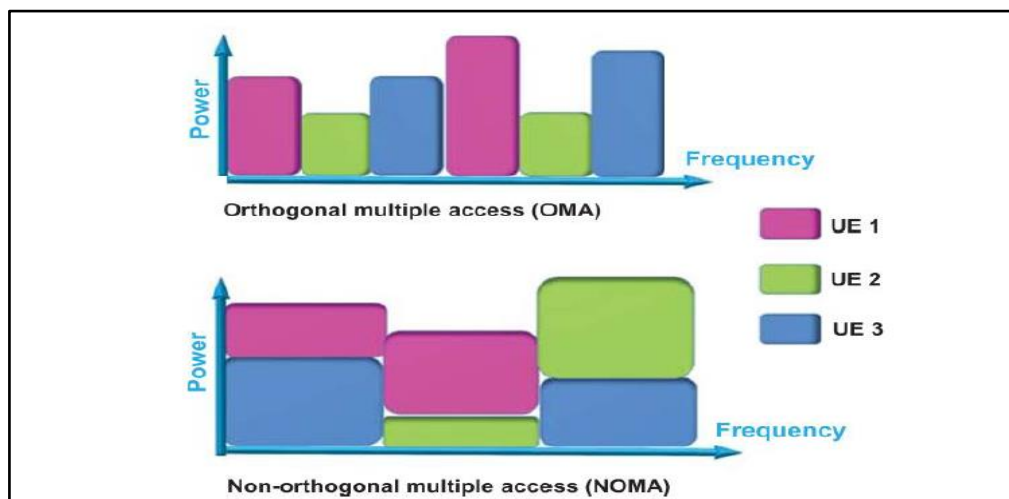


Figure I- 10 : NOMA ET OMA [13]

I.10. Modulations:

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

I.11. Conclusion :

Ce premier chapitre de notre mémoire a été consacré à la présentation des réseaux mobiles. Pour cela, nous avons commencé par exposer l'évolution des réseaux radio mobiles de la 1^{ère} génération à la 4^{ème} génération et vers la 5^{ème} génération .

Par la suite, nous avons présenté les technologies clés utilisées pour répondre aux exigences des réseaux 5G, notamment les formes d'onde post-OFDM. Ces dernières feront l'objet du deuxième chapitre de ce mémoire.

CHAPITRE II

LES FORMES D'ONDES

CONDIDATES POUR 5G

CHAPITRE II LES FORMES D'ONDES CONDIDATES POUR 5G

II.1. Introduction :

La forme d'onde est une composante essentielle de toute technologie de communication. De manière générale, il existe deux catégories principales de formes d'onde : I) formes d'onde à porteuse unique, II) formes d'onde à porteuses multiples.

En règle générale, les formes d'onde à porteuse unique ont un rapport de puissance crête sur la moyenne (PAPR) faible, ce qui les rend éco énergétiques - adaptées aux scénarios de couverture limitée et à l'allongement de la durée de vie de la batterie des équipements de l'utilisateur. D'autre part, les formes d'onde multi-porteuses offrent une efficacité spectrale élevée, une allocation de ressources flexible dans le domaine des fréquences et, éventuellement, une intégration facile avec la technologie multi-antennaire.

Dans ce chapitre nous présentons une étude théorique des formes d'onde OFDM, FBMC, F-OFDM, GFDM et UFCM. Dans ce cadre, les principes de mise en oeuvre de ces techniques ainsi que les structures de leurs émetteurs-récepteurs sont étudiés en détail.

II.2. Classification des formes d'ondes multi-porteuses:

Avant de présenter les différentes formes d'onde (FO) candidates pour la couche physique des futurs réseaux 5G, il est intéressant de les classer en fonction d'un aspect crucial, à savoir l'orthogonalité entre les symboles de données transmis. Dans cette section, nous définirons la condition d'orthogonalité dans les domaines complexes et réels. Ensuite, nous introduirons les formes d'onde non orthogonales.

Dans le contexte de la transmission des données, les modulations multi porteuses se réfèrent à une structure dans laquelle plusieurs symboles sont envoyés en même temps en occupant des sous-bandes différentes. La décomposition de la bande peut être uniforme ce qui conduit à des modulations basées sur les systèmes de Gabor, ou non-uniforme ce qui génère des systèmes de modulation en ondelettes ou en paquets d'ondelettes [10]. Dans le cadre de notre étude nous nous limitons au premier cas avec une décomposition uniforme de la bande.

Dans ce cas les FO multi porteuses peuvent être soit orthogonales soit non orthogonales. Pour les FO orthogonales deux classes existe suivant le domaine d'orthogonalité. Les FO qui respectent la condition d'orthogonalité complexe donnée par l'équation (II.1), et ceux qui respectent la condition d'orthogonalité dans le domaine réel donnée par l'équation (II.2) [14]:

$$\int_{\mathbb{R}} g_T(t - mT) e^{\frac{j2\pi kt}{T}} g_R(t - m'T) e^{\frac{j2\pi k't}{T}} dt = \delta_{m,m'} \delta_{k,k'} \quad (\text{II.1}) [14]$$

$$\Re \left[\int_{\mathbb{R}} g_T(t - mT) e^{\frac{j2\pi kt}{T}} e^{\frac{j(m+k)\pi}{2}} g_R(t - m'T) e^{\frac{j2\pi k't}{T}} e^{\frac{j(m'+k')\pi}{2}} dt \right] = \delta_{m,m'} \delta_{k,k'} \quad (\text{II.2}) [14]$$

Où $\delta_{k,k'}$ la fonction delta de Kronecker est égale à 1 si $k=k'$ et 0 ailleurs. g_T et g_R sont des fonction prototypes des filtres d'émission et de réception. $\Re[\cdot]$ est l'opérateur de la partie réel.

Dans le tableau II-1, nous présentons une classification des FO candidates pour la couche physique des futurs réseaux 5G en fonction de la condition d'orthogonalité.

FO avec orthogonalité dans \mathbb{C}	FO avec orthogonalité dans \mathbb{R}	FO sans orthogonalité
<ul style="list-style-type: none"> – CP-OFDM – WOLA-OFDM – UFMC – F-OFDM – N-continuous OFDM 	<ul style="list-style-type: none"> – FBMC-OQAM. – Lapped-OFDMOQAM – WCP-COQAM 	<ul style="list-style-type: none"> – FBMC-QAM – GFDM

Tableau II-1: classification des FO candidates en fonction de la condition d'orthogonalité.

Dans les sections suivantes nous allons décrire les formes d'ondes multi-porteuses les plus connus dans la littérature.

II.3. Caractéristiques des formes d'ondes multi-porteuses:

II.3.1. Facteur de crête (PAPR) :

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

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

$$PAPR(s(t)) = \frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{\max(|s(t)|^2)_{0 \leq t \leq T}}{\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt} \quad (II.3) [15]$$

À chaque fois qu'on aura un pic du signal, l'AP doit consommer plus d'énergie pour le transmettre. Or il est nécessaire d'optimiser la consommation d'énergie surtout dans les transmissions sans fil [15].

II.3.2. Rayonnements hors bande (Out Of Band (O.O.B)):

Le rayonnement hors bande ou le OOB (Out Of Band) est l'un des problèmes majeurs des modulations multi-porteuses. Il représente une émission de puissance dans les fréquences hors de la bande nécessaire à la transmission à cause du processus de la modulation, donc il est nécessaire

de réduire ce rayonnement pour éviter des pertes d'énergie et interférences avec d'autre bande fréquences.

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

$$OOB_{radiation} = \frac{|B|}{|OOB|} \frac{\int_{f \in OOB} PSD(f) df}{\int_{f \in B} PSD(f) df} \quad (\text{II. 4}) [15]$$

II.4. Technique OFDM:

II.4.1. Principe et fonctionnement de l'OFDM :

Le principe de l'OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux. En codage orthogonal, l'espacement entre chaque sous-porteuse doit être égal à $\Delta f = kTs$ Hertz, où *Ts* secondes est la durée utile d'un symbole (c.à.d. la taille de la fenêtre de capture du récepteur), et *k* est un entier positif, généralement égal à 1. Par conséquent, avec *N* sous-porteuses, la largeur totale de la bande passante sera de $B \approx N \cdot \Delta f$ (Hz) [16].

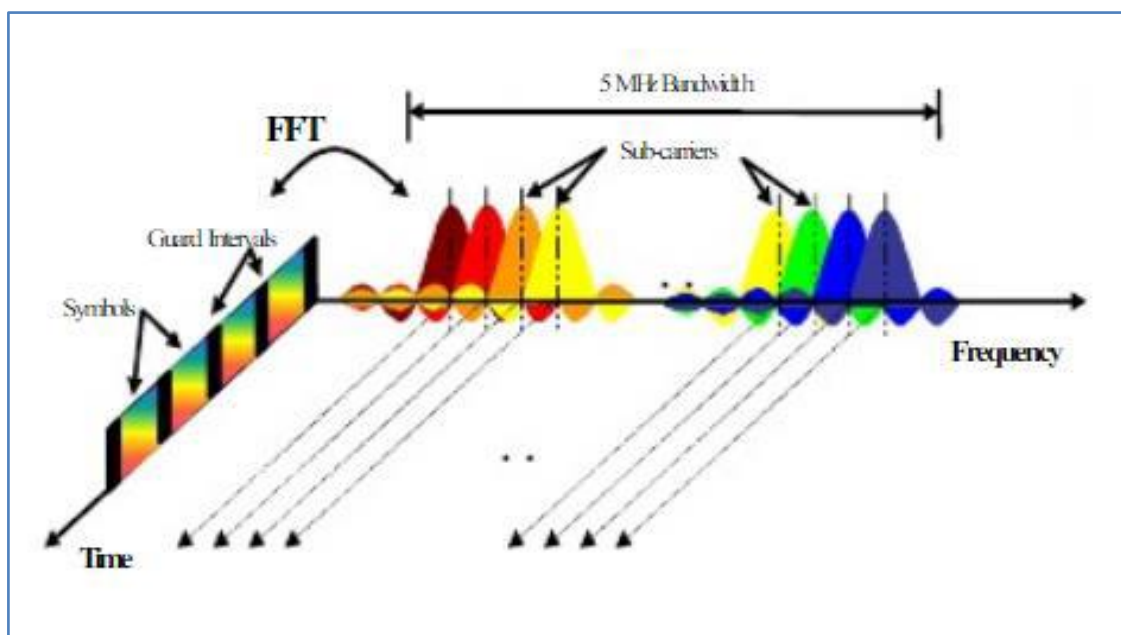


Figure II- 1 : Principe de l'OFDM [16]

II.4.1.1. Principe de la modulation OFDM :

Le principe du multiplexage en fréquence est de grouper des données numériques par paquets de N , qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par une porteuse différente chaque donnée en même temps. La figure II.2 illustre le principe d'un modulateur OFDM.

Considérons une séquence de N données c_0, c_1, \dots, c_{N-1} , appelons T_s la durée symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de N données. Chaque donnée C_k module un signal à la fréquence f_k .

Le signal $s(t)$ total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels [17] :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (\text{II.5}) [17]$$

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est $1/T_s$.

Alors [17] :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \text{ et } s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (\text{II.6}) [17]$$

De l'équation (II.5), la partie réelle de $s(t)$ s'écrit :

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

$$= \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos\left(2\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t\right) - b_k \sin\left(2\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t\right) \quad (\text{II.7}) [17]$$

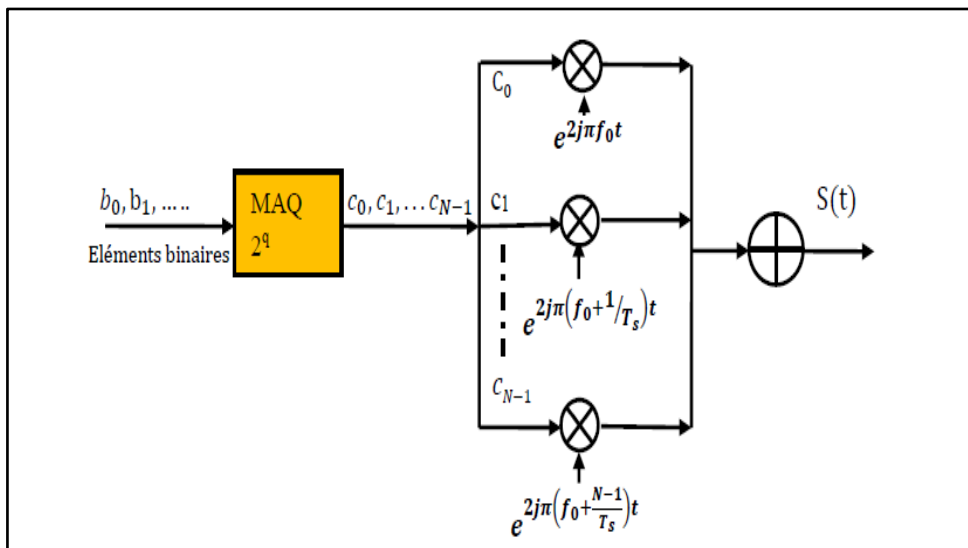


Figure II- 2 : Schéma de principe d'un modulateur [17]

II.4.1.2. Principe de la démodulation OFDM :

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole T_S [15] :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_S})t} \quad (II.8) [15]$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k à l'instant t . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_S ($T_S \ll 1/Bd.$) [17]. Une démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses (figure II.3).

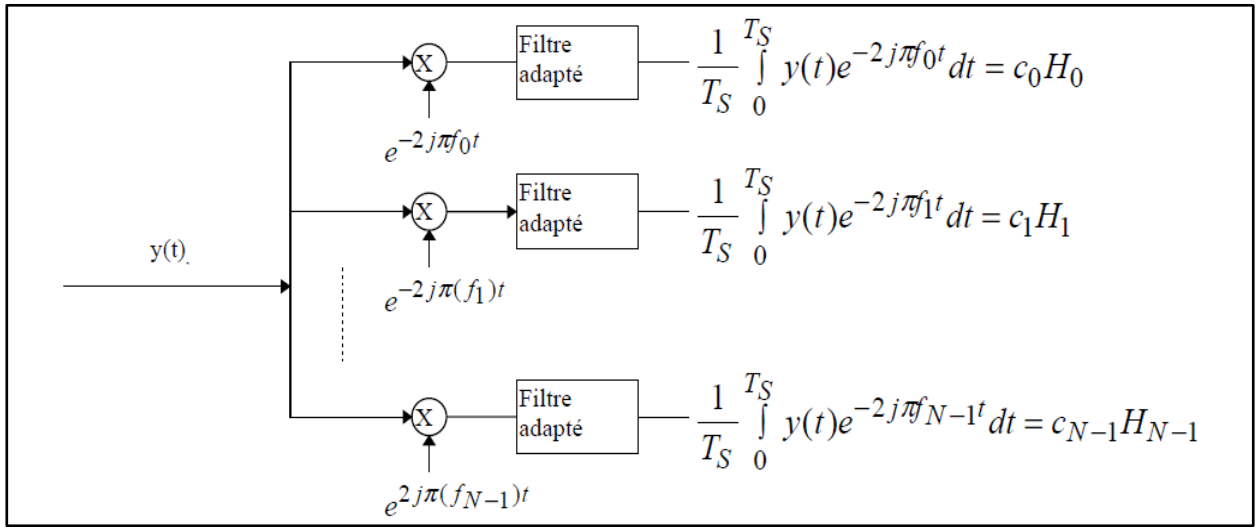


Figure II- 3 : Schéma du principe du démodulateur OFDM [17]

II.4.2. Orthogonalité des sous-porteuses :

Afin de ne pas créer un effet d'interférence entre les différentes sous-porteuses (communément appelé ICI, pour (Inter-Carrier Interférence), les exponentielles complexes doivent être orthogonales entre elles. L'orthogonalité de deux signaux est évaluée en fonction du résultat de leur produit scalaire [18]. Cela conduit à la condition d'orthogonalité donnée par :

$$\frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} e^{2j\pi f_k t} e^{-2j\pi f_i t} dt \quad (II.9) [18]$$

Donc :

$$\frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} e^{2j\pi(k-i)\frac{t}{T_S}} dt = \begin{cases} 0 & k \neq i \\ 1 & k = i \end{cases} \quad (II.10) [18]$$

En pratique, comme pour la modulation, on remarque que la démodulation peut être réalisée par une transformée de Fourier.

II.4.3. Préfixe cyclique :

Considérons que le canal comporte L trajets se caractérisant, respectivement, par τ_l et λ_l les retards et les atténuations relatifs à chaque trajet l . A cause de la mémoire du canal, les L dernières composantes du bloc OFDM interfèrent avec les L premières composantes du bloc OFDM. Cela donne naissance à un phénomène d'IES qui vient dégrader la qualité de la liaison. Une astuce, appelée préfixe cyclique, est utilisée dans les systèmes OFDM actuels dans le but d'éliminer ce phénomène d'IES [18].

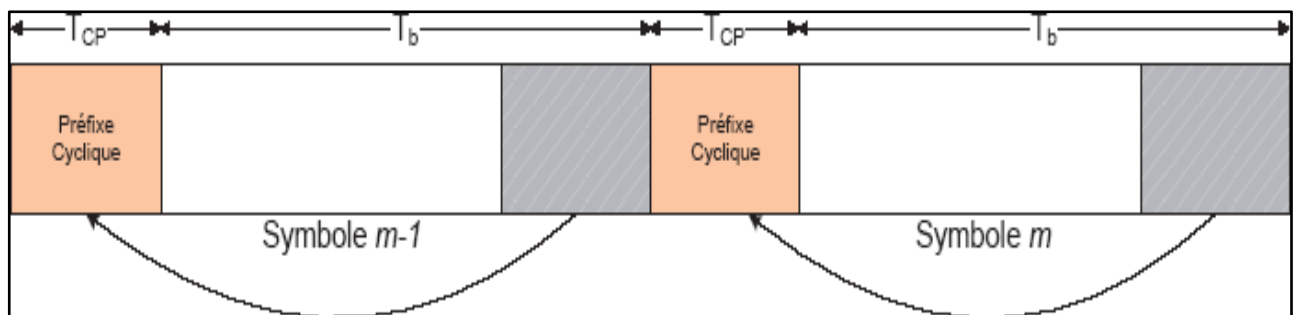


Figure II- 4 : Principe du préfixe cyclique [18]

Elle consiste, alors, à ajouter un espace entre les symboles OFDM, dit Intervalle de garde, d'une durée supérieure à l'étalement des délais. Ainsi les derniers échos du symbole OFDM d'indice m auront lieu durant cet intervalle dit de garde, et le symbole OFDM suivant d'indice $m + 1$ ne sera plus perturbé par le précédent. Afin que les interférences soient éliminées, il faut que l'intervalle de garde soit plus grand que le plus grand des retards T_m qui apparaissent sur le canal. En pratique, on choisit l'intervalle de garde de durée égale au quart du temps symbole OFDM, ce qui représente un bon compromis entre la diminution des erreurs et la perte du débit utile [18].

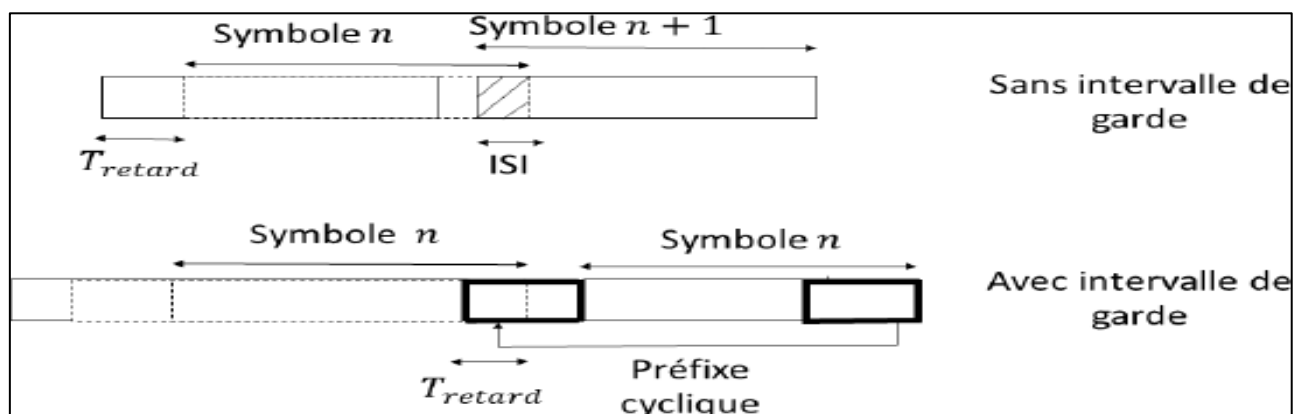


Figure II- 5: Intervalle de garde des symboles OFDM [18].

Cependant, l'ajout d'un intervalle de garde entraîne une perte de débit. Différentes variantes de l'OFDM classique ajoutant un intervalle de garde pour chaque symbole ont été définies.

II.4.3.1. Le CP-OFDM (Cyclic-Prefix) :

C'est la variante la plus utilisée. Dans le CP-OFDM, on reproduit, au début de chaque symbole OFDM, une copie de ses derniers échantillons. C'est ce qu'on appelle un préfixe cyclique (CP). Le signal qu'on met dans l'intervalle de garde est alors une partie qu'on copie de la fin du bloc de symbole, et on la rajoute à son début. Ce préfixe cyclique a deux propriétés :

- Éliminer ISI comme illustré dans la Figure (II.5).
- Simplifier l'égalisation : le préfixe cyclique et l'utilisation de la transformée de Fourier permettent de transformer le produit de convolution linéaire dans l'équation d'égalisation, à un produit de convolution circulaire facile à égaliser. L'égalisation devient alors simplifiée, il suffit d'effectuer des inversions scalaires au lieu des inversions matricielles pour extraire le signal

II.4.3.2. Le ZP-OFDM (zero-padded) :

Ajoute u temps de garde à l'OFDM classique pour combattre les IES. Pour chaque bloc d'une transmission ZP-OFDM, des zéros sont ajoutés aux symboles après la IFFT. Contrairement au CP-OFDM, dans le ZP-OFDM, aucun signal n'est transmis, et donc l'intervalle de garde n'engendre pas de perte en puissance. À la réception, au lieu d'utiliser une seule FFT comme pour le cas du CP-OFDM, un filtrage FIR ou zéro forcing est utilisé, ce qui augmente la complexité du récepteur. Parmi les solutions développées pour remédier à ce problème, des égaliseurs basés sur des combinaisons des techniques OLA/FAST/MMSE (overlap-add) ont été évalués et étudiés dans le contexte d'Hiperlan2 en utilisant un codage de Viterbi. Ces techniques promettent une réduction de la complexité à la réception, mais restent moins simples que le CP-OFDM.

Il est également important de rappeler que le fait d'ajouter un intervalle de garde, réduit l'efficacité spectrale du système, puisque aucune donnée utile n'est transmise durant toute la durée de l'intervalle de garde.

II.4.4. Implantation numérique de l'OFDM :

La réalisation analogique d'un modulateur OFDM est très complexe car il faut utiliser un banc de modulateurs/démodulateurs synchronisés et un banc de filtres de mise en forme/filtres adaptés avec un grand nombre de voies. C'est la raison pour laquelle l'OFDM a été proposée pour la première fois dans les années 50 mais très peu utilisée par la suite. Avec les progrès dans les domaines du traitement numérique du signal, ce problème s'est simplifié conduisant à une explosion de l'utilisation de cette technique [19].

On réduit dans ce cas les erreurs de transmission en numérisant les informations. De plus l'implantation numérique offre aussi l'opportunité d'ajouter des codes correcteurs d'erreurs afin de protéger notre signal des perturbations engendrées par le canal de transmission .

a) Modulateur

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

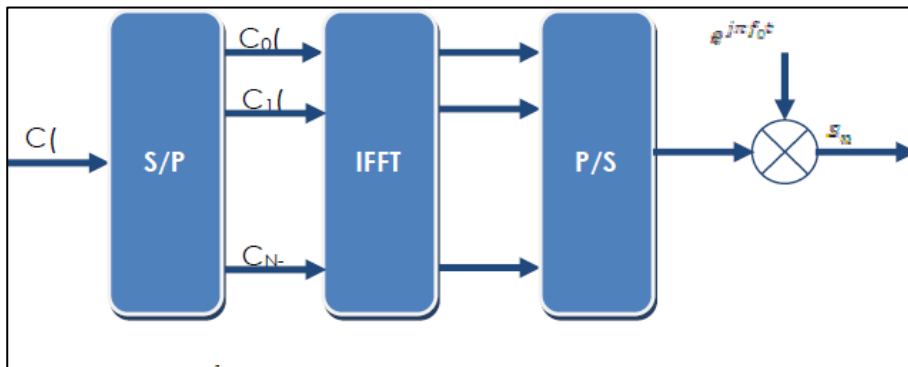
$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{\frac{2j\pi k t}{T_s}} \quad (\text{II.11}) [19]$$

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

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{\frac{2j\pi kn}{N}} \quad (\text{II.12}) [19]$$

Les S_n sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète.

En choisissant le nombre de porteuses N tel que $N = 2n$, le calcul de la transformée de Fourier inverse se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT tel que schématisé sur la figure suivante :



b) Démodulat **Figure II- 6 : Modulateur OFDM numérique.[19]**

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

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{t_s})t} \quad (\text{II.13}) [18]$$

A la réception, la procédure inverse est appliquée. La démodulation consiste à effectuer une transformée de Fourier discrète des symboles reçus. Ceci peut être réalisé à l'aide de l'algorithme de la FFT. La figure II.7 décrit le schéma d'un démodulateur OFDM numérique [18].

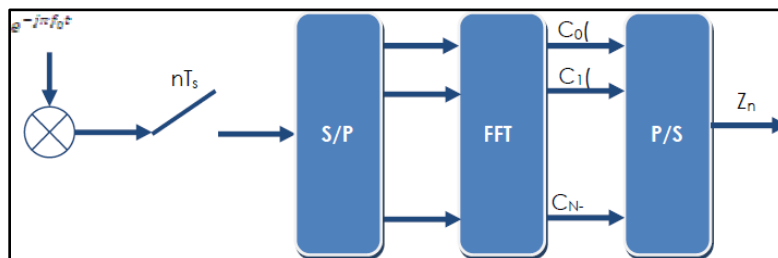


Figure II- 7 : Démodulateur OFDM numérique [18]

II.4.5. Limitations de l'OFDM :

Malgré la simplicité et l'efficacité de la technique de modulation OFDM, plusieurs problèmes limitent ses performances :

- Problèmes du facteur de crête : l'enveloppe du signal OFDM présente de grands pics ce qui sature rapidement l'amplificateur de puissance.
- Problèmes de synchronisation : le processus de démodulation, et en particulier l'opération de décodage, nécessite une synchronisation très précise. On doit être capable de trouver l'instant du début et la fin de chaque symbole OFDM, et la fréquence du récepteur doit être synchronisée avec celle de l'émetteur. Les systèmes OFDM sont sensibles aux erreurs de synchronisation. Les sources et les conséquences de ces erreurs peuvent être classées comme suit : o Décalage entre l'instant et la période d'échantillonnage considérés par l'horloge du récepteur et ceux du signal reçu. Ceci engendre des ISI.

Décalage en phase et en fréquence entre la porteuse générée par l'oscillateur local et celle du signal reçu. Ceci cause des interférences entre porteuses (ICI), des atténuations et des déphasages du signal utile.

II.5. Technique FBMC :

II.5.1. Introduction :

La modulation FBMC (Filter Bank Multi-Carrier) est l'une des formes d'onde candidates pour la 5G. Cette technique est un développement de l'OFDM, elle est un peu plus complexe que l'OFDM mais son but est de réduire les interférences et le rayonnement hors bande en utilisant un schéma de modulation différent à base de bancs de filtres.

La FBMC est une technique qui garde les mêmes principes que la modulation OFDM en améliorant ses avantages et minimisant ses inconvénients.

II.5.2. Bancs de filtres :

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

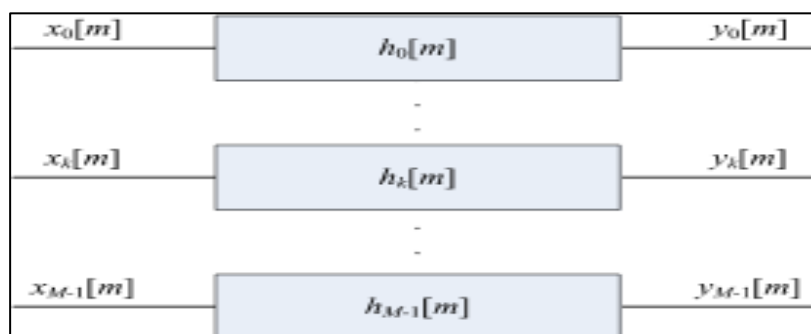


Figure II- 8 : Architecture d'un banc de filtre [19]

Si toutes les entrées du filtre sont connectées entre elles, alors le même signal est envoyé à travers le banc de filtre $x_i[m] = x[m]$. Dans ce cas le banc de filtre analyse l'entrée $x[m]$ sur des sous-banes selon les caractéristiques de chaque filtre, d'où ce filtre est appelé AFB (Analysis Filter Bank) et le système est dit système de sous-bande (figure II 9) (a).

Dans le cas contraire, les signaux sont filtrés et les sorties des filtres sont connectées et additionnés entre elles, un nouveau signal

$$y[m] = \sum_{k=0}^{M-1} y_{i[m]}$$

sera composé et synthétisé. Dans ce cas le filtre est nommé SFB (Synthesis Filter Bank) figure II.9(b)

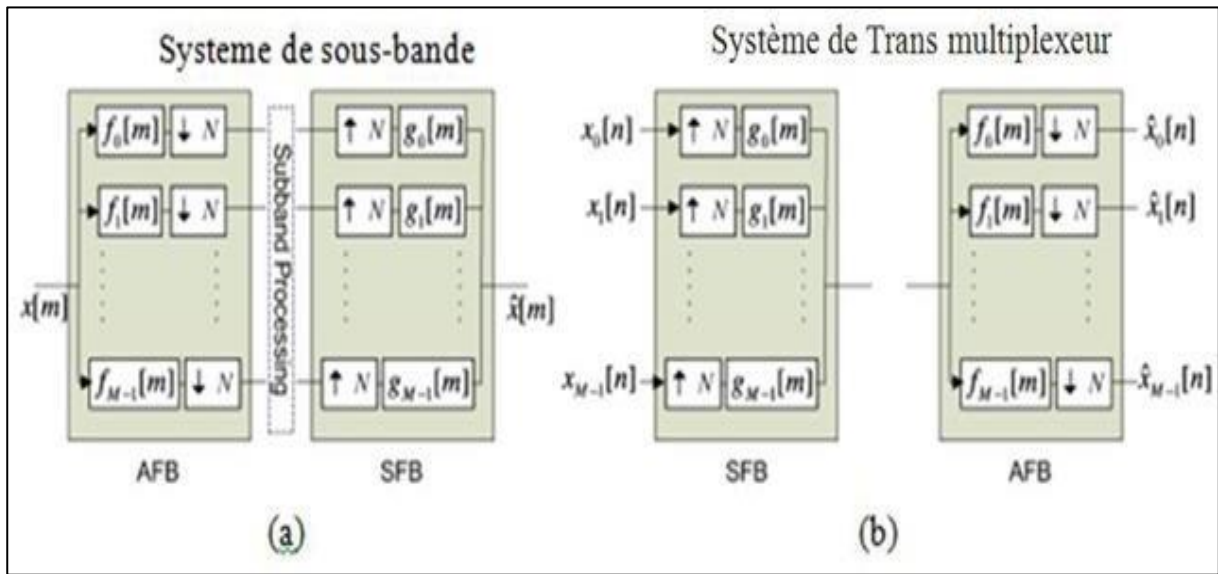


Figure II- 9 : Configuration du system sous-band et de trans-multiplexeur [20]

II.5.3.Principe générale:

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

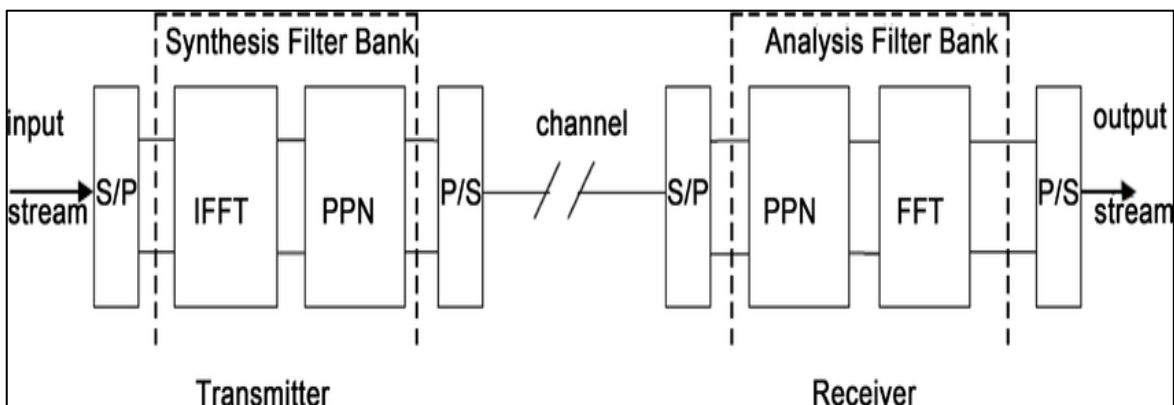


Figure II- 10 : Schéma block Filter Bank Multi Carrier FBMC[21]

II.5.3.1. Principe de modulation :

Dans la partie d'émission FBMC, le signal modulé passe par le bloc d'IFFT pour convertir le signal du domaine fréquentiel au domaine temporel ensuite il sort et passe par le bloc du filtre polyphasé et enfin les signaux résultants seront regroupés parallèlement ou en série et envoyé sur le canal.

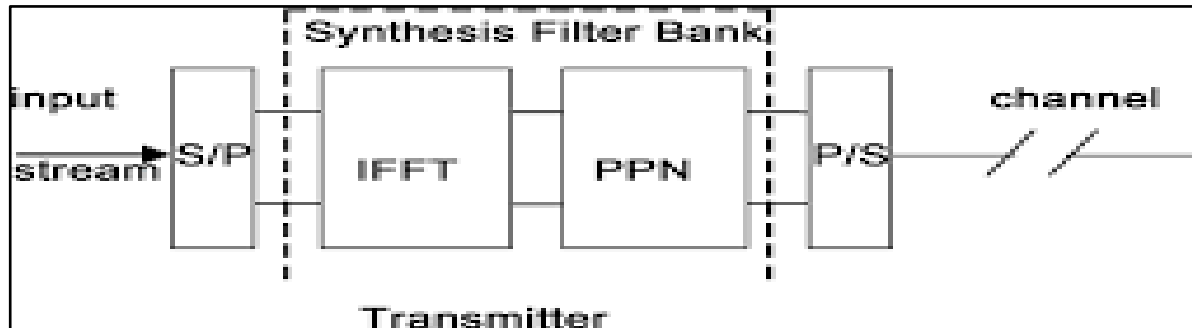


Figure II- 11 : Architecture d'un émetteur FBMC [23]

II.5.3.2 Principe de démodulation

À la réception c'est l'opération inverse qui se fait, une conversion série parallèle du signal est effectuée avant le passage par le filtre polyphasé, ensuite par le bloc FFT et enfin le signal de sortie est démodulé et on peut récupérer les informations.

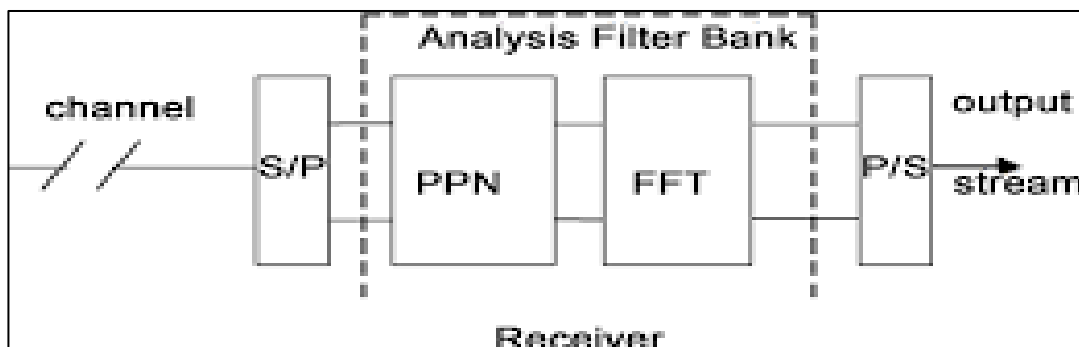


Figure II- 12 : Architecture d'un récepteur FBMC [23]

II.5.4.FBMC/OQAM:

L'idée principale de la FBMC/OQAM est de transmettre des symboles offset-QAM (OQAM) au lieu des symboles QAM (Quadrature Amplitude Modulation) conventionnels où un décalage d'une demi-période symbole $T/2$ est introduit entre la partie réelle et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné. La seconde spécificité est que le filtre d'émission utilisé est différent de la fonction porte et s'étale sur plusieurs symboles multi-porteuse [22]. FBMC signifie Filter-Bank Multi-Carrier qui consiste à un filtrage au niveau de la sous-porteuse qui sera appliqué lors de l'utilisation de ce qu'on appelle banc de filtres du côté émission et du côté réception. Différentes applications de FBMC sont en cours de discussion au sein de la communauté des chercheurs [23].

II.5.4.1.La modulation OQAM:

L'OQAM consiste à introduire un décalage temporel d'une demi-période $T/2$ entre la partie réelle et la partie imaginaire du symbole QAM transmis sur une sous-porteuse donnée. Ce qui permet d'éliminer les interférences entre symboles. La figure II.13 présente la répartition des symboles selon les sous-porteuses pour les modulations OFDM et FBMC/OQAM [24].

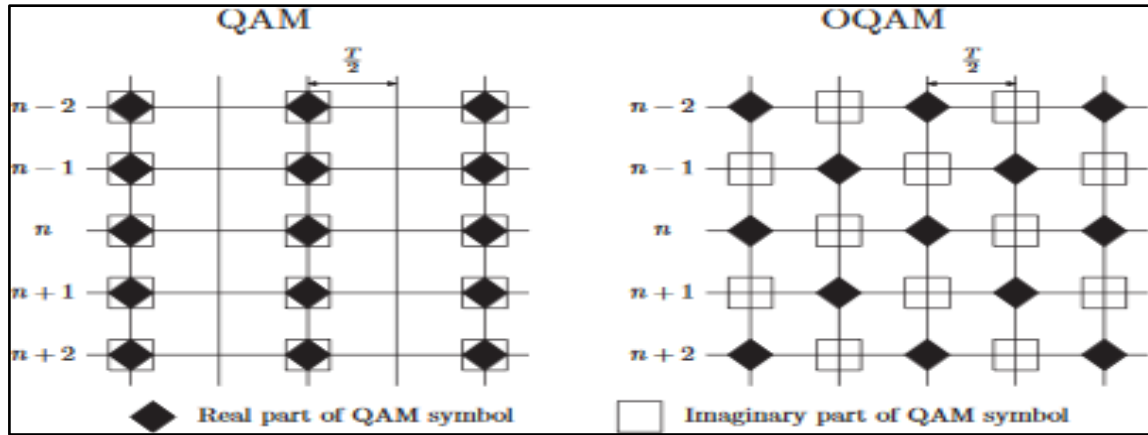


Figure II- 13 Répartition des symboles OFDM et FBMC/OQAM selon les sous- porteuses[24]

II.5.4.2.Filtre de prototype :

Le filtre prototype est un élément clé des banques de filtres modulés complexes car tous les filtres de synthèse et d'analyse sont des versions décalées en fréquence de la réponse en fréquence du filtre prototype passe-bas correspondant. En ce sens, la qualité du système de banque de filtres dépend principalement des propriétés du filtre prototype. Dans le projet PHYDYAS, le filtre prototype est sélectionné pour être un filtre FIR symétrique à valeur réelle causale avec une sélectivité en fréquence élevée. Le filtre prototype peut être conçu pour répondre aux conditions PR ou pour fournir les caractéristiques NPR. Dans le cas de PR, le filtre prototype résultant est généralement un facteur spectral d'un filtre à bande th (Nyquist). Toutefois, il convient de souligner que la propriété PR n'est obtenue exactement

que dans le cas du canal de transmission idéal. Dans notre cas, les conditions PR ne sont pas essentielles car il suffit que les interférences basées sur la structure de la banque de filtres soient suffisamment réduites par rapport aux interférences résiduelles dues au canal de transmission. De plus, les conceptions NPR sont plus efficaces que les conceptions PR, par Exemple : pour fournir une atténuation plus élevée de la bande d'arrêt avec une longueur de filtre prototype donnée. Le prototype de filtre initial de notre projet a été conçu en utilisant une technique dite sur-échantillonnage en fréquence [25]. Les coefficients de réponse impulsionnelle du filtre prototype peuvent être exprimés à l'aide de la représentation sous forme fermée suivante:

$$P[m] = p[0] + 2 \sum_{k=1}^{k-1} (-1)^k p[k] \cos\left(\frac{2nk}{km}(m+1)\right) \quad (\text{II. 14}) [25].$$

La figure suivante illustre la repense impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS pour k=2,3 et 4 :

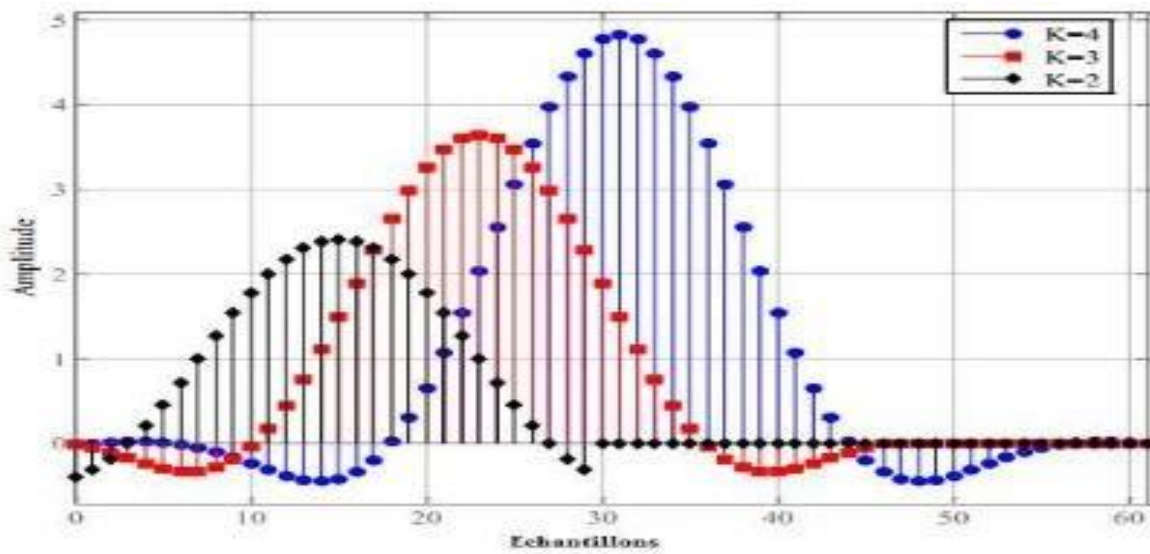


Figure II- 14 : Réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS avec M=16 [25]

II.5.4.3.Structure polyphasé:

L’implémentation d’un banc de filtres de synthèse et d’un banc de filtres d’analyse dans un système FBMC/OQAM est très complexe à mettre en œuvre. Pour réduire la complexité de calcul, on exploite la structure polyphasée des bancs de filtres de synthèse et d’analyse avec les opérations IFFT/FFT. Dans le cas des modulations à banc de filtres, le nombre de

composantes polyphasés du filtre est noté $\xi_k[m]$ [41]:

$$\begin{aligned} \xi_k[m] &= \exp \left(j \frac{2\pi K}{M} \left(m - \frac{L_p - 1}{2} \right) \right) \\ &= \exp \left(-j \frac{2\pi k}{m} \left(\frac{L_p - 1}{2} \right) \right) \exp \frac{2\pi km}{M} \qquad (II.15) [41] \\ &= \beta_k \gamma_k[m] \end{aligned}$$

II.5.4.4.Principe de la modulation :

Un émetteur-récepteur générique à porteuse multiples avec des bancs de filtre est représenté sur la figure et l’entrée du système est donnée par [42]:

$$s_i(t) = s_i[n]^\delta(t - nT) \qquad (II.16) [42]$$

Avec :

$S_i [n]$ Représente les symboles de données et T l’espace temporel entre les symboles.

Le signal d'émission global peut être considéré comme:

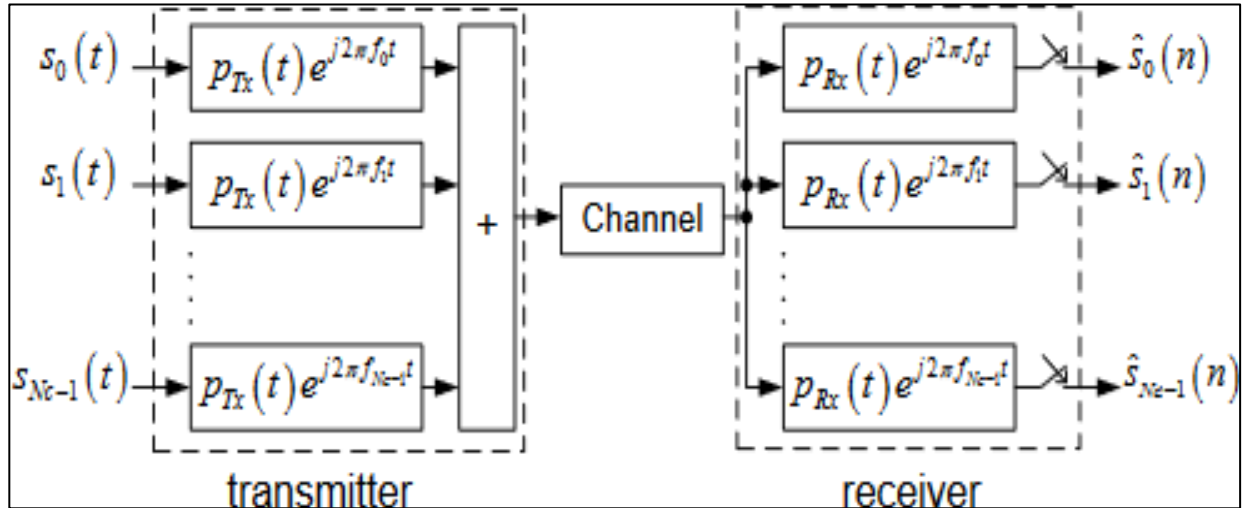


Figure II- 15 : Un émetteur-récepteur à porteuse multiples avec des bancs de filtres[26]

$$x(t) = \sum_n \sum_{i=0}^{Nc-1} s_i [n] PT_x(t - nT) e^{j2\pi(t-nT)f_i} \quad (II.17) [42]$$

Avec :

$x(t)$ Représente le groupe de sous porteuses et PT_x désigne les filtres prototypes de synthèse.

II.6. Technique UFMC:

I.6.1. Modèle de système UFMC:

La technologie UFMC (Universel Filter Multi carrier) est une nouvelle technologie qui combine les fonctionnalités d'OFDM et de FBMC. Il est basé sur le multiplexage par répartition en fréquence FDM. Dans UFMC le flux de données entrant est réparti en plusieurs sous-flux avec un débit de données comparativement inférieur. Ce nouveau candidat offre une émission réduite hors bande et une meilleure synchronisation temps-fréquence [28].

UFMC a été introduit en tant que nouvelle conception de forme d'onde représentant une généralisation de ce principe visant à collecter les avantages tout en évitant les inconvénients des autres techniques de modulation [29]. UFMC est la méthode qui combine les avantages de l'orthogonalité de l'OFDM et du concept de banque de filtres dans FBMC. Au lieu de filtrer chaque porteuse comme dans FBMC, un bloc de porteuses appelées sous-bande est filtré. Chaque sous-bande contient un nombre de porteuses et la longueur du filtre dépendra de la largeur de la sous-bande [30].

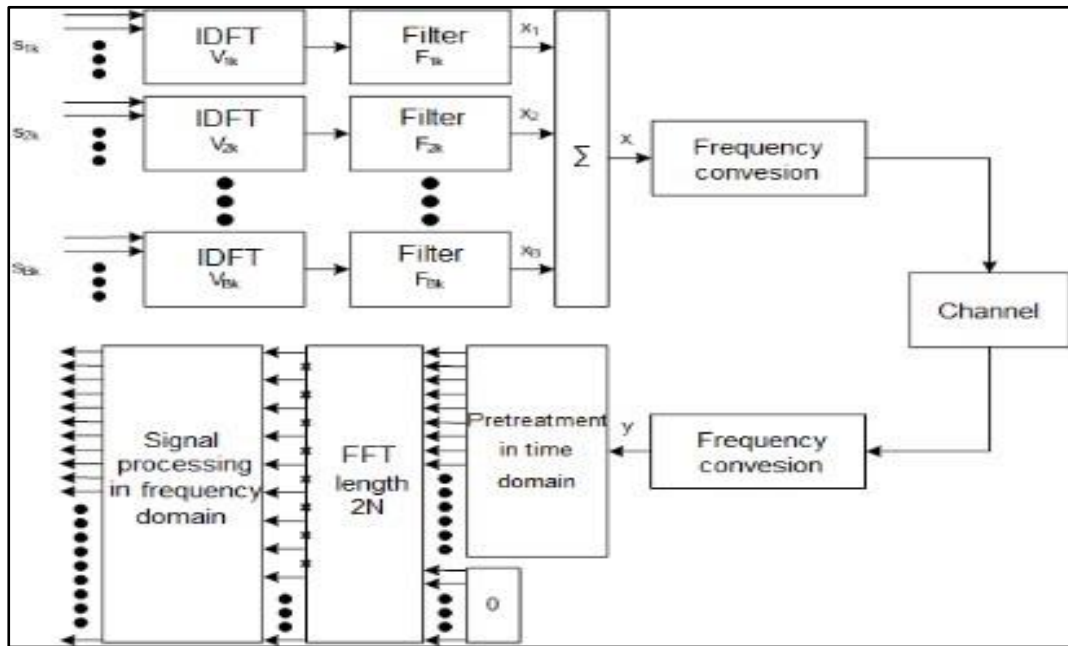


Figure II- 16 montre le schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC [31]

II.6.2.Structure d'émetteur UFMC :

Le signal UFMC transmis x dans le domaine temporel est la somme des signaux de toutes les sous-bandes et peut être représenté à l'aide de l'expression suivante:

$$X = \sum_{i=1}^B F_i V_i S_i \tag{II.18} [32]$$

Ou :

s_i Est un vecteur de symboles QAM de la $i^{ème}$ sous-bande.

V_i Sont des colonnes de dimension IDFT ($N \times n_i$) correspondant à la position de la $i^{ème}$ sous-bande dans la gamme générale des fréquences.

F_i Est une matrice de toeplitz de dimension $((N+L-1) \times N)$ qui implémente la convolution du signal avec la caractéristique de filtre

Le signal peut être réécrit sans sommation par les formes suivantes :

$$\bar{F} = [F_1 F_2 \dots F_B] \tag{II.19} [32]$$

$$\bar{V} = \text{diag}(V_1, V_2, \dots, V_B) \tag{II.20} [32]$$

$$\bar{S} = [S_1, S_2, \dots, S_B]^T \quad (II.21) [32]$$

Ces équations permettent l'assemblage en colonnes des matrices des filtres, génération d'une matrice IDFT diagonale en bloc et l'assemblage de tous les symboles de données dans une seule colonne [32].

Ce tableau résume les éléments de conception possible :

B	nombre de sous bandes
n_i : taille du bloc	Nombre de sous porteuse dans la sous bande i
N	Nombre totale de sous porteuses
Filter i	longueur/bande passant, caractéristique de filtre définie par les coefficients de filtre RIF.

Tableau II.3 : résumé des éléments de conception possible

La figure illustre un exemple de structure en bande de base de l'émetteur UFMC avec B sous- bandes. Le $i^{ème}$ sous-module UFMC.

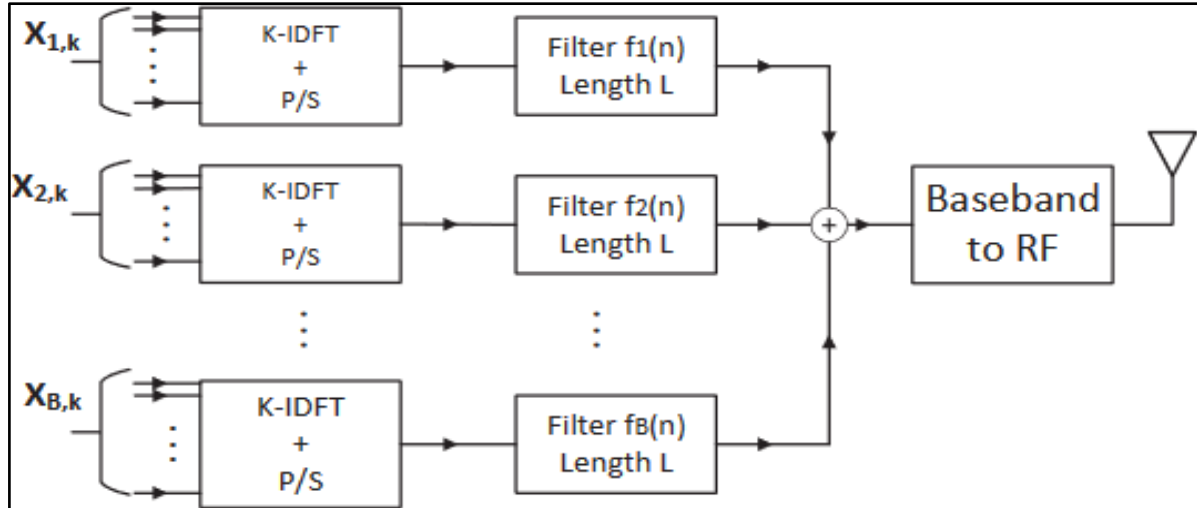


Figure II- 17 Structure générale de l'émetteur UFMC [32]

II.6.3. Structure d'un récepteur UFMC :

La réception UPMC est réalisée comme indiqué sur la figure ci-dessous :

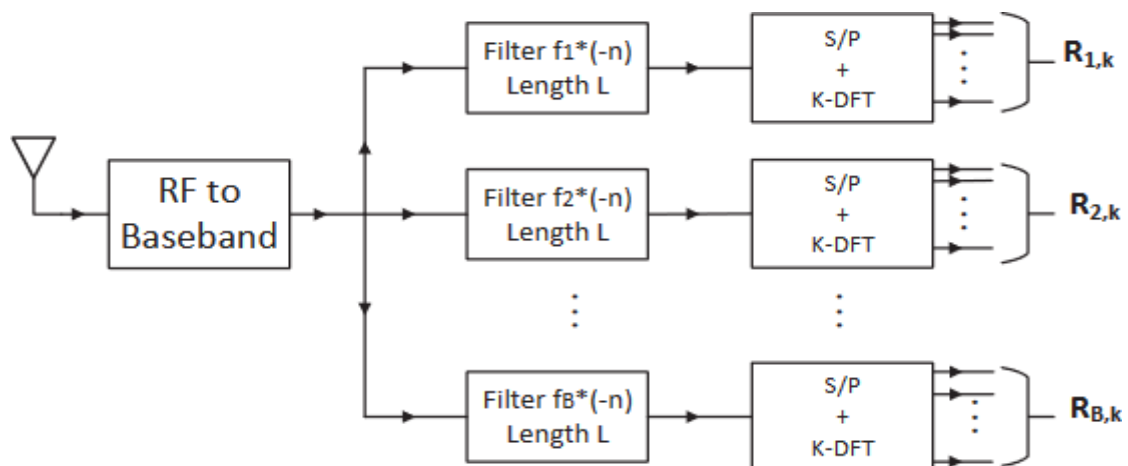


Figure II- 18 : Structure générale du récepteur UPMC [32]

Le signal UPMC récupéré à la réception peut être représenté à l'aide de l'expression suivante :

$$R = Hx + n = HFV \quad (II.22) \quad [32]$$

R est le vecteur du signal reçu après propagation dans le canal.

H représente la matrice de convolution avec une structure Toeplitz, modifié par la réponse impulsionnelle de canal dans le domaine temporel. n représente le bruit.

II.6.4. Conception du filtre pour UPMC :

Le filtre utilisé dans UPMC est le filtre Dolph – Chebyshev. Il est de longueur L. La longueur du filtre dépend de la taille de la sous-bande. Le filtre Dolph-Chebyshev minimise la norme de Chebyshev des lobes latéraux pour un lobe principal donné. La taille du filtre est implémentée à l'aide des fonctions intégrées du MATLAB et illustrée dans la figure ci- dessous :

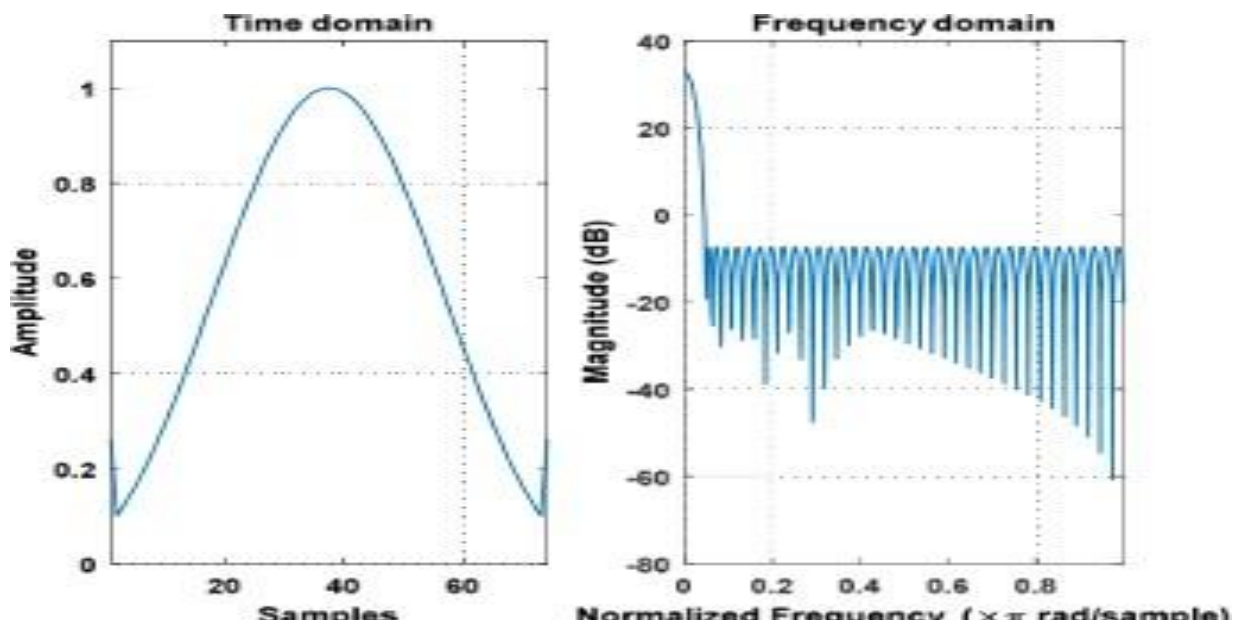


Figure II- 19: la réponse temporelle et fréquentielle du filtre [33]

La fenêtre Dolph-Chebyshev est construite dans le domaine fréquentiel en prenant des échantillons de la transformée de Fourier de la fenêtre. La fenêtre de Dolph-Chebyshev est utilisée dans l'analyse spectrale et le filtrage RIF [33].

II.7. Technique F-OFDM :

F-OFDM est une forme d'onde flexible qui peut répondre aux besoins de différents types de services en configurant l'espacement approprié entre sous-porteuses, la longueur du CP, l'intervalle de temps de transmission etc. Pour un système F-OFDM, la largeur de bande attribuée peut être divisée en plusieurs sous-bandes, qui sont utilisées pour transmettre différentes données de service. La structure d'émetteur-récepteur de F-OFDM est similaire à OFDM standard, car le modèle de transmission et le modèle de réception de chaque sous- bande sont considérés comme OFDM avec filtre [34].

II.7.1. Architecture de la F-OFDM :

Il est de notoriété publique que pour obtenir des débits de données plus élevés, une bande passante plus importante est nécessaire. La cinquième génération de communications mobiles disposerait d'une bande passante supérieure pour répondre à ce besoin. OFDM filtré utiliserait cette bande passante de telle manière que tout le spectre soit divisé en plusieurs sous-bandes plus petites. Chacune de ces sous-bandes contiendrait une forme d'onde personnalisée afin de satisfaire les exigences des différents services offerts par le réseau. Cela signifie que des paramètres tels que l'intervalle de temps de transmission (ITT) du préfixe cyclique (CP) et la stimulation entre les sous-porteuses de chaque sous-bande seraient conformes à la nature du service. Après cela, chacune de ces sous-bandes serait passée à travers un filtre personnalisé afin de réduire les interférences entre elles. D'autre part, pour prendre en charge la transmission asynchrone sur plusieurs sous-bandes et éliminer le besoin de synchronisation globale, l'orthogonalité basée sur le domaine temporel entre les sous-bandes est fragmentée à dessein. Par conséquent, F-OFDM

réduirait également la consommation spectrale de la bande de garde, ce qui augmenterait l'efficacité spectrale du système [35].

II.7.2. Structure d'émetteur-récepteur F-OFDM:

Les figures II-20 et II-21 illustre la conception structurelle de base de l'émetteur pour

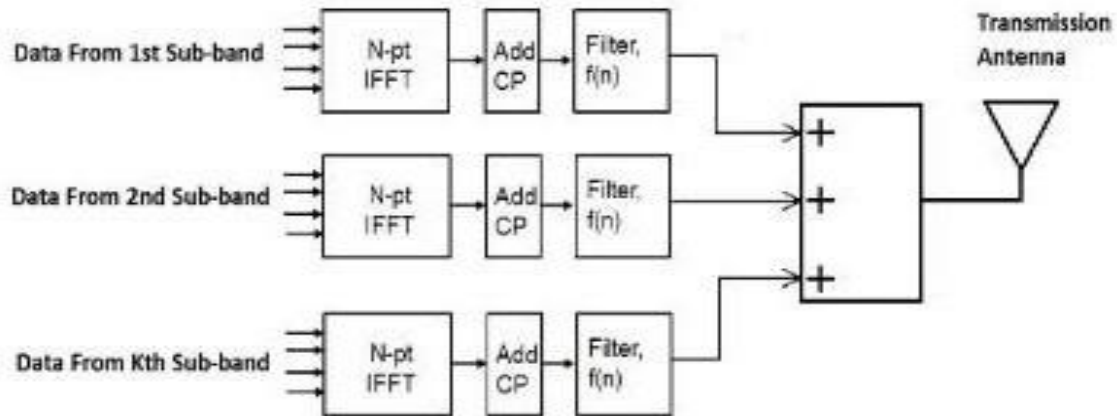


Figure II- 20 : émetteur F-OFDM [35]

F-OFDM, respectivement. Le principal avantage de F-OFDM est que l'espace entre les sous-porteuses dans chacune des sous-bandes peut être différent. Il a été mentionné précédemment que chacune de ces sous-bandes, en fonction des services, peut avoir des paramètres différents.

Le filtre est l'un des éléments clés d'une meilleure performance de F-OFDM, comme l'indiquent les figures II-20 et II-21. La conception du filtre est décrite dans la section suivante afin de fournir une bonne idée de son importance. La structure de l'émetteur de F-OFDM n'est pas si différente de la forme CP-OFDM. Le flux de données binaires est transmis à l'émetteur où une IFFT à N points est effectuée. Ensuite, le préfixe cyclique est ajouté entre les sous-porteuses pour éviter les interférences entre symboles (ISI) et les interférences entre porteuses (ICI). Avant de transmettre le signal, il passe par un filtre dont la raison est décrite précédemment [35]. Du côté du récepteur, un filtre identique filtre le signal entrant. Afin de reconfigurer le signal dans sa forme d'origine, le CP est supprimé et une FFT à N points est effectuée. L'égaliseur à la fin égalise les symboles de données et les convertit finalement à nouveau en bits. L'égaliseur utilisé peut être de différents types, notamment le forçage à zéro (égaliseur ZF), l'égaliseur MMSE (erreur quadratique moyenne minimale) et l'égaliseur ML (maximum vraisemblance). L'égaliseur utilisé n'est pas la principale préoccupation de cet article. Cependant, lors de la simulation de F-OFDM, l'égaliseur MMSE a été utilisé pour obtenir les résultats [36].

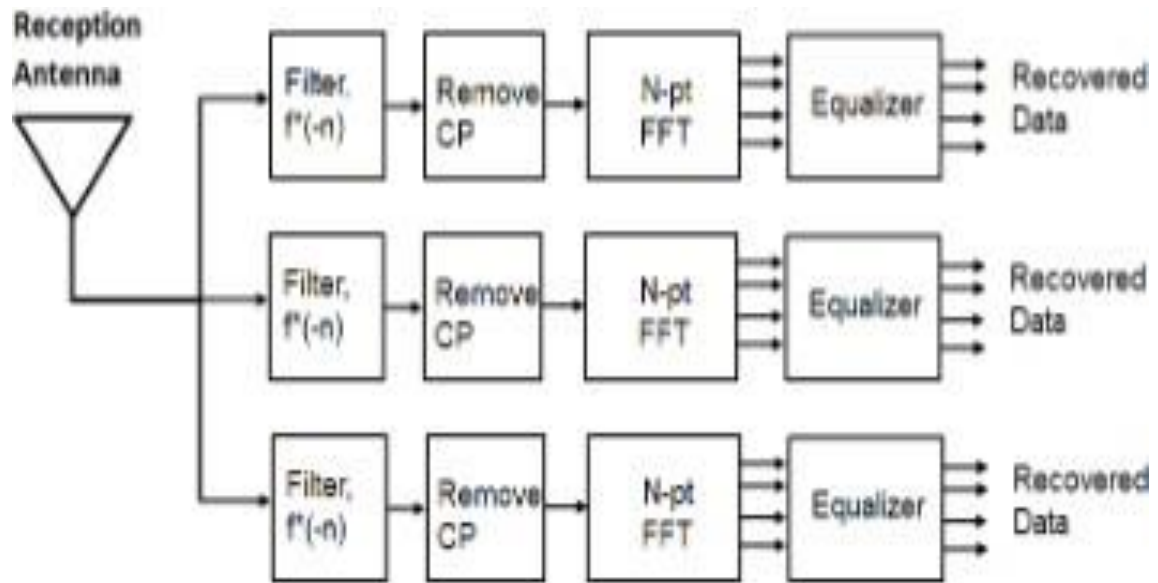


Figure II- 21 : Récepteur F-OFDM [36]

II.7.3. Conception du filtre pour F-OFDM :

En F-OFDM, la sous-bande passe à travers un filtre bien conçu pour améliorer l'émission hors bande du signal. Une étude de la littérature révèle que pour concevoir un filtre capable de fournir les résultats souhaités, il est nécessaire de respecter les trois points suivants :

- Le filtre conçu doit avoir une bande passante plate sur les sous-porteuses de la sous- bande.
- Pour réduire la taille des bandes de garde, le filtre doit avoir une bande de transition nette.
- L'atténuation de la bande d'arrêt devrait être suffisante pour éviter les interférences entre la bande d'arrêt et la bande passante. En gardant à l'esprit toutes ces exigences, un filtre ayant une réponse en fréquence rectangulaire satisferait aux critères. Il convient de noter qu'un filtre ayant une réponse en fréquence rectangulaire doit être une fonction sincère dans le domaine temporel et donc avoir une réponse impulsionnelle sincère [37]. La figure II-23 montre la réponse impulsionnelle du filtre conçu.

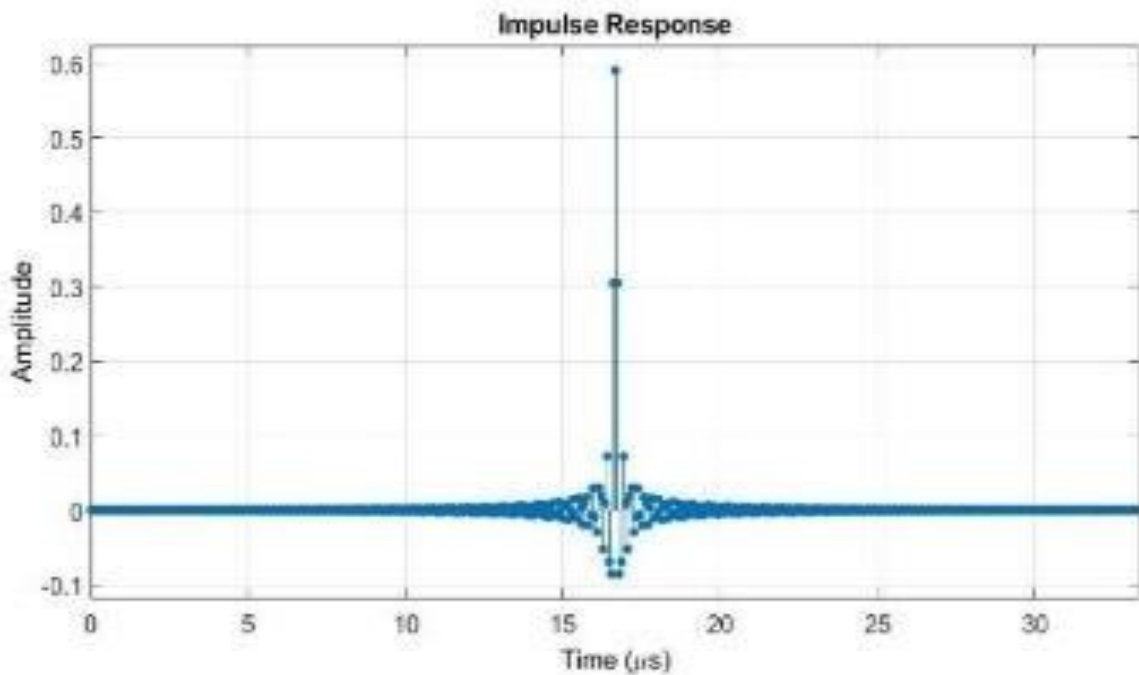


Figure II- 22 : Réponse impulsionnelle du filtre [37]

II.8. Technique GFDM :

II.8.1. Principe de GFDM :

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

Dans GFDM, le rayonnement hors bande du signal d'émission est commandé par un filtre de mise en forme d'impulsions réglable qui est appliqué aux sous-porteuses individuelles. En outre, une structure de données bidimensionnelle est introduite pour grouper des symboles de données sur plusieurs sous-porteuses et des tranches de temps vers des blocs. La taille des blocs est un paramètre variable et permet de mettre en œuvre des filtres longs ou de réduire le nombre total de sous-porteuses. Le traitement de ces blocs se fait à base de filtres numériques piqueurs qui préservent les propriétés circulaires dans le domaine temporel et fréquentiel. De manière similaire à OFDM, dans GFDM, un préfixe cyclique peut être utilisé pour combattre l'ISI dans un canal à trajets multiples [38].

L'un des inconvénients de cette technique est le filtrage de sous-porteuse qui peut entraîner des sous-porteuses non orthogonales et il peut se produire à la fois une interférence entre symboles (ISI) et une interférence entre porteuses (ICI).

Les figures II.24 et II.25 montre deux diagrammes de bloc l'un présente un émetteur GFDM et l'autre un modulateur GFDM détaillé.

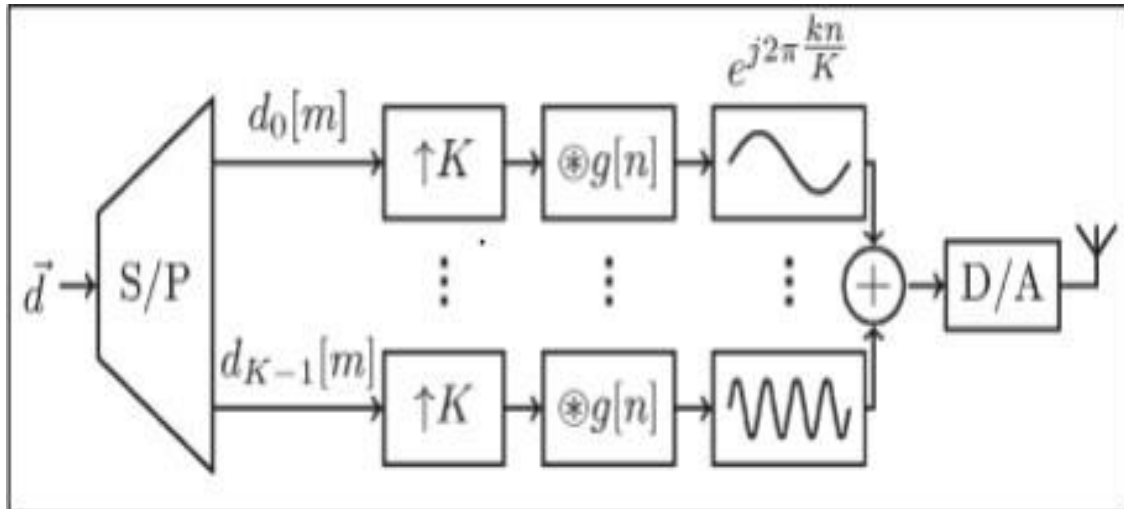


Figure II- 23 : Diagramme de bloc de l'émetteur GFDM [38].

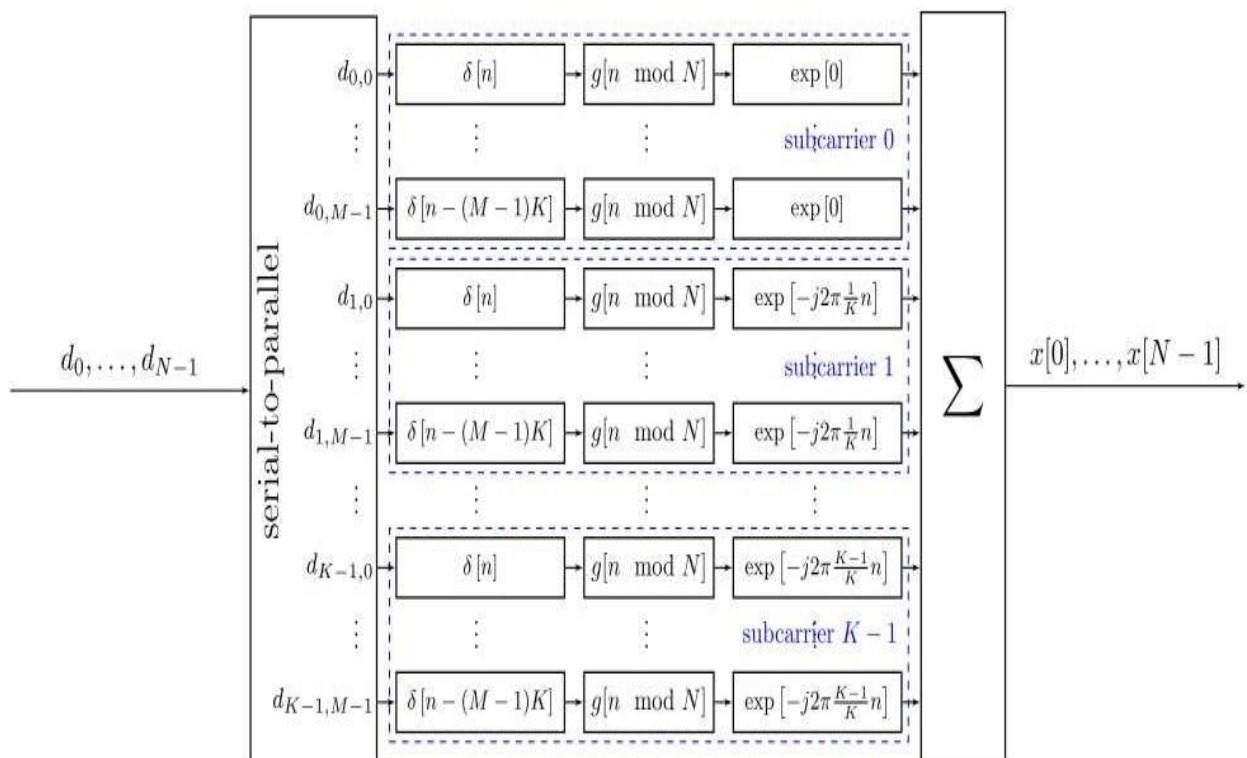


Figure II- 24 : Diagramme de bloc de modulateur GFDM détaillé [39]

II.8.2. Description mathématique :

Le schéma II.24 représente le principe d'un modulateur GFDM. Une source de données fournit un vecteur de données binaire, ce vecteur est codé et mappé par le QAM en symbole à partir d'une constellation complexe de 2^n où n est l'ordre de modulation..

Le vecteur \vec{d} résultant désigne un bloc de données contenant N éléments qui peuvent être décomposés en K sous-porteuses et M sous-symboles, le nombre total de symboles est

$$N = KM \text{ [38].}$$

Les détails de modulateur GFDM sont présentés dans la figure II.24 dont chaque $d_{k,m}$ est transmis avec la forme d'impulsion correspondante [39]:

$$g_{k,m}[n] = g[(n - mk) \bmod N]. e^{-\frac{j2\pi k}{k}n} \quad (\text{II.23}) \text{ [39]}$$

Avec n désignant l'indice de l'échantillonnage.

Chaque $g_{k,m}[n]$ est une version décalée en temps et en fréquence d'un filtre prototype $g[n]$, où l'opération modulo fait de $g_{k,m}[n]$ une version décalée de $g_{k,0}[n]$ et l'exponentielle complexe effectue l'opération de décalage en fréquence [39].

Les échantillons d'émission $\vec{x}[n] = (x[n])^T$ sont obtenus par superposition de tous les symboles d'émission.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{k,m}[n] d_{k,m} n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (\text{II.24}) \text{ [39]}$$

II.8.3. Les caractéristiques de GFDM :

La nature flexible de GFDM rend cette forme d'onde appropriée pour le futur système de communication 5G. Les caractéristiques des techniques GFDM sont listées comme [38]:

- Débits de données plus élevés.
- Faible consommation d'énergie.
- Haute efficacité spectrale et réponse à court terme.
- Une bonne localisation fréquentielle de l'impulsion d'émission rend le système robuste contre la dispersion de fréquence (effet Doppler).
- Une bonne localisation de l'impulsion fournit une robustesse contre la dispersion du temps.
- Taux de puissance moyen maximal (PAPR) inférieur à celui de l'OFDM.
- Modulation multi-porteuse flexible et allocation de spectre dynamique réalisable sans interférence sévère dans le service ou d'autres utilisateurs.

- Petit surcoût en ajoutant un seul CP pour tout le bloc qui contient plusieurs sous-symboles pour réduire la consommation d'énergie, et réaliser la diversité de transmission et de réception, égalisation de complexité car GFDM est une forme d'onde non orthogonale.
- Réduire l'OOB

II.9. Conclusion :

L'utilisation flexible et efficace de tous les spectres disponibles pour des scénarios de déploiement de réseau très différents constitue un défi pour la future 5G. Pour optimiser l'efficacité du spectre, les technologies d'interface radio 5G devront être flexibles et capables de mapper divers services sur les combinaisons les mieux adaptées de fréquences et de ressources radio. Dans ce travail, une comparaison équitable de plusieurs candidats de formes d'onde 5G (OFDM, UFMC, FBMC, GFDM, F-OFDM) a été proposée dans un cadre commun, le principe de fonctionnement de ces techniques est bien détaillé. Les avantages des nouvelles formes d'onde pour les cas d'utilisation de la 5G ont été clairement mis en évidence. UFMC et F-OFDM offrent des améliorations en maintenant la compatibilité avec les versions précédentes de l'OFDM. FBMC va de l'avant en rendant ces formes d'onde particulièrement intéressantes pour les scénarios 5G.

CHAPITRE III

simulations et résultats

CHAPITRE III SIMULATIONS ET RÉSULTATS

III.I .Introduction:

Ce chapitre est consacré aux résultats obtenus lors de nos simulations. Nous proposons, dans le cadre de cette simulation, l'utilisation du langage Matlab. Nous comparons les performances du FBMC-OQAM avec l'OFDM et l' F-OFDM. Pour cela, nous avons utilisé la densité spectrale de puissance (PSD) et le BER (taux d'erreur binaire) comme métriques pour atteindre notre objectif. Les filtres RRC, Phydyas et Hermit sont également pris en compte avec un canal véhiculaire A.

III.2.Modèle de simulation :

Le modèle de simulation utilisé pour évaluer les performances de FBMC-OQAM est présenté par la figure III.1 :

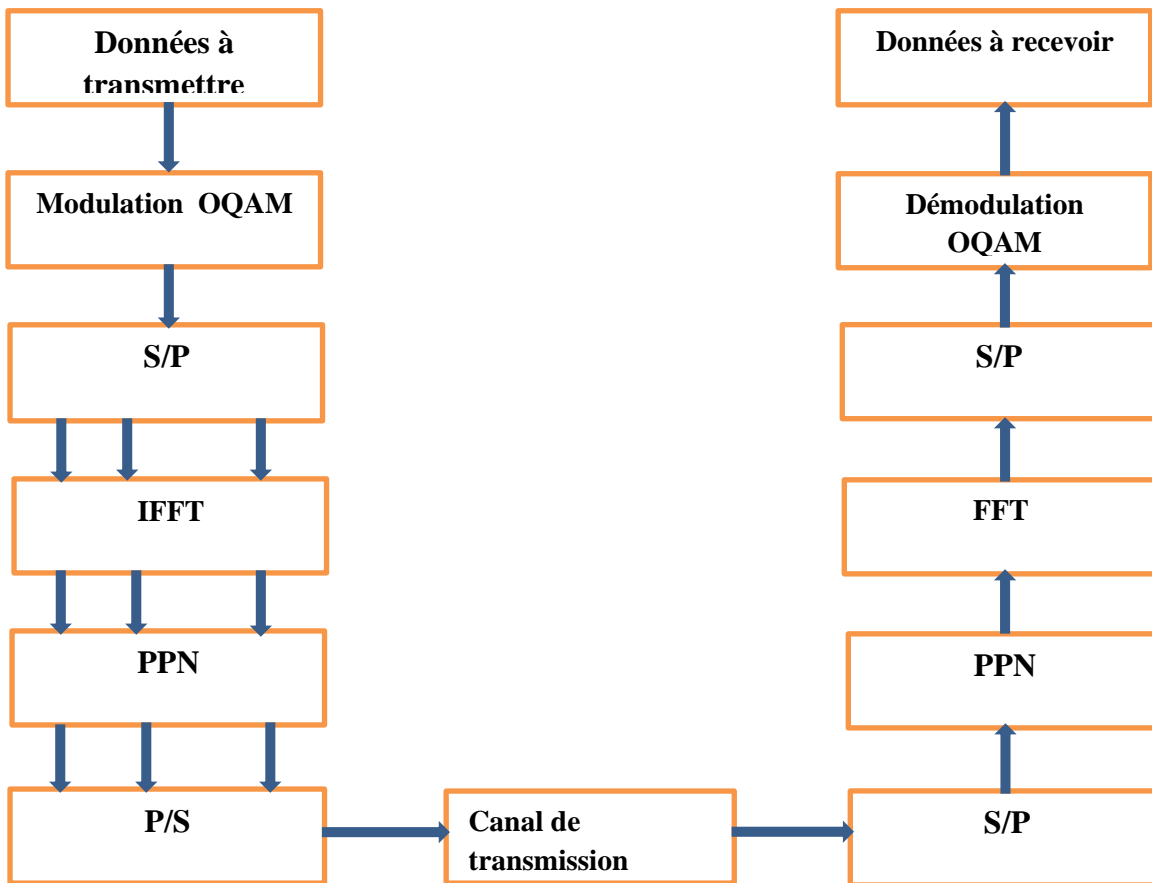


Figure III- 1 : modèle de simulation de technique FBMC-OQAM[40]

Le modèle de simulation utilisé pour évaluer les performances de technique F-OFDM est présenté par la figure III.2 :

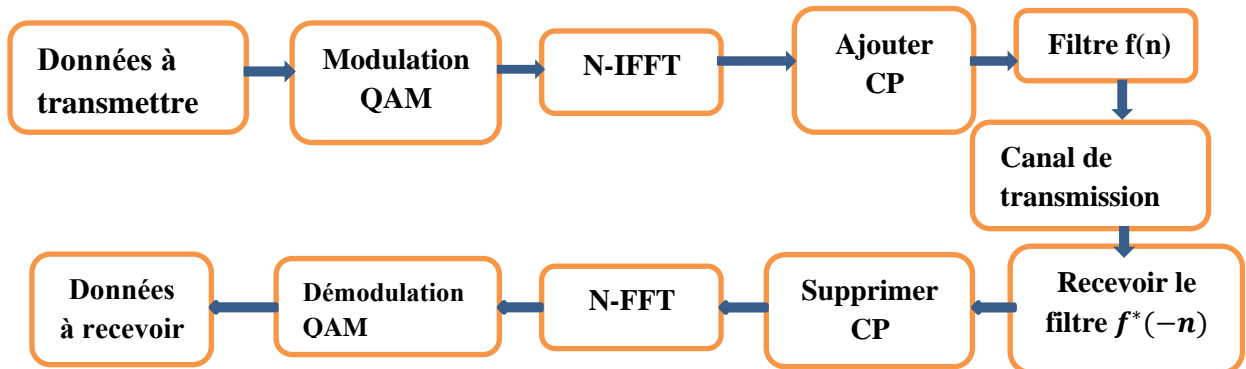


Figure III- 2: Modèle de modulation de technique F-OFDM[41]

III.3. Simulation et résultats:

Dans cette section, nous présentons les performances de FBMC-OQAM comparées avec celles d'OFDM et de F-OFDM. Cette comparaison est basée sur la densité spectrale de puissance (PSD) et le taux d'erreur binaire (BER). Les paramètres de simulation sont donnés par le tableau III.1.

Parameters	Values
Number of subcarriers	24
Numbers of FBMC symbols	14
Subcarrier spacing	15 KHz
Carrier frequency	2.5 GHz
Modulation	64 QAM, 256 QAM
Filter prototype	RRC, PHYDYAS et Hermite
Channel	Vehicular A

Tableau III.1: Paramètres de simulation

III.3.1. Taux d'erreur binaire (BER):

Les figures III.4 et III.5 montrent la comparaison de BER entre OFDM, F-OFDM et FBMC-OQAM pour 64 QAM et 256 QAM, respectivement.

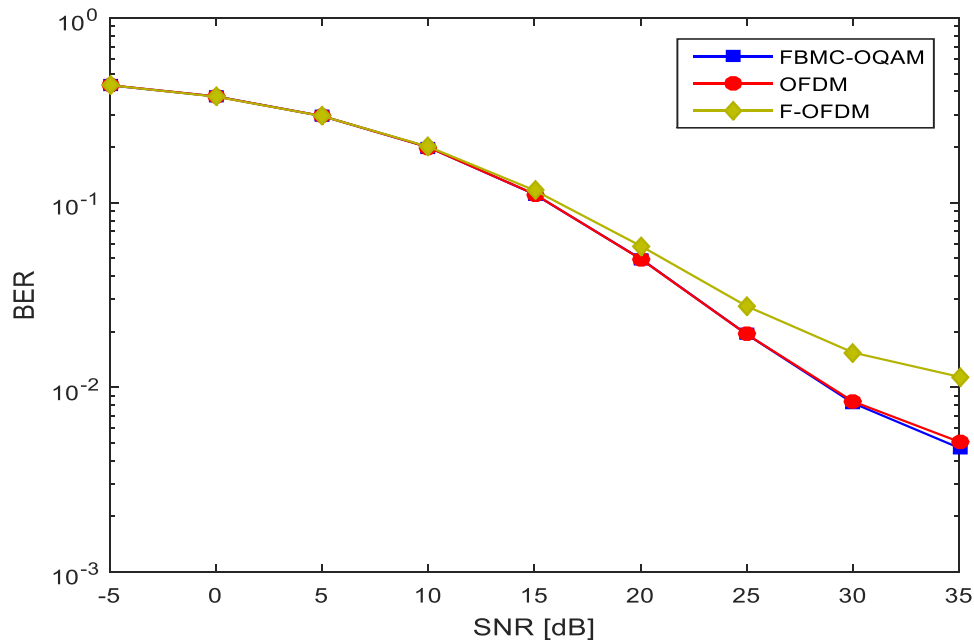


Figure III- 3 : Comparaison BER entre OFDM,F-OFDM et FBMC-OQAM pour 64 QAM[42]

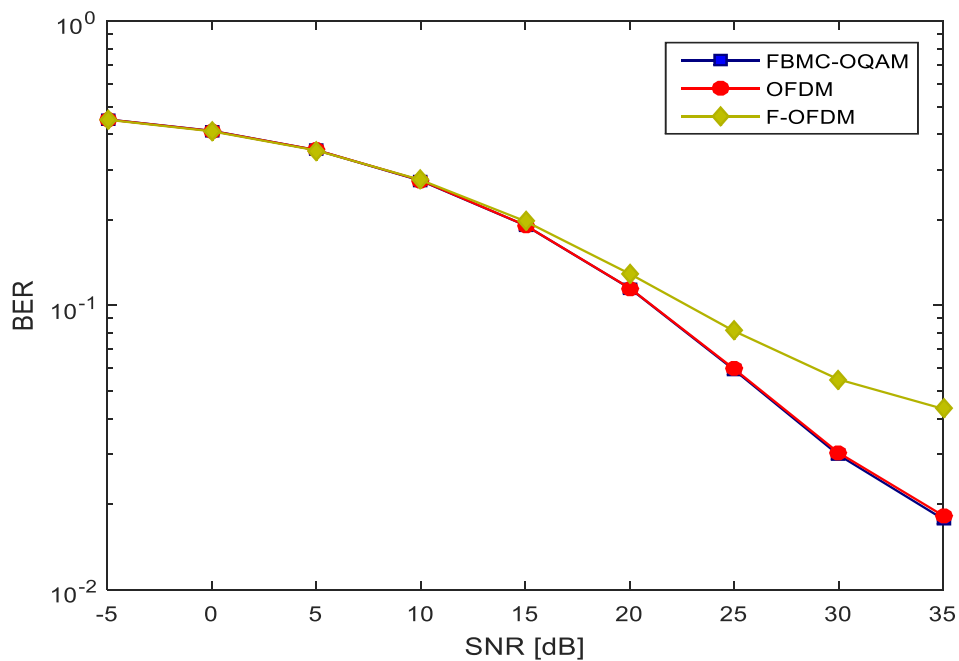


Figure III- 4 : Comparaison BER entre OFDM,F-OFDM et FBMC-OQAM pour 256 QAM[43]

La simulation est réalisée avec un canal à évanouissement rapide, appelé Vehicular A, un filtre prototype Phydas pour FBMC et un filtre Sinc avec fenêtre de Hamming pour F-OFDM. Cette comparaison des différentes formes d'onde confirme que lorsque le SNR est inférieur à 15 dB, les trois candidats ont le même BER. Alors que pour un SNR supérieur à 15dB, le FBMC est légèrement meilleur que l'OFDM, mais il est bien meilleur que le F-OFDM.

III.3.2. Densité spectrale de puissance (DSP):

Les figures III. 6, III. 7 et III. 8 montrent les PSD de FBMC-OQAM, F-OFDM et OFDM avec les filtres RRC, Phydya et Hermite pour FBMC-OQAM, respectivement. La simulation est effectuée avec un canal à évanouissement rapide, appelé Vehicular A et un filtre Sinc avec fenêtre de Hamming pour F-OFDM. La comparaison des trois formes d'onde montre clairement que les lobes secondaires du FBMC-OQAM sont bien inférieurs à ceux de l'OFDM et du F-OFDM pour les trois filtres. Ceci est principalement dû au très faible rayonnement hors bande (OOB) du FBMC.

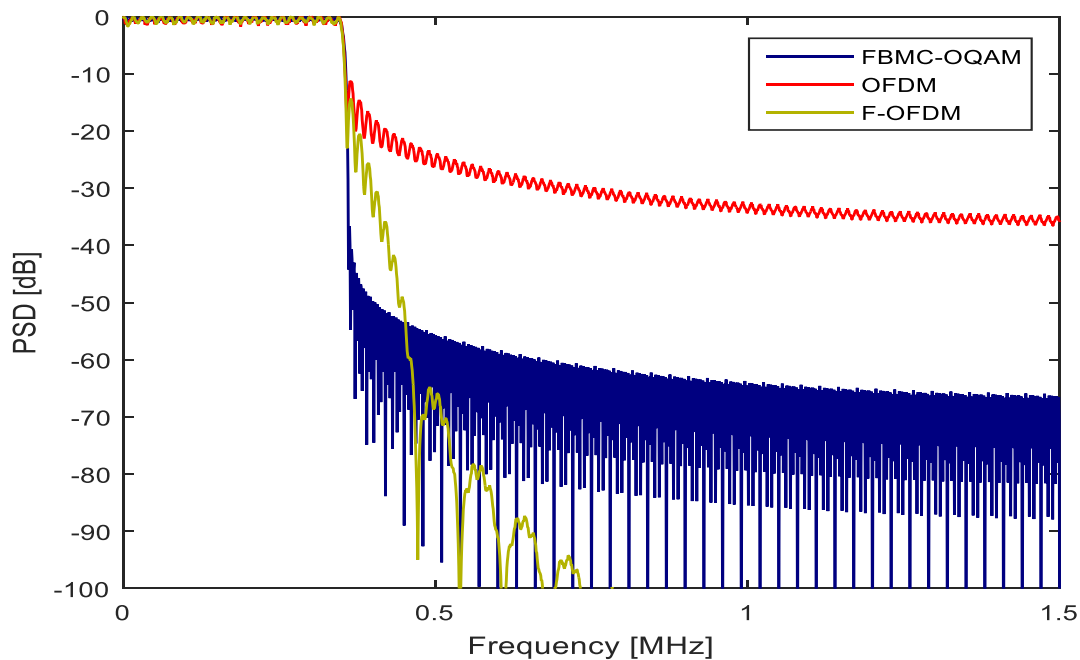


Figure III- 5 : Comparaison PSD entre OFDM,F-OFDM et FBMC-OQAM pour filtre RRC [44]

Les lobes latéraux du FBMC sont considérablement éliminés avec le filtre Hermit, n'interfèrent pas avec les lobes de sous-canal adjacent, contrairement aux deux autres filtres, et les pentes sont plus raides sur les bords de la bande de signal, ce qui permet d'utiliser plus de sous-porteuses pour la transmission du signal et d'améliorer encore l'efficacité spectrale. Cela conduit à la

conclusion que ce type de filtre est le meilleur

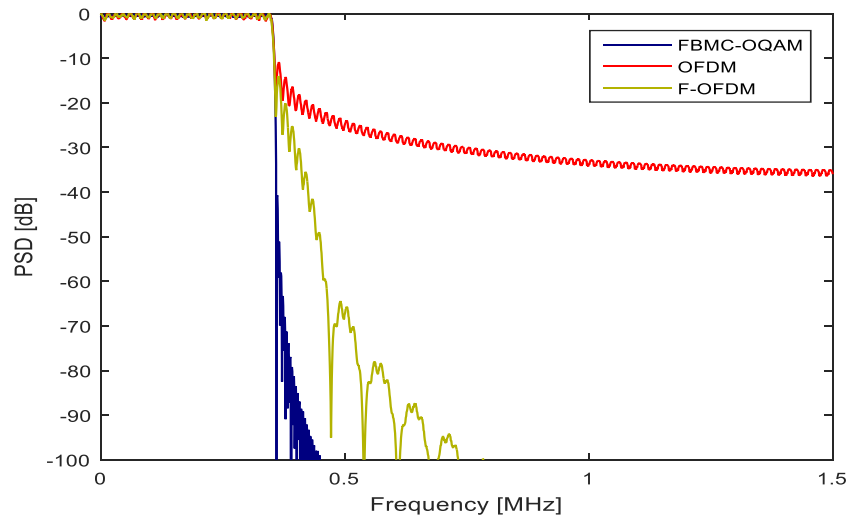


Figure III- 6 : Comparaison DSP entre OFDM, F-OFDM et FBMC-OQAM pour filtre PHYDAS[45]

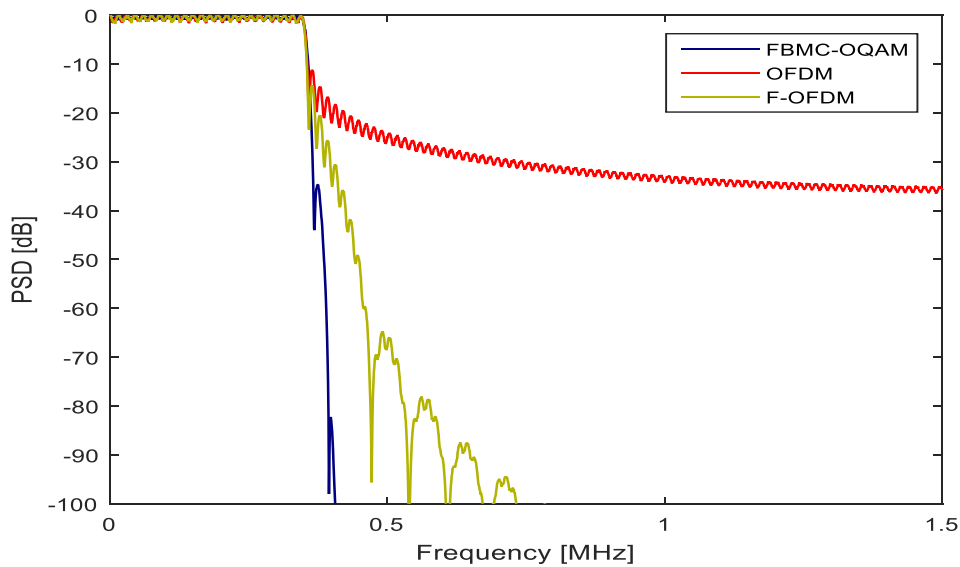


Figure III- 7 : Comparaison PSD entre OFDM, F-OFDM et FBMC-OQAM pour filtre Hermite [46].

III.4. Conclusion :

La simulation de PSD a confirmé que le FBMC-OQAM a le plus faible OOB et la meilleure efficacité spectrale pour les trois filtres et le meilleur résultat est fourni par le filtre Hermite. Les performances du BER simulé pour les trois systèmes de modulation étaient identiques mais à partir de 15 dB du SNR, le FBMC-OQAM enregistre les meilleurs résultats par rapport aux autres. Finalement, La forme d'onde FBMC-OQAM peut être considérée comme une alternative à

l'OFDM pour la prochaine génération (5G) en garantissant une efficacité spectrale avec un meilleur BER résultant en une capacité élevée avec un débit élevé.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les systèmes radio mobiles de 5^{ème} génération attirent de plus en plus l'attention des chercheurs et des opérateurs ces dernières années. La technologie 5G promet une révolution. Une plus grande bande passante et des temps de latence extrêmement faibles permettront de développer de nouveaux services et l'amélioration des systèmes existants. Le développement et le déploiement, de ces réseaux, présentent de très grands défis.

À l'heure actuelle, les plus grands opérateurs ont déjà commencé à expérimenter des réseaux 5G. Il s'agit évidemment d'expérimentations pré-commerciales, car, actuellement, une norme universelle pour la 5G n'existe pas. La mise en place d'une telle norme passe forcément par le développement de nouvelles techniques clés pour répondre aux exigences des réseaux 5G. Le développement des formes d'onde post-OFDM, est l'un des champs d'investigations entamées par les chercheurs pour répondre aux exigences de la 5G. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet de fin d'études.

Dans ce travail nous avons étudié cinq formes d'ondes candidates pour la couche physique des réseaux 5G.

Dans un premier temps nous avons brièvement décrit les évolutions des différentes générations vers la cinquième génération. Nous nous sommes ensuite intéressés aux exigences et besoins qu'exigent les systèmes de la 5^{ème} génération des télécommunications sans fil avec une explication de l'architecture du standard 5G. Par la suite, dans la deuxième partie nous avons présenté les formes d'ondes CP-OFDM, FBMC, GFDM, F-OFDM et UFMC.

Dans la dernière partie, l'étude était limitée à trois types qui sont OFDM, FBMC-OQAM et F-OFDM

Nous avons mené une étude paramétrique de ces formes d'onde afin de juger leurs performances.

Les résultats de simulations obtenus, montrent que la FBMC-OQAM présente les meilleurs résultats en termes de PSD. Les performances du BER simulé pour les trois systèmes de modulation étaient identiques mais à partir de 15 dB du SNR, le FBMC-OQAM enregistre les meilleurs résultats par rapport aux autres. Finalement, La forme d'onde FBMC-OQAM peut être considérée comme une alternative à l'OFDM pour la prochaine génération (5G) en garantissant une efficacité spectrale avec un meilleur BER résultant en une capacité élevée avec un débit élevé.

Bibliographies

Bibliographies

Bibliographies

- [1] Majid Irfan Baba¹, Naira Nafees², Insha Manzoor³, Kamran Aijaz Naik⁴, Suhaib Ahmed⁵ Evolution of Mobile Wireless Communication Systems from 1G to 5G : A Comparative Analysis Department of Electronics and Communication Engineering, Baba Ghulam Shah Badshah University, Rajouri, J&K, India_2018 IJSRCSEIT | Volume 4 | Issue 1 | ISSN : 2456-3307
- 2] DACI Kaoutar, DOU Warda , Etude de massive MIMO pour 5G, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, (MASTER),2018/2019,page(3)
- [3] <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/telecoms-histoire-telephone-portable-annees-80-nos-jours-1944/page/5/> 2019
- [4] G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality innovations-white-papers-14-Updated Mar 5, 2019
- [5] Jaime Lloret, Lorena Parra, Miran Taha, Jesús Tomás ,An Architecture and Protocol for Smart Continuous eHealth Monitoring using 5G Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras. Universidad Politécnica de Valencia, Spain-May 2017
- [6]G/NR-FrameStructure[Enligne].https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Fr-5ameStructure.html [consulté le 20 Mai 2019.]
- [7] NR Resource Block Definition and RBs Calculation. April 24,2019 [En ligne]. <http://www.techplayon.com/nr-resource-block-definition-and-rbs-calculation/>[consulté le 27 Mai 2019.
- de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras. Universidad Politécnica de Valencia, Spain
- [8] Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond Yuanwei Liu, Member, IEEE, Zhijin Qin, Member, IEEE, Maged Elkashlan, Member, IEEE,Zhiguo Ding, Senior Member, IEEE, Arumugam Nallanathan, Fellow, IEEE, and Lajos Hanzo, Fellow, IEEE, arXiv:1808.00277v1 [cs.IT] 1 Aug 2018
- [9] Moret, Boris. Amplificateur de puissance autonome pour applications OFDM et beamforming de la 5G aux fréquences millimétriques en technologie CMOS avancée. Bordeaux, 2017.
- [10] bendahmane Amira Meriem et Ghermoul Rania, Etude de méthode de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systemes FBMC,(master), Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen,2018, (page 5)
- [11] Julien Lausson: une toute nouvelle bande de fréquences sera bientôt réservée aux opérateurs, Article 5G - 12 juin 2019
- [12]Elhem souissi, NOMA avec massive MIMO dans les réseaux 5G ,(mèmoire master),L'ècole Nationale d'èlectronique et des Télécommunications de sfax ,2020, (page 13,14)

Bibliographies

[14] Yahia Medjahdi, Sylvain Traverso. «Critical and comparative study of waveforms in C-MTC context». Document 2017. Deliverable D2.1, project WONG5.

[15] Mr. BOUAZIZ Samir, « Réduction du PAPR du système OFDM-MIMO en 4G », Mémoire MAGISTER, année 2015.

[16] OFDM », article de Wikipedia consulté le 15 Avril 2019.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing#Principe

[17] Annick Le Glaunec , « MODULATIONS MULTIPORTEUSES », Document consulté le 20 Avril 2019.

[18] NOUARIA ASMA, « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM sur FPGA », Mémoire pour l'obtention du Diplôme de master, année 2016.

[19] HO Anh Tai , « Application des techniques multiporteuses de type OFDM

pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite », thèse de Doctorat à l'université de Toulouse, année 2009.

[20] Tobias Hidalgo Stitz, « Filter Bank Techniques for the Physical Layer in Wireless », thèse de Doctorat à l'université de Tampere, année 2010.

[21] BTISAM MOURID, « FILTRE À DÉCIMATION PARALLELISÉ », Mémoire de maîtrise électronique, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 16 Octobre 2003.

[22] P. Siohan, C. Siclet, and N. Lacaille, "Analysis and design of OFDM/OQAM

systems based on filterbank theory ,”Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 50, no.

5, pp. 1170 –1183, may 2002.

[23] Viholainen, A.; Bellanger, M.; Huchard, M.; "PHYDAS - PHYsical layer for Dynamic Access and cognitive radio", Report D5.1, January 2009

[24] P.Siohan,C.Siclet,andN.Lacaille,Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory,IEEE Transaction on Signal Processing ,vol.50,pp.11701183,May2002

[25] M. Bellanger, Digital Signal Processing – Theory and Practice. Wiley, Chichester, NY, USA, 1999.

[26] Attif Basheer Aamir Habib. FILTER BANK MULTI CARRIER BASED MIMO SYSTEMS FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION .Institute of space technology Islamabad, Pakistan. July 2016

Bibliographies

- [27] BENYAHIA Hafsa Imane et CHERIFI Wafa, ETUDE DE LA TECHNIQUE DE MODULATION FBMC/OQAM. Laboratoire de recherche en télécommunication, Automatique, Signal Et Images (LR-TASI) Ecole Doctorale en Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'innovation (ED -STII). Ecole Supérieure Polytechnique- Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101 –Madagascar
- [28] Amjad Iqbal, Syed Shah, M. Amir. Adaptive Investigating Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) Performance Analysis in 5G Cognitive Radio Based Sensor Network (CSN)
- [29] Wild T, Schaich F, Chen Y 5G Air interface design based on universal filtered (UF) OFDM. 19th International Conference on Digital Signal Processing, pp. 699-704, (2014)
- [30] An C, Kim B, Ryu HG, Waveform comparison and nonlinearity sensitivities of FBMC, UFMC and W-OFDM systems. 8th International Conference on Networks & Communications, pp. 83- 90, (2016)
- [31] Xiaojie Wang, Thorsten Wild, and Frank Schaich. Filter Optimization for Carrier-Frequency- and Timing-Offset in Universal Filtered Multi-Carrier Systems. Vehicular Technology Conference (VTC Spring)
- [32] <https://www.is-wireless.com/wp-content/uploads/2015/07/5GNOW-Deliverables-5GW-waveform-Candidate-Selection.pdf>, avril 2019
- [33] Thiagarajan 1, Soundharya Veerappan 1 1 Sadhana Performance Analysis of UFMC and its Comparison with CP-OFDM (Electronics and Communication Engineering, Periyar Maniammai Institute of Science and Technology, Vallam, Thanjavur, Tamilnadu, India. mars 2018)
- [34] Fanggang Wang*(1), Xia Chen(2), Yinsheng Liu(1), Deshan Miao(3), and Zhuyan Zhao(3)(1), Comparison of 5G Waveform Candidates in High Speed Scenario Qiwei Zheng(1) State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing,
- [35] X. Wang, T. Wild, and F. Schaich, "Filter optimization for Carrier frequency- and timing offset in universal filtered multi-carrier systems," in Proc. IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 16, May 2015

Bibliographies

- [36] Abdoli J., Jia M. and MaJ., "Filtered OFDM: A New Waveform for Future Wireless Systems," 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Stockholm, pp. 66-70, 2015.
- [37] Syed Shoaib Ullah Shah¹, Majid Ashraf², Ruhul Amin Khalil³, Tariqullah Jan⁴, M. Inayatullah Babar⁵, S. Waqar Shah⁶, Gulzar Ahmad⁷, "Implementing Enhanced MIMO with F-OFDM to Increase System Efficiency for Future 5G Cellular Networks, Department of Electrical Engineering, University of Engineering and Technology Peshawar, Pakistan. August 2018
- [38] Abdullah Ahmed Nadji, Ahmed Sadeq Sultan, Ahmed Saeed Hatem Abdullah et d'autres auteurs, «Analysis of out of band emission reduction for 5G wireless communications», Soutenu à TAIZ, Université de TAIZ-Yemen, 2017.
- [39] Nicola Michailow, Maximilian Matthé, Ivan Gaspar, « Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks », IEEE transactions on communications, "FP7 project 5GNOW", Sponsor: Union Européen, Institut national de télécommunications et conseil national pour le développement scientifique et technologique, Brésil, 2014.
- [40] D. Kténas, N. Cassiau and J-B, Comparative study of 5G waveform candidates for below 6GHz air interface R. Gerzaguët, Doré CEA-Leti –Minatec Campus –Grenoble, France. 27-28 January 2016
- [41] ETUDE DE LA TECHNIQUE DE MODULATION FBMC/OQAM Theodoret N.1, Randriamitantoa P.A.2, Randriamitantoa A. A.3 Laboratoire de recherche en télécommunication, Automatique, Signal Et Images (LR-TASI) Ecole Doctorale en Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'innovation (ED -STII) Ecole Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101 -Madagascar
- [42] X. Zhang, L. Chen, J. Qiu, and J. Abdoli, "On the Waveform for 5G," IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 11, pp. 74–80, Dec. 2016.
- [43] Huawei, HiSilicon, "5G waveform: requirements and design principles," 3GPP Standard Contribution (R1-162151), Busan, Korea, Apr. 11-15 2016.
- [44] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "OFDM and its wireless applications: a survey," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 58, no. 4, pp. 1673–1694, May. 2009.
- [45] Y. Rahmatallah and S. Mohan, "Peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems: a survey and taxonomy," IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 15, no. 4, pp. 1567–1592, Mar. 2013.
- [46] A. F. Demir and H. Arslan, "The impact of adaptive guards for 5G and beyond," in Proc. IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, Canada, pp. 1–5, October 2017.
- [47] Qualcomm Inc., "Waveform candidates," 3GPP Standard Contribution (R1-162199), Busan, Korea, Apr. 11-15 2016.

Bibliographies

[48] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. t. Brink, and J. F. Frigon, “Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE,” in Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Atlanta, GA, USA, pp. 223–228, December 2013.