

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systemes des Télécommunications**

Les différentes formes d'ondes candidates dans les applications 5G

Présenté par :

Youcefi Abdessamad

Mazouni Ibrahim

Sous la direction de :

Dr .Samir Ikni

Juillet 2019

Remerciements

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

Ce travail a été réalisé avec l'aide de nombreuses personnes que nous souhaitons remercier.

Ce travail a été effectué à l'université de Guelma Algérie

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

Tout d'abord, Nous remercions l'encadreur Dr Samir Ikni, nous a fourni des conseils de ce mémoire.

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

Dédicaces

Nous dédions mon travail à mes parents,

Mes sœurs et mes frères,

Tout la famille, mes amis, mes collègues de fin de cycle,

Et tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à

*L'élaboration de ce modeste mémoire sans pour autant
oublier mon encadreur qui mérite une dédicace spéciale pour
leur effort qui m'a consacré afin de réussir ce travail.*

Youcefi Abdessamad

Dédicaces

Nous dédions mon travail à mes parents,

Mes sœurs,

Tout la famille, mes amis, mes collègues de fin de cycle,

Et tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à

*L'élaboration de ce modeste mémoire sans pour autant
oublier mon encadreur qui mérite une dédicace spéciale pour
leur effort qui m'a consacré afin de réussir ce travail.*

Mazouni Brahim

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les différentes formes d'ondes dans le but d'obtenir une bonne qualité de communication sans fils avec des débits de transmission plus élevés pour des applications du futur standard 5G. Dans ce mémoire, trois points importants pour le développement des techniques multi-porteuses sont discutés, ces trois points peuvent être résumés comme suit :

Nous commençons par une petite description des caractéristiques d'un canal multi-trajet dans lesquels ces techniques sont intéressantes suivi d'une étude du principe de la modulation OFDM. Ensuite, nous étudierons les exigences et les besoins du standard 5G, et pour finir nous examinons quelques nouvelles modulations qui peuvent remplacer la modulation OFDM. En outre, une comparaison entre ces modulations et l'OFDM a été faite, puis différents résultats de simulation ont été exposés en employant le logiciel MATLAB pour confirmer l'efficacité et évaluer les performances de chaque technique.

Mots clés : OFDM, FBMC/OQAM, UFMC, F-OFDM, 5G

Abstract

The purpose of this report is to study the different waveforms in order to obtain a good wireless communication quality with higher transmission rates for the future 5G applications. In this work, three important points for the development of multi-carrier techniques are discussed which can be summarized as follows:

We begin with a short description of the characteristics of a multi-path channel in which these techniques are interesting followed by a study of the principle of OFDM modulation. Next, we will study the requirements and needs of the 5G standard, and finally we examine some new modulations that can replace the OFDM modulation. In addition, a comparison between these modulations and the OFDM was made, then different simulation results were exposed using MATLAB software to confirm the effectiveness and evaluate the performance of each technique.

Key words: OFDM, FBMC/OQAM, UFMC, F-OFDM, 5G.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة أشكال الموجات المختلفة من أجل الحصول على جودة اتصال لاسلكي جيدة مع معدلات نقل أعلى لسيناريو سياق الجيل الخامس. في هذه المذكرة، تمت مناقشة ثلاث نقاط مهمة لتطوير تقنيات النقل المتعدد. يمكن تلخيص هذه النقاط الثلاث على النحو التالي:

نبدأ بوصف قصير لخصائص قناة متعددة المسارات بحيث تكون فيها هذه التقنيات مهمة وتليها دراسة مبدأ التشكيل (OFDM). ثم قمنا بدراسة متطلبات واحتياجات معيار الجيل الخامس ، وأخيراً تطرقنا إلى شرح التشكيلات الجديدة التي يمكن أن تحل محل التشكيل (OFDM) والمقارنة بين هذه التشكيلات جميعاً. ثم الاختبار العملي لهذه النتائج المختلفة باستخدام برنامج مختبر المصفوفات (MATLAB) من أجل إثبات فعالية كل منها.

كلمات مفتاحية: 5G, F-OFDM, UFMC, FBMC/OQAM, OFDM.

TABLES DES MATIERES

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des acronymes	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Forme d'onde du standard 4G, OFDM.....	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Canal multi trajet	4
I.3.1. Caractéristique d'un canal à trajet multiple	5
I.3.2. La dispersion des retards.....	6
I.3.3. La dispersion fréquentielle	6
I.3.4. Principales dégradations de puissance.....	6
I.4. Principe de la modulation OFDM	7
I.4.1. Spécification d'une transmission OFDM	7
I.4.2. Notion d'orthogonalité	7
I.4.2.1. Rappel mathématique	7
I.4.2.2. Porteuses orthogonales	8
I.4.3. Expression du signal OFDM en bande de base	9
I.4.3.1. Génération des porteuses en utilisant IFFT	10
I.4.3.2. Principe de la démodulation	12
I.4.3.3. La modulation de chaque porteuse	12
I.4.4. Problème des interférences	14
I.4.4.1. Interférences entre les symboles	14
I.4.4.2. Interférences entre les porteuses	14
I.4.4.3. Intervalle de garde	15
I.4.4.4. Préfixe cyclique	15
I.5. Avantages et limitations de l'OFDM.....	16

I.5.1. Avantages.....	16
I.5.2. Limitations.....	16
I.6. Conclusion	17
Chapitre 2 : Le standard 5G et ses exigences.....	18
II.1. Introduction.....	19
II.2. La technologie 5G	19
II.3. Architecture de 5G.....	20
II.3.1. Le service innovant.....	21
II.3.2. La plate-forme de validation.....	21
II.3.3. La radio Hyper-Connecté.....	21
II.4. Les exigences de la 5G.....	22
II.4.1. Efficacité spectrale	22
II.4.2. Débit de données maximal.....	23
II.4.3. Débit de donnée perçu par utilisateur.....	23
II.4.4. Latence.....	24
II.4.4.1. Latence du plan utilisateur.....	24
II.4.4.2. Latence du plan de contrôle.....	24
II.4.5. Mobilité	25
II.4.6. Capacité de trafic d'une zone	26
II.4.7. L'efficacité énergétique des réseaux	26
II.4.8. La densité de connexion.....	26
II.4.9. Bande passante.....	26
II.4.10. Résumé des exigences.....	27
II.5. Comparaison entre 4G et 5G.....	29
II.6. Les applications de la 5G.....	30
II.6.1. Mobilité intelligente.....	31
II.6.2. Énergie Intelligent.....	31

II.6.3. Santé intelligente.....	32
II.6.4. Applications industrielles.....	33
II.6.5. Applications grand public.....	33
II.7. Conclusion.....	34
Chapitre 3 : LES FORMES D'ONDES CANDIDATES POUR 5G.....	35
III.1. Introduction.....	36
III.2. FBMC/OQAM.....	36
III.2.1. Généralité.....	36
III.2.2. La modulation OQAM.....	36
III.2.3. Bancs des filtres.....	37
III.2.4. Filtre de prototype	38
III.2.5. Structure polyphasé.....	39
III.2.6. principe de la modulation.....	40
III.2.7. Comparaison entre FBMC et OFDM.....	41
III.3. UFMC.....	42
III.3.1. Modèle de système UFMC.....	43
III.3.2. Structure d'émetteur UFMC.....	43
III.3.3. Structure d'un récepteur UFMC.....	45
III.3.4. Conception du filtre pour UFMC	46
III.3.5. Comparaison entre UFMC et FBMC.....	46
III.4. F-OFDM.....	47
III.4.1. Architecture de la F-OFDM	47
III.4.2. Structure d'émetteur-récepteur F-OFDM.....	48
III.4.3. Conception du filtre pour f-OFDM.....	49
III.4.4. Comparaison entre F-OFDM et OFDM.....	50
III.5. Conclusion.....	51
Chapitre 4 : RESULTAT DE SIMULATION.....	52
IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Comparaison entre OFDM et FBMC.....	53

IV.2.1. FBMC	53
IV.2.2. Réponse impulsionnelle.....	54
IV.2.3. Réponse fréquentielle.....	55
IV.2.4. Densité spectrale de puissance	56
IV.3. Comparaison entre OFDM et UFMC.....	57
IV.3.1. Réponse impulsionnelle.....	57
IV.3.2. Réponse fréquentielle.....	58
IV.3.3. Densité spectrale de puissance.....	59
IV.4. Comparaison entre OFDM et F-OFDM.....	60
IV.4.1. Réponse impulsionnelle.....	60
IV.4.2. Réponse fréquentielle.....	61
IV.4.3. Densité spectrale de puissance.....	62
IV.5. Comparaison entre UFMC et FBMC/OQAM.....	63
IV.5.1. Densité spectrale de puissance.....	63
IV.6. Comparaison entre F-OFDM et FBMC/OQAM.....	64
IV.6.1. Densité spectrale de puissance.....	64
IV.7. Conclusion.....	65
Conclusion Générale.....	67

Les Références

Liste des figures

Chapitre 1 : Forme d'onde du standard 4G, OFDM

Figure I-1 : Schéma de principe des trajets multiple.....	4
Figure I-2 : Dégradation principale de la puissance.....	7
Figure I-3 : Exemple d'une base orthogonale.....	8
Figure I-4 : Différence entre OFDM et une technique -multi porteuse Conventionnelle.....	9
Figure I-5 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.....	9
Figure I-6: Schéma de principe d'un modulateur OFDM.....	11
Figure I-7: Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM.....	11
Figure I-8: schéma de principe du démodulateur OFDM.....	12
Figure I-9: Codage de gray des constellations (a) 4-QAM et (b) 16-QAM.....	13
Figure I-10: interférence entre les porteuses dans le domaine fréquentielle.....	14
Figure I-11: intervalle de garde.....	15
Figure I-12: préfixe cyclique.....	15

Chapitre 2 : Le standard 5G et ses exigences

Figure II-1 : L'architecture de la 5G.....	20
Figure II-2 : L'efficacité spectrale.....	22
Figure II-3 : Débit de donnée maximal.....	23
Figure II-4 : Débit de donnée perçu par utilisateur.....	24
Figure II-5 : Latence	25

Figure II-6 : La mobilité supportée.....	25
Figure II-7 : La bande passante.....	27
Figure II-8 : Comparaisons entre les performances de 4G et de la 5G.....	30
Figure II-9 : Développement de services Internet.....	30
Figure II-10 : Mobilité intelligente.....	31
Figure II-11 : Energie intelligente.....	32
Figure II-12 : Santé intelligente.....	32
Figure II-13 : Applications industrielles.....	33

Chapitre 3 : LES FORMES D'ONDES CANDIDATES POUR 5G

Figure III-1 : Répartition des symboles OFDM et FBMC/OQAM selon les sous- porteuses.....	37
Figure III-2 : Schéma d'un banc de filtres à M canaux d'analyse/synthèse.....	37
Figure III-3 : Réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS avec M=16.....	39
Figure III-4 : Un émetteur-récepteur à porteuse multiples avec des bancs de filtres.....	40
Figure III-5 : Comparaison en fréquence de l'OFDM et FBMC.....	41
Figure III-6 : Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC.....	43
Figure III-7 : Structure générale de l'émetteur UFMC.....	45
Figure III-8 : Structure générale du récepteur UFMC.....	45
Figure III-9 : la repense temporelle et fréquentielle du filtre.....	46
Figure III-10 : émetteur F-OFDM.....	48
Figure III-11 : Récepteur F-OFDM.....	49
Figure III-12 : Réponse impulsionnelle du filtre	50

Chapitre 4 : RESULTAT DE SIMULATION

Figure IV-1 : la Densité spectrale de puissance de FMBC avec déferents valeurs de facteur k.....	53
Figure IV-2 : les réponses impulsionnelles FBMC et OFDM.....	54
Figure IV-3 : les réponses fréquentielles FBMC et OFDM d'une sous-porteuse unique.....	55
Figure IV-4 : la densité spectrale de puissance pour FBMC et OFDM.....	56
Figure IV-5 : Les réponses impulsionnelles pour UFMC et OFDM	57
Figure IV-6 : Les réponses fréquentielles UFMC et OFDM d'une sous-porteuse unique.....	58
Figure IV-7 : la densité spectrale de puissance pour UFMC et OFD.....	59
Figure IV-8 : Les réponses impulsionnelles pour F-OFDM et OFDM.....	60
Figure IV-9 : Les réponses fréquentielles pour F-OFDM et OFDM.....	61
Figure IV-10 : la densité spectrale de puissance pour F-OFDM et OFDM.....	62
Figure IV-11 : la densité spectrale de puissance pour UFMC et FBMC.....	63
Figure IV-12 : la densité spectrale de puissance pour F-OFDM et FBMC.....	64

Liste des acronymes

AR : Réalité augmenté

CP : Préfixe cyclique

DVB : Digital Video Broadcasting

DAB : Digital Audio Broadcasting

DSP : Densité spectrale de puissance

EQM: Erreur quadratique moyenne

FIR : Réponse impulsionnelle finie

FFT : Fast Fourier Transform

FBMC : Filter Bank Multi-Carrier

F-OFDM : Filtered orthogonal frequency division multiplexing

IES : Interférence entre symboles

IEP : Interférence entre porteuse

IdO : Internet des objets

IA : Intelligence artificielle

ITT : Intervalle de temps de transmission

MATLAB : Matrix Laboratory

M-QAM : Quadrature Amplitude Modulation

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output

MMSE: Erreur quadratique moyenne minimale

ML: maximum vraisemblance

M2M : Machine à Machine

NFV : Network Function Virtualization

NPR: New multi-Personalized Recommender

OOBE: out-of-band-emission

OFDM : Orthogonal frequency-division multiplexing

OQAM : Offset Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature phase-shift keying

QoE : Quality of Experience

QMF : Quadrature Mirror Filter

RIT : Technologie d'interface radio

SDN : Software Defined Networking

SDU : Les unités de données de service

SRIT : Ensemble de technologies d'interface radio

TFD : Transformée de Fourier discrète

UFMC : Universal filtered multi carrier

VR : Réalité virtuelle

V2V : Vehicle-to-Vehicle

WLAN : Wireless Local Area Network

WLL : Wireless Local Loop

ZF : Forçage à zéro

1G : 1ère Génération.

2G : 2ème Génération.

3G : 3ème Génération.

4G : 4ème Génération.

5G : 5ème Génération

Introduction Générale

Introduction générale :

De nos jours, dans un monde de à très grande mobilité, la vitesse et la capacité des systèmes de transmissions sont des éléments essentiels afin de mettre des moyens efficaces de communication entre les gens du monde entier.

Les premiers systèmes de communications numériques étaient basés sur la modulation mono-porteuse. En général, lorsque l'on veut augmenter le débit d'une transmission, on doit diminuer la durée de symbole. Cependant, la présence d'un canal multi-trajet a comme effet d'introduire de l'interférence inter-symboles (ISI), ce qui nécessite à la réception une égalisation complexe. Ainsi, les modulations multi-porteuses ont été proposées en tant que des solutions alternatives afin de contrer les effets des canaux multi-trajets. En effet, les données dans les modulations multi-porteuses sont transmises sur plusieurs fréquences porteuses en divisant ainsi le canal large-bande sélectif en fréquence en plusieurs sous-canaux non-sélectifs en fréquence [56].

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

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

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

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

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

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

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

UFMC est une nouvelle technique basée sur l'ancien formalisme de l'OFDM avec l'ajout d'un traitement qui lui permet d'avoir des performances comparables à celles de l'FBMC. Cette nouvelle candidate offre une émission hors bande réduite et une bonne localisation temps-fréquences.

F-OFDM quant à elle, c'est également une version filtrée de l'OFDM. Il s'agit d'ajouter un filtrage au niveau de chaque sous-porteuse de l'OFDM, ce qui améliore grandement l'efficacité spectrale en minimisant les lobes secondaires qu'a la forme d'onde rectangulaire de l'OFDM.

Dans le premier chapitre, on va présenter la technique OFDM, qui est utilisé dans le standard 4G (LTE). Dans le second chapitre on va présenter l'architecture et les exigences de standard 5G.

Dans le troisième chapitre nous voulons présenter des nouvelles formes d'ondes qui utilisé dans le standard 5G. Dans le quatrième chapitre nous voulons comparer entre différents formes d'ondes avec simulateur MATLAB.

CHAPITRE

I

Forme d'onde du
standard 4G, OFDM

I.1. Introduction:

L'origine de l'OFDM est un développement du FDM depuis les années 1950. L'OFDM est une technique de modulation numérique qui joue sur l'efficacité et la rentabilité de transmission dans le canal radio mobile pour un environnement multi-trajets. L'OFDM transmet les données en utilisant un grand nombre de porteuses pour une bande étroite. L'espace de fréquence et de synchronisation de la porteuse est choisi de telle sorte que les porteuses sont orthogonales pour éviter les interférences. Pour l'implémentation de l'OFDM on utilise la FFT (Fast Fourier Transform), qui est la base de cette technique. La première utilisation de l'OFDM est en 1980 dans les systèmes DAB (Digital Audio Broadcasting), et DVB (Digital Video Broadcasting) Pour ces deux derniers systèmes il y a une seule direction de la station de base vers les utilisateurs. Notre but dans ce chapitre est l'étude de la technique OFDM et son utilisation dans les réseaux de communication sans fil pour des applications multi-utilisateurs. Ces applications sont incluses dans les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network), WLL (Wireless Local Loop) ainsi que la téléphonie mobile de la 4G. On va également présenter des figures de simulation sous MATLAB qui montrent l'implémentation de l'ODEM (modulateur/démodulateur), pour lesquelles nous avons discuté les performances de cette technique en fonction de l'effet multi-trajet du canal radio mobile [1].

I.2. Historique:

La modulation multi-porteuse a été introduite à la fin des années 1950, sa première utilisation était dans des systèmes de communications hautes fréquences militaires. Quelques années plus tard elle a été améliorée avec l'apparition du concept des signaux orthogonaux à bande limitée, concept que l'on appellera par la suite "Orthogonal Frequency Division Multiplexing" (OFDM). La mise en œuvre de l'OFDM à l'époque consistait à utiliser des filtres de Nyquist. Du fait de la complexité de calcul, l'OFDM n'a pas tout de suite intéressé les industriels civils. Vingt ans plus tard, le schéma de modulation-démodulation a été simplifié avec l'utilisation de la Transformée de Fourier Discrète Inverse (TFDI) à l'émission et de la TFD au niveau du récepteur, ce qui rend facile son implémentation numérique. Au milieu des années 1980, la technique OFDM a été développée dans les domaines industriels civils tels que le projet de radiodiffusion numérique DAB [2]. Durant cette dernière décennie l'OFDM est adoptée pour une large gamme d'applications, telles que DVB, DSL, HomePlug, WiFi,

WiAX, ainsi que les applications de communication sans fil de 4^{ème} génération, notamment LTE.

I.3. Canal multi trajet:

Avant d'exposer le principe des modulations multi-porteuses, nous allons donner quelques caractéristiques du canal radio mobile pour lequel ce type de modulations est intéressant. Dans un système de communication sans fil, les signaux de transmission s'interfèrent les uns avec les autres à cause de différents mécanismes. Le récepteur peut recevoir un signal sous plusieurs versions à travers des trajets multiples. On appelle ce phénomène l'effet multi-trajet. En effet, il existe cinq phénomènes principaux: la réflexion, la réfraction, la diffraction, la diffusion et le guidage d'onde qui ont un impact direct sur la propagation du signal. Les ondes émises lors de la communication radio subissent généralement une combinaison de ces divers phénomènes. Par conséquent, le signal reçu est une somme de tous les signaux arrivants au récepteur sur les différents trajets, et cette somme peut s'effectuer d'une manière constructive ou destructive. Les obstacles peuvent être considérés comme un avantage ou un inconvénient pour la transmission [3].

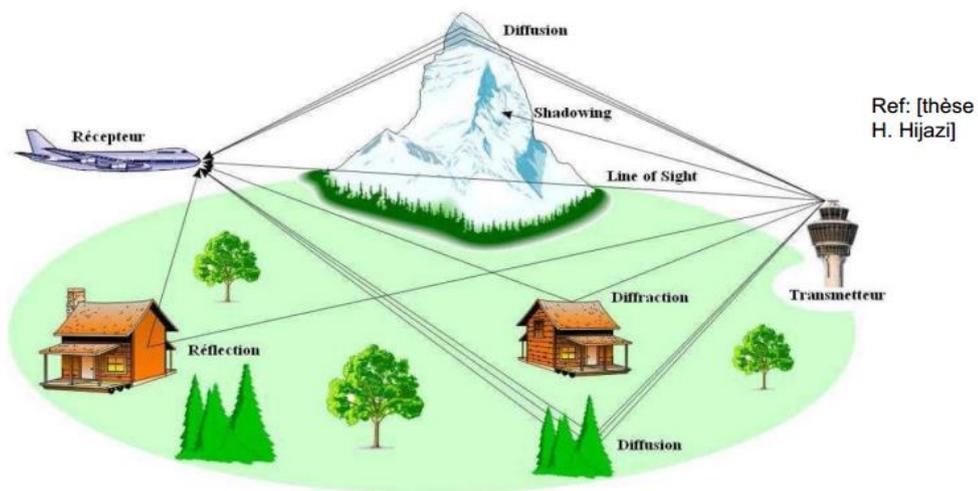


Figure I-1 : Schéma de principe des trajets multiple

Considérons un modèle simple de canal à l'issue duquel le récepteur reçoit la somme des signaux émis ayant subi des échos donc retardés de τ_i et d'amplitudes h_i [3].

La réponse impulsionnelle du canal s'écrit alors :

$$h(t) = \sum_{i=1}^I h_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

Sa fonction de transfert est obtenue par transformée de Fourier comme suit :

$$H(f) = \sum_{i=1}^I h_i e^{-2j\pi f \tau_i} \quad (2)$$

I.3.1. Caractéristique d'un canal à trajet multiple :

L'évaluation des systèmes de transmission est faite selon deux caractéristiques : la qualité de transmission et la complexité de calcul liée aux opérations de modulation/démodulation. Les grandeurs permettant de quantifier la qualité de la transmission sont :

- **Le taux d'erreur binaire (TEB) :** permet de mesurer la fréquence à laquelle les erreurs se produisent, il correspond au rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total des bits émis.
- **Erreur quadratique moyenne (EQM) :** détermine l'écart moyen entre les symboles émis et les symboles reçus.
- **L'efficacité spectrale :** mesure le débit binaire par unité de fréquence pour une transmission de 'q' bits sur une durée T_s et une largeur de bande B allouée à la transmission. Le débit binaire étant donné par le rapport q/T_s , l'efficacité spectrale est exprimée donc par le rapport q/BT_s .
- **Le rapport signal sur bruit (RSB) :** est généralement adopté en transmission numérique comme paramètre d'entrée du récepteur pour lequel on va évaluer la qualité du message numérique restitué, il permet ainsi de qualifier la sensibilité du récepteur aux perturbations subies par le signal lors de propagation dans le canal. Le RSB est déterminé par le rapport E_b/N_0 avec N_0 la densité spectrale de puissance du bruit blanc à l'entrée du récepteur et E_b l'énergie moyenne par bit du signal modulé [4].
- **La bande de cohérence :** est une mesure statistique de la bande de fréquence dans laquelle le canal peut être considéré comme plat (non sélectif) [5].

I.3.2. La dispersion des retards:

Dans les télécommunications sans fil, les trajets réfléchis sont généralement plus longs que le trajet direct c'est-à-dire qu'ils atteignent l'émetteur plus tard que le trajet direct. Les signaux provenant de la même émission arrivent donc au niveau du récepteur avec des retards différents. La dispersion de retard peut être calculée selon la formule suivante [6] :

$$\text{Dispersion des retards} = \frac{\text{Trajet le plus long} - \text{Trajet le plus court}}{\text{Célérité de la lumière}} \quad (3)$$

I.3.3. La dispersion fréquentielle :

Les dispersions fréquentielles sont liées à la mobilité de l'émetteur et/ou du récepteur. Ces mouvements provoquent un décalage fréquentiel du spectre des signaux émis, appelé effet Doppler. Ce décalage dépend de la vitesse relative de déplacement, ainsi pour un signal émis à la fréquence f_c le récepteur aura une fréquence de réception f_r qui sera la somme de la fréquence émise f_c et le décalage Doppler f_d .

$$f_r = f_c + f_d \quad (4)$$

ou f_d est fonction de l'angle θ d'incidence, de l'onde reçue, de la vitesse V_c de déplacement relatif entre l'émetteur et le récepteur, et de la vitesse de la lumière C [7] :

$$f_d = \frac{V_c}{C} \cos \theta \quad (5)$$

I.3.4. Principales dégradations de puissance :

Si on analyse la puissance du signal reçu en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, on distingue trois types de variations de la puissance reçue:

- **Affaiblissement de parcours (pathloss) :** dû à la distance, il peut se calculer de manière déterministe ou avec un modèle empirique lorsque l'environnement se complique.
- **L'ombrage ou évanouissement lent (shadowing ou slow fading):** des variations lentes dues aux atténuations successives produites par de gros obstacles locaux qui causent de la diffraction.

- **Évanouissement rapide ou multi trajets (fast fading ou multipath fading):** des variations rapides causé par les trajets due à l'addition constructive ou destructive des signaux qui ne peut être déterministe [8].

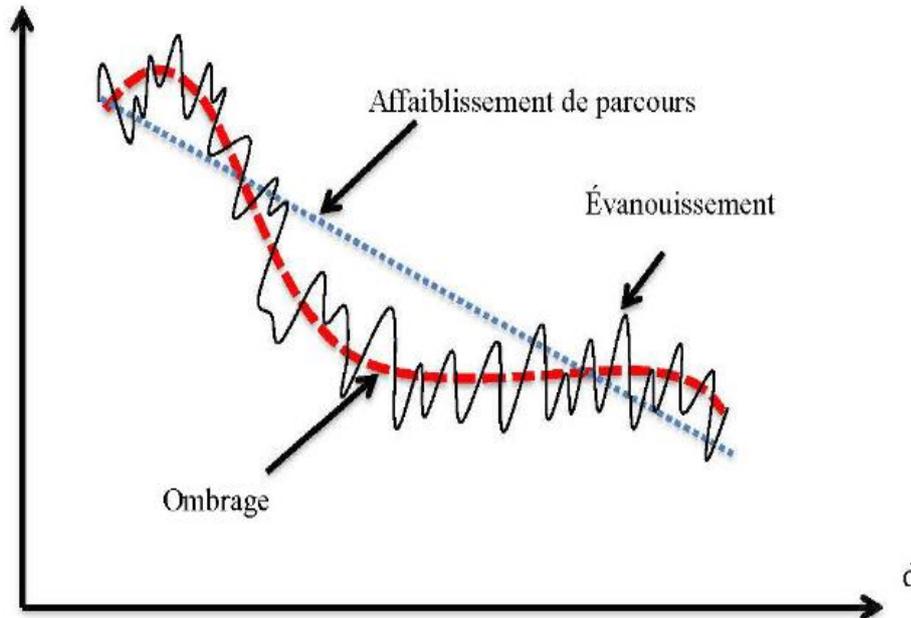


Figure I-2 : Dégradation principale de la puissance

I.4. Principe de la modulation OFDM :

I.4.1. Spécification d'une transmission OFDM :

L'OFDM est un procédé de modulation qui consiste à répartir un train binaire à haut débit sur N sous-canaux orthogonaux à bas débit. Le terme modulation est un abus de langage dans le sens où il s'agit de répartir l'information sur N sous-porteuses en bande de base. La modulation à proprement parler, qui permet d'adapter le signal autour de la fréquence centrale, reste quant à elle, identique à celle utilisée dans les chaînes de transmission numériques classiques. Après avoir rappelé la notion d'orthogonalité, nous décrirons successivement la méthode utilisée pour générer les symboles OFDM [9].

I.4.2. Notion d'orthogonalité :

I.4.2.1. Rappel mathématique :

L'orthogonalité de deux fonctions complexes $f(t)$ et $g(t)$ dans un l'intervalle $[a, b]$ est donnée par l'expression mathématique suivante :

$$\int_a^b f(t) \cdot g^*(t) = 0 \quad (6)$$

L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence [9].

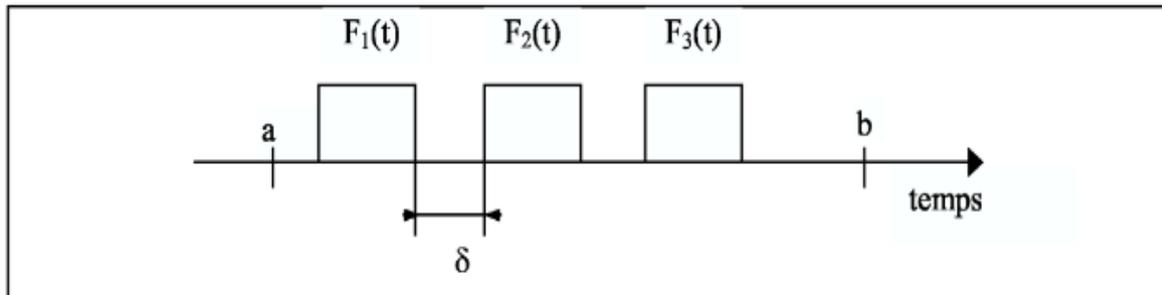


Figure I-3 : Exemple d'une base orthogonale

I.4.2.2. Porteuses orthogonales :

Nous définissons l'efficacité spectrale comme étant le débit binaire transmis par unité de fréquence. Dans une transmission de type OFDM, le choix de l'écart entre les porteuses va influencer sur cette efficacité spectrale. Plus l'espacement entre porteuses est grand, plus nous avons besoin de bande passante pour transmettre un même débit, et plus l'efficacité spectrale diminue. Pour garantir une efficacité spectrale optimale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant une absence d'interférence entre les informations qu'elles transportent afin que le récepteur soit capable de les restituer. Cette condition est vérifiée :

- dans le domaine temporel si les formes d'onde du signal OFDM reçu $g(t)$ et du récepteur $f(t)$ sont orthogonales.
- dans le domaine fréquentiel si les spectres des porteuses s'annulent mutuellement deux à deux, avec $G(f) = \text{TF}[g(t)]$.

On parle alors de condition d'orthogonalité des porteuses [10].

Voici le schéma qui montre le rôle de l'orthogonalité pour améliorer l'efficacité spectrale :

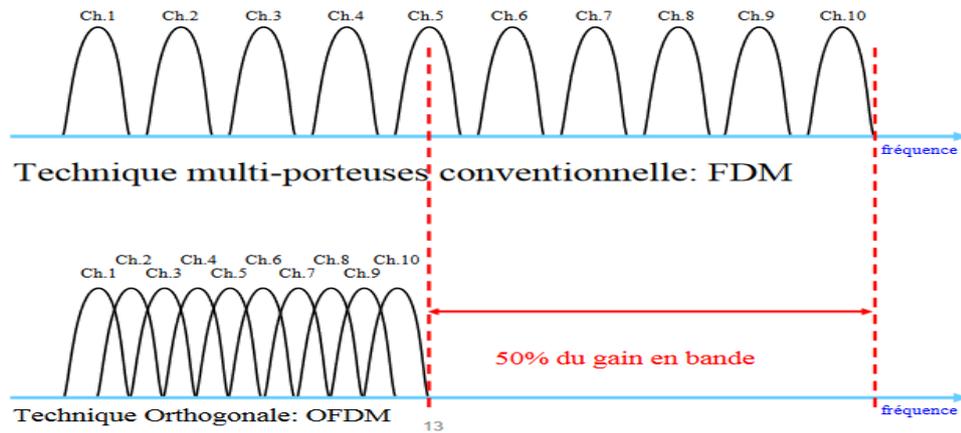


Figure I-4 : Différence entre OFDM et une technique -multi porteuse conventionnelle

I.4.3. Expression du signal OFDM en bande de base :

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée [11]. Comme le montre la Figure I-5, l'OFDM découpe le canal en cellule selon les axes du temps et des fréquences. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée. L'information à transmettre est répartie sur l'ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type QPSK ou QAM. Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant 't' [1].

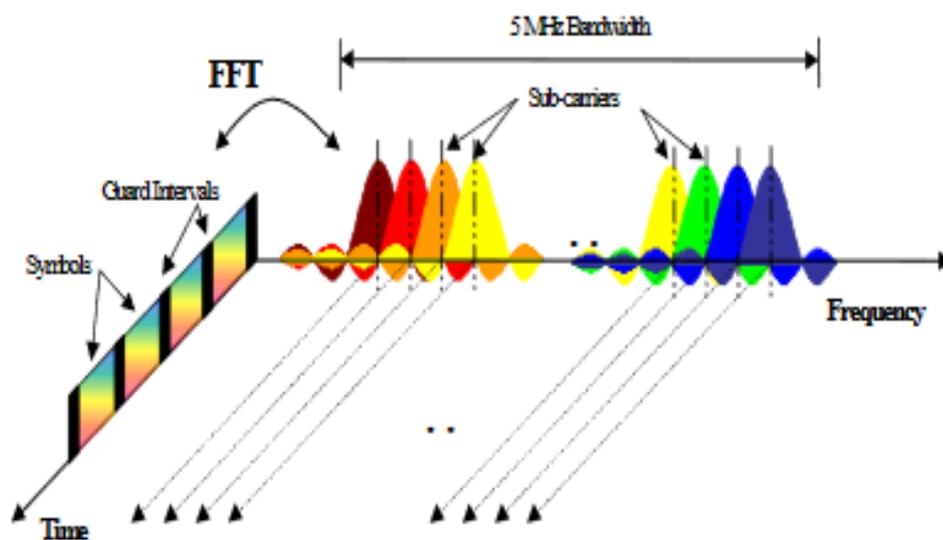


Figure I-5 : Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM

I.4.3.1. Génération des porteuses en utilisant IFFT :

L'OFDM se caractérise par une simple implémentation au niveau de la transmission et la réception, ceci grâce à l'utilisation de la TFD (transformée de Fourier discrète) : la TFDI (transformée inverse) à l'émission et la TFDD (transformée directe) à la réception. Pour implémenter efficacement la TFD, un algorithme moins complexe et plus simple est utilisé, on parle des algorithmes de transformée rapide FFT [12].

Comme nous venons de le voir, le signal OFDM se compose de N sous-porteuses de fréquences $f_k = f_0 + k\Delta_f$, avec $k \in [0, \dots, N-1]$ utilisées pour la transmission en parallèle de N symboles. Ces symboles notés c_k , sont des éléments complexes prenant leurs valeurs dans un alphabet fini correspondant à une modulation donnée comme par exemple une modulation de phase. La fonction de mise en forme est la fonction porte $\Pi(t)$ dont l'orthogonalité est vérifiée si $\Delta_f = 1/T_u$ où T_u est la durée d'un symbole OFDM. L'expression du signal OFDM en bande de base généré durant l'intervalle $[0, T_u[$ est donnée par :

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \Pi(t) e^{2j\pi f_k t} \quad (7)$$

Ou:

$\Pi(t)$ est une fonction porte définie par :

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

Le facteur $1/\sqrt{N}$ permet de normaliser l'énergie du signal qui n'est dans ce cas pas modifiée par l'opération de modulation OFDM [13].

Les données numériques c_k sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature MAQ à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à 2^q états). Ces données sont des symboles q -aires formés par groupement de q bits. On les appelle symboles numériques.

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est $1/T_u$, alors :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_u} \quad (9)$$

Et l'expression (7) peut s'écrire :

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \Pi(t) e^{2j\pi \frac{kt}{T_u}} \tag{10}$$

L'équation (10) représente la transformée de Fourier inverse des symboles c_k déduits de la constellation QPSK ou QAM, donc il suffit d'appliquer l'algorithme de la FFT (Fast Fourier Transform) sur ces symboles c_k pour réaliser la modulation OFDM [14].

Voici le schéma de principe de la modulation OFDM :

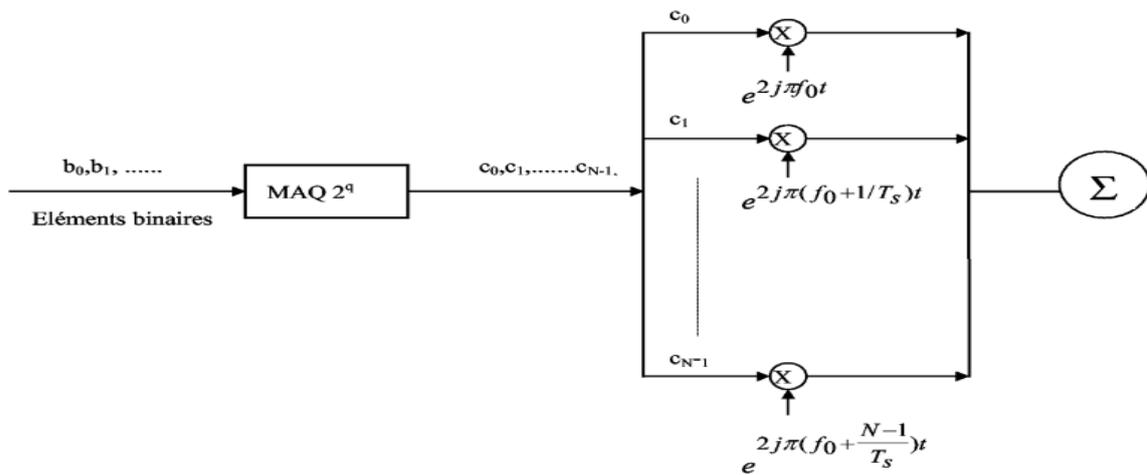


Figure I-6: Schéma de principe d'un modulateur OFDM

Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la Figure I-7. Le spectre d'un signal OFDM est la somme de tous ces spectres.

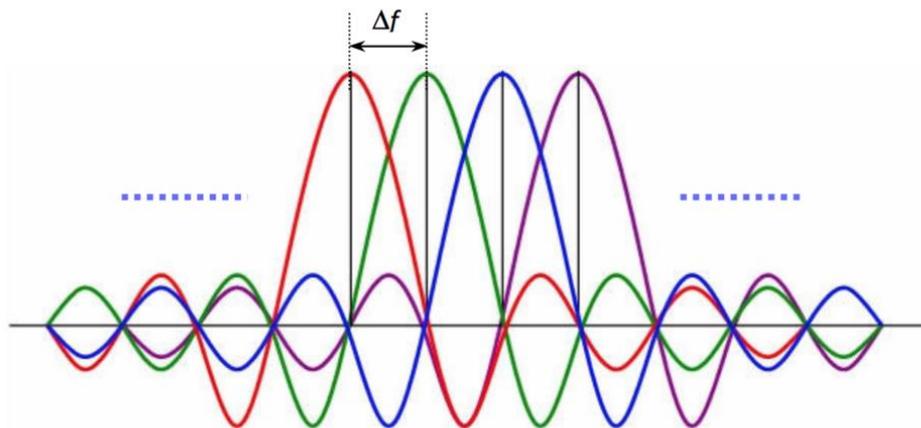


Figure I-7: Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM

I.4.3.2. Principe de la démodulation :

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

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_u})t} \tag{11}$$

$H_k(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal au niveau de la sous-porteuse k.

La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique :

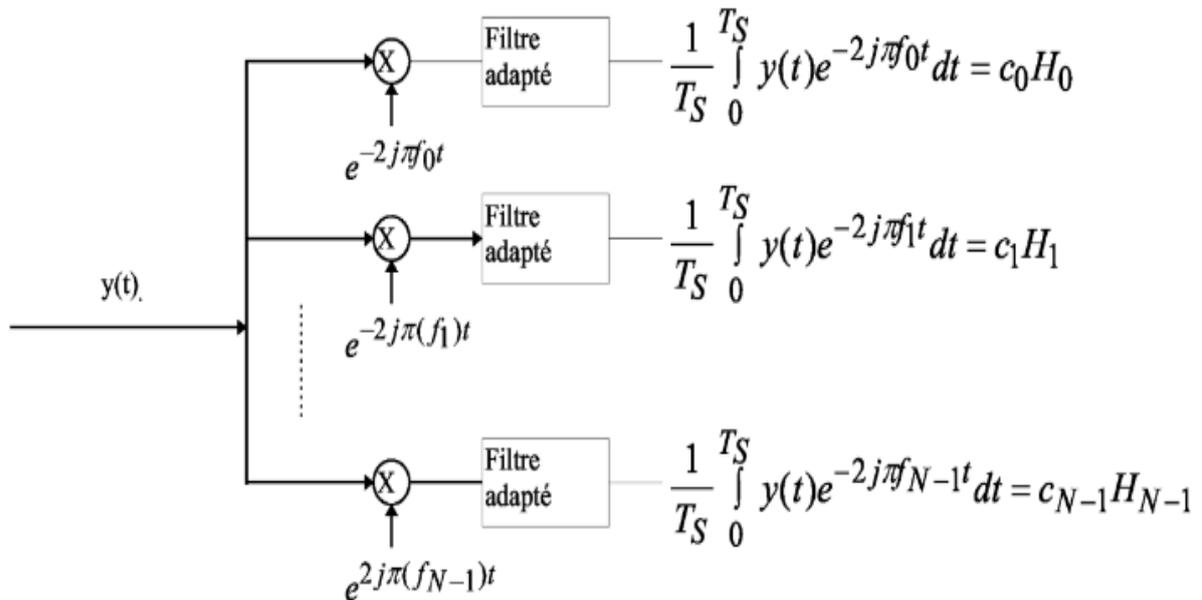


Figure I-8: schéma de principe du démodulateur OFDM

En pratique, comme pour la modulateur, le démodulateur est basé sur la transformée de Fourier directe (FFT) [14] comme une opération inverse.

I.4.3.3. La modulation de chaque porteuse :

Si un nombre R de bits à transmettre est alloué à chaque sous-porteuse, on utilisera une modulation M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation), la taille M de la constellation étant telle que $M=2^R$. Chaque symbole est représenté par un nombre complexe, dont les parties

réelles et imaginaires sont notées respectivement I et Q. Figure I-9 montre deux exemples de codage de bits par le codage de Gray: le codage de 4-QAM, identique à celui de la QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), qui code 2 bits par symbole, et le codage 16-QAM, qui code chaque symbole sur 4 bits. Chaque constellation est bâtie sur le même modèle, à savoir que les parties réelles et imaginaires des symboles prennent leurs valeurs dans $\{\pm v, \pm 3v, \pm 5v, \dots\}$. La valeur de v est ensuite normalisée pour que la puissance moyenne des symboles D_k , appartenant à une constellation, soit égale à 1 Watt, la normalisation étant basée sur une valeur d'impédance de charge de 1Ω . Cette condition de normalisation s'écrit mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |D_k|^2 = 1 \tag{12}$$

A la réception, la FFT restituera les symboles M-QAM, mais entachés de bruit. Le décodage s'effectuera donc grâce à un module de décision qui estimera le symbole le plus probable compte tenu de la constellation choisie [9].

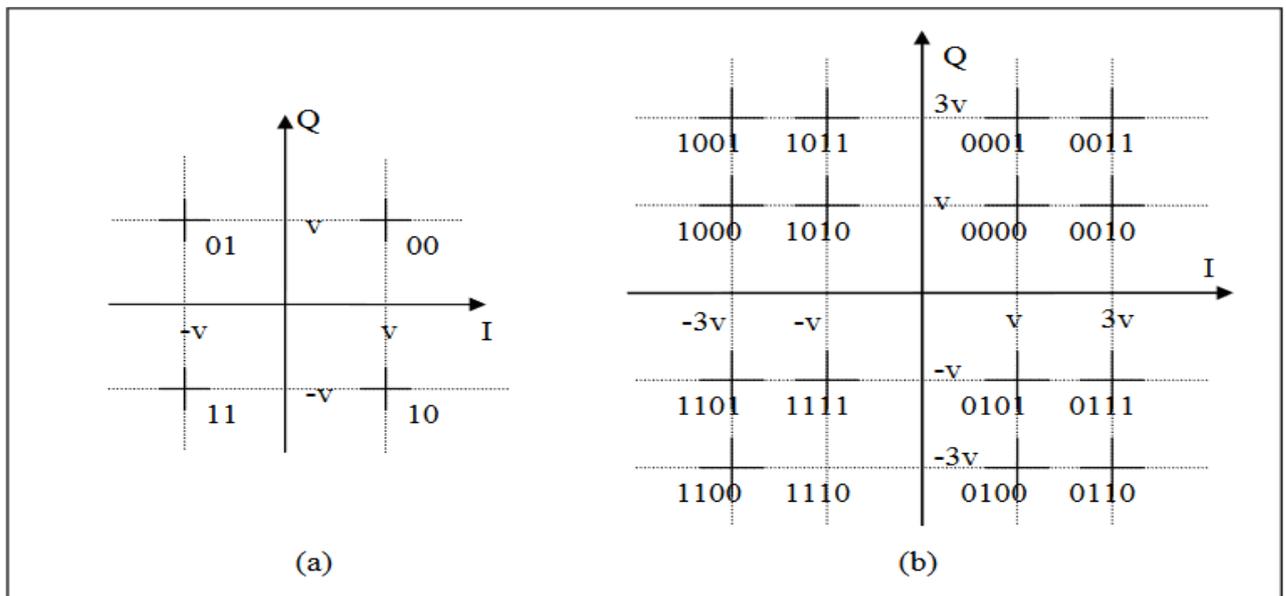


Figure I-9: Codage de gray des constellations (a) 4-QAM et (b) 16-QAM

I.4.4. Problème des interférences :

I.4.4.1. Interférences entre les symboles :

Les signaux OFDM sont transmis à des intervalles égaux, et ils doivent parcourir un certain trajet pour atteindre le récepteur. Dans le cas d'un canal multi-trajets, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur à cause des différents chemins de propagation, ce qui cause des étalements temporels différents. La prolongation de la durée des symboles fait chevaucher les symboles entre eux, ce qui donne naissance à l'interférence entre symboles (IES) [15].

I.4.4.2. Interférences entre les porteuses :

L'orthogonalité dans un système OFDM signifie qu'au maximum de chaque spectre d'une sous porteuse, tous les spectres des autres sous porteuses s'annulent, ainsi les spectres des sous-porteuses se recouvrent mais demeurent orthogonaux entre eux. L'interférence entre porteuse (IEP) est causée par une perte d'orthogonalité fréquentielle suite à un décalage fréquentiel ce qui traduit par la présence des symboles de données des sous-porteuses adjacentes dans la sous-porteuse actuelle [15].

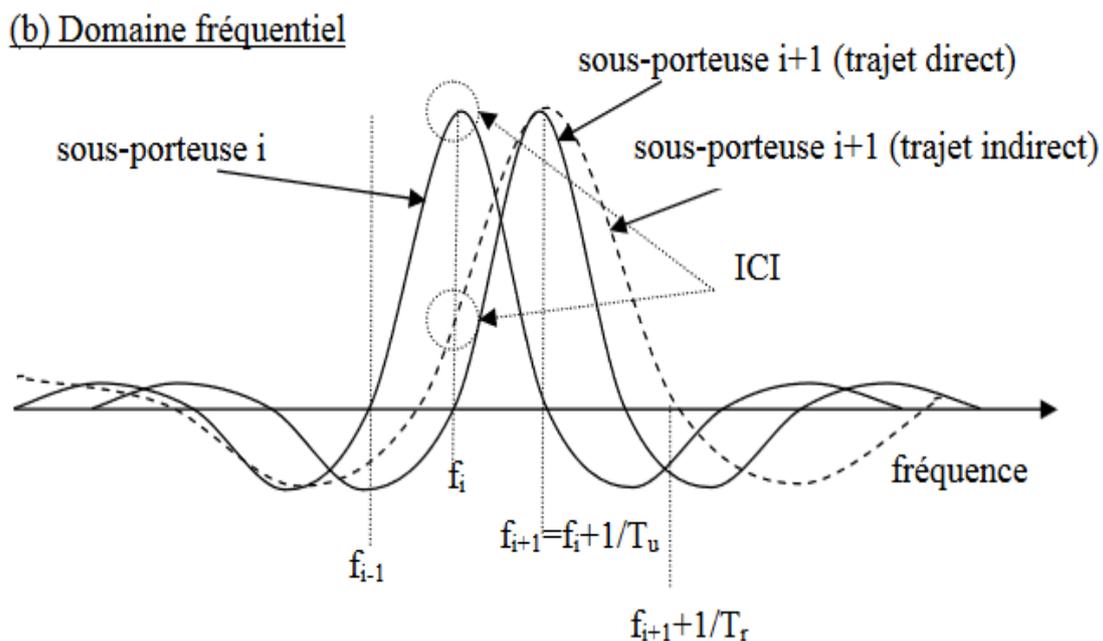


Figure I-10: interférence entre les porteuses dans le domaine fréquentielle

I.4.4.3. Intervalle de garde :

Les symboles subissent des échos et un symbole émis parvient au récepteur sous forme de plusieurs symboles atténués et retardés. Un symbole émis lors d'une période iT_s peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(i-1)T_s$, il se produit alors des interférences entre les symboles. Pour éviter ces interférences, on ajoute un intervalle de garde d'une durée T_g . Chaque symbole est précédé par une extension périodique du signal lui-même, la durée du symbole totale transmis est alors $T = T_s + T_g$, afin que les interférences soient éliminées [16].

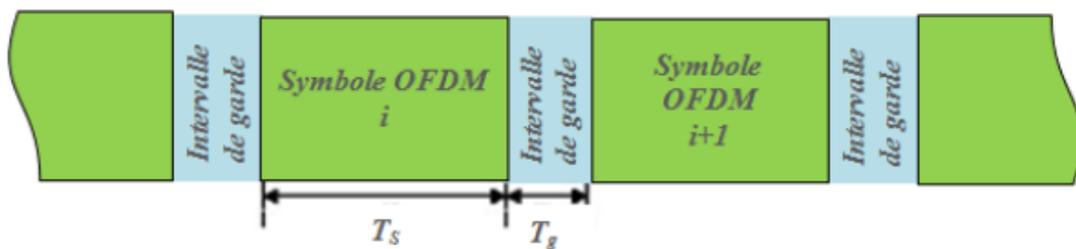


Figure I-11: intervalle de garde

I.4.4.4. Préfixe cyclique :

Est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de ce bloc. Plus clairement, il s'agit de récupérer une partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début du bloc, on appelle ce mécanisme Préfixe Cyclique (CP-OFDM)[16].

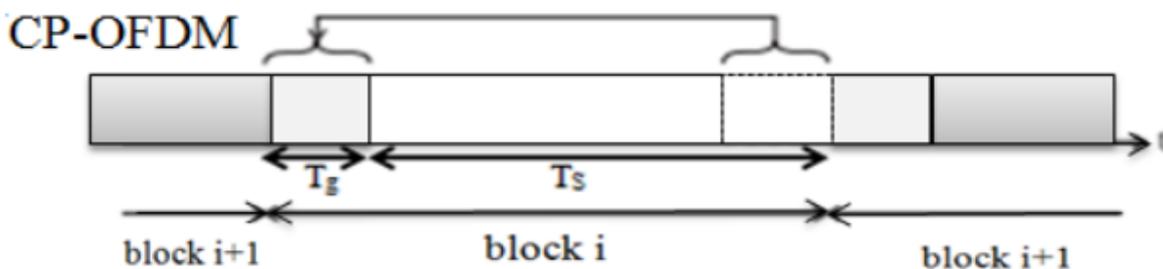


Figure I-12: préfixe cyclique

Ainsi, le préfixe cyclique permet d'éviter les interférences causées par les effets des trajets multiples et maintenir l'orthogonalité temporelle entre les symboles.

I.5. Avantages et limitations de l'OFDM:

I.5.1. Avantages :

Les avantages de l'OFDM sont nombreux :

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel (FDM). Ceci est dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite.
- Une égalisation numérique moins complexe grâce à l'utilisation d'un grand nombre de sous-porteuses, et optimale grâce à l'utilisation de l'intervalle de garde (au prix d'une diminution du débit).
- Les techniques multi-porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses. Contrairement aux modulations mono porteuses ou le bruit peut affecter un certain nombre de symboles transmis, par conséquent, la perte d'un symbole dû à un bruit important n'affectent pas les autres symboles.
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multi-utilisateurs. En effet, en fonction de la valeur du gain instantané du canal, chaque porteuse peut être codée indépendamment des autres porteuses. Il est alors possible d'implémenter la méthode de 'water pouring' lorsque le canal est connu à l'émission [17].
- Une simple implémentation numérique à l'émission et à la réception grâce à l'utilisation de la transformée de Fourier et son inverse.
- La robustesse contre l'effet multi-trajet grâce à l'utilisation du préfixe cyclique.

I.5.2. Limitations :

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

- L'OFDM conventionnelle, utilise une forme d'onde rectangulaire parfaitement localisée en temps mais mal localisée en fréquence. Elle n'a pas été adoptée

dans les communications radio mobiles vue sa sensibilité à la sélectivité temporelle (variations très rapides en temps) du canal de propagation, entraînée par le mouvement des stations mobiles. Le désir actuel d'utiliser cette technique dans les systèmes radio mobiles de 4^{ème} génération (4G) a motivé les chercheurs à proposer de nouvelles formes d'onde bien localisées à la fois en temps et en fréquence [18].

- L'intervalle de garde induit une perte d'efficacité spectrale et une perte en débit de transmission.
- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de synchronisation. Les erreurs de synchronisation induisent un déphasage sur les symboles reçus [19].
- Malgré ses nombreux avantages, la performance de l'OFDM est beaucoup moins satisfaisante dans un scénario de communication à grande mobilité, où l'effet Doppler joue un rôle important. Dans ce cas, les techniques traditionnelles, qui sont utilisées avec succès pour l'estimation de canal ou l'égalisation dans un environnement statique, fonctionneront de manière très dégradée [20].

I.6. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter l'évolution de la modulation multi porteuse OFDM, les besoins qui ont menés à l'apparition de cette technologie.

On a commencé par une petite description d'un canal à trajet multiples suivi du principe de base de l'OFDM côté émission (modulation) et côté réception (démodulation). Nous avons expliqué la propriété d'orthogonalité fréquentielle qui permet d'améliorer l'efficacité spectrale. Ensuite nous avons vu l'utilisation du préfixe cyclique et son efficacité pour combattre les interférences inter-symboles. Pour finir, on a cité les avantages et limitations et quelques applications qu'utilise cette technologie.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter l'architecture des systèmes 5G et les exigences demandées par les applications de ce futur standard.

CHAPITRE

II

Le standard 5G et ses
exigences

II.1. Introduction:

La prochaine génération des systèmes de communication sans fil représente la cinquième génération baptisée par le standard 5G. C'est la prochaine phase majeure des normes de télécommunications mobiles de la 4G actuelle. La 5G nous amène de la conception de réseaux raccordant des périphériques mobiles uniquement vers des systèmes qui connectent différents types de périphériques fonctionnant à grande vitesse.

Les principales caractéristiques de la 5G consistent en un débit élevé, une efficacité du spectre améliorée, une latence réduite, une meilleure prise en charge de la mobilité et une densité de connexion élevée.

Il prend en charge le multimédia interactif, la voix, la vidéo, Internet et d'autres services à large bande. Pour prendre en charge l'augmentation des besoins en débit de la 5G, un nouveau spectre a été assigné aux bandes 5G en onde millimétrique. La 5G utilisera plusieurs entrées multiples (MIMO) pour augmenter considérablement la capacité du réseau [21]. Le passage à la norme de communication sans fil 5G est une action en réponse à la croissance de l'Internet des objets et à la demande croissante d'accès à la vidéo et aux services sur le haut débit sans fil [22].

II.2. La technologie 5G :

L'évolution des réseaux cellulaires repose sur le défi d'une connectivité sans fil omniprésente: tout service de données est instantanément accessible partout. À chaque génération de réseaux cellulaires, nous nous sommes rapprochés de ce rêve sans fil; d'abord en fournissant un accès sans fil aux communications vocales (1G et 2G), puis en fournissant des services de données sans fil (3G), et récemment en offrant une expérience de type Wi-Fi avec une couverture étendue et une gestion de la mobilité des utilisateurs (4G). Un support à très haut débit de données a été le principal objectif de ces dernières années, ce qui justifie les efforts déployés par les organismes de normalisation pour répondre aux besoins en débit de pointe spécifiés par l'IMT-2020 qui définit les exigences du futur standard 5G.

La technologie 5G offre certaines capacités de spectre uniques, dont la capacité d'utiliser des bandes autorisées et non autorisées et de partager un spectre, permettant ainsi d'améliorer l'utilisation des bandes à haute fréquence (plus de 24 GHz), des bandes intermédiaires (1 à 6

GHz), et des sous-bandes ou bandes à faible fréquence [23]. Les bandes de 3 300 à 4 200 MHz et de 4 400 à 4 990 MHz comprises dans les bandes 5G inférieures sont d'un intérêt particulier. Elles sont déjà utilisées dans des essais sur la technologie 5G en Chine. Les bandes supérieures incluent 26, 28, 38 et 42 GHz, lesquelles sont envisagées pour le déploiement rapide de la technologie 5G aux États-Unis, en Chine et en Europe. Les autres bandes d'intérêt incluent 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,5 GHz, 2,1 GHz, 2,3 GHz et 2,6 GHz [24].

La technologie mobile 5G fait présentement son apparition et devrait être disponible à grande échelle dès 2020.

II.3. Architecture de 5G :

L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir «l'activation de service innovante», «la plate-forme d'activation» et «la radio hyper-connectée » [25], que nous décrivons dans cette section en détail.

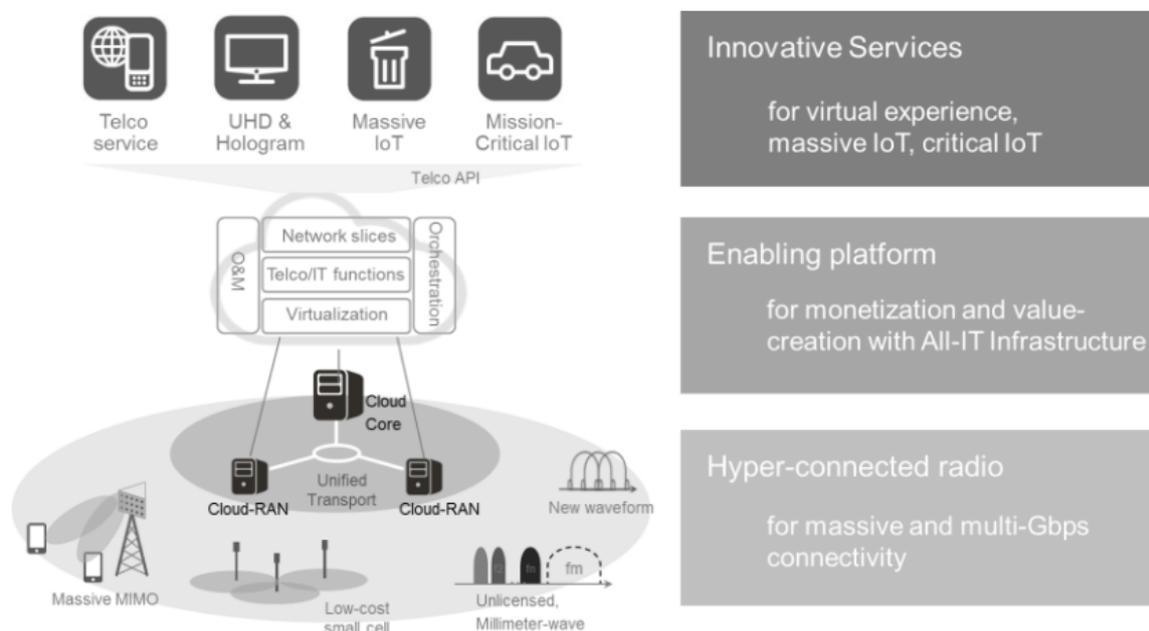


Figure II-1 : L'architecture de la 5G.

II.3.1. Le service innovant :

C'est la couche supérieure (couche Application) 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 ultrahaute définition finira par devenir des services dominants offrant des expériences utilisateur virtuelles telles que le streaming vidéo multi-view. De plus, la bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront l'émergence de services de contrôle de robots à distance et de services d'Internet des objets (IdO) essentiels à la mission [25].

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

C'est la couche intermédiaire (couche Réseau) qui crée des valeurs significatives et centrées sur le service pour prendre en charge la couche supérieure de « service innovant » en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints. Les réseaux sous-jacents a une infrastructure orientée services. Ils utilisent deux activateurs clés pour effectuer chaque tâche. L'une est la virtualisation des fonctions réseau NFV (Network Function Virtualization) et l'autre du réseau SDN (Software Defined Networking), qui ont comme objectif de virtualité l'infrastructure et les services pour offrir toujours plus de souplesse, d'intelligence et d'ouverture, ce sont l'avenir des télécommunications [25].

II.3.3. La radio Hyper-Connecté :

C'est la couche inférieure (couche Physique) qui peut récupérer/fournir une quantité massive de données à la couche "Enabling Platform" d'une manière très efficace et transparente. En raison de l'énorme quantité de données de transmission et des exigences de latence strictes, cette couche inclura non seulement les technologies de réseau radio existantes (à la fois telles quelles et évoluées), mais aussi de nouvelles technologies de réseau radio. Il est nécessaire de développer une gamme de technologies capables d'améliorer le fractionnement des cellules, l'efficacité spectrale, la bande passante de la fréquence du canal et l'efficacité du fonctionnement du réseau [25].

II.4. Les exigences de la 5G :

II.4.1. Efficacité spectrale :

L'efficacité spectrale (η) est définie comme le débit global de tous les utilisateurs (nombre de bits correctement reçus, c'est-à-dire le nombre de bits contenus dans les unités de données de service (SDU) fournies à la couche 3, sur une certaine période) divisé par la largeur de bande du canal divisée par le nombre de cellules. La largeur de bande du canal à cet effet est définie comme étant la largeur de bande effective multipliée par le facteur de réutilisation de la fréquence, la largeur de bande effective étant la largeur de bande de fonctionnement normalisée de manière appropriée en tenant compte du rapport liaison montante / liaison descendante [26]. Ainsi, l'efficacité spectrale est exprimée en bit/s/Hz.

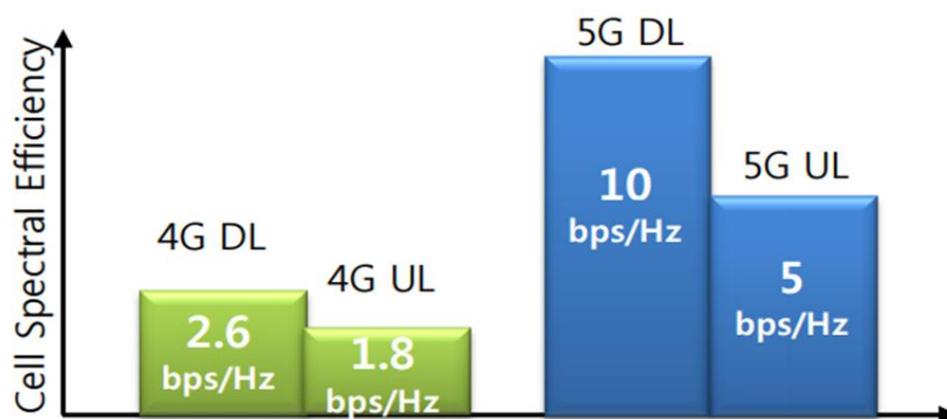


Figure II-2 : L'efficacité spectrale

Soit ψ_i le nombre de bits correctement reçus par l'utilisateur i (liaison descendante ou montante) dans un système comprenant une population de N utilisateurs et de M cellules. De plus, notons w la largeur de bande du canal et T le temps pendant lequel les bits de données sont reçus. L'efficacité spectrale dans une cellule est alors définie par :

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i}{T \cdot w \cdot M} \quad (13)$$

II.4.2. Débit de données maximal :

Le débit de données de pointe est le débit de données maximum théoriquement réalisable qui peut être attribué à une seule station mobile en supposant que les conditions soient exemptes d'erreurs lorsque toutes les ressources radio disponibles sont utilisées pour le lien correspondant. (Dans ce cas, les ressources radio utilisées pour la synchronisation de couche physique, les signaux de référence ou les pilotes, les bandes de garde et les temps de garde sont exclues).

La valeur minimale requise pour le débit de données de pointe est de 20 Gbps [26].

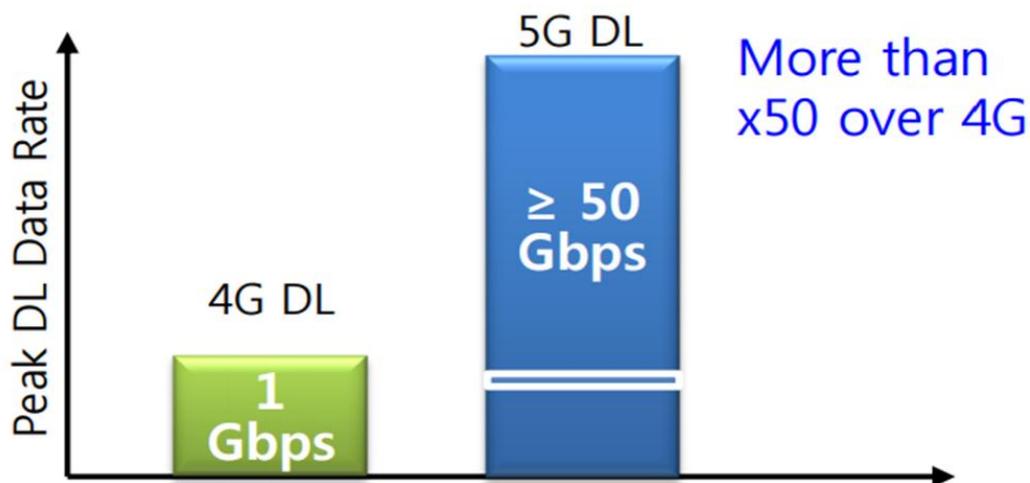


Figure II-3 : Débit de données maximal

II.4.3. Débit de donnée perçu par utilisateur :

C'est le point à 5% de la fonction de distribution cumulative (CDF) du débit utilisateur. Le débit utilisateur (pendant la durée d'activité) est défini comme le nombre de bits correctement reçus, c'est-à-dire le nombre de bits contenus dans les unités de données de service (SDU) livrées à la couche 3, sur une certaine période [27].

Les valeurs cibles pour le débit de données expérimenté par l'utilisateur dans l'environnement sont les suivantes :

- Le débit de données expérimenté par l'utilisateur de liaison descendante est de 100 Mbit/s.

- Le débit de données expérimenté par l'utilisateur de liaison montante est de 50 Mbit/s.

Considérons ψ_i comme le nombre de bits correctement reçus de l'utilisateur i , T_i le temps de session actif de l'utilisateur i , le débit de données de l'utilisateur i , γ_i est défini par :

$$\gamma_i = \frac{\psi_i}{T_i} \text{ Mbit/s} \quad (14)$$

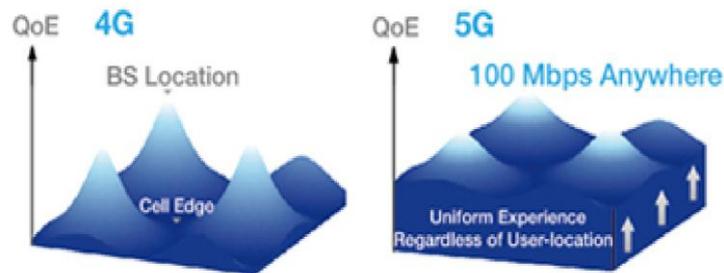


Figure II-4 : Débit de donnée perçu par utilisateur

II.4.4. Latence :

II.4.4.1. Latence du plan utilisateur :

C'est la contribution du réseau radio au temps écoulé entre le moment où la source envoie un paquet et celui où la destination le reçoit (en ms). Il s'agit du temps unidirectionnel nécessaire pour livrer avec succès un paquet de la couche application et du protocole radio au point d'entrée SDU de la couche de protocole radio pour un service donné dans des conditions non chargées, en supposant que la station mobile soit à l'état actif [27].

Dans le standard 5G, l'exigence minimale requise pour la latence du plan utilisateur est de 1 ms.

II.4.4.2. Latence du plan de contrôle :

La latence du plan de contrôle (plan C) est généralement mesurée en tant que temps de transition entre différents modes de connexion, par ex. de l'état inactif à l'état actif. Un temps de transition (correspondant à l'exclusion du délai de recherche de la liaison descendante et du délai de signalisation du réseau filaire) soit inférieur ou égal à 50 ms doit pouvoir être atteint de l'état inactif à un état actif de manière à ce que le plan utilisateur soit établi [26].

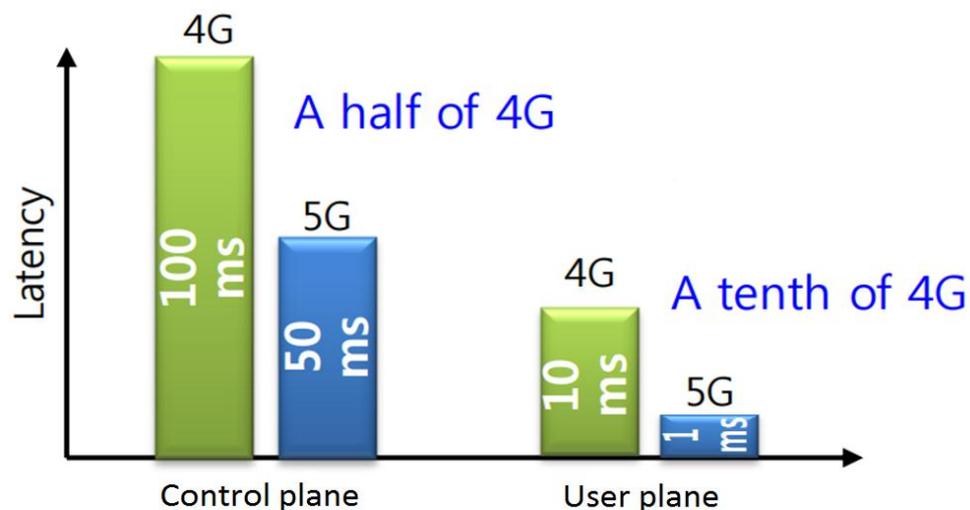


Figure II-5 : Latence supporté pour 5G

II.4.5. Mobilité :

Une classe de mobilité est prise en charge si le lien de canal de trafic peut être maintenu lorsque l'utilisateur se déplace à la vitesse maximale dans cette classe de mobilité [26].

Les classes de mobilité sont définies comme suit :

- stationnaire: 0 km / h
- Piéton: > 0 km/h à 10 km/h
- Véhicule: 10 à 120 km/h
- Véhicule à grande vitesse: 120 à 350 km/h
- Train à Très Grande Vitesse: 350 à 500 km/h

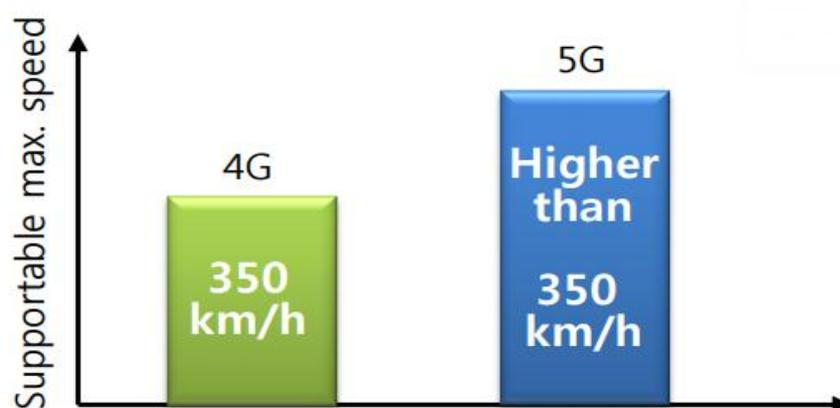


Figure II-6 : La mobilité supportée

II.4.6. Capacité de trafic d'une zone :

C'est le débit de trafic total desservi par zone géographique en ($Mbit/s/m^2$). Le débit ici correspond au nombre de bits correctement reçus, c'est-à-dire au nombre de bits contenus dans les SDU livrées à la couche 3, sur une certaine période [27].

Dans le standard 5G, la valeur cible pour la capacité de trafic de zone en liaison descendante est de 10 Mbit /s/m²

II.4.7. L'efficacité énergétique des réseaux :

L'efficacité énergétique du réseau est la capacité d'un RIT/SRIT (RIT : technologie d'interface radio /SRIT : ensemble de technologies d'interface radio) de minimiser la consommation d'énergie du réseau d'accès radioélectrique par rapport à la capacité de trafic fournie. L'efficacité énergétique du périphérique est la capacité du RIT/SRIT à minimiser la consommation d'énergie du modem du périphérique en relation avec les caractéristiques du trafic [27]. Une valeur métrique en bit/Joule est spécifiée.

L'efficacité énergétique du réseau et de l'appareil peut concerner la prise en charge des deux aspects suivants:

- a) Transmission de données efficace dans un cas chargé.
- b) Faible consommation d'énergie en l'absence de données.

II.4.8. La densité de connexion :

La connectivité en 5G n'est tout simplement pas limitée aux appareils mobiles. Au lieu de cela, chaque unité utilisant une fonction modem se connectera pour des raisons de sécurité, de communication, de vie agréable, etc. [26].

II.4.9. Bande passante:

La bande passante peut être prise en charge par une ou plusieurs porteuses radiofréquences. La capacité de bande passante d'un système RIT/SRIT est définie aux fins de l'évaluation du standard IMT-2020 [27]. La bande passante requise pour le standard 5G est d'au moins 100 MHz.

Le RIT/SRIT doit prendre en charge des largeurs de bande allant jusqu'à 1 GHz pour les bandes de fréquences supérieures (supérieures à 6 GHz, par exemple).

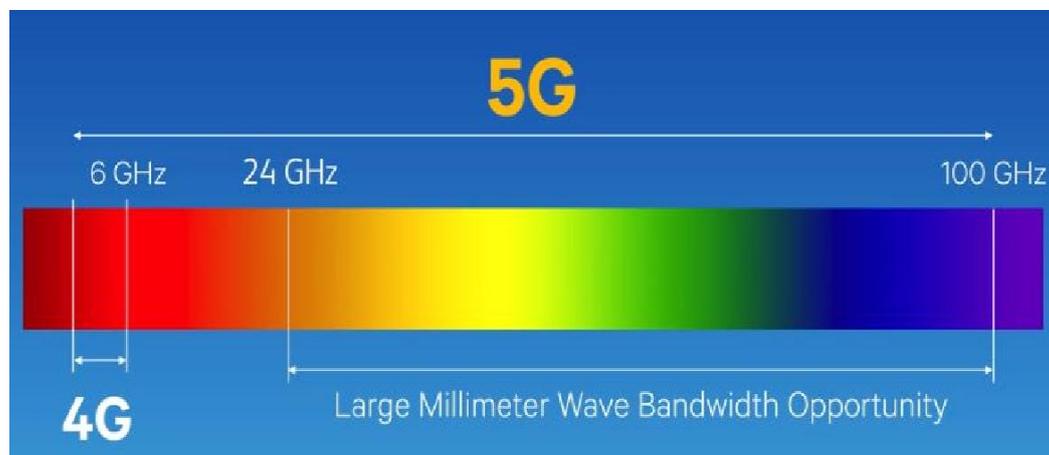


Figure II-7 : La bande passante

II.4.10. Résumé des exigences :

Le tableau II.1 suivant résume les exigences du réseau sans fil 5G et les descriptions détaillées correspondantes :

Tableau II-1 Résumé des exigences de la 5G

Exigence	Définition	Valeur
Efficacité spectrale	Le débit total de tous les utilisateurs divisé par la largeur de bande du canal divisée par le nombre de cellules	3 fois plus élevé que 4G 10 (bps / Hz)
Débit de données maximal	Débit de données maximum théoriquement réalisable pouvant être attribué à une seule station mobile en supposant qu'il n'y ait pas d'erreur lorsque toutes les ressources radio disponibles sont utilisées pour le lien correspondant.	20 Gbps

Débit de donnée perçu par utilisateur	Débit de données utilisateur garanti au bord de la cellule correspondant à 5% de la fonction de distribution cumulative (CDF) du débit de données de l'utilisateur.	100 Mbps / 1 Gbps
Latence	Latence du plan de contrôle: généralement mesurée en temps de transition entre différents modes de connexion, par ex. de l'état inactif à l'état actif. Latence du plan utilisateur: temps de transit unidirectionnel entre la disponibilité d'un paquet SDU au niveau de la couche IP du terminal utilisateur / de la station de base et la disponibilité de ce paquet (PDU) au niveau de la couche IP de la station de base / du terminal utilisateur.	Plan de contrôle: 50 ms Plan utilisateur: 1 ms
Mobilité	Une classe de mobilité est prise en charge si le lien de canal de trafic peut être maintenu lorsque l'utilisateur se déplace à la vitesse maximale dans cette classe de mobilité.	500 km/h
Capacité de trafic d'une zone	Afin de faire face à l'augmentation explosive du futur trafic de données mobiles, le réseau 5G RAN devrait pouvoir augmenter la capacité du système en ajoutant davantage de cellules dans une zone cible.	10 Mbps/m ²
Efficacité énergétique	La conception de la technologie d'accès radio 5G devrait viser une efficacité énergétique supérieure par rapport à la consommation accrue des périphériques / réseaux requise pour les communications sans fil 5G.	100 fois plus haut que 4G
densité de raccordement	Nombre total d'appareils connectés et/ou accessibles par unité de surface	10 ⁶ (par km ²)

II.5. Comparaison entre 4G et 5G :

Le tableau ci-dessous résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G :

Tableau II-2 comparaison des performances entre 4G et 5G

Caractéristiques	4G	5G
Débit maximal (Gbit/s)	1	20
Débit aperçu par l'utilisateur (Mbit/s)	10	100
Efficacité spectrale (bps/Hz)	2.6	10 (\cong 3x)
Mobilité (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

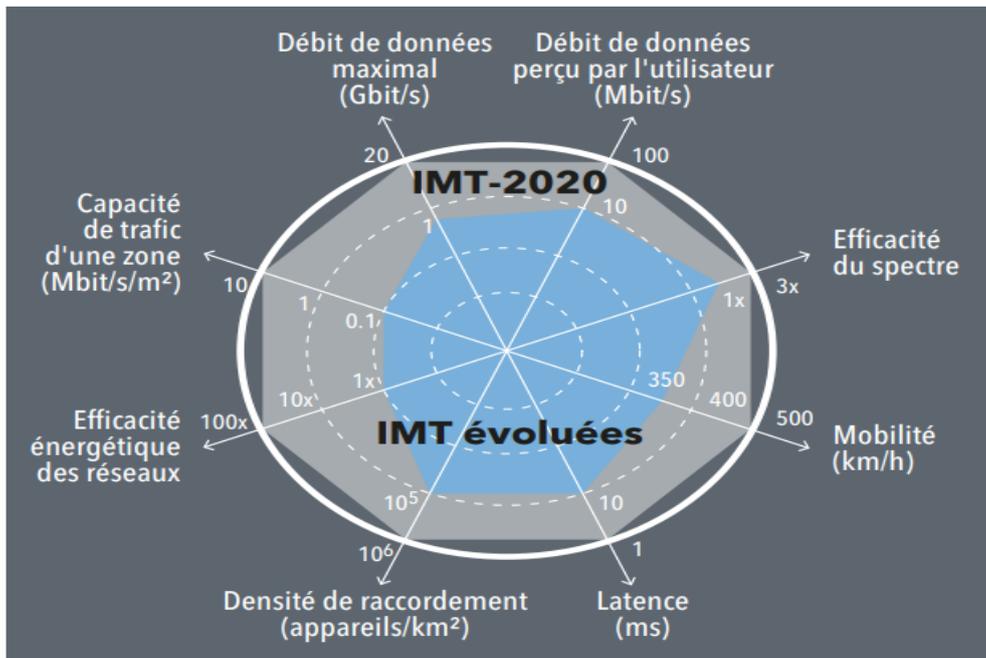


Figure II-8 : Comparaisons entre les performances de 4G et de la 5G

II.6. Les applications de la 5G :

Les progrès des réseaux mobiles ont créé une multitude d'applications diverses pour améliorer la qualité des services fournis des utilisateurs finaux, notamment la mobilité intelligente, le commerce numérique, les réseaux sociaux et les soins de santé. Dans une perspective plus large, les applications mobiles font partie des services Internet, qui ont connu une évolution rapide au cours des dernières décennies.

Comme l'illustre la figure II-9, les services Internet ont évolué depuis les échanges classiques de donnée point à point, le World Wide Web (WWW), les applications mobiles et sociales, vers les services IdO récents et le futur Internet tactile [28].

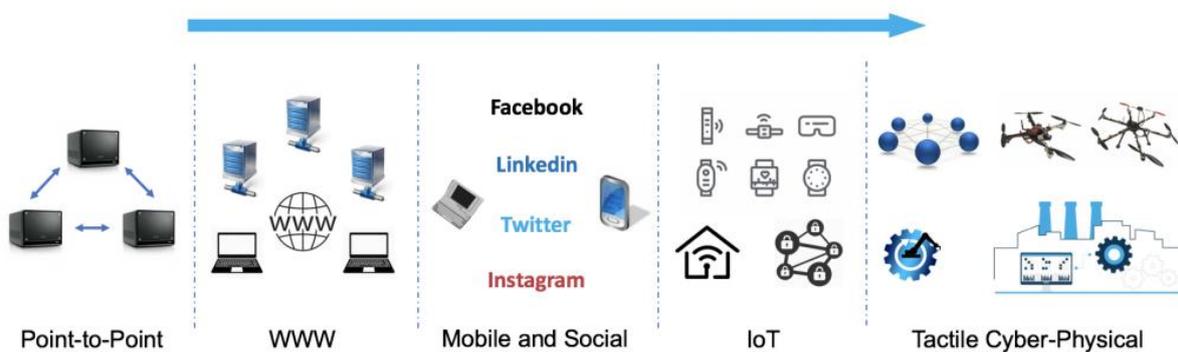


Figure II-9 : Développement de services Internet

II.6.1. Mobilité intelligente:

Les applications de mobilité en 5G vont de la planification route/itinéraire traditionnelle aux nouveaux services de conduite autonome (véhicules connectés ou V2V : Vehicle-to-Vehicle en anglais) en passant par les économies de partage étendues du transport intelligent. Parmi les avantages de la mobilité intelligente, on peut citer l'équilibrage du trafic, l'acheminement efficace, la prévention des accidents, les économies d'énergie, les coûts et la réduction des émissions [29]. Ce groupe d'applications suscite une forte demande pour la 5G, qui prend en charge la connectivité omniprésente, une faible latence, une grande vitesse, et des liaisons fiables, sécurisées et à faible consommation.



Figure II-10 : Mobilité intelligente

II.6.2. Énergie Intelligent :

Cette catégorie d'applications comprend la surveillance et la gestion des centrales électriques, la mise en réseau intelligente, la détection et la résolution des pannes de courant, de nouveaux services permettant d'économiser la consommation pour les maisons et les immeubles de bureaux, le marché de l'énergie et les bornes de recharge intelligentes pour les véhicules électroniques. L'énergie intelligente devrait améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes électriques utilisant des énergies renouvelables et permettre une distribution intelligente. Les principales exigences de la 5G concernent la fiabilité, la sécurité et la confidentialité des liaisons [30,31].

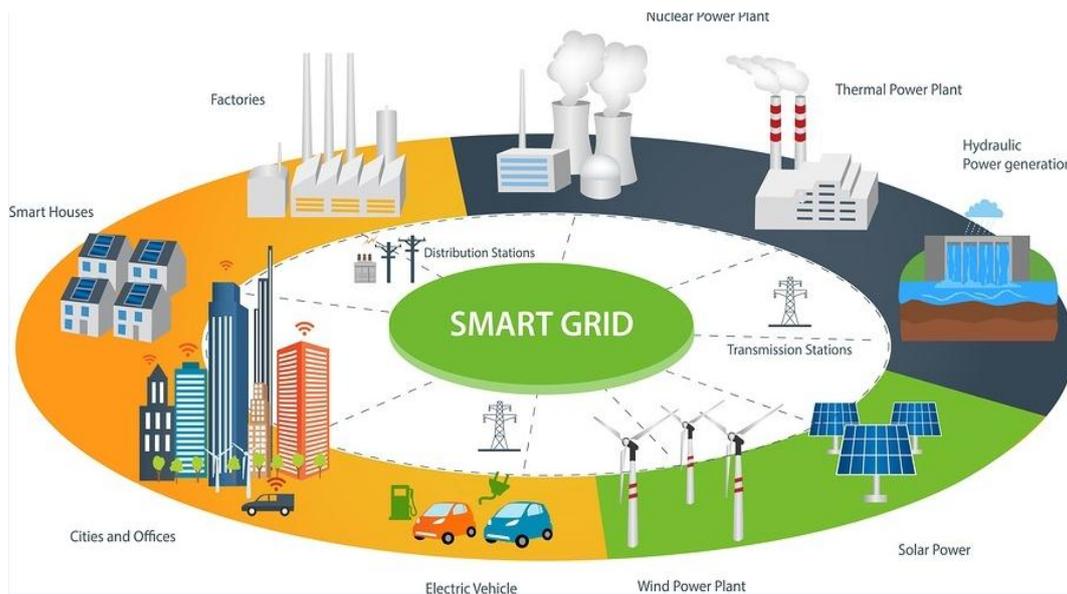


Figure II-11 : Energie intelligente

II.6.3. Santé intelligente :

Les applications de santé deviennent de plus en plus populaires parmi les utilisateurs de téléphones mobiles en raison de la prise de conscience croissante de leur intégrité et de leur bien-être. Parallèlement aux progrès des technologies vestimentaires intelligentes, les applications de cette catégorie couvrent la surveillance et le diagnostic de l'état sur mobile, ainsi que l'inspection de la qualité environnementale. Avec plus de données collectées à partir de capteurs déployés sur des appareils portables, Santé intelligente aura une influence positive sur les systèmes médicaux et de santé [32]. Une autre application émergente dans ce domaine est la chirurgie compatible AR/VR (AR : réalité augmenté / VR : réalité virtuelle), qui exigera une latence faible et une bande passante élevée, en plus des exigences générales de faible consommation, de sécurité et de confidentialité des données de la 5G.



Figure II-12 : Santé intelligente

II.6.4. Applications industrielles :

Des applications telles que Industrie IdO 4.0 [33] représentent la prochaine génération de services cyber-physiques en termes de fabrication, de communication M2M, d'impression 3D et de construction assistée par l'IA (intelligence artificielle). L'impact de ces applications industrielles ira au-delà des usines et profitera directement à la société tout entière. Les principales exigences de la 5G comprennent une fiabilité critique, une latence ultra faible, la prise en charge d'un déploiement massif, la sécurité et la confidentialité.

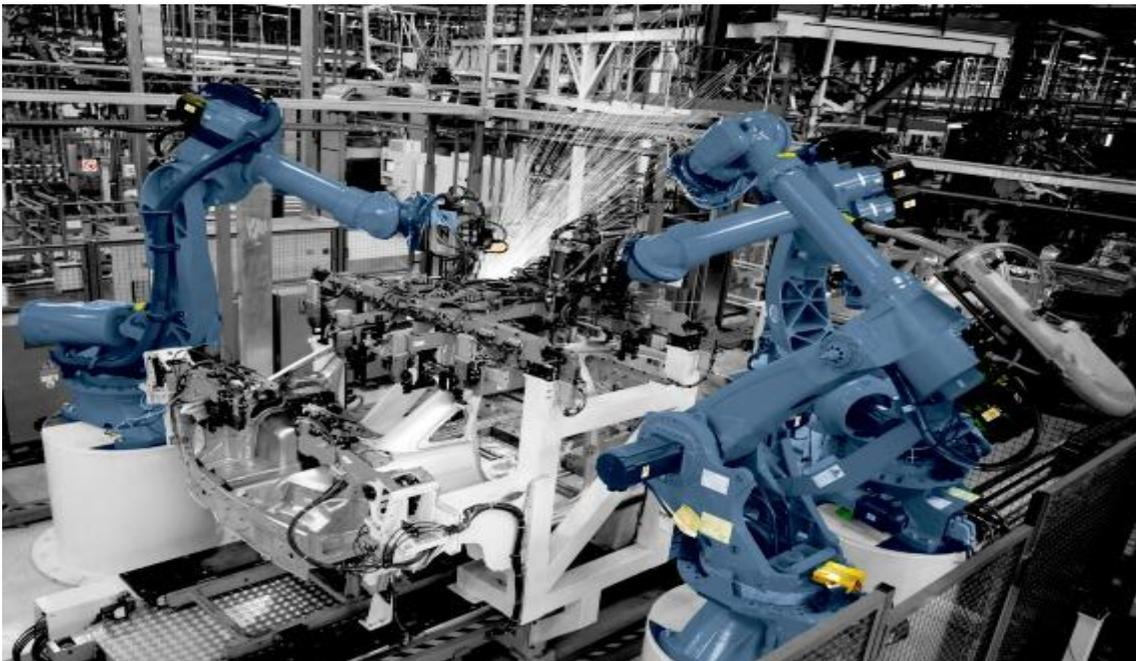


Figure II-13 : Applications industrielles

II.6.5. Applications grand public :

La grande quantité d'applications grand public reflète le potentiel des innovations commerciales et technologiques mobiles 5G. Comme nous sommes familiers avec les applications mobiles typiques fonctionnant sur les Smartphones et les tablettes, les applications émergentes incluent le streaming mobile ultra HD (4K/8K), la technologie financière basée sur le block Chain (Fin Tech), le jeu omniprésent (comme Pokemon GO). [34], des services de réalité mixte mobiles AR/VR pris en charge par des véhicules aériens sans pilote et une technologie holographique telle que HoloLens (paire de lunettes de réalité mixte) [35]. Tous ces services avancés exigent de la 5G de prendre en charge une connectivité

étendue, une bande passante élevée, une latence faible, une faible consommation d'énergie, ainsi que la fiabilité et la sécurité des liaisons.

II.7. Conclusion :

Nous avons discuté des principales caractéristiques, exigences, applications et défis liés au développement de la cinquième génération (5G) de communications mobiles cellulaires.

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

Les exigences 5G couvrent les considérations de bout en bout, y compris les exigences relatives aux utilisateurs, aux systèmes, aux services améliorés, à la gestion et à l'exploitation, aux dispositifs et aux modèles commerciaux. Il est particulièrement important de maintenir les améliorations dans plusieurs domaines.

CHAPITRE

III

LES FORMES D'ONDES

CANDIDATES POUR 5G

III.1. Introduction :

D'après ce qu'on vu au premier chapitre, l'OFDM a plusieurs avantages qui l'ont permis son succès et sa réputation dans le standard 4G. Néanmoins, elle présente quelques inconvénients majeurs comme l'insertion de l'intervalle de garde, un niveau très élevé des lobes latéraux entraînant une fuite de puissance entre les différentes sous-porteuses. La technique OFDM va alors être moins utilisée au profit des techniques multi-porteuses alternatives adaptées au futur standard 5G. Dans ce chapitre on va parler de ces nouvelles formes d'ondes candidates pour remplacer l'OFDM dans les nouvelles applications.

III.2. 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 [36]. 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 [37].

III.2.1. Généralité:

La FBMC est une technique multi-porteuse qui utilise un réseau de filtres à l'émission et à la réception, des filtres de synthèse et d'analyse spécifiques, ainsi qu'une transformée de Fourier inverse rapide (IFFT) en tant que modulateur et transformée de Fourier rapide (FFT) en tant que démodulateur. [38]

III.2.2. 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 III.1 présente la répartition des symboles selon les sous-porteuses pour les modulations OFDM et FBMC/OQAM. [39]

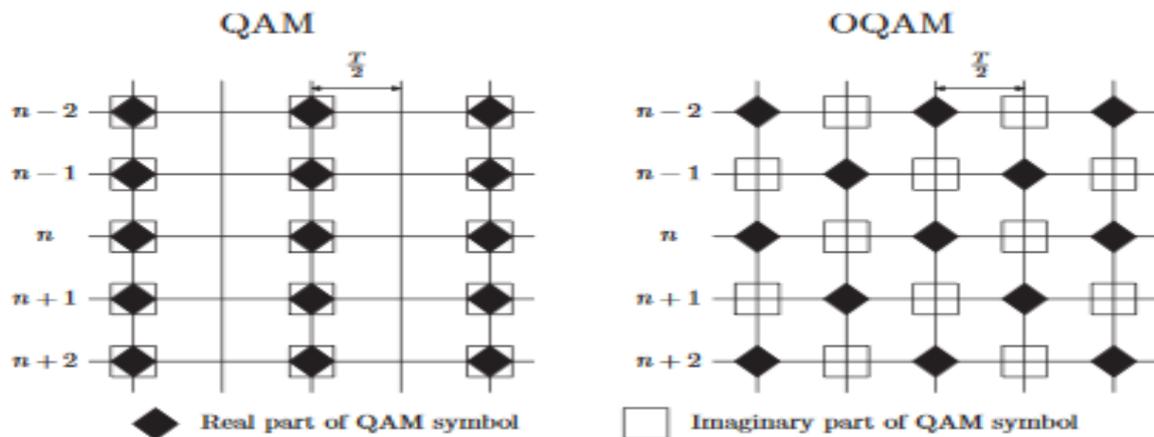


Figure III-1 : Répartition des symboles OFDM et FBMC/OQAM selon les sous-porteuses

III.2.3. Bancs des filtres :

Les bancs de filtres forment une classe d'outils fondamentaux en traitement du signal introduits dès au milieu des années 70 par les travaux sur les Quadrature Mirror Filter (QMF).

Le principe de cette transformation est illustré par la figure III.2.

Les bancs de filtres d'analyse et de synthèse sont généralement associés: le premier décompose un signal pour appliquer un traitement à chaque signal de sous-bande, et le second recombine les signaux de sous-bandes traités pour construire le signal modifié. Un tel système d'analyse/synthèse est appelé banc de filtres à reconstruction parfaite quand en l'absence de tout traitement dans les sous-bandes, c'est-à-dire quand $w_k(n) = v_k(n)$, $k=0, \dots, M-1$ [40].

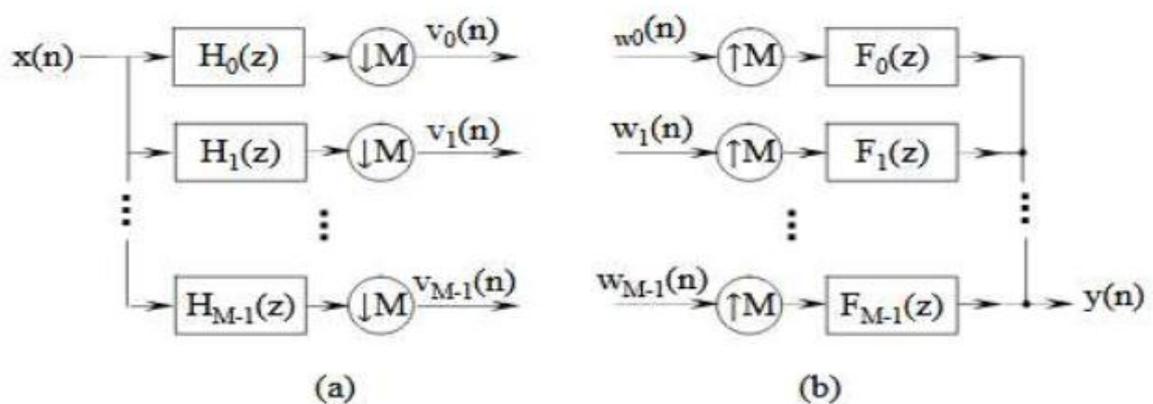


Figure III-2 : Schéma d'un banc de filtres à M canaux d'analyse/synthèse.

Pour obtenir des conditions nécessaires et suffisantes assurant la reconstruction parfaite, commençons par donner l'expression du $k^{\text{ème}}$ signal de sous-bande :

$$v_k(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)h_k(nM - i) \quad (15)$$

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

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} w_k(i)f_k(n - Mi) \quad (16)$$

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

$$y(n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(i)s(n, i) \quad (17)$$

Où le noyau S du système global est donné par:

$$s(n, i) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} f_k(n - Mi) h_k(nM - i) \quad (18)$$

III.2.4. 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 [41]. Les coefficients de réponse impulsionnelle du filtre prototype peuvent être exprimés à l'aide de la représentation sous forme fermée suivante:

$$p[m] = p[0] + 2 \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k p[k] \cos\left(\frac{2\pi k}{KM} (m+1)\right) \quad (19)$$

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

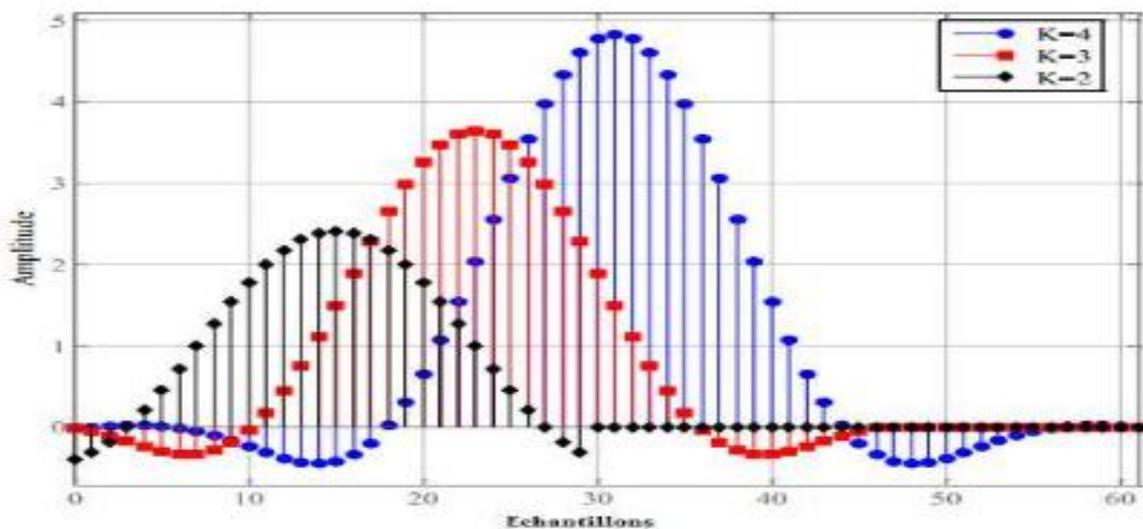


Figure III-3 : Réponse impulsionnelle du filtre prototype PHYDYAS avec $M=16$

III.2.5. 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 $\xi_k[m]$: [42]

$$\begin{aligned} \xi_k[m] &= \exp\left(j\frac{2\pi k}{M}\left(m - \frac{L_p - 1}{2}\right)\right) \\ &= \exp\left(-j\frac{2\pi k}{M}\left(\frac{L_p - 1}{2}\right)\right) \exp\left(j\frac{2\pi km}{M}\right) \\ &= \beta_k \gamma_k[m] \end{aligned} \tag{20}$$

III.2.6. principe de la modulation :

Un émetteur-récepteur générique à porteuse multiples avec des bancs de filtre est représenté sur la figure III.4 et l'entrée du système est donnée par [38]:

$$s_i(t) = s_i[n]\delta(t - nT) \tag{21}$$

Avec :

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

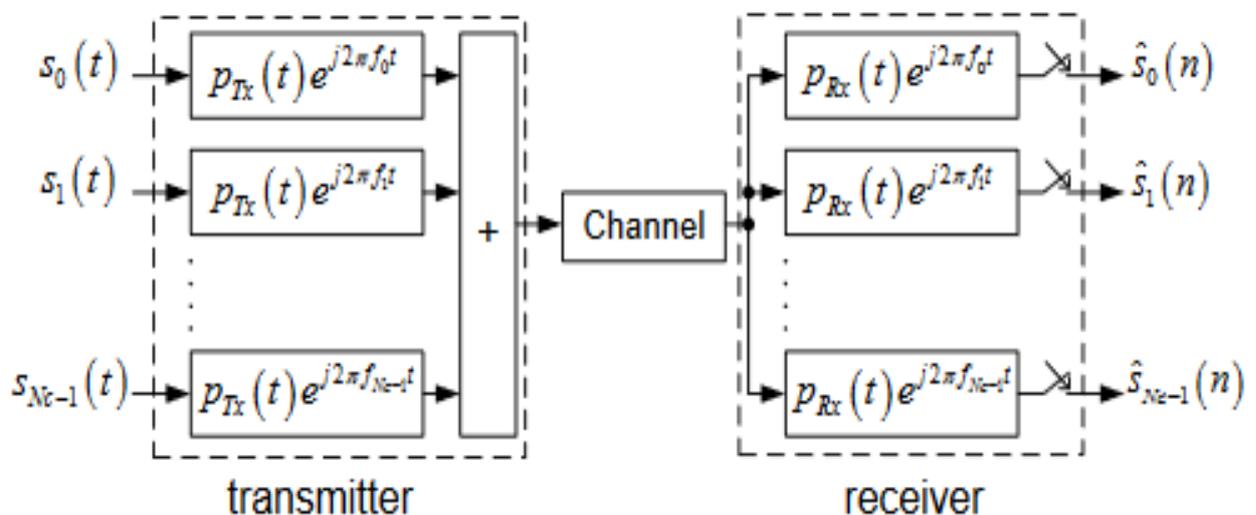


Figure III-4 : Un émetteur-récepteur à porteuse multiples avec des bancs de filtres

Le signal d'émission global peut être considéré comme:

$$x(t) = \sum_n \sum_{i=0}^{Nc-1} s_i[n] p_{Tx}(t - nT) e^{j2\pi(t-nT)f_i} \tag{22}$$

Avec :

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

III.2.7. Comparaison entre FBMC et OFDM :

La principale différence entre FBMC et OFDM réside dans le choix du filtre prototype. De telle sorte que l'OFDM utilise un filtre à fenêtre rectangulaire et le FBMC utilisant un filtre de type pro conçu avec le principe de mise en forme d'impulsion de Nyquist, qui peut considérablement réduire le problème de fuite spectrale d'OFDM. [43]

La figure III.5 désigne les deux réponses impulsionnelles des filtres utilisés dans les deux modulations

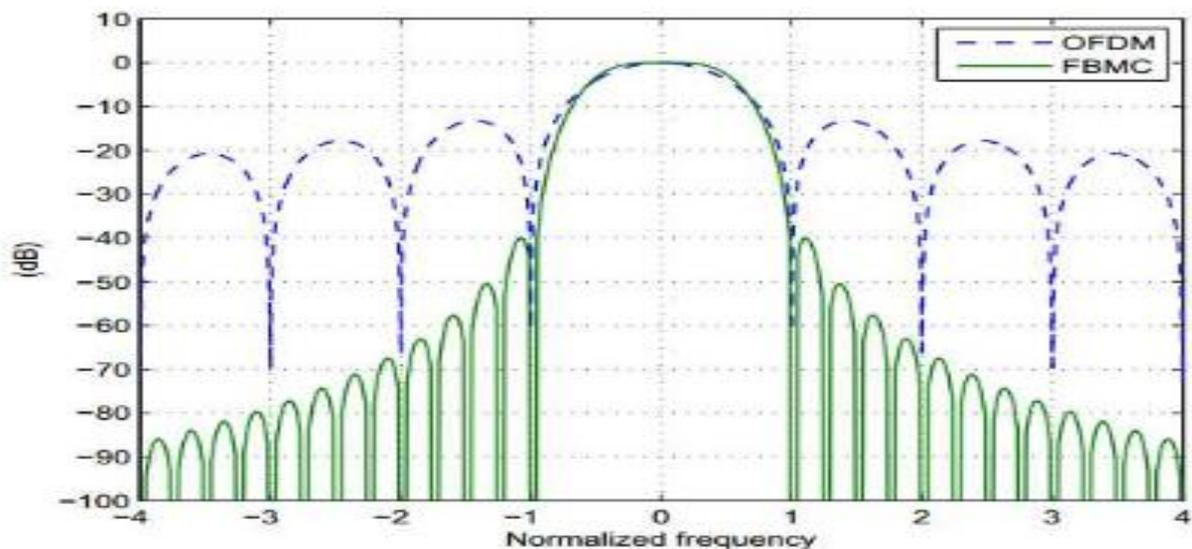


Figure III-5 : Comparaison entre DSP d'OFDM et FBMC

La technique FBMC/OQAM est moins sensible au décalage de fréquence résiduelle que l'OFDM et est plus robuste à l'effet Doppler. [43]

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

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

Tableau III-1 : Comparaison entre OFDM et FBMC

III.3. 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. [44]

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 [45]. 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. [46]

III.3.1. Modèle de système UFMC :

La figure III-6 montre le schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC [47]

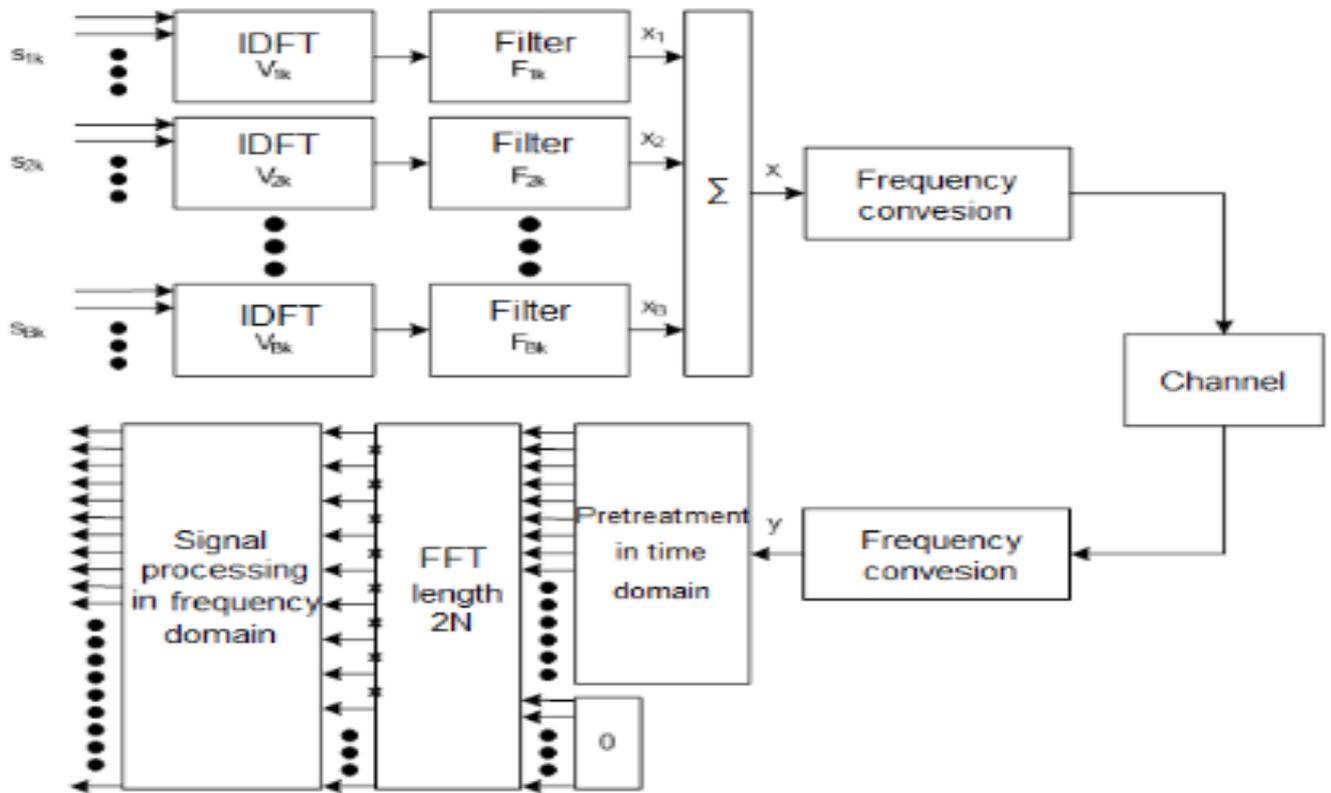


Figure III-6 : Schéma fonctionnel de l'émetteur-récepteur UFMC

III.3.2. 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:

$$X = \sum_{i=1}^B F_i V_i S_i \tag{23}$$

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 :

$$\bar{F} = [F_1 F_2 \dots F_B] \quad (24)$$

$$\bar{V} = \text{diag}(V_1, V_2, \dots, V_B) \quad (25)$$

$$\bar{S} = [S_1, S_2 \dots, S_B]^T \quad (26)$$

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 [48].

Ce tableau résume les éléments de conception possible :

B	nombre de sous bandes
n_i : <i>taille du bloc</i>	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 III-2 : 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 $i^{\text{ème}}$ sous-module UFMC.

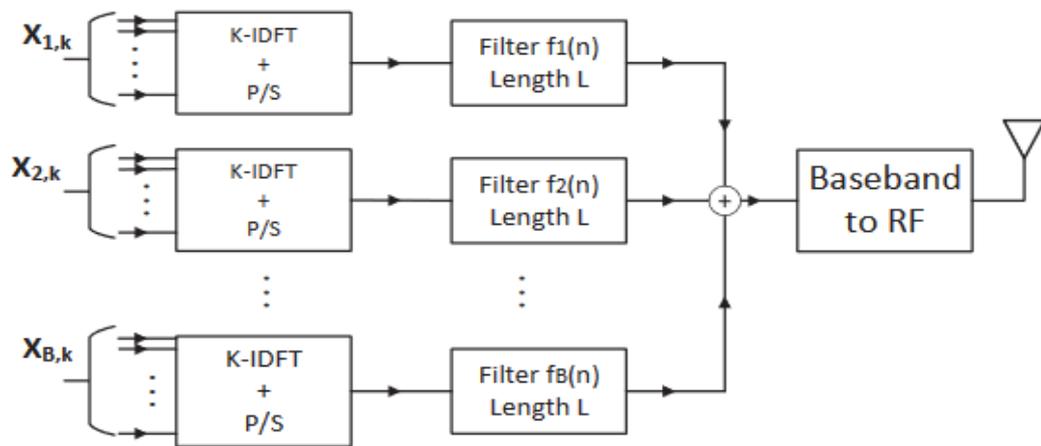


Figure III-7 : Structure générale de l'émetteur UFMC

III.3.3. Structure d'un récepteur UFMC :

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

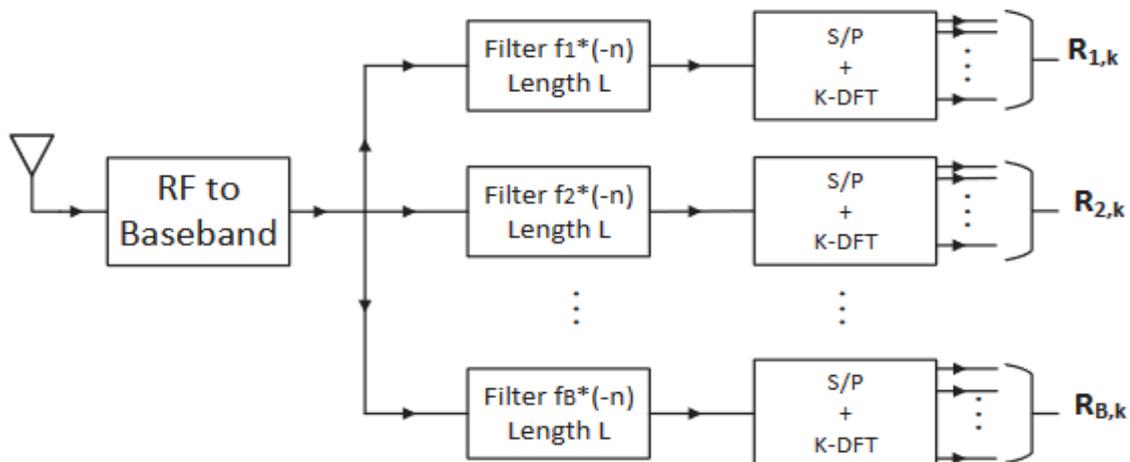


Figure III-8 : Structure générale du récepteur UFMC

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

$$R = Hx + n = HFV\bar{S} \tag{27}$$

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.

III.3.4. Conception du filtre pour UFMC :

Le filtre utilisé dans UFMC 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 :

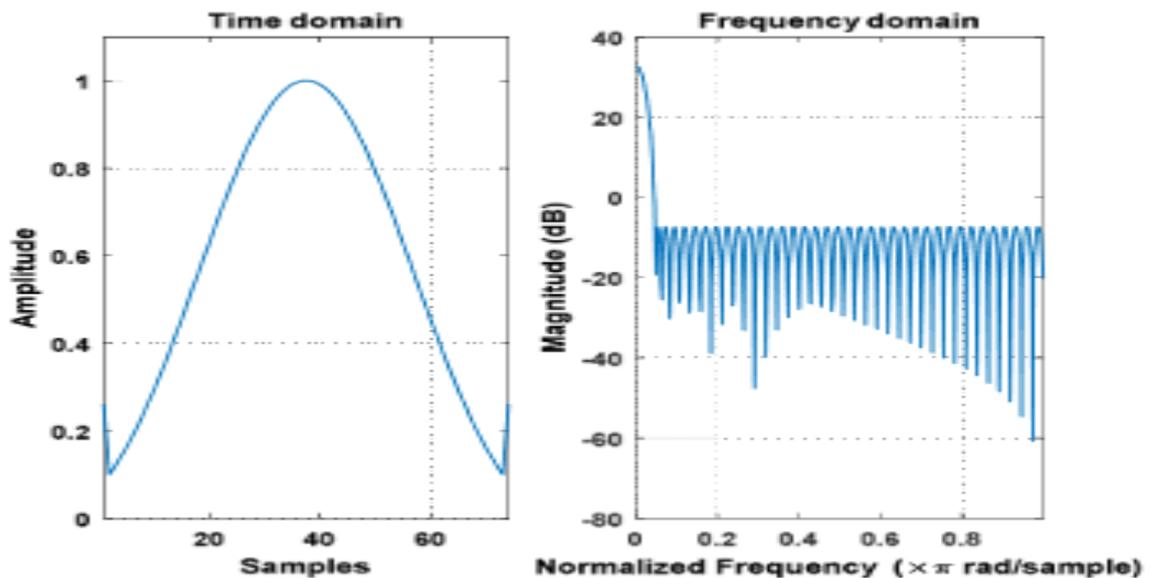


Figure III-9 : la réponse temporelle et fréquentielle du filtre

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 [49].

III.3.5. Comparaison entre UFMC et FBMC :

- UFMC a une Bonne efficacité spectrale similaire à FBMC.
- Moins de frais généraux requis par rapport à FBMC.
- Bien adapté pour les transmissions de courte durée par rapport à l'FBMC ,Comme l'orthogonalité complexe est en partie perdue, UFMC peut ne pas être adapté à des débits de données élevés par contre FBMC est mieux adaptée pour les transmissions de longue durée avec des débits élevés .

- Avec un retard important, des égaliseurs à prises multiples doivent être appliqués et un récepteur de plus grande taille FFT augmente la complexité.
- Brouillage causé par des sous-bandes se recouvrant partiellement
- Une faible complexité et l'amélioration du bruit par rapport à la FBMC.

III.4. 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. [50]

III.4.1. 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. [51]

III.4.2. Structure d'émetteur-récepteur F-OFDM:

Les figures III-9 et III-10 illustrent la conception structurelle de base de l'émetteur pour 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.

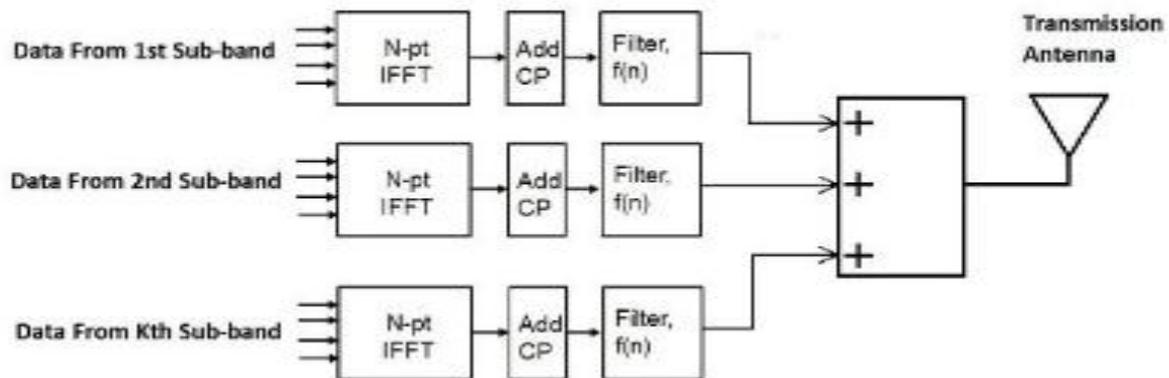


Figure III-10 : émetteur F-OFDM

Le filtre est l'un des éléments clés d'une meilleure performance de F-OFDM, comme l'indiquent les figures III-9 et III-10. 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 [52]. 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 [53].

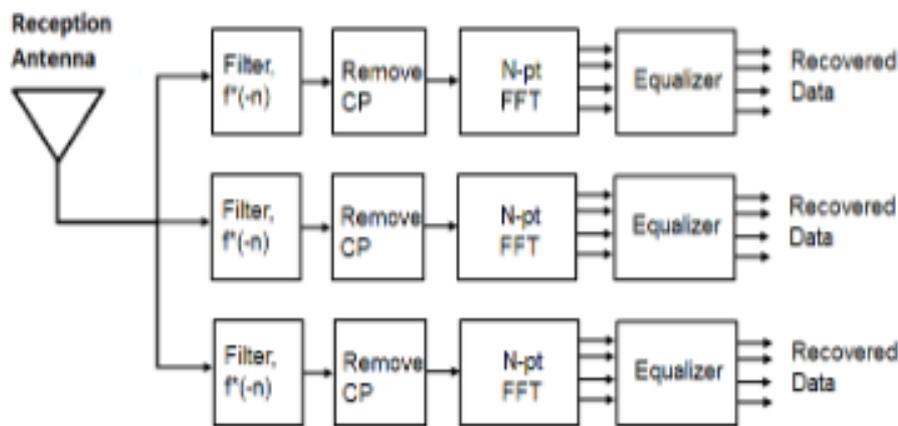


Figure III-11 : Récepteur F-OFDM

III.4.3. 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 [54]. La figure III-12 montre la réponse impulsionnelle du filtre conçu.

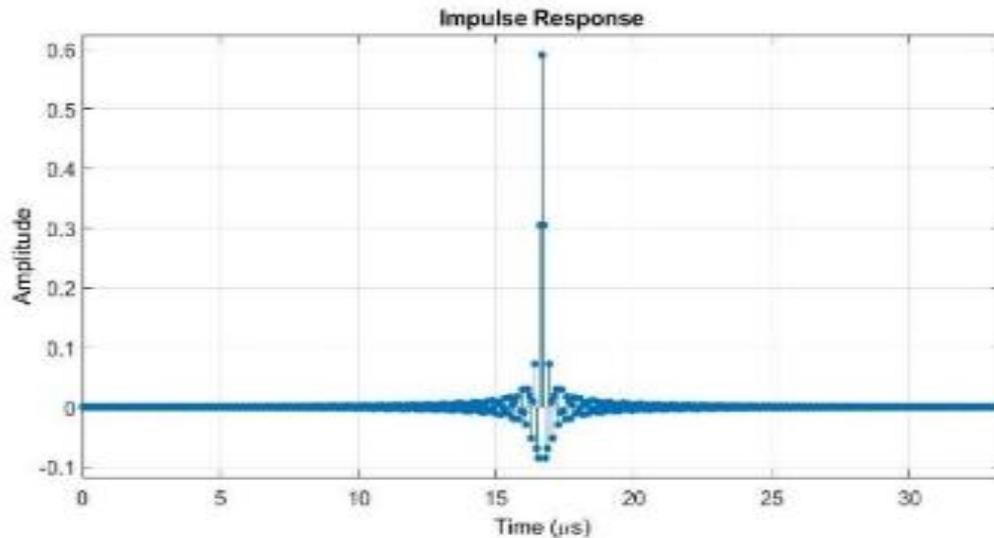


Figure III-12 : Réponse impulsionnelle du filtre

III.4.4. Comparaison entre F-OFDM et OFDM :

- Le f-OFDM exploite tous les avantages de la technique OFDM. De plus, il contribue à une utilisation efficace du spectre en répondant aux exigences OOBE.
- Comme mentionné précédemment, les architectures CP-OFDM et F-OFDM ont la même architecture, à l'exception d'un filtre ajouté à F-OFDM. Le filtre ajouté améliore ses performances en termes d'efficacité spectrale. Le F-OFDM permet également de modifier des paramètres tels que l'espacement des sous-porteuses. De plus, F-OFDM réduit le spectre utilisé par la bande de garde et à la place d'une bande de garde, une tonalité de garde est ajoutée entre les sous-porteuses.
- Le F-OFDM offre un gain de débit plus élevé que la technique OFDM conventionnelle
- Dans le système LTE, utilisation de l'OFDM offre une occupation maximale de la bande passante est de 90% de la bande passante allouée. En 5G, F-OFDM offre une utilisation de toute la largeur de bande attribuée.

III.5. 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 (UFMC, FBMC, 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 [55].

CHAPITRE

IV

Résultat du Simulation

IV.1. Introduction:

Après avoir finalisé la partie théorique, nous allons passer dans ce chapitre à l'implémentation numérique et la simulation de quelques caractéristiques des formes d'onde. Nous avons utilisé comme outil de programmations le simulateur MATLAB qui est un langage de programmation utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société Mathworks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs.

Nous voulons comparer Entre différents formes d'ondes (FBMC, UFMC, F-OFDM) avec OFDM. Après nous voulons comparer les trois techniques entre elles afin d'évaluer les performances de chacune d'elles.

IV.2. Comparaison entre OFDM et FBMC :

IV.2.1. FBMC :

Notre simulation nous voulons comparer la densité de puissance de FBMC entre différents valeurs de facteur de chevauchement k , Nombre de points de transformé de fourrier est 1024.

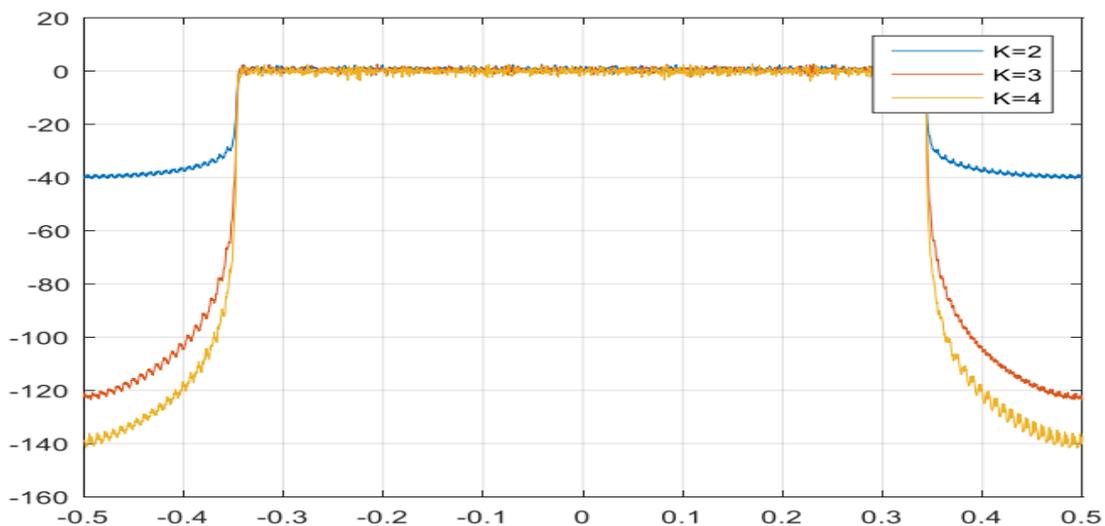


Figure IV-1 : la Densité spectrale de puissance de FMBC avec différents valeurs de facteur k

La figure montre que les lobes secondaires de la courbe de facteur ($k=4$) sont inférieurs aux lobes des autres courbes. Pour le cas $k=4$ c'est le meilleur.

IV.2.2 Réponse impulsionnelles :

Nous pouvons avoir un aperçu des réponses impulsionnelles à la fois pour OFDM qui a une forme rectangulaire et FBMC qui utilise un filtre PHYDYAS.

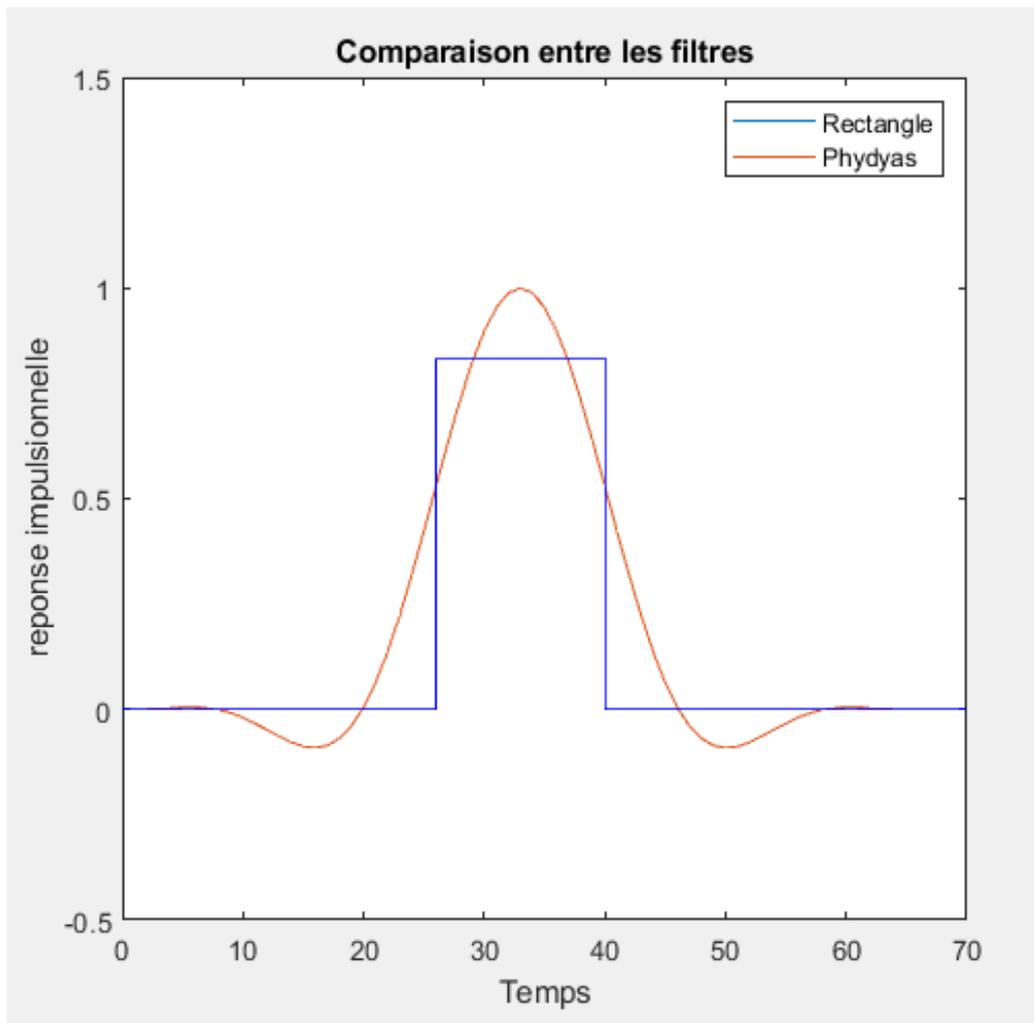


Figure IV-2 : les réponses impulsionnelles FBMC et OFDM

La figure montre que la largeur du filtre Phydyas utilisé en FBMC/OQAM est plus large que le filtre rectangulaire de l'OFDM. C'est la raison du chevauchement temporel entre les symboles.

IV.2.3. Réponse fréquentielle :

Après application de la transformé de Fourier nous pouvons avoir un aperçu sur la réponse fréquentielle à la fois pour OFDM qui a une forme sinus cardinal et FBMC/OQAM qu'utilise le filtre Phydias.

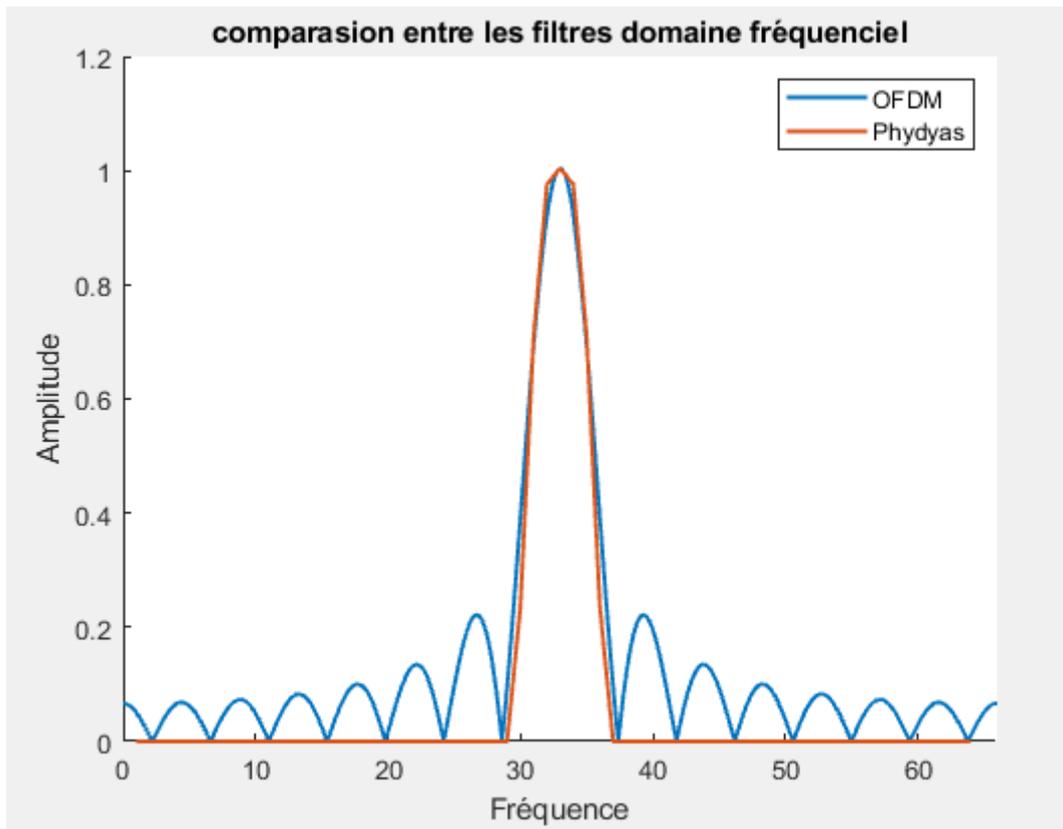


Figure IV-3 : les réponses fréquentielles FBMC et OFDM d'une sous-porteuse unique

La figure montre que :

- Les lobes latéraux de l'OFDM sont énormes par rapport à ceux de FBMC/OQAM qui sont très faibles vis-à-vis du lobe principal.
- De plus, le lobe principal du spectre de FBMC/OQAM est plus sélectif par rapport à celui de l'OFDM. Ainsi, l'FBMC/OQAM peut garantir une amélioration de l'efficacité spectrale.

IV.2.4. Densité spectrale de puissance :

La figure IV-4 illustre la densité spectrale de puissance (DSP) de l'OFDM et l'FBMC/OQAM pour un nombre de points de transformé de fourrier égal à 512.

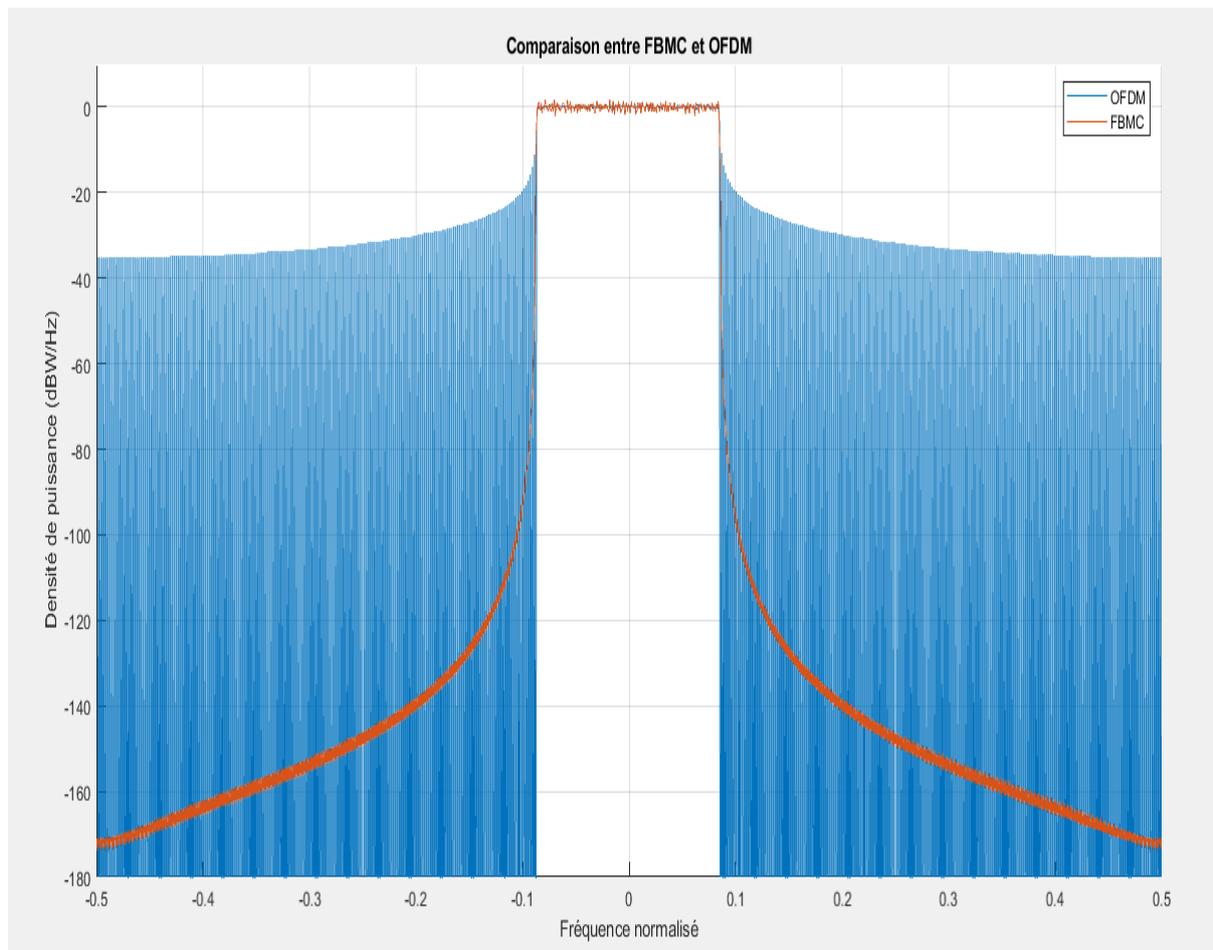


Figure IV-4 : la densité spectrale de puissance pour FBMC et OFDM

De la figure on peut constater que la bande d'arrêt (stop band) sur les deux côtés de la bande passante de FBMC/OQAM est beaucoup plus meilleure que celle de l'OFDM. C'est grâce aux lobes secondaires de l'FBMC qui sont très infimes qu'on a une telle forte atténuation ce qui nous permet de ne pas sacrifier de larges bandes de garde comme c'est le cas pour OFDM. Par conséquent, le spectre de FBMC/OQAM est plus avantageux par rapport à l'OFDM en offrant une efficacité spectrale supérieure.

IV.3. Comparaison entre OFDM et UFMC :

IV.3.1. Réponse impulsionnelle:

Nous pouvons avoir un aperçu des réponses impulsionnelles à la fois pour OFDM qui a une forme rectangulaire et UFMC qui utilise un filtre Chebyshev.

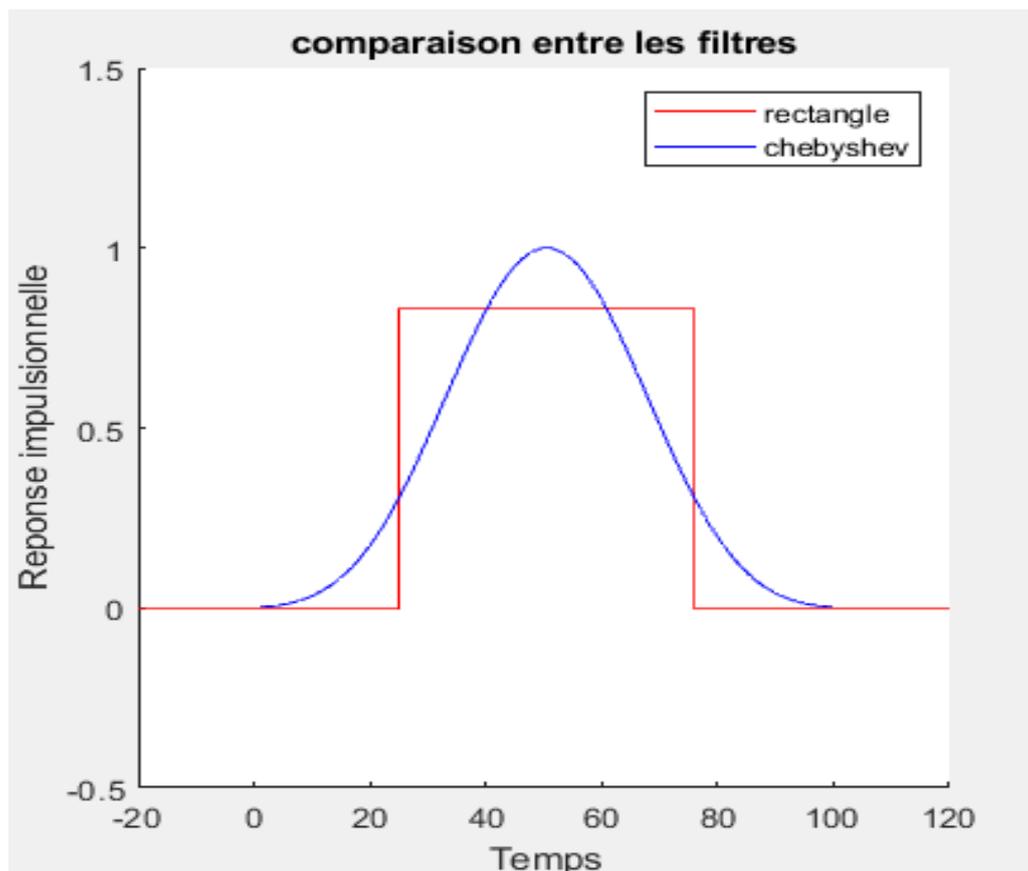


Figure IV-5 : Les réponses impulsionnelles pour UFMC et OFDM

La figure montre que le filtre Chebyshev est plus large que celle du filtre rectangulaire. De plus elle est bien localisée en temps ce qui lui permet une robustesse d'effet Doppler dans les milieux qui présentent un canal à évanouissement très rapide (grande mobilité cas d'un TGV par exemple).

IV.3.2. Réponse fréquentielle :

En appliquant la transformé de Fourier (FFT) nous pouvons voir un aperçu de la réponse fréquentielle à la fois pour OFDM qui a une forme sinus cardinal et UFMC qui utilise un filtre Chebyshev.

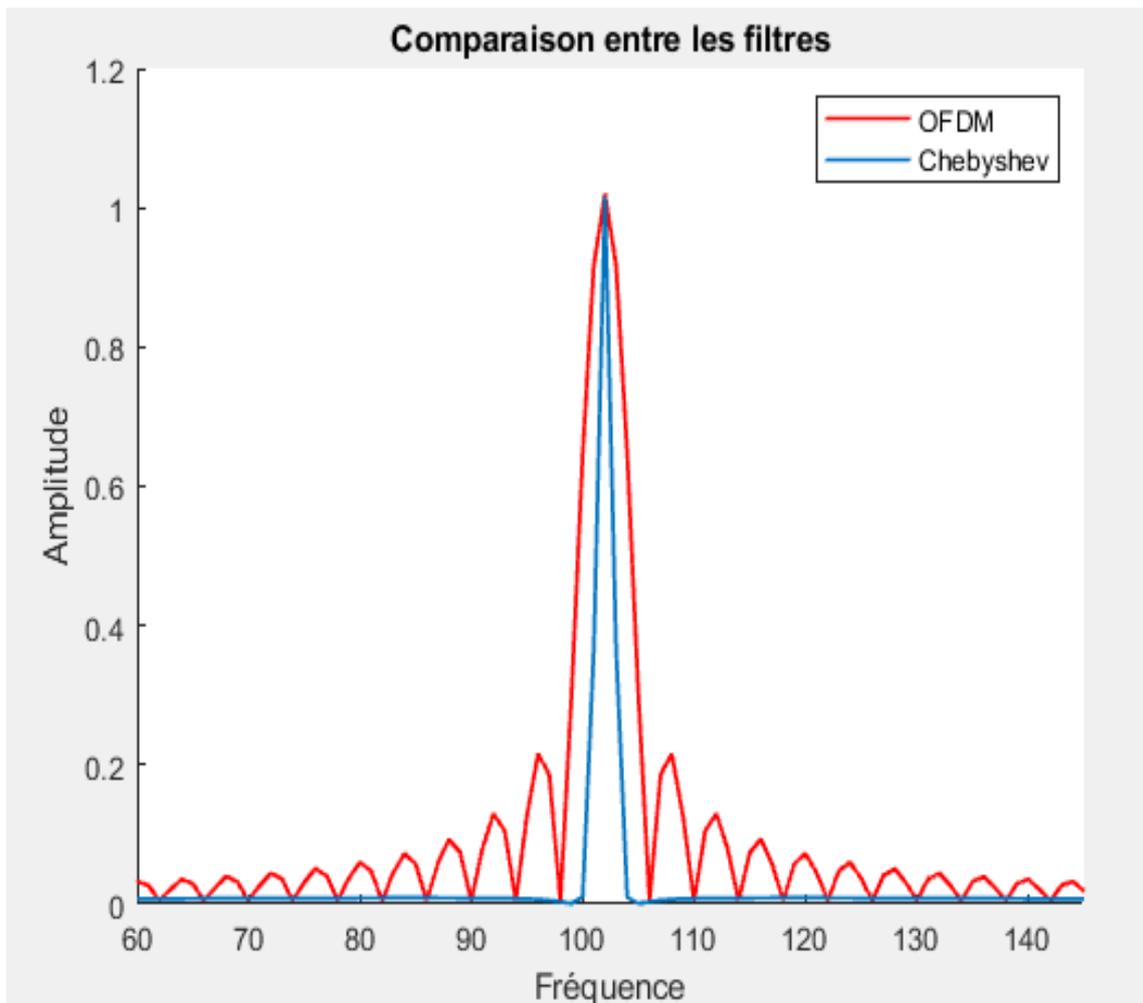


Figure IV-6 : Les réponses fréquentielles UFMC et OFDM d'une sous-porteuse unique

De la figure on peut remarquer les deux points suivants :

- Les lobes latéraux de l'OFDM sont très proches au niveau du lobe principal, ce qui leur permet de contenir une partie non négligeable d'énergie. Par contre les lobes secondaires de l'UFMC sont presque nuls devant le lobe principal, ce qui lui permet

une robustesse au décalage fréquentiels qui peuvent se présenter lors de la propagation dans un canal variant dans le temps.

- De plus, le lobe principal du spectre de l'UFMC est plus localisé en fréquence par rapport à celui de l'OFDM. Ainsi, l'UFMC peut garantir une amélioration de l'efficacité spectrale.

IV.3.3. Densité spectrale de puissance:

Nous voulons comparer entre les techniques UFMC et OFDM en termes de spectre (DSP) en tenant en compte les paramètres suivants :

- Nombre de points de transformé de fourrier (FFT) est 512.
- Pour OFDM nombre de sous porteuses 200.
- Pour UFMC nombre de sous-bandes 10 chaque sous-bande contient 20 sous-porteuses

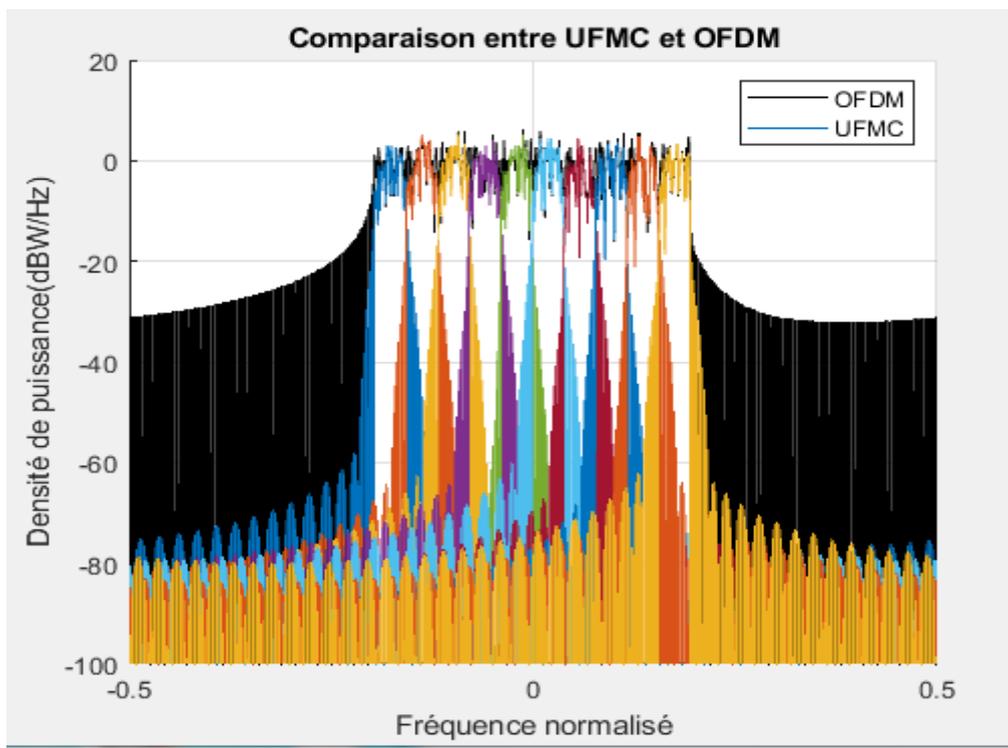


Figure IV-7 : la densité spectrale de puissance pour UFMC et OFDM

La figure montre que le signal UFMC à lobes secondaires plus faible que les lobes secondaires du signal OFDM. On remarque une forte atténuation sur les deux côtés de la bande passante de l'ordre de - 60 dB, qui est considérée comme un résultat acceptable. UFMC est plus avantageuse par rapport à l'OFDM en termes d'efficacité spectrale.

IV.4. Comparaison entre OFDM et F-OFDM :

IV.4.1. Réponse impulsionnelle :

Nous pouvons avoir un aperçu de la réponse impulsionnelle à la fois pour OFDM qui a une forme rectangulaire et F-OFDM qui effectue un filtrage passe-bas (LOWPASS) (de la forme visible sur la figure) bien localisé au niveau de chaque sous-porteuse.

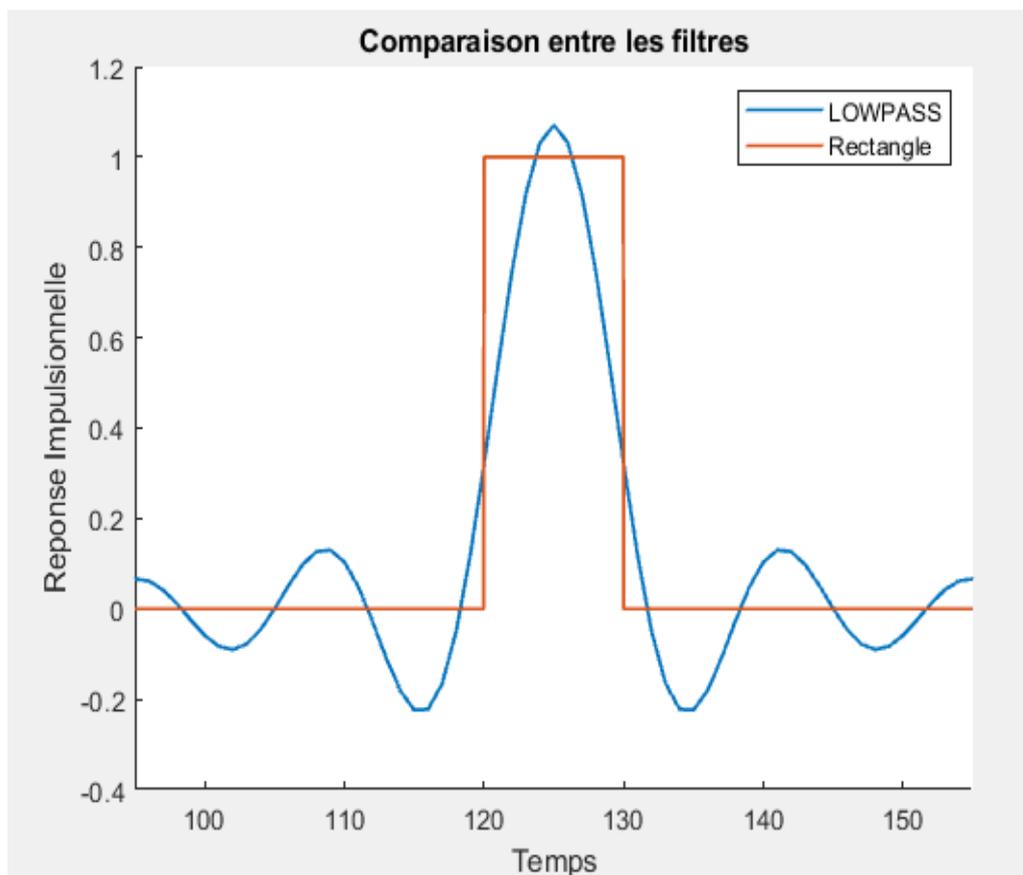


Figure IV-8 : Les réponses impulsionnelles pour F-OFDM et OFDM

La figure montre que le largeur du filtre utilisé en F-OFDM est plus grand que la largeur du filtre rectangulaire, mais plus localisée dans le temps (lobe principal plus étroit), ce qui

améliore la résistance contre les variations rapides du canal et offre un spectre à lobes secondaires très faibles.

IV.4.2. Réponse fréquentielle :

Comme précédemment, après passage au domaine fréquentiel par la transformé de Fourier rapide (FFT) nous pouvons avoir un aperçu de la réponse fréquentielle à la fois pour OFDM qui a une forme sinus cardinal et F-OFDM qui utilise un filtre Lowpass.

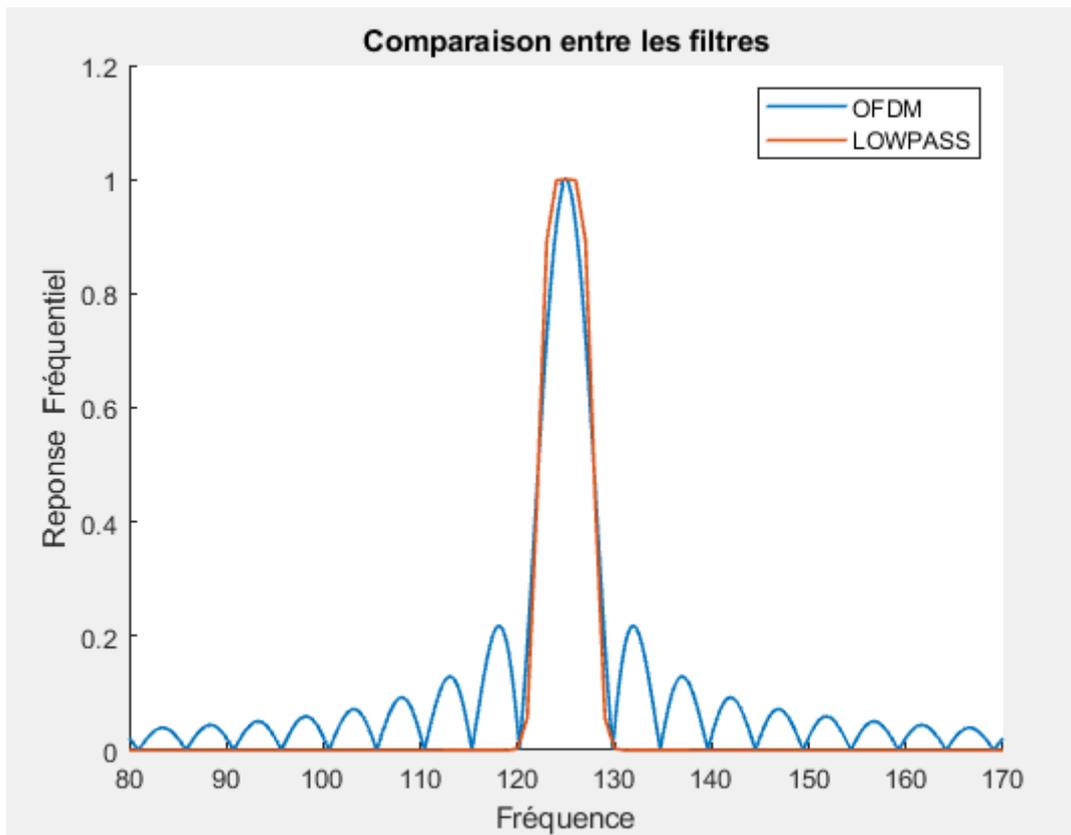


Figure IV-9 : Les réponses fréquentielles pour F-OFDM et OFDM

La figure montre que :

Les lobes latéraux de l'OFDM sont grands (même constat toujours). Par contre, les lobes latéraux du F-OFDM sont très petits. Donc F-OFDM peut offrir une efficacité spectrale améliorée (de petites bandes de garde seront suffisantes).

IV.4.3. Densité spectrale de puissance:

Nous voulons maintenant comparer entre les techniques F-OFDM et OFDM en tenant compte des paramètres suivants :

- Nombre de points de transformé de fourrier est 1024.
- Pour OFDM nombre de sous porteuses 600.
- Pour F-OFDM nombre de blocs ressources 50 chaque sous-bandes a 12 sous-porteuses.

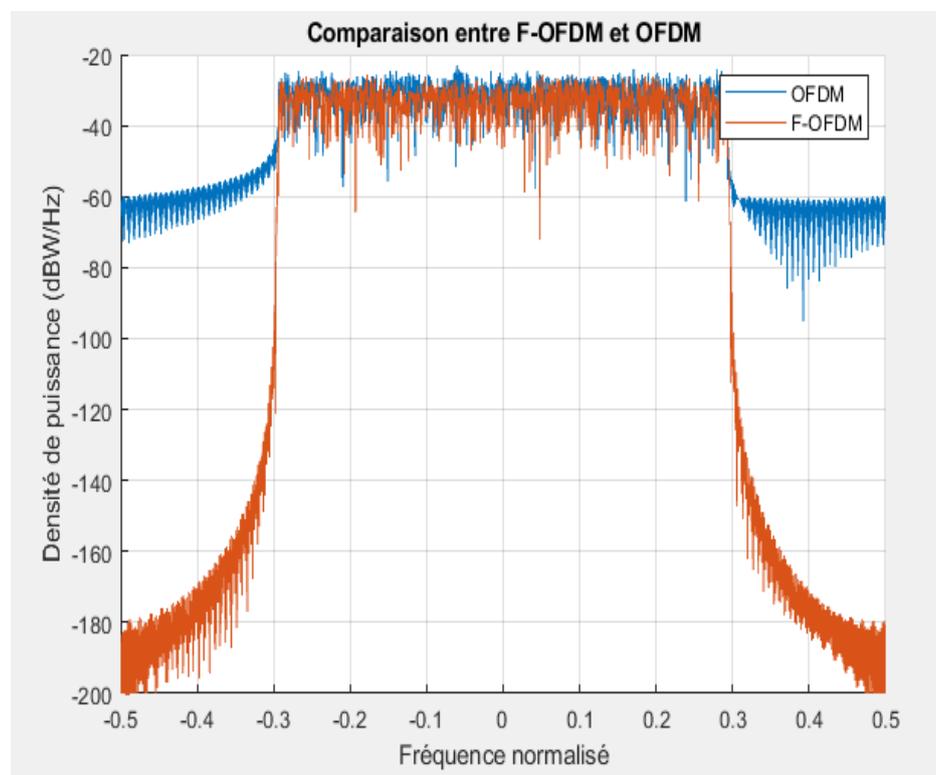


Figure IV-10 : la densité spectrale de puissance pour F-OFDM et OFDM

La figure montre que F-OFDM a une bande d'arrêt bien stoppée par rapport à OFDM. Par conséquent, l'F-OFDM est plus avantageuse par rapport à l'OFDM en termes d'efficacité spectrale en évitant de laisser de larges bandes de garde entre les symboles OFDM. Contrairement, l'OFDM sacrifie inutilement (pas d'information transmise) des bandes de fréquence très larges ce qui constitue une perte en efficacité spectrale.

IV.5. Comparaison entre UFMC et FBMC/OQAM :

IV.5.1. Densité spectrale de puissance :

Dans la figure IV-11 suivante nous voulons comparer entre les techniques UFMC et FBMC en termes de spectre avec les paramètres suivants :

- Nombre de points de transformé de fourrier est 512.
- Pour UFMC nombre de sous-bandes 10 chaque sous bandes contient 20 sous-porteuses.

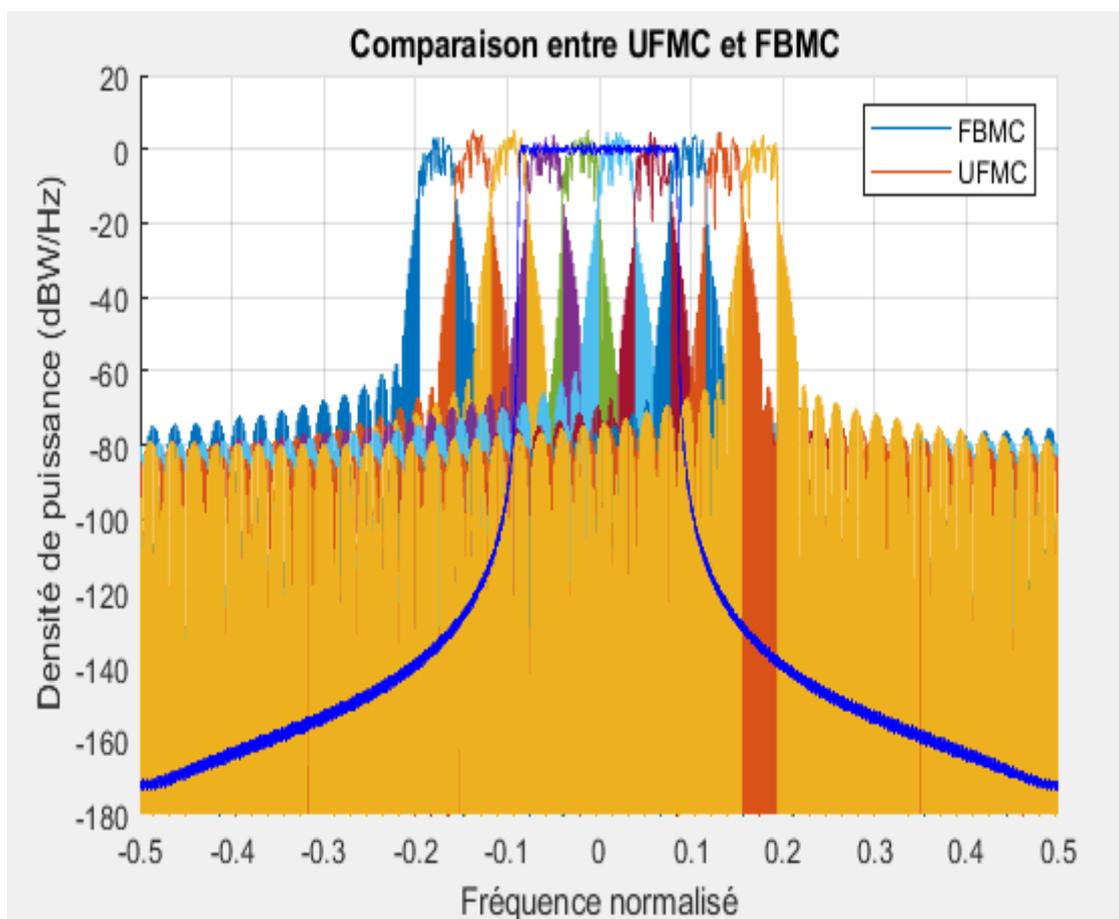


Figure IV-11 : la densité spectrale de puissance pour UFMC et FBMC

La figure montre que les lobes secondaires du signal FBMC/OQAM (en bleu foncé) sont plus faibles que ceux du signal UFMC. Par conséquent, en termes d'efficacité spectrale, l'FBMC est plus avantageuse par rapport à l'UFMC.

IV.6. Comparaison entre F-OFDM et FBMC/OQAM :

IV.6.1. Densité spectrale de puissance :

Nous voulons maintenant comparer entre le spectre de la technique F-OFDM et celui de FBMC/OQAM, avec les paramètres suivants :

- Nombre de points de transformé de fourrier est 1024.
- Pour F-OFDM nombre de blocs ressources 50 chaque sous-bande contient 12 sous-porteuses.

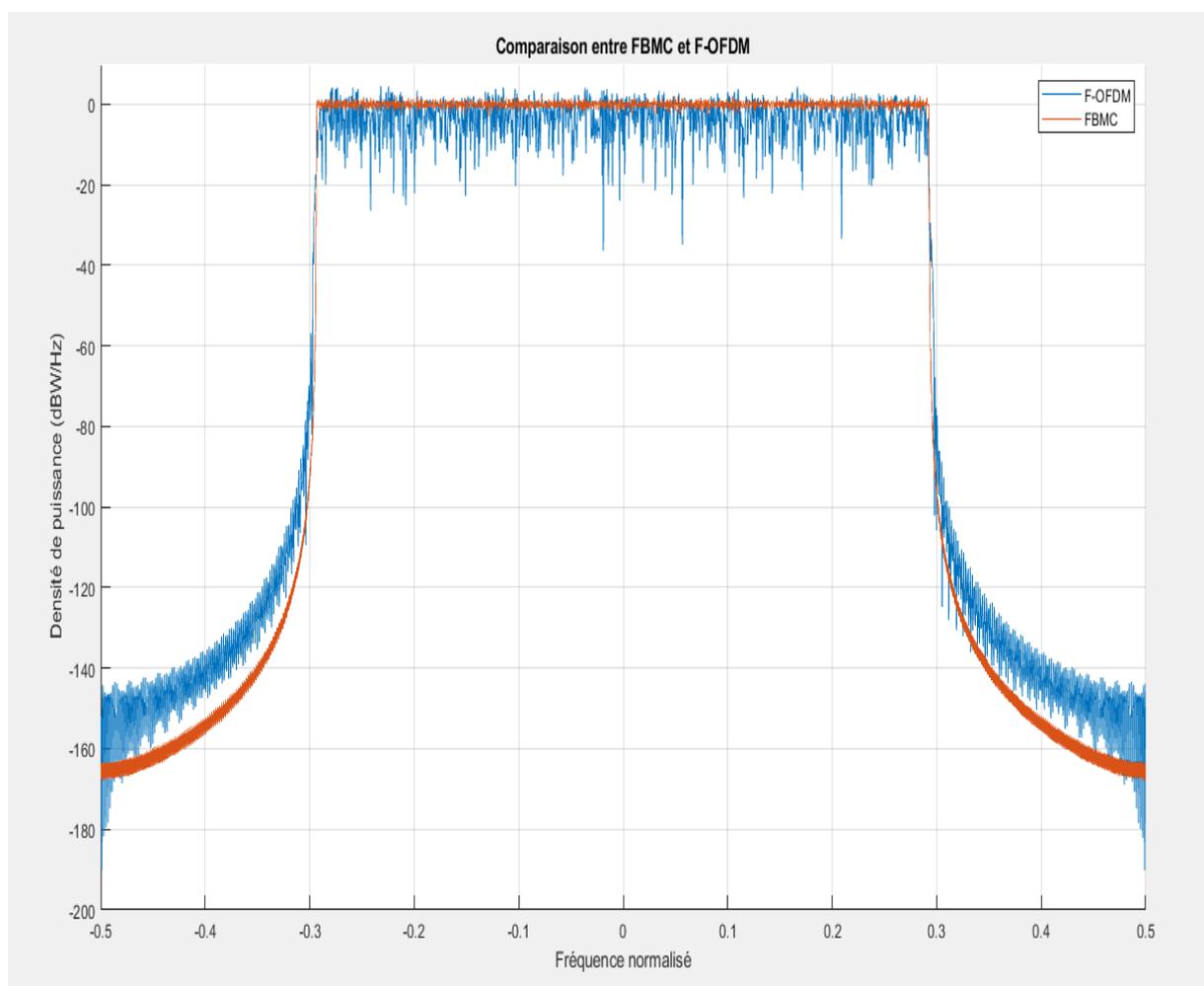


Figure IV-12 : la densité spectrale de puissance pour F-OFDM et FBMC

La figure montre que les lobes secondaires du signal FBMC/OQAM sont légèrement faibles devant ceux de la F-OFDM ce qui lui permet un bande d'arrêt un peu plus stoppée sur les

bords de la bande passante. On constate que FBMC/OQAM est encore plus avantageuse par rapport à F-OFDM.

IV.7. Conclusion:

Après avoir analysé les figures de simulations nous remarquons que dans FBMC/OQAM présente une structure chevauchante dans le temps avec un facteur de chevauchement ($k=4$ comme meilleure valeur). Les trois techniques (FBMC, UFMC, F-OFDM) présentent des caractéristiques un peu comparables mais beaucoup plus meilleur par rapport à OFDM. En comparant les trois techniques alternatives entre elles, on peut constater que l'FBMC/OQAM est plus avantageuse par rapport à les deux premières techniques, offrant donc une efficacité spectrale excellente.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le débit, la capacité et la vitesse de transmission des systèmes sont toujours les besoins que l'on veut améliorer. Au cours de cette mémoire nous avons tenté de répondre à des problèmes majeures qui se posent pour le standard actuel (4G) et proposé des solutions efficaces à ces limitations envers les applications du futur standard (5G).

Dans un premier temps nous avons brièvement décrit les caractéristiques d'un canal multi-trajet pour lequel les modulations multi-porteuses sont intéressantes et nous avons présenté la modulation OFDM dans laquelle un bloc d'information est modulé par une transformée de Fourier ce qui rend un canal multi-trajet large bande en un groupe de sous-canaux mono-trajet à réponse plate et très simples à égaliser.

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, puis nous avons abordé les alternatives de la modulation OFDM qui ne nécessitent pas l'utilisation d'un préfixe cyclique comme (FBMC, UFMC, F-OFDM) pour une utilisation efficace du spectre et atteindre un débit de transmission plus élevé avec une augmentation de la capacité du système et traité le problème qui se pose quand il y a une grande mobilité, problème auquel l'OFDM pourrait être inefficace.

Et pour finir nous avons effectué une série de simulation qui permet de montrer les caractéristiques et performances des nouvelles techniques qui se basent sur de nouvelles formes d'onde du filtre utilisé. La simulation que nous avons réalisée repose sur une étude comparative entre les réponses impulsionnelles et fréquentielles des filtres existants (le filtre rectangulaire utilisé dans l'OFDM) avec celles que l'on veut utiliser dans les standards développés (en l'occurrence les filtres PHYDYAS et CHEBYSHEV utilisés respectivement dans FBMC et UFMC, et le filtre passe-bas utilisé dans F-OFDM) et comment le choix du filtre joue un rôle essentiel pour améliorer l'efficacité spectrale et augmenter la qualité de service des systèmes de transmission.

Les références

- [1] Helmi BEN HNIA, Abdennaceur KACHOURI, Ossama BEN BELGHITH, Lotfi KAMOUN, Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G, International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 15-20, 2004 – TUNISIA.
- [2] BENANI MOHAMED NADJIB , BENYAHIA YASSER, Principe et simulation d'une transmission de type OFDM, mémoire, Année Universitaire: 2017/2018.
- [3] Annick Le Glaunec ,Modulations Multiporteuses
- [4] Elhadji Mansour Fall, "Conception D'un amplificateur RF Agile En CMOS Pour Les Futures Générations De La Téléphonie Mobile ", Université Québec, Mars 2012.
- [5] T. S. Rappaport, Wireless communications: principles and practice: Prentice Hall PTR, 2002.
- [6]"La propagation des ondes radioélectriques à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments",
Mai 2019, adresse site web:
<http://famille.menot.free.fr/boulot/gsm/propa%20indoor/propa%20indoor.htm>
- [7] FEROUANIS "Traitement d'Antennes Adaptatives pour l'Optimisation des Performances des Systèmes MIMO-OFDM dans les Réseaux de Télécommunications Sans Fil", Année 2014
- [8] hamou chehri, Étude et caractérisation d'un canal de propagation pour les réseaux vanet, université du Québec en Abitibi Témiscamingue. JUIN 2014.
- [9] Virginie Dégardinle ,Thèse-Analyse de la faisabilité d'une transmission de données haut débit sur le réseau électrique basse tension , 19 Décembre 2002.
- [10] HO Anh Tai , Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite. THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT .L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.2009.
- [11] P. Moose, 'A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction', IEEE Transactions on Communications, Vol. 42, No. 10, Octobre 1994, pp. 2908 – 2914.

[12] Marwa Chafii, Étude d'une nouvelle forme d'onde multi porteuses à PAPR réduit, 19 Nov 2016.

[13] Emeric Gueguen, Etude et optimisation des techniques UWB haut débit multi-bandes OFDM. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Rennes, 2009. Français. <tel-00361467v1>

[14] Pierre GRUYER, Simon PAILLARD, Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM, 12décembre2005.

[15] SamirArab, "Une étude sur la réduction du PAPR dans un système OFDM", Mémoire du grade de Maître es science (M. Se.), Université Laval, Canada, 2010.

[16] DAOUD Khedidja , Réseaux et Systèmes de Télécommunication, Juin2016.

[17] Mérouane Debbah, Ce document est une brève introduction aux principes de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

[18]A. Skrzypczak, Contribution à l'étude des modulations multi-porteuses OFDM/OQAM et OFDM suréchantillonnées. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Novembre 2007.

[19]A. Latif, Hybrid QAM - FSK (HQFM) OFDM transceiver with low PAPR. Thèse de Doctorat, GhulamIshaq Khan Institute of Engineering Sciences & Technology, January, 2009.

[20] Hijazi, Estimation de canal radio-mobile à évolution rapide dans les systèmes à modulation OFDM. Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, Novembre 2008.

[21] "5G," Wikipedia, the free encyclopedia <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>

[22]"5G Development with Matlab",
https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/ebook/gated/5_G_ebook.pdf

[23] Campbell et al, The 5G economy, 13.

[24] Joe Barrett, 5G Spectrum Bands ,Global Mobile Suppliers Association, February 2017.

[25] sktelecom's 5g architecture design and implementation guidelines , october 2015

[26] Rec. ITU-R M.2083-0, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, septembre 2015

- [27] Eiman Mohyeldin ,Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s)
- [28] Zanella et al, Internet of things for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal 1, 1 (2014).
- [29] Benevolo et al, Smart Mobility in Smart City. In Empowering Organizations, 2016.
- [30] Fang et al, Smart Grid - the New and Improved Power Grid: A Survey. IEEE Communications Surveys and Tutorials 14, 4 (2012), 944-980,2016.
- [31] Wang et al,Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. Computer Networks 57, 5 (2013).
- [32] Akpakwu et al,A Survey on 5G Networks for the Internet of things: Communication Technologies and Challenges. IEEE Access 6 (2018).
- [33] Wang et al, Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. Computer Networks 101, 4 (2016).
- [34] <https://www.pokemongo.com/en-us/> .avril 2019
- [35] <https://www.microsoft.com/en-us/hololens> . avril 2019
- [36] P. Siohan, C. Siclet, and N. Lacaille, "Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filter bank theory," Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 5, pp. 1170–1183, May 2002.
- [37] Viholainen, A.; Bellanger, M.; Huchard, M.; "PHYDAS - PHYSical layer for Dynamic Access and cognitive radio", Report D5.1, January 2009
- [38] Attif Basheer Aamir Habib. FILTER BANK MULTI CARRIER BASED MIMO SYSTEMS FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION .Institute of space technology Islamabad, Pakistan. July 2016
- [39] P.Siohan,C.Siclet,andN.Lacaille,Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filter bank theory,IEEE Transaction on Signal Processing ,vol.50,pp.1170-1183,May 2002
- [40] Jérôme GAUTHIER. Analyse de signaux et d'images par bancs de filtres. Applications aux géosciences. Thèse pour l'obtention de grade de Docteur en Sciences de l'Université de Paris-Est Marne-la-Vallée. 2008

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

[42] ETUDE DE LA TECHNIQUE DE MODULATION FBMC/OQAM Theodoret N.1, Randriamitantsoa P.A.2, Randriamitantsoa 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 Supérieur Polytechnique - Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101 -Madagascar

[43] 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 Supérieur Polytechnique - Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101 –Madagascar

[44] Amjad Iqbal, Syed Shah, M. Amir. Adaptive Investigating Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC) Performance Analysis in 5G Cognitive Radio Based Sensor Network (CSNs)

[45] 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)

[46] 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)

[47] 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).

[48] <https://www.is-wireless.com/wp-content/uploads/2015/07/5GNOW-Deliverables-5G-Waveform-Candidate-Selection.pdf>, avril 2019

[49] Performance Analysis of UFMC and its Comparison with CP-OFDM Sadhana Thiyagarajan¹, Soundharya Veerappan¹ (Electronics and Communication Engineering, Periyar Maniammai Institute of Science and Technology, Vallam, Thanjavur, Tamilnadu, India. mars 2018

[50] 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,

China(2) Beijing Engineering Research Center of High-speed Railway Broadband Mobile Communications, Beijing, China(3) Nokia Bell Labs, Beijing, China

[51] P. Siohan, C. Siclet, and N. Lacaille, "Analysis and design of OFDM/OQAM systems based on filterbank theory," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 50, No. 5, pp. 1170-1183, May 2002

[52] 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

[53] Abdoli J., Jia M. and Ma J., "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.

[54] 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

[55] D. Ktésas, N. Cassiau and J-B, Comparative study of 5G waveform candidates for below 6GHz air interface R.Gerzaguet, Doré CEA-Leti –Minatec Campus –Grenoble, France. 27-28 January 2016

[56] Rostom Zakaria. Conception d'émetteur et récepteur pour l'élimination des interférences intrinsèques dans les systèmes multi-porteuses à base de bancs de filtres et à antennes multiples. Thèse pour obtenir le Grade de Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers. Ecole Doctorale Technologique et Professionnelle CEDRIC/LAETITIA. 2012