

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Djilali Bounaama Khemis Miliana



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de

**Master**

En

« Télécommunications »

Option :

« Systèmes de Télécommunications »

**Titre :**

**Mise en évidence et comparaison par simulation  
entre les systèmes 4G et 5G**

**Réalisé par :**

- **Fortas Ibrahim**
- **Benhalima Nouredine**

**Encadré par :**

**Dr. Mourad Benyarou**

Année Universitaire: 2019/2020

## *Dédicace*

*À nos chers **parents**, pour leurs sacrifices, amour, affection, soutien et prières tout au long de nos études,*

*À nos chères **sœurs** ..... pour leur encouragement constant et leur soutien moral,*

*À nos chers **frères** ..... à les soutenir et à les encourager,*

*À toute notre **famille** pour leur soutien tout au long de notre carrière universitaire,*

*Pour tous nos camarades de classe “ **systèmes de communications** ”*

*À toutes les côtés de la **famille universitaire**,*

*Nous transmettons cet humble message sans oublier **l'encadreur** qui mérite un dévouement particulier à ses efforts qui nous ont consacré à la réussite de ce travail,*

*Nous espérons que ce travail permettra de tenir vos promesses présumées et les fuites infaillibles de soutien,*

*Merci d'être toujours là pour nous.*

# Remerciements

*Nous remercions tout d'abord le grand Dieu pour l'achèvement de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté examiné ce mémoire.*

*Nous remercions Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont portés à ce travail.*

*Nous remercions Monsieur Mourad Benyarou, notre encadreur, pour ses conseils et suggestions avisés qui nous aidés à mener à bien ce travail, et d'avoir rapporté à ce mémoire ces remarques et conseils.*

## Résumé

Les communications sans fil de la génération actuelle (4G) basée sur la technique de modulation multi porteuses OFDM/CP qui proposent un débit déjà important pour les consommateurs, les besoins des particuliers, des entreprises et des gouvernements ne cessent de croître avec les évolutions technologiques tel que l' IOT (IDO l'internet des objets) qui sera réalisée dans la future génération (5G) basée sur la nouvelle technique de modulation à base de filtre (FBMC). Les programmes de simulation réalisés dans ce travail ont permis de mettre en relief l'intérêt d'une technique FBMC/OQAM. Les courbes du BER (TEB : taux d'erreur binaire) et de la DSP (Densité Spectrale de la Puissance) tracées en fonction de SNR (RSB : rapport signal sur bruit) avec des canaux AWGN et Rayleigh dans les bandes centimétriques ( $f < 6\text{GHZ}$ ) ont montrés les intérêts des liaisons FBMC par rapport à l'OFDM.

**Mots clés:** OFDM, FBMC, OQAM, QAM, CP, MIMO massive, BER, SNR, DSP...

## Abstract

The current generation wireless communications (4G) based on the OFDM/CP multi-carrier modulation technique which have an already significant speed for consumers, the needs of individuals, businesses and governments are constantly growing with technological developments such as the IOT (IDO Internet of Things) which will be performed in the next generation (5G) based on the new filter-based modulation technique (FBMC). The simulation programs carried out in this work made it possible to highlight the interest of an FBMC / OQAM technique. The curves of BER (BER: bit error rate) and of DSP (Spectral Density of Power) plotted in SNR function (RSB: signal-to-noise ratio) with AWGN and Rayleigh channels in centimeter bands ( $f < 6\text{GHZ}$ ) on shown the advantages of FBMC compared to OFDM.

**Keywords:** OFDM, FBMC, OQAM, QAM, CP, MIMO massive, BER, SNR, DSP...

## الملخص

الجيل الحالي للاتصالات اللاسلكية (G4) القائم على تقنية التشكيل CPOFDM/متعددة الموجات الحاملة والتي لها سرعة كبيرة بالفعل بالنسبة للمستهلكين، واحتياجات الأفراد والشركات والحكومات تنمو باستمرار مع التطورات التكنولوجية مثل (IDO) IOT (Internet of Things) التي سيتم إجراؤها في الجيل التالي (G5) بناءً على تقنية التعديل القائمة على المرشح (FBMC). جعلت برامج المحاكاة التي تم تنفيذها في هذا العمل من الممكن إبراز اهتمام تقنية FBMC / OQAM. تظهر منحنيات BER (BER: معدل خطأ البتات) و DSP (الكثافة الطيفية للقدرة) المرسله بالنسبة لSNR: نسبة الإشارة إلى الضوضاء مع قنوات AWGN و Rayleigh في نطاقات الموجات السنتمترية ( $f > 6\text{GHZ}$ ) على المزاي الموضحة روابط FBMC مقارنة بـ روابط OFDM

الكلمات المفتاحية: OFDM, FBMC, OQAM, QAM, CP, MIMO massive, BER, SNR, DSP

## Liste des abbreviations

**3GPP** : 3rd Generation Partnership Project  
**AFB** : Analysis Filter Bank  
**AMF** : Access and Mobility Management Function  
**AUSF** : Authentication Server Function  
**AWGN** : Additive White Gaussian Noise  
**BER** : Bit Error Rate  
**BPSK** : Binary Phase-Shift Keying  
**BS** : Base Station  
**CAC** : Call Admission Control  
**CDMA** : Code Division Multiple Access  
**CIR**: Impulse Response of the Channel  
**CP** : Cyclic Prefix  
**CPRI**: Common Public Radio Interface  
**CUPS** : Control User Plane Separation  
**DAB** : Digital Audio Broadcasting  
**DFT** : Transformation de Fourier Discrète du signal  
**DL** : Downlink  
**DSP** : Densité Spectrale de Puissance  
**DVB** : Digital Video Broadcasting  
**EDGE** : Enhanced Data Rates for GSM Evolution  
**eMBB** : enhanced Mobile Broadband  
**EP** : Estimation Pilots  
**ePC** : evolved Packet Core  
**ePS** : evolved Packet System  
**ETSI** : European Telecommunications Standards Institute  
**EUTRAN** : Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network  
**FBMC** : Filter Bank based MultiCarrier  
**FDD** : Frequency Division Duplexing  
**FDMA** : Frequency-Division Multiple Access  
**FFT** : Fast Fourier Transform

**G** : Generation

**GFDM** : Generalized Frequency Division Multiplexing

**gNB** : next Generation Node Base Station

**GPRS** : General Packet Radio Service

**GSM** : Global System for Mobile

**HARQ** : Hybrid Automatic Repeat reQuest

**HD** : High Definition

**HSxPA** : High Speed Packet Access

**ICI** : Inter Carrier Interference

**IEEE** : Institute of Electrical and Electronics Engineers

**IFFT** : Inverse Fast Fourier Transform

**IG** : Guard Interval

**IMS** : IP Multimedia Subsystem

**IMT-Advanced** : International Mobile Telecommunications-Advanced

**IOT** : Internet of Things

**IOV** : Internet Of Vehicles

**IP** : Internet Protocol

**Ipv6** : Internet protocol version 6

**ISI** : Inter-Symbol Interference

**ITU** : International Telecommunication Union

**ITU-R** : International Telecommunication Union – Radio

**LDPC** : Low-Density Parity-Check

**LOS** : Line-Of-Sight

**LTE** : Long Terme Evolution

**MAC** : Media Access Control

**MAN** : Metropolitan Area Network

**MC-CDMA** : Multi-Carrier Code-Division Multiple Access

**MIMO** : Multiple Input Multiple Output

**MIMO-OFDM** : Multiple-input, multiple-output orthogonal frequency-division multiplexing

**MME** : Mobility Management Entity

**MMS** : Multimedia Messaging Service

**MU-MIMO** : Multi-Utilisateur Multiple Input Multiple Output

**NAS** : Non-Access Stratum

**ng-eNb** : Next Generation Nb

**NG-RAN** : Next Generation RAN

**NOMA** : Non-Orthogonal Multiple Access

**NR** : Number Request

**NSSF** : Network Slice Selection Function

**OFDM** : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**OFDMA** : Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

**OQAM** : Offset Quadrature Amplitude Modulation

**OSI** :Open Systems Interconnection

**PAPR** : Peak-to-Average Power Ratio

**PC** : Portable Computer

**PCF** : Policy Charging Function

**PCRF** :Policy and Charging Rules Function

**PDN** : Packet Data Network

**PDU** : Session User Plane protocol

**PFCP** : Packet Forwarding Control Protocol

**PGW-C** : PDN Gateway Control plane function

**PGW-U** :PDN Gateway User Control plane function

**PHYDYAS** : PHYsical layer for DYnamic spectrum AccesSand cognitive radio

**PPN** :Published Polyphase Network

**PSK** : Phase-Shift Keying

**QAM** :Quadrature Amplitude Modulation

**QoS** : Quality of Service

**QPSK** : Quaternary Phase-Shift Keying

**RAN** : Radio Access network

**RNC** : Radio Network Controller

**RRM** : Radio Resource Management

**S/P Et P\S** : Serial to Parallal et Parallal to Serial

**SC-FDMA** : Single-carrier frequency division multiple access

**SCMA** : Sparse Code Multiple Access, Sparse Code Multiple Access

**SFB** : Synthesis Filter Bank

**SGW** : Serving Gateway

**SGW-C** : Serving Gateway Control plane function

**SGW-U** : Serving Gateway User plane function

**SMF** : Session Management Funtion

**SNR** : Signal to Noise Ratio

**TDD** : Time Division Duplexing

**TDMA** : Time-division multiple access

**TVHD** : High Definition Television

**UDM** : Unified Data Management

**UDR** : Unified Data Repository

**UE** : User Equipement

**UFMC** :Universal Filtered Multi-Carrier

**UHD** : Ultra Haute Définition

**UMTS** : Universal Mobile Telecommunications System

**UP** : Uplink

**UPF** : User Plane Function

**VoIP** : Voice Over Internet Protocol

**WI Max** : World wide Interoperability for Microwave access

**WiBro** : wireless broadband

**Wi-Fi** : Wireless Fidelity

**WMAN** : Wireless Metropolitan Area Network

## Liste des figures

Fig.1. 1. Architecture de 4G /LTE .....	5
Fig.1. 2. Quelques applications de la 5G.....	11
Fig.1. 3. Architecture de la 5G .....	13
Fig.2. 1. Schéma synoptique d'une chaine de transmission [13]. .....	20
Fig.2. 2. Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM.....	22
Fig.2. 3. Schéma générale de l'OFDM.....	23
Fig.2. 4. Constellation MAQ-16 et MAQ-64. ....	24
Fig.2. 5. Constellation pour B-PSK et Q-PSK. ....	24
Fig.2. 6. Symbole OFDM avec CP.....	25
Fig.2. 7. Les porteuses de l'OFDMA .....	26
Fig.2. 8. Schéma de principe de l'OFDMA. ....	26
Fig.2. 9. Schéma de principe de SC-FDMA. ....	27
Fig.2. 10. Similitude entre une chaine OFDMA et SC-FDMA.....	28
Fig.2. 11. La différence entre L'OFDMA et SC-FDMA [22].....	28
Fig.2. 12. Chaîne de communication de la 4G. ....	29
Fig.2. 13. Transmetteur MIMO OFDM. ....	31
Fig.2. 14. Récepteur MIMO OFDM. ....	31
Fig.2. 15. Paramètres techniques d'IEEE 802.16d.....	32
Fig.2. 16. Paramètres techniques d'IEEE 802.16e.....	33
Fig.2. 17. Présentation générale sur le système LTE [25].....	34
Fig.3. 1. Système MIMO massive.....	35
Fig.3. 2. Comparaison entre l'OFDMA et NOMA. ....	36
Fig.3. 3. La bande passante de la 5G.....	38
Fig.3. 4. Chaîne de communication de la 5G à base de FBMC. ....	39
Fig.3. 5. Schéma générale de pré/traitement OQAM.....	39
Fig.3. 6. Schéma fonctionnel du post-traitement OQAM. ....	41
Fig.3. 7. Schéma de principe de l'émetteur FBMC/OQAM. ....	42
Fig.3. 8. Schéma de principe du récepteur FBMC/OQAM.....	43
Fig.3. 9. Schéma fonctionnel de l'OFDM et de la FBMC.....	44
Fig.4. 1. Spectre de sous porteuse OFDM pour 8 sous canaux.....	46

Fig.4. 2. Spectre de sous porteuse FBMC pour 8 sous canaux. ....	47
Fig.4. 3. Spectre de sous porteuse FBMC pour 64 sous canaux. ....	48
Fig.4. 4. Spectre de sous porteuse FBMC pour 64 sous canaux. ....	48
Fig.4. 5. L'effet de la modification de facteur de chevauchement $k$ . ....	49
Fig.4. 6. L'effet de la modification de nombre de sous canaux $M$ . ....	50
Fig.4. 7. L'effet de la modification de la taille de l'intervalle de garde $IG$ . ....	51
Fig.4. 8. L'effet de changement type d'antenne MOMO-OFDM / MIMO Massive ..	52

## Liste des tableaux

Tab.1. 1.Comparaison entre 3G et 4G.....	9
Tab.1. 2. Comparaison entre 4G et 5G.....	18
Tab.2. 1. Caractéristiques techniques de la 4G. ....	29
Tab.2. 2. Caractéristiques techniques de LTE.....	34

# Table de Matière

## Remerciement

## Résumé

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### Chapitre 1 : Caractéristique principale de la 4G et la 5G

1.1. Introduction.....	3
1.2. Caractéristiques principales de la 4G .....	3
1.2.1. Généralités sur la 4G .....	3
1.2.2. Les normes de 4G .....	4
1.2.3. L'architecture de 4G .....	4
1.2.4. Les caractéristiques de 4G.....	5
1.2.5. Les avantages et les inconvénients .....	7
1.2.5.1. Avantages de la 4G.....	7
1.2.5.2 Inconvénients de la 4G .....	8
1.3. Comparaison entre 3G et 4G.....	8
1.4. Caractéristiques principales de la 5G .....	9
1.4.1. Généralité sur la 5G.....	9
1.4.2. Applications de la 5G.....	10
1.4.3. La norme de 5G .....	11
1.4.4. L'architecture de la 5G .....	12
1.4.4.1. L'accès radio 5G .....	12
1.4.4.2. Le cœur réseau 5G (5GC).....	12
1.4.5. Les caractéristiques de 5G.....	14
1.4.6. Les avantages et les inconvénients : .....	17
1.4.6.1. Les avantages du futur réseau 5G .....	17
1.4.6.2. Les inconvénients du réseau 5G.....	17
1.5. Comparaison entre 4G et 5G.....	18
1.6. Conclusion .....	18

### Chapitre 2 : Etude d'une chaîne de communication 4G

2.1. Introduction.....	19
------------------------	----

2.2. Chaîne de transmission numérique.....	19
2.2.1. Les technologies de Transmission .....	20
2.2.2. Technique de Modulation OFDM.....	21
2.2.2.1. Définition de L'OFDM .....	21
2.2.2.2. Principe de l'OFDM.....	21
2.2.3. Chaîne de Transmission d'un Système OFDM.....	22
2.2.4. Modulation numérique .....	23
2.2.5. Principe des modulations multi-porteuses .....	24
2.3. Les types de transmission utilisée dans la 4G .....	25
2.3.1. OFDMA .....	25
2.3.2. Principes de l'OFDMA.....	25
2.3.3. SC-FDMA.....	26
2.3.4. Comparaison entre l'OFDMA et le SC-FDMA .....	27
2.4. Les caractéristiques techniques de la 4G .....	28
2.5. Principe d'une chaîne de communication 4G .....	29
2.6. Les systèmes MIMO OFDM .....	30
2.7. Technologies WiMAX .....	31
2.7.1. Wi MAX fixe .....	32
2.7.2. Wi MAX mobile.....	32
2.7.3. LTE (4G) .....	33
2.8. Conclusion .....	34

### **Chapitre 3 : Etude d'une chaîne de communication 5G**

3.1. Introduction.....	35
3.2. MIMO massive.....	35
3.3. Multiplexage NOMA : .....	36
3.4. Méthodes duplex.....	36
3.5. Type de modulation .....	37
3.6. La bande passante .....	37
3.6.1. Bandes centimétriques.....	38
3.6.2. Bandes millimétriques.....	38
3.7. Chaîne de communication de la 5G .....	38
3.7.1. Structure du Système FBMC/OQAM .....	38
3.7.2. Principe de traitement OQAM .....	39
3.7.2.1. Bloc pré-traitement OQAM.....	39

3.7.2.2. Bloc Post-traitement OQAM.....	40
3.7.3. Emetteur FBMC/OQAM.....	41
3.7.4. Récepteur FBMC/OQAM .....	42
3.8. Comparaison entre L'OFDM et FBMC .....	43
3.8.1. Les avantages et les défis de FBMC.....	44
3.8.1.1. Avantages .....	44
3.8.1.2. Défis .....	44
3.9. Conclusion .....	44

## **Chapitre 4 : Simulation et comparaison entre la 4G et la 5G**

4.1. Introduction.....	45
4.2. Les performances .....	45
4.2.1. Le taux d'erreur binaire (BER).....	45
4.2.2. Le rapport signal sur bruit (SNR) .....	45
4.2.3. La densité spectrale.....	46
4.3. Les critères de comparaison.....	46
4.3.1. Le spectre de sous porteuses .....	46
4.3.2. Facteur de chevauchement k.....	48
4.3.3. Le nombre de sous canaux M.....	49
4.3.4. L'intervalle de garde IG .....	50
4.4. Conclusion .....	52
<b>Conclusion générale</b> .....	53

### **Bibliographie**

### **Annexe**

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

De nos jours, les usages de technologie de communication sans fils se multiplient, les réseaux de télécommunication font face à une hétérogénéité d'usage sans précédent. Jusqu'ici, chaque génération (1G, 2G, 3G, 4G) de réseaux a été mise en œuvre en réponse à des usages spécifiques. Mais la 5G devra répondre à des besoins diversifiés. En effet, à côté des utilisateurs cellulaires classiques apparaissent de nouveaux types d'objets communicants, où ce qui est désormais courant d'appeler l'Internet des Objets. Les technologies de l'information sont devenues une partie intégrante de notre société, ceci dans le but de la demande de transmission à débit de plus en plus élevé, s'accroît d'avantage avec l'essor de nouveaux services dans les réseaux de communication sans fils. Des anciens systèmes mobiles font généralement référence à un changement de nature du système, de vitesse, de technologie, de fréquence, de capacité de donnée et de latence. 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.

Le système des réseaux actuels (4G) est basé sur la technique OFDM qui est la modulation multi-porteuse la plus répandue et elle est utilisée dans nombreux systèmes de communications sans fil tel que WiFi IEEE 802.11, WiMax IEEE 802.16, LTE [1]. La grande popularité de la modulation OFDM vient principalement de sa grande efficacité spectrale due à l'espacement étroit entre ses sous-porteuses orthogonales, sa robustesse aux effets du multi-trajet et capacité d'éviter les interférences inter-symboles et inter-porteuses grâce à l'ajout de préfixe cyclique (CP). Malgré ces avantages ; L'OFDM a quelques inconvénients (l'ajout du préfixe cyclique cause une perte en efficacité spectrale, l'utilisation d'un filtre rectangulaire

génère des lobes secondaires importants) qui motive les chercheurs à développer d'autres solutions

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

Notre travail a été divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous allons décrire les caractéristiques principales, l'utilisation, les avantages et l'inconvénient de la 4G et la 5G.

Dans le deuxième chapitre nous allons étudier la chaîne de communication numérique de la 4G basé sur la modulation multi-porteuse OFDM.

Dans le troisième chapitre nous allons étudier la chaîne de communication 5G basé sur la modulation FBMC/OQAM.

Dans le dernier chapitre on va simuler les deux chaînes de communication et comparer leurs BER en fonction de SNR.

Pour élaborer à ce travail on a utilisé le MATLAB qui est un outil informatique de programmation et de simulation.

# **Chapitre 1**

**Caractéristiques  
principales de la 4G et  
la 5G**

## **1.1. Introduction**

Dans ce premier chapitre nous allons rappeler quelques caractéristiques essentielles des systèmes de communication de quatrième génération (4G) et de la cinquième génération (5G).

L'architecture réseaux est bien détaillée, nous allons dresser quelques tableaux pour pouvoir voir leur comparaison en termes de débits, de mobilité, de bandes passantes, etc.

## **1.2. Caractéristiques principales de la 4G**

### **1.2.1. Généralités sur la 4G**

Avec l'attribution par l'état, en Septembre 2011 et Janvier 2012, des bandes de fréquences pour l'exploitation d'un service de communication sans-fil, le coup d'envoi du déploiement des réseaux mobiles de 4ème génération est donné. La 4G, au-delà du terme « marketing », annonce de profonds changements et investissements techniques pour les opérateurs de réseaux mobiles avec le déploiement d'un nouveau réseau d'accès et d'un nouveau réseau cœur. Pour les utilisateurs, la 4G annonce une meilleure qualité du réseau (débits, latence) et le développement de nouveaux services innovants. Le vocabulaire technique pour désigner ce futur ensemble, composé du réseau d'accès appelé LTE, et d'un réseau cœur appelé ePC, est EPS. Ce nouveau réseau a remplacé progressivement les anciens réseaux 2G (GSM, GPRS, EDGE) et 3G (UMTS, HSxPA). Comme pour ses prédécesseurs, le réseau EPS est standardisé par l'organisme 3GPP qui l'introduit dans les versions 8 et supérieures de ses normes. Selon l'ITU-R, le LTE ne remplit pas les critères d'un véritable réseau de 4ème génération, et le terme 4G est donc erroné. Il serait plus exacte de parler de 3,99G. Le véritable réseau d'accès 4G, selon l'ITU-R, sera le successeur du LTE : le LTE advanced. Mais pour des raisons évidentes de « marketing » et pour faciliter la discussion, le terme 4G est de fait utilisé pour désigner le nouveau réseau : LTE + ePC = EPS. La promesse de ce nouveau réseau est d'apporter plus de qualité pour les utilisateurs finaux (débit, latence, QoS, IMS, ...) et plus de confort pour la

maintenance, l'exploitation et l'évolutivité pour les opérateurs (full IP, Ipv6, rapprochement avec le monde Internet) [2].

### 1.2.2. Les normes de 4G

On distingue quatre normes qui sont regroupées en (IMT-Advanced) pour la 4G et ce sont comme suit :

- LTE
- WiMAX
- LTE-Advanced
- Gigabit WiMAX(non déployée)

Les organismes de normalisation UIT-R et ETSI ont établi, en 2008, les spécifications IMT-Advanced pour définir les caractéristiques des normes 4G. La norme LTE-Advanced fait partie des technologies réseaux retenues dans le cadre de l'IMT-Advanced, avec le Gigabit WiMAX.

Les normes précédentes LTE et WiMAX ont d'abord été considérées comme des normes de troisième génération (« 3,9G »), spécifiées dans le cadre des technologies IMT-2000. Cependant, en décembre 2010, l'UIT a accordé aux normes LTE et WiMAX la possibilité commerciale d'être considérées comme des technologies 4G, du fait d'une amélioration sensible des performances comparées à celles des premiers systèmes 3G [3].

### 1.2.3. L'architecture de 4G

On prend l'architecture de la norme 4G/LTE et la **figure 1.1** la représente.

Le réseau d'accès LTE contient un nœud unique l'Evolved NodeB eNodeB, Il rassemble en une seule entité les fonctionnalités des nœuds NodeB et RNC de l'UMTS. Le principal rôle de l'eNodeB est de véhiculer les flux de données de l'UE vers l'EPC au moyen des fonctions comme le RRM et le CAC .Elle peut être divisée en deux interfaces élémentaires: S1-U (S1-User) se trouve entre l'eNodeB et le SGW et S1-C entre l'eNodeB et le MME. Les eNodeB ont offert deux qualités au réseau : la sécurité en cas de problème d'un relais et le partage des ressources équitable en cas de saturation du lien principal. Cette opération est faite grâce à l'utilisation de l'interface S1 qui joint l'E-UTRAN aux composantes de l'EPC. L'E-UTRAN a une nouvelle interface X2 unique au réseau LTE.

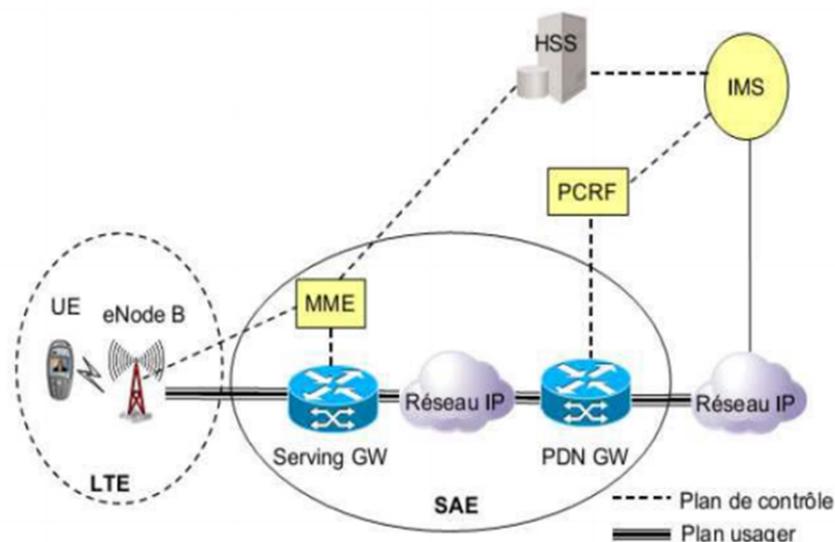


Fig.1. 1. L'architecture de 4G /LTE [4].

#### 1.2.4. Les caractéristiques de 4G

On focalise sur les caractéristiques suivantes :

##### A/Débit sur l'interface radio :

L'interface radio E-UTRAN doit pouvoir supporter un débit maximum descendant instantané (du réseau au terminal) de 100 Mbit/s tout en considérant une allocation de bande de fréquence de 20 MHz pour le sens descendant, et un débit maximum montant instantané (du terminal au réseau) de 50 Mbit/s en considérant aussi une allocation de bande de fréquence de 20 MHz.

##### B/ Flexibilité de la bande passante :

Il est possible d'opérer avec une bande de taille différente avec les possibilités suivantes : 1.25, 2.5, 5, 10, 15 et 20 MHz, pour les sens descendant et montant. L'intention est de permettre un déploiement flexible en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer.

##### C/ Efficacité du spectre :

Le LTE utilise une efficacité du spectre de 5bit/s/Hz pour le sens descendant, et 2,5 bit/s/Hz pour le sens montant.

##### D/Méthode de duplexage :

Le LTE utilise le (FDD) et le (TDD)

**E/Orthogonalité des liaisons :**

La liaison montante et la liaison descendante des utilisateurs sont orthogonales entre elles (pas d'interférence intracellulaire).

**F/Coexistence et interfonctionnement avec la 3G :**

Le handover entre E-UTRAN (LTE) et UTRAN (3G) doit être réalisé en moins de 300 ms pour les services temps-réel et 500 ms pour les services non temps-réel. Il est clair qu'au début du déploiement de la LTE peu de zones seront couvertes. Il s'agira pour l'opérateur de s'assurer que le handover entre LTE et La 2G/3G est toujours possible.

**G/Mobilité :**

La mobilité est assurée à des vitesses comprises entre 120 et 350 km/h. Le handover pourra s'effectuer dans des conditions où l'utilisateur se déplace à grande vitesse.

**H/Technologie d'antenne :**

LTE utilise la technologie d'antenne MIMO

**I/Support du multicast :**

Notamment pour les applications multimédia telles que la télévision en broadcast.

**J/Modulation :**

La 4G utilise la modulation d'amplitude en quadrature (QAM). Cette modulation peut atteindre QAM-64, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis.

**K/Technologies d'accès :**

LTE utilise la technologie OFDMA pour le sens descendant et SC-FDMA) et pour le sens montant basées sur l'OFDM.

**L/Formes d'ondes :**

La 4G repose sur la technique de l'OFDM qui consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de

transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux.

En codage orthogonal, l'espacement entre chaque sous-porteuse doit être égal à

$$\Delta f = k/(T_U) \dots\dots\dots (Eq. 1.1)$$

Où  $T_U$  secondes est la durée utile d'un symbole (c.à.d. la taille de la fenêtre de capture du récepteur), et  $k$  est un entier positif, généralement égal à 1. Par conséquent, avec  $N$  sous-porteuses, la largeur totale de la bande passante sera de

$$B \approx N \cdot \Delta f \text{ (Hz)} \dots\dots\dots (Eq. 1.2)$$

Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes sous-porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système saura tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. Chaque sous-porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques : BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64...[4].

### 1.2.5. Les avantages et les inconvénients de la 4G

La 4G ou LTE prend de plus en plus d'importance dans le panorama actuel, en raison de la forte augmentation de la consommation d'Internet mobile et des ventes de smartphones, le réseau 3G (avant la 4G) ne disposait pas d'une capacité suffisante pour que chacun puisse se connecter et surfer à une vitesse acceptable. En d'autres termes, le débit de la 3G était trop petit pour nous. Le débit de la 4G est presque 10 fois plus rapide que la 3G.

#### 1.2.5.1. Les avantages de la 4G

Le principal avantage du réseau 4G est précisément la vitesse. Cette connexion nous permet de télécharger du contenu avec une grande vitesse de téléchargement.

Cela signifie que le temps de téléchargement du contenu sur notre appareil est réduit de plus de la moitié. Vous pouvez également remarquer l'amélioration quand il s'agit de visualiser le contenu en ligne. Surtout dans le téléphone mobile, la bande passante nous permet de regarder des vidéos en streaming sans la spirale éternelle du chargement qui ne finit jamais. Et bien sûr, pour les jeux en ligne, la 4G fonctionne beaucoup plus facilement qu'avec les réseaux de la génération précédente.

#### **1.2.5.2 Les inconvénients de la 4G**

Le principal inconvénient de cette connexion est qu'étant plus rapide, elle consomme plus de données du trafic contracté en moins de temps. Très probablement si vous avez un débit de données minimum, au milieu du mois, vous rechercherez le Wi-Fi dans les coins pour télécharger les photos que vous recevez dans Whatsapp.

Un autre inconvénient de la 4G est qu'à l'heure actuelle, nous ne pouvons trouver la connexion à ce réseau que dans les villes et les zones largement communiquées, de sorte que même si votre téléphone est compatible, peut-être dans la zone, vous n'êtes pas en mesure de profiter de cette couverture. En outre, vous devez avoir un trafic qui permet l'utilisation de la 4G, et certains opérateurs ne travaillent toujours pas avec eux.

Enfin, votre téléphone portable doit être compatible avec cette technologie. C'est quelque chose à garder à l'esprit, cependant, de nos jours, il est rare qu'un Smartphone ne soit pas compatible avec les réseaux 4G. Mais s'il est vrai que vous devriez avoir une couverture 4G mais que vous ne la recevez pas, vérifiez que le problème n'est pas dans votre appareil [5].

### **1.3. Comparaison entre 3G et 4G**

Le tableau suivant permet de faire une comparaison entre les générations en termes de débit binaire.

	3G	4G
Bande de fréquence	1.8 à 2.5 GHz	2 à 8 GHz
Bande passante	5-20 MHz	5-20 MHz
Le débit de données	Jusqu'à 2Mbps (384 kbps WAN)	Jusqu'à 20 Mbps ou plus
Accéder	Wideband CDMA	MC-CDMA, OFDMA
Codage du canal	Turbo-codes	Turbo-codes, LDPC
Commutation	Circuit / paquet	Paquet
Mobiles des vitesses de pointe	200 km/h	200 km/h

**Tab.1. 1.** Comparaison entre 3G et 4G [6].

On voit bien que la 4G se caractérise d'un débit élevé qui peut offrir à nos besoins de téléchargements ou de connexion par rapport à la génération précédente. Mais les chercheurs réfléchissent toujours à faire évoluer le débit pour avoir au moins des gigabit/s, c'est pour cela ils donneront une nouvelle naissance à une génération très performante qui sera la 5G.

## 1.4. Caractéristiques principales de la 5G

### 1.4.1. Généralité sur la 5G

Les technologies de la cinquième génération (5G) arrivent à grands pas, et elles possèdent un potentiel de transformation immense pour rendre nos vies meilleures. De meilleurs soins de santé, des villes plus intelligentes, une industrie bien plus efficace; tout cela devient possible à l'heure où l'Internet des objets prend de l'ampleur et s'accompagne d'une large gamme de solutions innovantes, qui font tourner notre économie moderne. Toutefois, sans les réseaux 5G, aucun de ces éléments ne peut exprimer tout son potentiel. Bientôt, en effet, les systèmes 5G intelligents deviendront indispensables pour satisfaire la forte demande de données des milliards de personnes qui utilisent des quantités de vidéos chaque jour plus importantes. La 5G permettra des débits de données nettement plus rapides, une connectivité fiable ainsi qu'une faible latence pour les télécommunications mobiles internationales (IMT) autant de points nécessaires à notre nouvel écosystème de communications mondial, constitué de dispositifs connectés envoyant de grandes quantités de données via la large bande à ultra-haut débit. Dans cette édition des

Nouvelles de l'UIT, on expliquera ce qu'est la 5G et pourquoi elle offre de telles promesses, et l'on se penchera sur la manière de faire de ces systèmes aussi complexes une réalité.

### **1.4.2. Applications de la 5G**

La technologie 5G est la technologie sans fil de cinquième génération, qui est dans sa phase de développement, et devrait être commercialisée dans les deux à trois prochaines années. La vitesse opérationnelle de la technologie devrait être plusieurs fois supérieure à celle des technologies sans fil existantes (1G, 2G, 3G et 4G) et pénétrer de manière significative sur les marchés du sans-fil 2G et 3G. Le haut débit, la vitesse de téléchargement plus rapide, le faible coût et l'extension du marché de l'Internet des objets (IOT) alimentent le marché de la technologie 5G. Cette technologie devrait être largement utilisée dans l'automobile, applications médicales, la réalité virtuelle et les applications basées sur la réalité augmentée.

La 5G utilisera des ondes millimétriques (entre 24 et 86 GHz). Les ondes millimétriques peuvent remplacer les lignes de transmission traditionnelles à fibre optique reliant les stations de base mobiles.

**Énergie :** Comme les réseaux intelligents impliquent une connectivité appropriée entre les capteurs et les systèmes de surveillance, la 5G révolutionnera la manière dont l'énergie est stockée, livrée et vendue. Composante indispensable de nombreuses stratégies énergétiques nationales, les réseaux 5G amélioreront la gestion globale du réseau. Ceci, à son tour, aidera à équilibrer la capacité de régulation de charge de pointe et l'approvisionnement en énergie par intermittence. Le réseau 5G ultra-rapide aidera à gérer rapidement les perturbations anormales dans les appareils d'alimentation avec une surveillance en temps réel - rendant ainsi le réseau intelligent encore plus intelligent. La 5G alimenterait également la robotique dans la fabrication en aidant à contrôler les machines lourdes à distance, rendant ainsi les situations dangereuses plus sûres.

**Automobile :** Les voitures connectées annoncent le début de la transformation de l'industrie automobile. Des milliards de dollars sont investis dans l'Internet des véhicules (IOV - le nom de l'IOT dans l'automobile), afin de concrétiser les capacités réelles de l'industrie automobile. La 5G assurera une connectivité ultra rapide, ce qui améliorera la sécurité et l'efficacité, rendant ainsi le signal vert pour les voitures

connectées. Avec un réseau rapide et fiable, les voitures autonomes pourront facilement obtenir des informations en temps réel, notamment des alertes rapides et des données de trafic panoramiques.

**Applications vidéo HD :** Des ondes millimétriques peuvent être utilisées pour transmettre sans fil des vidéos UHD à la TVHD. De minuscules modules de transmission peuvent être intégrés aux appareils pour la transmission HD à partir de décodeurs numériques, de stations de jeu HD et d'autres sources vidéo haute définition.

**Applications médicales :** Les chercheurs ont découvert que la technologie à ondes millimétriques peut être utilisée dans des applications médicales telles que le traitement de la douleur aiguë. La thérapie par ondes millimétriques utilise des plages de fréquences comprises entre 40 GHz et 70 GHz pour expérimenter plusieurs conditions médicales.

**Communication par satellite :** Les ondes millimétriques sont des candidats parfaits pour la communication par satellite. À des altitudes d'orbites plus élevées, il fonctionne parfaitement avec un débit de données massif et une faible latence.

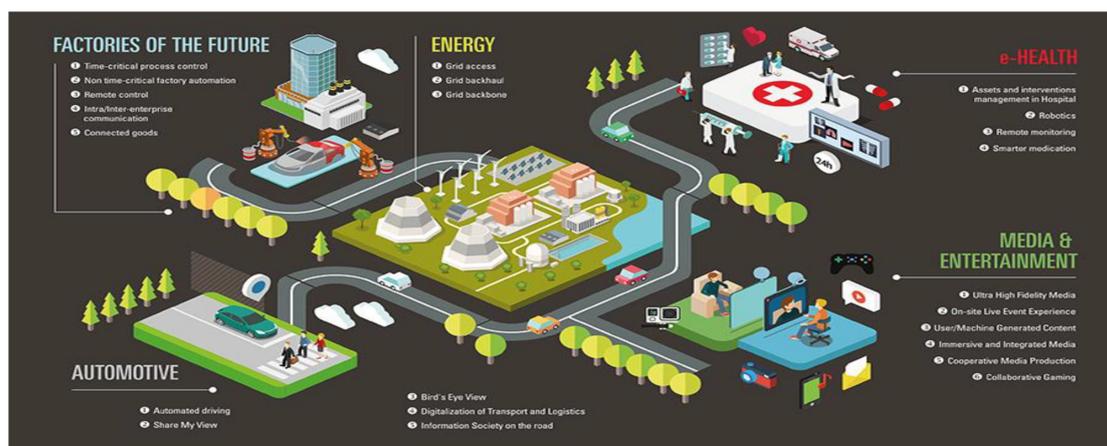


Fig.1. 2. Quelques applications de la 5G [7].

### 1.4.3. La norme de 5G

Après l'IMT-2000 (pour la 3G) et l'IMT-Advanced (4G), voici l'IMT-2020, définie par l'UIT-T (anciennement l'UIT) vise à faire le lien entre les télécommunications mobiles mondiales et les technologies qui construiront les communications sans fil à partir de 2020. Autrement dit, à désigner l'ensemble des normes de la 5G. Un choix arrêté lors d'une récente réunion de travail de l'UIT-T dans le prolongement du programme « IMT for 2020 and beyond » qui, dès 2012, commençait à réunir les travaux effectués dans le monde autour de la 5G [8].

#### 1.4.4. L'architecture de la 5G

Le réseau 5G (5G System) se compose d'un accès Radio (NG-RAN : NextGeneration RAN) et d'un cœur réseau (5G Core).

##### 1.4.4.1. L'accès radio 5G

L'accès radio 5G est constitué de stations de base de nouvelle génération qui forment le nœud de connexion des mobiles avec le cœur réseau 5G (5GC)

Les mobiles UE communiquent avec les stations de base soit par un lien radio 5G, soit par un lien radio 4G. Si la communication est en 5G, la station de base se nomme gNB, si la communication est en 4G, la station de base est une station de base 4G eNB évoluée pour s'interconnecter avec le cœur réseau 5G. La station de base se nomme g-eNB.

Les fonctions de la station de base gNB sont assez similaires avec l'entité eNB. Cependant, les différences concernent la gestion de la qualité de service.

##### 1.4.4.2. Le cœur réseau 5G (5GC)

Le cœur réseau 5G est adapté pour la virtualisation du réseau et s'appuie sur le découpage du plan de contrôle (Control Plane) et du plan utilisateur (User Plane) défini dans l'architecture CUPS.

Ainsi, l'entité MME qui gère à la fois l'attachement des mobiles, la localisation et la création des supports (bearers) se décompose en deux entités fonctionnelles en 5G :

- L'entité AMF : L'entité AMF établit une connexion NAS avec le mobile UE et a pour rôle d'enregistrer (attachement) les mobiles UE et de gérer la localisation des mobiles sur le réseau 3GPP et/ou non 3GPP.
- L'entité SMF : L'entité SMF permet de contrôler les sessions PDN. L'entité SMF est choisie par l'entité AMF puisque l'entité AMF gère la signalisation NAS avec le mobile. L'entité SMF est responsable de la gestion du plan de contrôle. Autrement dit, l'entité SMF correspond à l'entité SGW-C et PGW-C de l'architecture CUPS. L'entité SMF a une interface avec l'entité qui gère la politique des flux PCF.

Le plan de transport est composé de passerelle de données qui réalise des mesures sur les données transportées et réalise l'interconnexion avec les réseaux Data (PDN). Dans l'architecture CUPS, les fonctions du plan de transport sont gérées par les entités SGW-U et PGW-U. Pour le cœur réseau 5G, les fonctions du plan de transport

sont à la charge de l'entité UPF. L'entité UPF communique avec l'entité SMF par l'interface N4 et selon le protocole PFCP.

L'entité PCRF de l'architecture 4G permet de définir les règles de contrôle et les politiques de flux avec l'entité SGW/PGW. En 5G, l'entité PCRF se renomme PCF et permet de contrôler les flux à la fois au niveau de l'entité SMF mais également au niveau de l'entité AMF afin de pouvoir apporter une meilleure granularité sur les flux autorisés en prenant en compte la localisation du mobile UE.

Le profil utilisateur (son abonnement, ses droits, ...) sont sauvegardées dans une base de données UDR accessible via l'entité. L'entité UDM conserve les profils de sessions de données (sessions PDU) et de l'entité AMF sur laquelle est attachée le mobile UE (éventuellement les entités AMF pour un accès 3GPP et non 3GPP sur un autre opérateur).

L'enregistrement du mobile nécessite une double authentification réalisée au niveau de l'entité AMF et du mobile UE à partir de vecteurs d'authentifications fournies par l'entité AUSF.

Enfin, l'entité NSSF est une entité permettant d'assister l'entité AMF de la sélection des instances logiques du réseau pour une tranche de réseau (slice) défini. La figure suivante présente l'architecture 5G et les interfaces entre chaque entité :

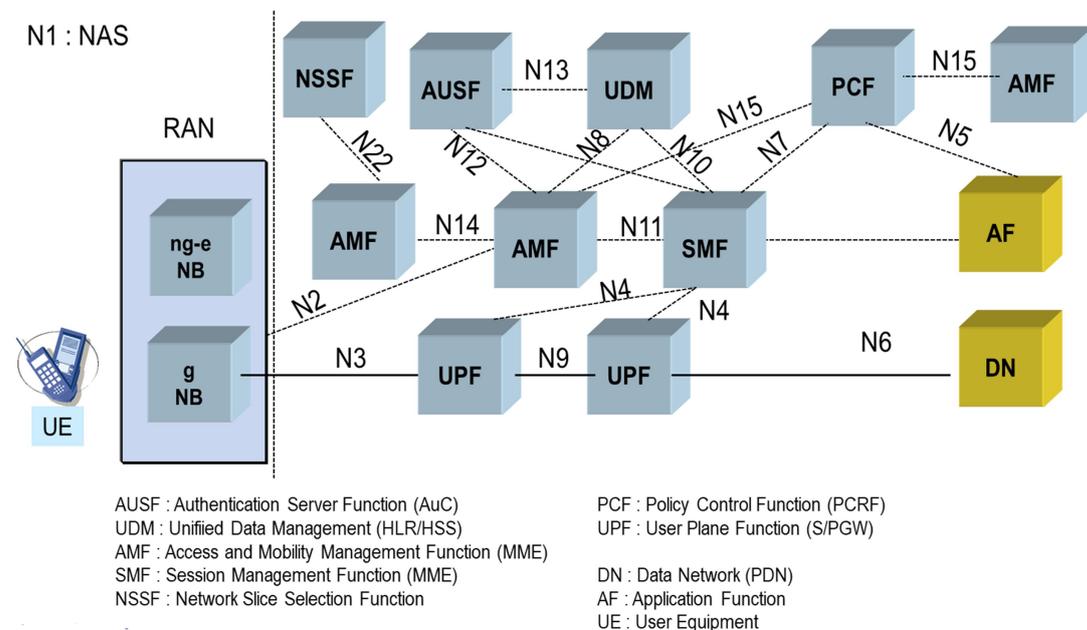


Fig.1. 3.L'architecture de la 5G [9].

### 1.4.5. Les caractéristiques de 5G

La 5G promet de nombreuses améliorations techniques des réseaux radioélectriques. Les sections qui suivent ont pour but d'éclairer les performances des réseaux 5G et visent à interroger les parties prenantes sur la manière dont pourrait être caractérisée la fourniture d'un service 5G générique. Le service 5G pourrait être défini par tout ou partie des critères de performances définis ci-dessous.

#### A/ Débit

L'introduction de la 5G va fortement augmenter l'efficacité spectrale par rapport aux technologies existantes. Ce gain de performance est rendu possible par l'introduction de nouvelles techniques telles que :

- le MIMO et le beam forming qui permettent, grâce à des stations de base composées d'un grand nombre d'émetteurs/récepteurs, de créer des faisceaux d'onde directs limitant ainsi la puissance du signal là où il n'est pas utile. La gestion des faisceaux permet de séparer spatialement les communications qui occupent les mêmes fréquences et limite d'autant les brouillages potentiels entre communications et entre cellules.
- des réductions du poids de la signalisation dans les trames radio qui permettent l'optimisation de la bande passante dédiée au trafic utile
- une meilleure utilisation du spectre utile par porteuse, et notamment des canalisations radio larges, pour optimiser le débit par MHz
- la coordination des cellules entre elles pour limiter les occurrences de brouillages aux limites des cellules
- la gestion dynamique de la structure des trames radio en mode TDD, avec notamment une adaptation rapide des ratios descendant et montant en fonction du trafic pour réduire les brouillages et adapter les bandes passantes à l'asymétrie du trafic en temps réel.

Cette meilleure efficacité spectrale doit se traduire pour les utilisateurs par une amélioration substantielle du débit à même de fournir les services ultra haut débit (eMBB).

La fourniture d'un accès mobile à ultra haut débit en 5G à l'extérieur des bâtiments, devrait par exemple, atteindre un débit descendant théorique d'au moins 100 Mbit/s

dans 10 MHz, ce qui correspond à un débit théorique descendant de 1 Gbit/s dans une bande de 100 MHz simplex.

### **B/ latence :**

Une autre amélioration attendue par la 5G est la réduction de la latence de bout en bout des communications, ouvrant la possibilité de fournir des services connectés qui nécessitent une très forte réactivité et qui ne pouvaient être rendus jusque-là que dans un environnement fixe. Cette amélioration vient, entre autres, des techniques suivantes :

- boucle temporelle d'acquittement des paquets radio fortement réduite
- gestion dynamique de la structure des trames radio dans le cas du mode TDD

La fourniture d'un accès mobile à faible latence en 5G à l'extérieur des bâtiments devrait par exemple permettre d'atteindre un délai de bout en bout de moins de 5 millisecondes (ms).

### **C/ Densité de connectivité**

La technologie 5G doit permettre d'augmenter substantiellement le nombre d'objets connectés par unité de surface en comparaison avec les technologies existantes, y compris la 4G. Cette croissance est notamment rendue possible par des protocoles de connexion très allégés qui utilisent une très faible proportion de la bande passante.

La fourniture d'un accès massif pour les objets connectés en 5G, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des bâtiments, devrait par exemple permettre une densité de connexion de plusieurs centaines de milliers d'objets au km<sup>2</sup>.

### **D/ Fiabilité**

Certains des nouveaux usages envisagés avec les réseaux 5G nécessitent une fiabilité renforcée de la connexion avec un taux d'indisponibilité réduit au minimum.

Les techniques de dual connectivité et de retransmission rapide des paquets de données HARQ qui sont prévus pour la 5G devraient permettre de limiter les pertes de paquets et de rendre les connexions plus fiables.

La virtualisation de certaines parties des réseaux 5G devrait aussi permettre une meilleure résilience de ceux-ci, et donc une amélioration de la fiabilité des connexions au réseau.

La fourniture d'une connexion ultra fiable en 5G à l'extérieur des bâtiments pourrait, par exemple, être disponible 99% du temps.

#### **E/ la modulation :**

Grace à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation atteindra à l'ordre QAM-256 (8 bits d'information), ces modulations offrent une excellente efficacité spectrale et ont permis de réaliser des débits de données très élevés.

#### **F/ Technologies d'accès :**

La technologie 5G est basée sur la technologie de transmission OFDMA

#### **G/ Formes d'onde :**

Bien que l'OFDM nécessite l'utilisation d'un préfixe cyclique qui a eu un grand succès et présente encore de nombreux avantages ; la 5G utilise d'autres formes d'ondes optimales et qui sont utilisées jusqu'à au moins 2040.

Quelques formes d'ondes 5G:

- FBMC : son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuse qui sont très étroites et les filtrées individuellement, il est capable de fournir un très haut niveau d'efficacité spectrale.
- UFMC : Il diffère de FBMC, au lieu de filtrer chaque sous-porteuse individuellement, UFMC divise le signal en un certain nombre de sous-bande qu'il filtrera. Ensuite, on peut l'utiliser pour améliorer la protection contre les interférences entre symboles.
- GFDM : Est une technique de transmission multi-porteuse flexible qui présente de nombreuses similitudes avec OFDM. La principale différence est que les porteuses ne sont pas orthogonales entre elles. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne [9].

## **1.4.6. Les avantages et les inconvénients :**

### **1.4.6.1. Les avantages du futur réseau 5G**

- une augmentation des débits : le réseau 5G permettra d’aller plus vite avec des débits 10 fois plus rapides que la 4G,
- une réactivité accrue grâce à un temps de latence divisé par dix,
- une amélioration des capacités de connectivité avec beaucoup plus d’utilisateurs qui pourront se connecter en même temps, tout en conservant une connexion de qualité,
- une solution à l’explosion du trafic mobile causée par les milliards d’objets connectés qui rempliront notre quotidien de demain,
- une réduction de la consommation d’énergie : cette technologie est plus performante en consommant moins d’énergie, ce qui aura un impact positif sur l’autonomie des batteries.

### **1.4.6.2. Les inconvénients du réseau 5G**

Le réseau 5G suscite néanmoins quelques inquiétudes notamment en matière d’exposition aux ondes. En effet, à l’heure où l’impact des radiofréquences sur notre santé et sur l’environnement fait débat, l’arrivée de la 5G, tout comme la 4G, augmentera obligatoirement l’exposition aux ondes avec l’installation de nouvelles antennes pour assurer une bonne couverture 5G du territoire.

Pour évaluer si la 5G présente un danger pour notre santé, les expérimentations pilotes actuellement menées vont permettre de mesurer les niveaux d’exposition du public aux ondes.

Le danger 5G est également annoncé en matière de sécurité de réseau. Le réseau 5G permettra, en effet, de définir des priorités, permettant de gérer au mieux les ressources en fonction des usages. Concrètement, les connexions au réseau 5G seront différentes en fonction des besoins des appareils connectés. Par exemple, un appareil de télé-chirurgie, qui nécessite un débit ultra-rapide et un temps de latence minimal, profitera d’un réseau 5G plus réactif que votre Smartphone. Cependant, cette

avancée technologique qu'offrira la 5G ne garantit, à priori, pas encore une sécurité absolue du réseau [10].

## 1.5. 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:

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

**Tab.1. 2.** Comparaison entre 4G et 5G [9]

On voit bien que la 5G sera une technologie très performante dans différents domaines avec Les débits en 5G sont jusqu'à 10 fois plus élevés que ceux de la 4G, avec une grande vitesse de communication permet de réaliser des opérations encore plus complexes, telles que télécharger des fichiers volumineux, les éditer de façon collaborative et les partager à partir d'un Smartphone ou un appareil téléphonique

## 1.6. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons rappelé les principales caractéristiques des réseaux de télécommunications 4G et 5G. Nous avons fait aussi des comparaisons entre ces deux technologies comme les débits, la latence, etc...

Dans le chapitre suivant nous allons faire l'étude d'une chaîne de communication 4G et donner son schéma de principe général

# **Chapitre 2**

**Etude d'une chaine de  
communication 4G**

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire l'étude d'une chaîne de communication complète 4G.

Dans une première partie nous allons rappeler le principe de base de la chaîne de communication numérique et dans une deuxième partie nous allons rappeler le principe de l'OFDM qui est le cœur de la 4G.

## 2.2. Chaîne de transmission numérique

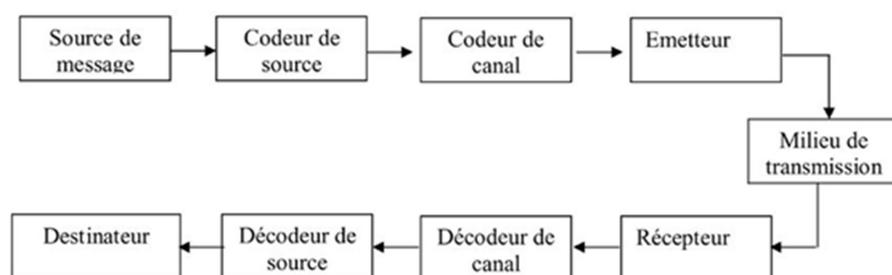
Le but d'une communication numérique est de transmettre une information d'un point A à un point B à travers un canal de transmission. L'information peut être de deux types soit analogique comme la parole ; soit numérique comme un MMS d'un téléphone portable. Lorsque les données sont analogiques, elles doivent subir un traitement afin d'être numérisées. Il faut d'abord les échantillonner, ce qui consiste à enregistrer à intervalles réguliers la valeur de la donnée. Ensuite il faut quantifier la valeur enregistrée ce qui est fait en lui attribuant un état parmi un ensemble fini d'états.

Une chaîne de transmission numérique peut être représentée par différents blocs modélisant les traitements successifs apportés à l'information. Les blocs peuvent être énumérés comme suit:

- La source : génère l'information à émettre (message),
- Le codage de source : supprime les redondances contenues dans le message afin de rendre les éléments binaires mutuellement indépendants,
- Le codage de canal : insère des éléments binaires pour améliorer la qualité de la transmission,
- Le modulateur : traduit le message binaire en signal permettant son transport dans les milieux tel que l'air, l'eau, les câbles etc.,
- L'émetteur : permet au signal de se propager dans le canal de transmission,

- Le canal de transmission : propage le signal ; lors de la propagation, le signal peut être perturbé par du bruit externe, des multi-trajets, le mouvement de l'émetteur et / ou récepteur etc.,
- Le récepteur : capte le signal émis.
- Le démodulateur : traduit le message reçu en signal binaire.
- Le décodeur de canal : détecte et/ou corrige les erreurs de transmission grâce aux éléments binaires ajoutés lors du codage.
- Le décodeur de source : régénère le message binaire [11].

La **figure 2.1** montre la chaîne de transmission à l'aide d'un schéma bloc



**Fig.2. 1.** Schéma synoptique d'une chaîne de transmission

### 2.2.1. Les technologies de Transmission

Les réseaux locaux radioélectriques utilisent des ondes radio afin de transmettre des données. La technique utilisée à l'origine pour les transmissions radio est appelée transmission en bande étroite, elle consiste à passer les différentes communications sur des canaux différents. Les transmissions radio sont toutefois soumises à de nombreuses contraintes rendant ce type de transmission non suffisantes. Le partage de la bande passante entre les différentes stations est présenté dans une même cellule.

\*La propagation par des chemins multiples d'une onde radio.

\*La technique de l'étalement de spectre à saut de fréquence.

\*La technique de l'étalement de spectre à séquence directe.

\*l'OFDM [12]

## 2.2.2. Technique de Modulation OFDM

### 2.2.2.1. Définition de L'OFDM

L'origine de l'OFDM est un développement de la 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. La première utilisation de l'OFDM est en 1980 dans les systèmes DAB, et DVB. Pour ces deux derniers systèmes il y a une seule direction de la station de base vers les utilisateurs.

L'OFDM est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous porteuses. 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, qui est la base de cette technique [13].

La technique de l'OFDM permet de lutter contre les canaux sélectifs en fréquence en permettant une égalisation de faible complexité. Ces canaux se manifestent notamment en présence de trajets multiples et sont d'autant plus pénalisants que le débit de transmission est élevé. C'est la raison pour laquelle on trouve cette technique largement adoptée dans la plupart des applications à très haut débit.

### 2.2.2.2. Principe de l'OFDM

Le principe de l'OFDM est de transmettre les informations sur plusieurs porteuses orthogonales entre elles, ainsi le spectre du signal présente une occupation optimale de la bande allouée, comme le montre la **Figure 2.2**

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 [14].

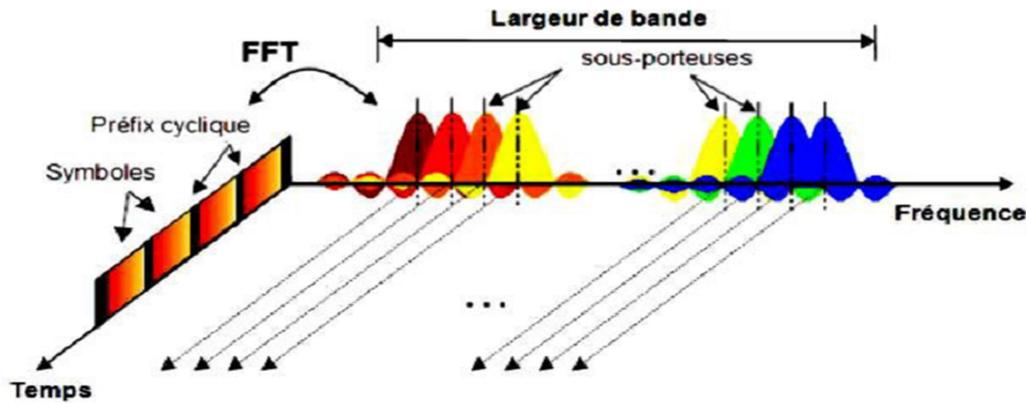


Fig.2. 2. Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM.

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  $t$ . La technique de transmission OFDM est basée sur l'émission simultanée sur  $n$  bandes de fréquence (situées entre 2 et 30 MHz) de  $N$  porteuses sur chaque bande

Le signal est réparti sur les porteuses [15].

Les fréquences de travail sont choisies en fonction des réglementations, les autres sont « éteintes » de manière logicielle. Le signal est émis à un niveau assez élevé pour pouvoir monter en débit, et injecté sur plusieurs fréquences à la fois. Si l'une d'elles est atténuée le signal passera quand même grâce à l'émission simultanée.

### 2.2.3. Chaîne de Transmission d'un Système OFDM

La chaîne de transmission dans les systèmes OFDM se divise en deux parties, l'émetteur et le récepteur de l'émission, les bits de la source binaire sont modulés et génèrent des symboles complexes prenant leurs valeurs dans un alphabet fini correspondant à une modulation numérique donnée comme la modulation en quadrature QAM ou la modulation par sauts de phase

Ces symboles  $c_k$  sont répartis sur les  $N_{sc}$  sous-porteuses. Les sous-porteuses dans le domaine fréquentiel sont espacées de :  $\Delta f = \frac{1}{T_s} \dots \dots \dots$  (Eq. 2. 1)

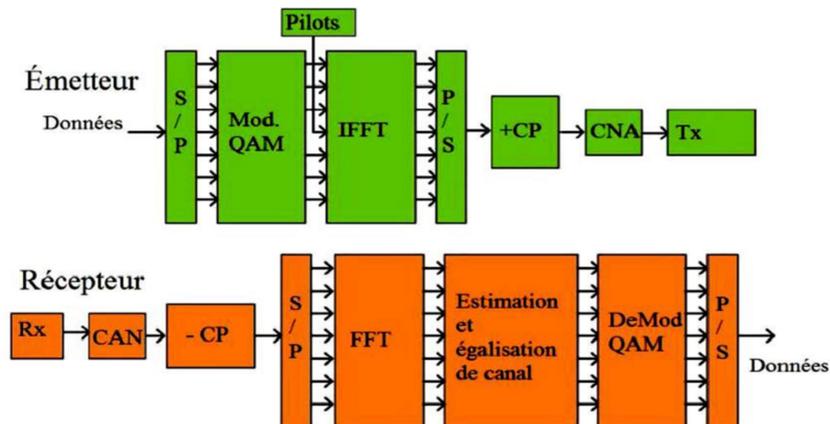
La transformée de Fourier discrète inverse IFFT permet de générer le signal dans le domaine temporel constitué de  $N_{sc}$  échantillons. En général, toutes les

Nscsous-porteuses sont modulées en utilisant les symboles de données, mais certaines sous-porteuses sont des porteuses pilotes [13].

Les pilotes EP sont connus au niveau des émetteurs et des récepteurs et sont utilisés pour l'estimation du canal. Le nombre de pilotes insérés entre les données dépend du canal et de la précision requise pour l'estimation de canal. Les symboles pilotes peuvent être répartis sur plusieurs symboles OFDM consécutifs. Après la fonction, le préfixe cyclique (CP) de longueur  $T_g$  est ajouté pour éliminer l'interférence entre symboles tout en gardant l'orthogonalité entre les sous-porteuses

Le symbole OFDM est alors transmis à l'étage radiofréquence comportant la conversion numérique-analogique et la translation sous fréquence porteuse [16].

La **figure 2.3** représente le schéma général d'un système de transmission OFDM en bande de base.



**Fig.2. 3.** Schéma générale de l'OFDM [17].

En réception, le CP qui peut présenter de l'interférence avec des symboles adjacents est enlevé et le symbole OFDM est remis au démodulateur. Celui-ci réalise une transformée de Fourier (FFT) qui transpose les symboles OFDM, porteuses de données utiles et/ou de pilotes, du domaine temporel au domaine fréquentiel [17].

#### 2.2.4. Modulation numérique

Les **figures 2.4** et **2.5** rappellent les constellations des modulations M-QAM et M-PSK qui sont les modulations les plus utilisées.

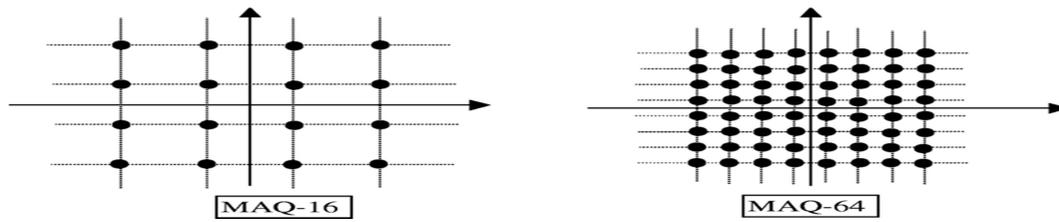


Fig.2. 4. Constellation MAQ-16 et MAQ-64.

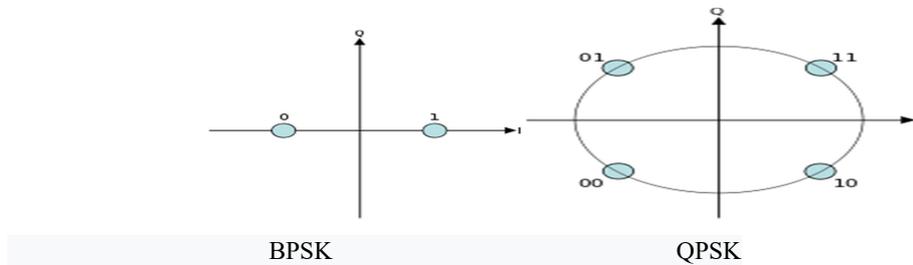


Fig.2. 5. Constellation pour B-PSK et Q-PSK.

### 2.2.5. Principe des modulations multi-porteuses

Le principe est de transmettre des données numériques en parallèle modulées sur un grand nombre de porteuses à bas débit.

Un CP est utilisé dans les transmissions OFDMA, afin de conserver l'orthogonalité et les propriétés sinusoïdales du signal pour les canaux à trajets multiples. Ce préfixe cyclique est ajouté au début des symboles émis. En LTE, deux longueurs différentes de préfixe cyclique sont prévues pour s'adapter à des temps différents de propagation du canal de transmission qui dépendent de la taille de la cellule radio et de l'environnement : un préfixe cyclique normal de  $4,7\mu s$ , et un préfixe cyclique étendu de  $16,6\mu s$  utilisé dans les très grandes cellules radio (ce préfixe représente de 7 à 25 % de la durée d'un symbole).

Le CP (préfixe cyclique) consiste à copier une partie du début d'un symbole OFDM dans sa fin, **figure 2.6**. Il a été démontré que l'ajout d'un intervalle de garde, de longueur égale ou supérieure à la dispersion maximale causée par le canal, permet de maintenir l'orthogonalité entre les différentes sous porteuses [18].

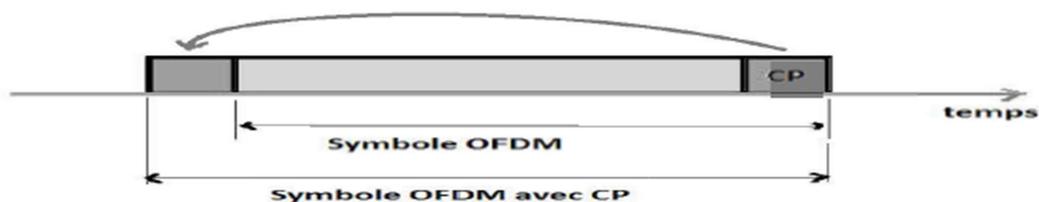


Fig.2. 6. Symbole OFDM avec CP

### 2.3. Les types de transmission utilisée dans la 4G

Un des éléments clés de la LTE est l'utilisation de ces deux techniques OFDMA et SC-FDMA qu'on présentera par la suite en tant que porteur du signal et des régimes d'accès.

#### 2.3.1. L'OFDMA

L'OFDMA est une technologie de codage radio de type (Accès multiple par répartition en fréquence) qui est utilisée notamment dans les réseaux de téléphonie mobile de 4G LTE. Elle est également utilisée par d'autres systèmes de Radiocommunication, tels les versions évoluées des normes de réseaux locaux sans fil (WIFI : IEEE 802.11 versions n, IEEE 802.22 et WiBro) ainsi que par certaines normes de télévision numérique. Comme pour d'autres techniques de codage permettant l'accès multiples (TDMA, FDMA, CDMA). L'objectif est de partager une ressource radio commune (bande de fréquence) et d'en attribuer dynamiquement des parties à plusieurs utilisateurs.

#### 2.3.2. Principes de l'OFDMA

Le codage OFDMA consiste en un codage et une modulation numérique d'un ou plusieurs signaux binaires pour les transformer en échantillons numériques destinés à être émis sur une (ou plusieurs) antennes radio ; réciproquement le signal radio reçoit le traitement inverse en réception.

Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long (66.7  $\mu$ s pour le LTE) ; cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de fading liés aux « chemins multiples de propagation » qui existent dans les liaisons radio de moyenne et longue portées (quand le débit binaire sur une porteuse est élevé, l'écho d'un symbole arrivant en retard à cause d'une propagation multi-trajets perturbe le ou les symboles suivants) :

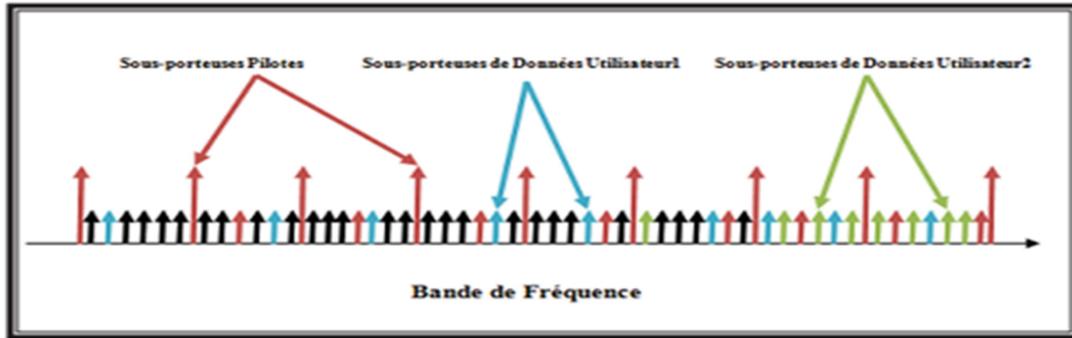


Fig.2. 7. Les porteuses de l'OFDMA

Un filtrage séparé de chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage dans le terminal récepteur, une (Transformée de Fourier) FFT est suffisante pour séparer les sous-porteuses l'une de l'autre. Dans le cas du LTE, il y a jusqu' à 1200 porteuses indépendantes et orthogonales. La **figure 2.8** montre le principe d'une chaîne de communication numérique à base de l'OFDMA.

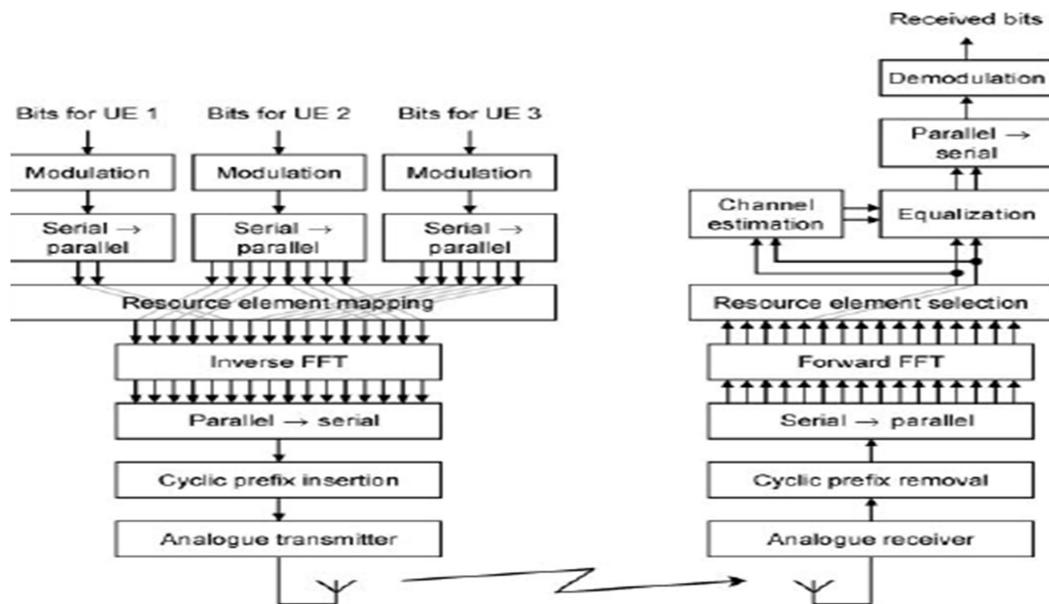


Fig.2. 8. Schéma de principe de l'OFDMA

### 2.3.3. SC-FDMA

Le single-carrier FDMA est une technologie de codage radio de type accès multiple par Répartition en fréquence utilisé notamment dans les réseaux de téléphonie mobile 4G LTE. Comme pour d'autres techniques à schéma d'accès multiples (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA), le but est l'attribution et le partage d'une ressource radio commune (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs. Le SC-FDMA peut être considéré comme une variante linéaire des codages OFDM et OFDMA, dans le sens

où il consiste aussi à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses du signal numérique, mais il utilise en complément, une « DFT » supplémentaire pour précoder l'OFDMA conventionnel.

Le SC-FDMA a attiré l'attention comme une alternative séduisante à l'OFDMA, Particulièrement dans les communications terre-satellite et dans le sens de transmission montant des réseaux 4G LTE où son PAPR plus faible que celui de l'OFDMA bénéficie au terminal mobile en termes d'efficacité énergétique, en diminuant la puissance crête d'émission et donc le poids et le coût du terminal (smartphone ou tablette tactile). Il a été adopté pour les liaisons uplink de certaines normes 3GPP, plus particulièrement pour la partie radio (eUTRAN) des réseaux mobiles 'LTE', car ce codage permet de diminuer la consommation électrique du terminal et donc d'augmenter l'autonomie de sa batterie. Pour les liaisons radio downlink des réseaux LTE, pour lesquelles il y a moins de contraintes Énergétiques, c'est l'OFDMA qui est utilisé car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé. Codage radio OFDMA et SC-FDMA : conversion numérique/analogique

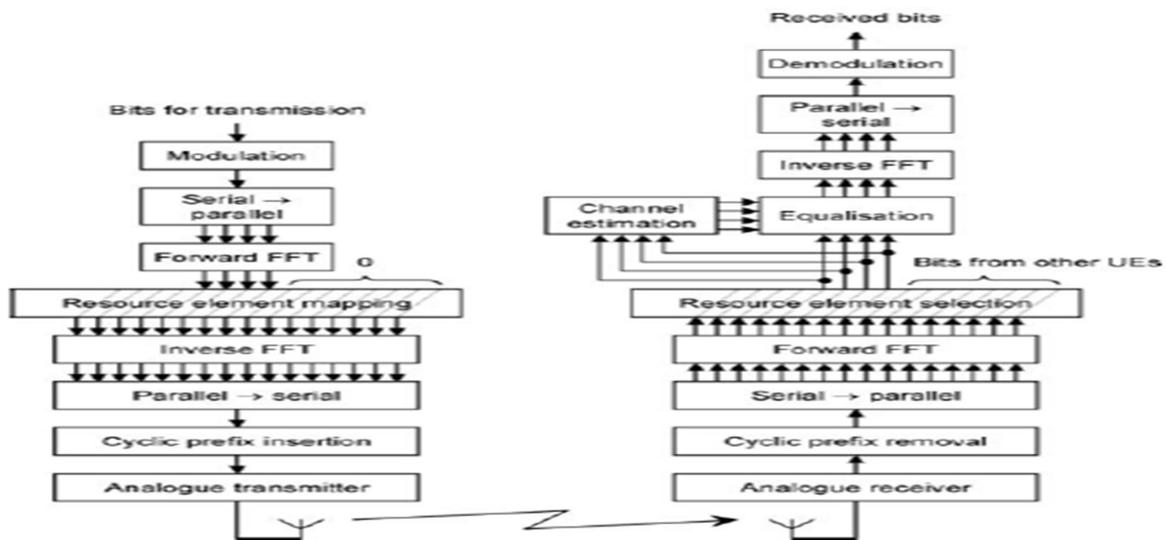


Fig.2. 9. Schéma de principe de SC-FDMA

### 2.3.4. Comparaison entre l'OFDMA et le SC-FDMA

La figure suivante permet de relever les points communs entre l'OFDMA et le SC-FDMA :

- Une transmission de données en blocs.

- Un multiplexage des données en fréquence dans le cas où ils sont répartis sur plusieurs sous-porteuses orthogonales.
- Une égalisation de canal réalisée dans le domaine fréquentiel.
- Une complexité globalement équivalente.

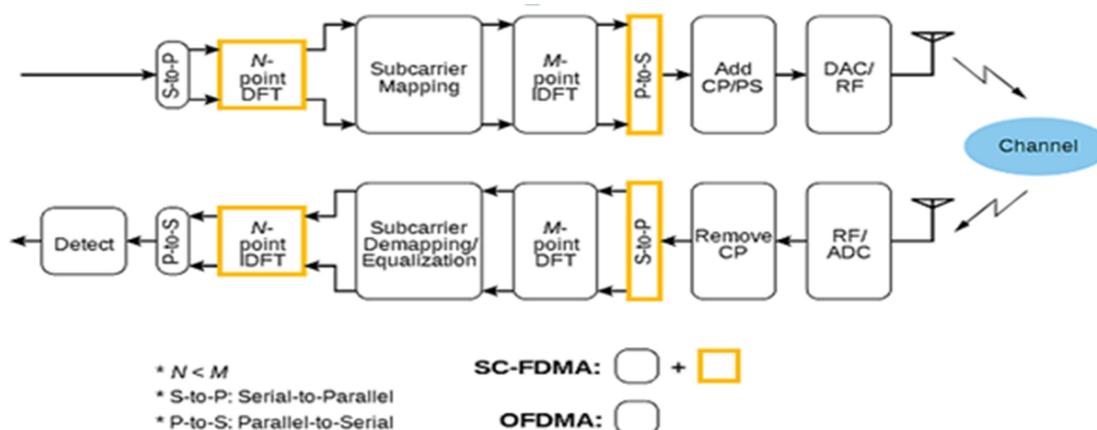


Fig.2. 10. Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA

Mais ces techniques n'ont pas que des points communs. La différence majeure entre elles, réside dans le fait que l'OFDMA est une technique de transmission multi-porteuse tandis que la SC-FDMA est une technique mono-porteuse

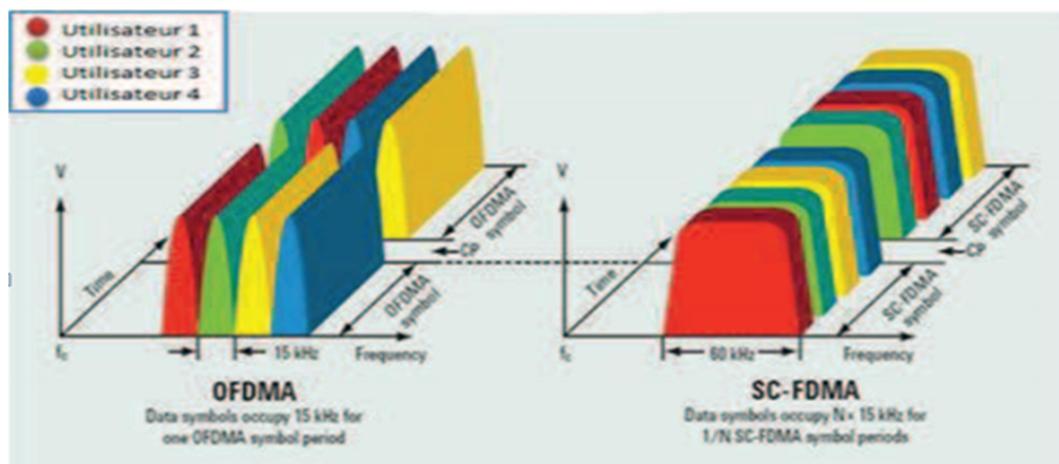


Fig.2. 11. La différence entre L'OFDMA et SC-FDMA [19]

## 2.4. Les caractéristiques techniques de la 4G

Le tableau suivant permet de résumer quelques caractéristiques de la 4G qui utilise généralement des fréquences (ondes centimétriques)

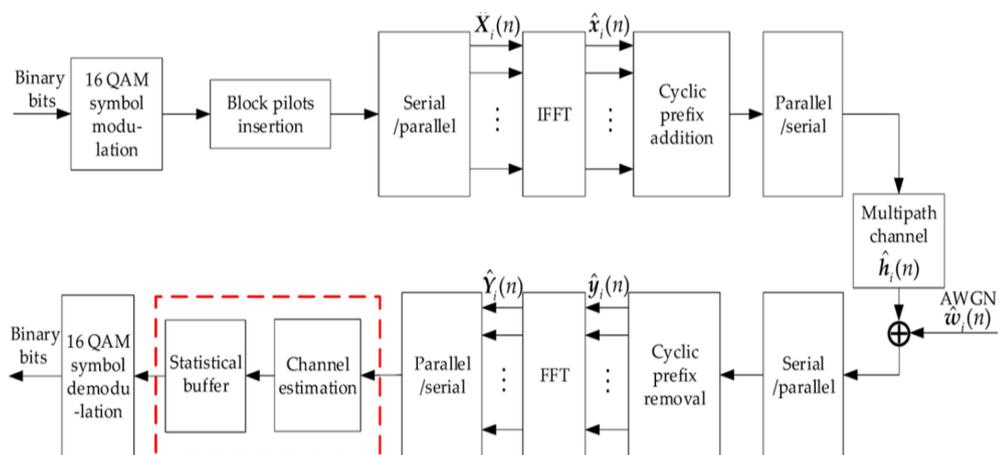
Caractéristiques techniques	4G
Bande de fréquence	2 à 8GHz
Bande passante	5-20 MHz
Le débit de données	Jusqu' à 20 Mbps ou plus
Accéder	MC-CDMA OFDMA
Codage du canal	Turbo codes LDPC
Commutation	PAQUETS
Mobiles des vitesses de pointe	200 Km/h
Les antennes	MIMO OFDM

**Tab.2. 1.** Caractéristiques techniques de la 4G

Pour augmenter de plus en plus le débit, plusieurs antennes sont utilisées à l'émission et à la réception associée à l'OFDM.

## 2.5. Principe d'une chaîne de communication 4G

Cette figure représente le modèle du système d'une chaîne de communication numérique à base de l'OFDM utilisant la méthode d'estimation de canal de niveau de confiance proposée.



**Fig.2. 12.** Chaîne de communication de la 4G

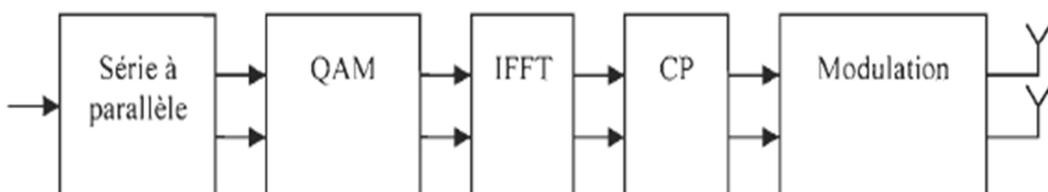
Au niveau de l'émetteur OFDM, les bits binaires entrants sont d'abord regroupés et mappés selon un schéma de modulation prédéfini: 16 QAM. Après avoir inséré les pilotes de type bloc, les 16 symboles QAM sont convertis en flux parallèles par un bloc série à parallèle. Le bloc de transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) est utilisé pour transformer la séquence de données  $X_i(n)$  avec N lignes en signal de domaine temporel  $x_i(n)$ , où N est le nombre de points d'échantillonnage dans un

symbole OFDM. Ensuite, le CP est inséré dans les symboles OFDM du domaine temporel afin de réduire les ICI et ISI. Les signaux transmis sont ensuite passés à travers les canaux d'évanouissement à trajets multiples  $h_i(n)$  avec AWGN  $w_i(n)$  après le bloc parallèle à série.

Au niveau du récepteur, le CP est retiré après la conversion série en parallèle. Après avoir retiré le CP, les symboles OFDM reçus dans le domaine temporel  $y_i(n)$  sont alternés dans la transformée de Fourier rapide (FFT). Après cela, les symboles OFDM du domaine fréquentiel  $Y_i(n)$  sont transformés du bloc parallèle en bloc série. Le CIR estimé est obtenu dans le bloc d'estimation de canal. Il y a deux blocs dans la zone en pointillés rouges: le premier est le bloc d'estimation de canal, qui représente la méthode d'estimation de canal basée sur le niveau de confiance; le second est un bloc tampon statistique, qui représente le nombre de trames statistiques T. Le bruit dans le canal à trajets multiples est en outre supprimé dans le bloc tampon statistique. Enfin, les bits d'informations binaires sont obtenus après le schéma de démodulation à 16 symboles QAM [20].

## 2.6. Les systèmes MIMO OFDM

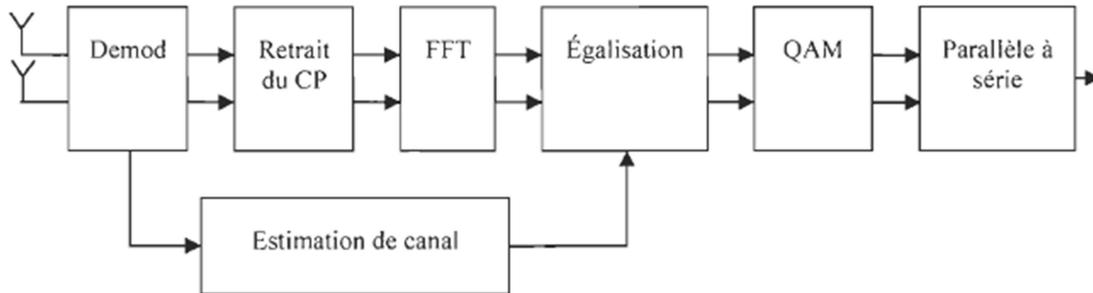
La **figure 2.13** montre le schéma de principe d'une chaîne de communication MIMO OFDM., mentionnons qu'il existe deux types principaux de transmission MIMO. Ces deux choix mettent en évidence un problème courant en télécommunications: choisir entre un débit plus élevé ou bien en une meilleure qualité de transmission. En effet, dans un système MIMO, nous pourrions choisir d'envoyer, avec chaque antenne, la même information, afin d'augmenter encore la diversité des canaux. Toutefois, cette technique est peu utilisée, et il n'en sera pas question dans ce travail. Nous considérons donc que les antennes de transmission envoient des informations différentes, que nous voudrions reconstruire avec le récepteur.



**Fig.2. 13.** Transmetteur MIMO OFDM.

La forme générale est très semblable au transmetteur OFDM illustré à la **figure 2.12**. Nous la représentons ici différemment pour mettre en évidence les éléments MIMO, Ce schéma illustre 2 antennes de transmission, mais ce nombre pourra varier.

La **figure 2.14** donne le principe du récepteur MIMO OFDM.



**Fig.2. 14.** Récepteur MIMO OFDM.

## 2.7. Technologies WiMAX

WiMAX est une solution pour des réseaux MAN sans fil. En utilisant un accès WiMAX, on peut atteindre théoriquement un débit jusqu'à 70 Mb/s avec une distance de 50 km. WiMAX se sert de la technologie micro-onde avec plusieurs bandes de fréquences, par rapport au modèle OSI, IEEE 802.16 se focalise comme tous les standards IEEE sur la couche 1 et 2.

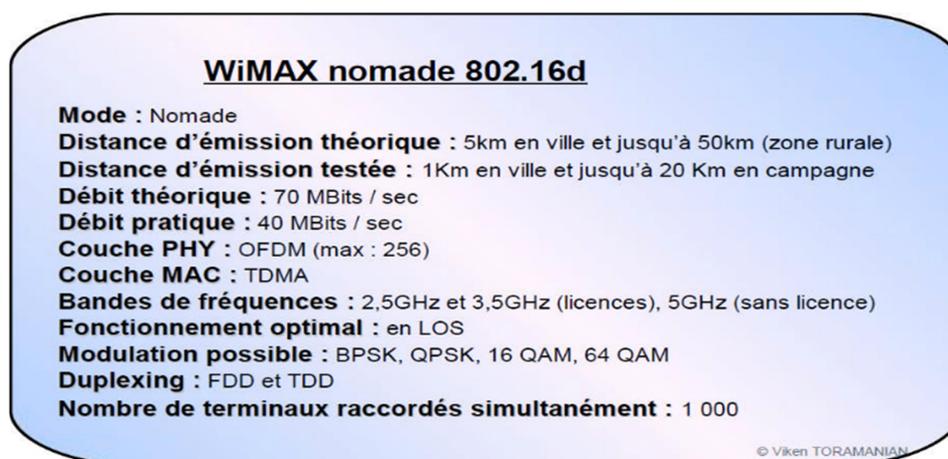
- WiMAX prend en charge les transferts de type ATM et IP, pour cela il utilise une sous-couche de convergence qui permet la conversion des informations afin de les rendre exploitable par la couche MAC.
- Le WiMAX couvre des zones géographiques importantes sans la contrainte d'installation d'infrastructures coûteuses pour faire parvenir la connexion jusqu'à l'utilisateur. Le premier élément de l'architecture WMAN est la station de base (BS) qui couvre une certaine zone géographique où se situent des utilisateurs immobiles ou en mouvement relativement lent qui communiquent avec la BS selon le principe du point à multipoint.

Ce réseau peut fournir des débits importants et un passage à l'échelle en raison des capacités de canal flexibles. Il offre une couverture importante, des services avec des exigences de QoS, ainsi qu'une sécurité importante.

### 2.7.1. Wi MAX fixe

Dont la norme est l'IEEE 802.16d. Il a été conçu pour un usage fixe avec une petite antenne d'abonné placée sur un point d'une certaine hauteur, tel qu'un toit, de la même manière qu'une antenne TV, ou directement sur le PC. Ce type de réseau opère dans une bande de fréquence allant de 2 à 11 GHz

. Son débit théorique est de l'ordre de 70 Mb/s et son rayon de couverture est de 50 km. La **figure 2.15** représente les paramètres techniques d'IEEE 802.16d [21].



**Fig.2. 15.** Paramètres techniques d'IEEE 802.16d.

### 2.7.2. Wi MAX mobile

Sa norme est la 802.16e. Son objectif est d'autoriser les abonnés mobiles, une communication continue, en basculant d'une antenne émettrice à une autre, donc d'une cellule à une autre. Ce réseau opère dans les bandes de fréquences allant de 2 à 6 GHz et permet de préserver la connexion lorsque l'on est en déplacement dans la couverture du réseau avec une vitesse allant jusqu'à 150 km/h dans des conditions idéales qui se résument par l'absence d'obstacles.

La **figure 2.16** représente les paramètres techniques d'IEEE 802.16e :

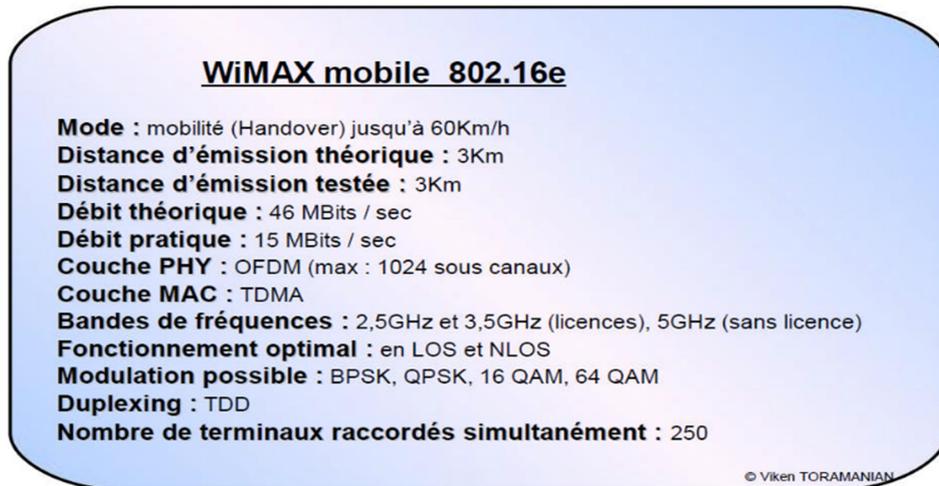


Fig.2. 16. Paramètres techniques d'IEEE 802.16e.

### 2.7.3. LTE (4G)

La technologie LTE ou la 4G s'appuie sur un réseau de transport à commutation de paquet IP. Elle n'a pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre que la VoIP, contrairement à la 3G qui transporte la voix en mode circuit.

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « downlink », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s.

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées à même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et latence) par rapport aux réseaux 3G existants. Le multiplexage OFDMA apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée.

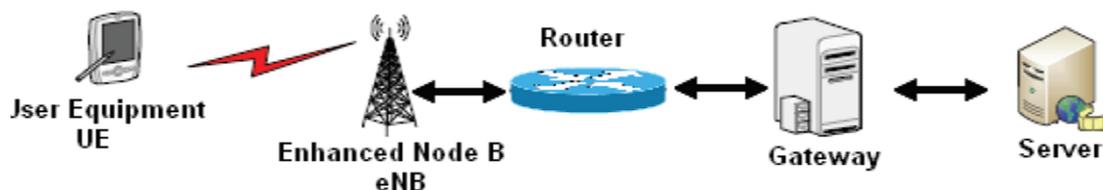


Fig.2. 17. Présentation générale sur le système LTE [22].

Le tableau suivant résume quelques caractéristiques techniques de 4 G LTE

Les caractéristiques	LTE
La mobilité (km/h)	350
La portée (km)	5
Latence (ms)	5
Bande de fréquence (GHZ)	2.6
Technique d'accès	UL : SC-FDMA DL : OFDMA
Duplexage	TDD et FDD
Débit (Mbit/s)	UL : 50 DL : 100

**Tab.2. 2.** Caractéristiques techniques de LTE.

LTE est la norme de communication mobile la plus récente qui a été proposée par l'organisme 3GPP dans le contexte de la 4G. Comme l'IEEE 802.16m, elle propose des débits élevés pour le trafic temps-réel, avec une large portée. Théoriquement, le LTE peut atteindre un débit de 50 Mb/s en lien montant et 100 Mb/s en lien descendant. En réalité, l'ensemble de ce réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System), et il est composé des deux parties :

- Le réseau évolué d'accès radio LTE.
- Le réseau cœur évolué appelé SAE (System Architecture Evolution).

Le seul inconvénient de cette nouvelle technologie est l'installation de ces nouveaux équipements qui sont différents de ceux des normes précédentes, et le développement des terminaux adaptés [23].

## 2.8. Conclusion

Nous avons fait dans ce chapitre une étude de la chaîne de transmission 4G basée sur la technique de transmission OFDM et la modulation numérique M-QAM ou M-PSK. Pour éviter les interférences (ICI) et (ISI) on utilise des intervalles de garde ou des (CP) qui ont beaucoup d'avantages et de rôles importants dans l'évolution des réseaux mobiles en général. Nous avons aussi introduit le principe des antennes MIMO qui ont pour rôles d'augmenter le débit de transmission ou la diversité de la transmission et à la fin nous avons donné comme exemple de réseau 4G, le Wi max. Nous allons voir au chapitre suivant le principe d'une chaîne de communication 5G

# **Chapitre 3**

**Etude d'une chaîne de  
communication 5G**

### 3.1. Introduction

Nous avons donné dans le chapitre précédent un exemple de schéma de principe d'une chaîne de communication numérique 4G. Dans ce chapitre nous allons donner un exemple d'une chaîne de communication 5G, cette dernière peut être employée dans le domaine des bandes centimétriques ou millimétriques. Dans notre travail nous allons considérer le domaine des bandes centimétriques. Nous avons introduit en premier lieu les notions de base des antennes Massive-MIMO qui ont pour avantages d'augmenter largement le débit.

### 3.2. MIMO massive

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes » sur un seul équipement (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieure à 6Ghz). L'attrait l'utilisation du massive MIMO est double [7] :

- Permet d'augmenter les débits grâce au multiplexage spatiotemporel.
- Permet de focaliser l'énergie sur un terminal pour améliorer son bilan de liaison.

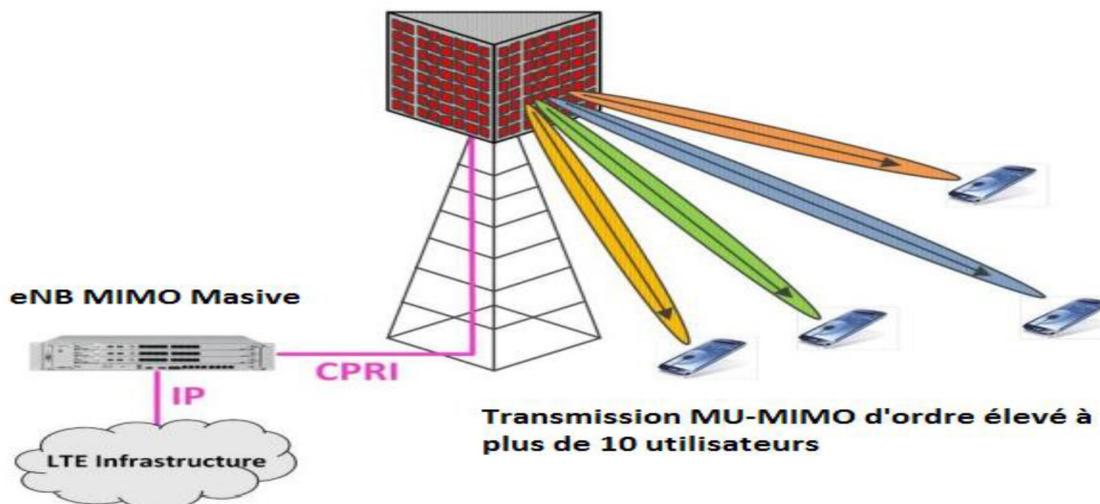


Fig.3. 1. Système MIMO massive.

### 3.3. Multiplexage NOMA

LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné. Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G par rapport à la 4G des méthodes de multiplexage non orthogonales sont utilisées, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, CDMA) [7].

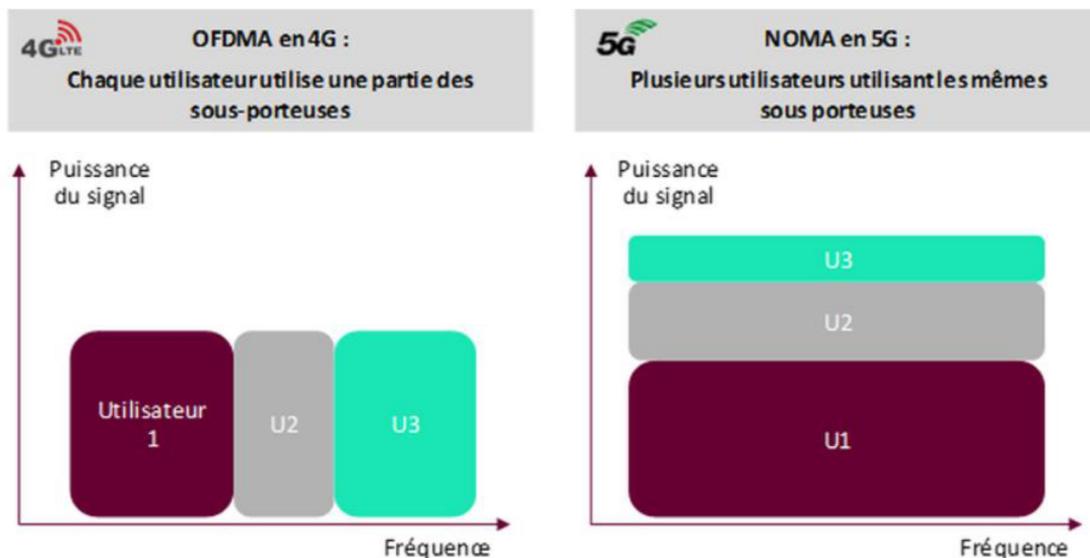


Fig.3. 2. Comparaison entre l'OFDMA et NOMA.

### 3.4. Méthodes duplex

Pour les communications mobiles, il est important de pouvoir communiquer simultanément ou virtuellement dans les deux sens [7].

Dans les systèmes de téléphonie mobile précédents, cela a été accompli en utilisant des systèmes FDD (parfois appelée semi-duplex, nécessite l'utilisation de deux canaux, un pour la liaison montante (UP) et l'autre pour la liaison descendante (DL), ce système nécessite la largeur de bande complète du canal dans deux zones du spectre. Les caractéristiques de propagation entre les bandes d'émission et de réception seront également légèrement différentes dans des instants différents. L'utilisation des filtres devient de plus en plus difficile et complexe si plusieurs bandes sont utilisées car ils sont nécessaires pour augmenter la taille, le poids, et le coût. Ceci introduit une perte supplémentaire dans les systèmes TDD (alloue des canaux temporels en fonctions de transmission et de réception dans laquelle la liaison

montante (UP) et la liaison descendante (DL) sont reportées sur même canal avec même fréquence). Les canaux sont relativement courts et de ce fait la transmission dans les deux directions est pratiquement instantanée.

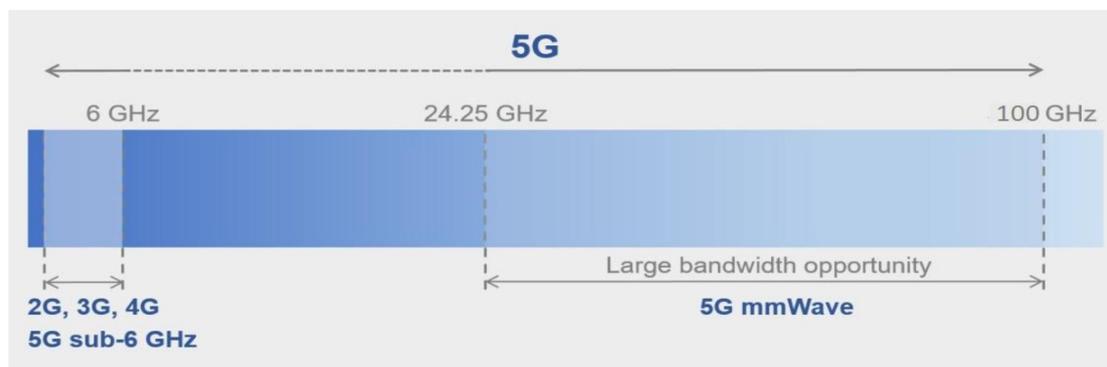
- Le concept de développé le full duplex 5G est de pouvoir émettre et recevoir simultanément l'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit. Ce duplex intégral 5G offre plusieurs avantages :
- Efficacité du spectre.
- Caractéristique d'évanouissement.
- Filtrage.
- Nouvelles solution de relais.
- Coordination améliorée des interférences.

### 3.5. Type de modulation

La 4G utilise la modulation d'amplitude en quadrature (QAM). Cette modulation peut atteindre **QAM-64**, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis. Grâce à amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation peut atteindre l'ordre **QAM-256** (8 bits d'information), ces modulations offrent une excellente efficacité spectrale et ont permis de réaliser des débits de données très élevés [7].

### 3.6. La bande passante

La bande passante et l'agrégation de porteuses à canal unique déterminent les besoins globaux en bande passante. Une largeur de bande de canal maximale par porteuse NR 5G de 100 MHz pour la gamme inférieure à 6 GHz et de 400 MHz pour la gamme mmWave plus un agrégat de plusieurs porteuses conduit à une bande passante maximale de 2 GHz. Pour le secteur de la téléphonie cellulaire, le spectre au-dessus de 6 GHz est un nouveau domaine et les développeurs de composants sont confrontés à de nombreux défis, tels que l'atténuation de trajets plus élevés, la réponse en fréquence et le bruit de phase, ainsi que les aspects de linéarité et d'efficacité. Les développeurs ont besoin de solutions de test et de mesure flexibles pour générer et analyser ces signaux 5G à large bande afin de développer et d'optimiser leurs conceptions, **figure 3.3** [7].



**Fig.3. 3.** La bande passante de la 5G.

### 3.6.1. Bandes centimétriques

Les fréquences inférieures à 6 GHz sont prises dans les réseaux mobiles des générations précédentes (2G 3G et 4G).

### 3.6.2. Bandes millimétriques

Il s'agit tout simplement des fréquences supérieures à 6GHz qui n'ont encore jamais été prises pour déploiement dans les réseaux mobiles pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'incessante augmentation des débits et des volumes de données échangés, elle pourraient offrir de telles réserves de spectre et leur utilisation impose le développement de toutes les technologies nécessaires, miniaturisés à bas cout et avec une consommation énergétique compatible avec des terminaux portables (amplificateur, codeur, traitement de signal, antenne...) en particulier, la communication par onde millimétrique est susceptible d'être utilisée pour une couverture extérieure pour des réseaux denses telle que la portée allant jusqu'à 200 à 300 mètres, Chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de 'beamforming' (MIMO) [7].

## 3.7. Chaîne de communication de la 5G

### 3.7.1. Structure du Système FBMC/OQAM

L'idée principale de la technique FBMC/OQAM est de remplacer la modulation QAM habituelle par la modulation OQAM, pour cela un décalage d'une demi-période symbole  $T/2$  est introduit entre la partie réelle et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné. Si la partie imaginaire est retardée de  $T/2$  sur une sous-porteuse, c'est la partie réelle qui sera retardée sur la sous-porteuse suivante, **figure 3.6.**

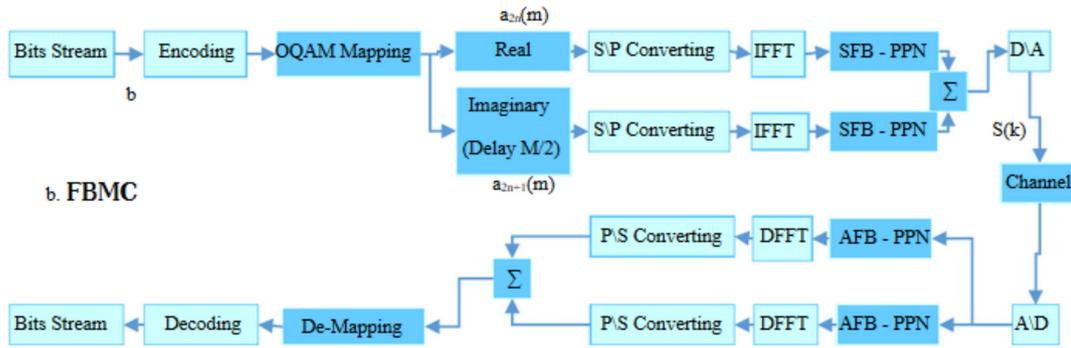


Fig.3. 4. Chaîne de communication de la 5G à base de FBMC.

### 3.7.2. Principe de traitement OQAM

Les symboles OQAM sont transmis plutôt que les symboles QAM, Pour effectuer cette modulation il y'a deux bloc principaux de traitement OQAM qui s'appelle « pré/post de traitement », l'un est placé à côté d'émetteur « pré/traitement » et l'autre est placé à côté de récepteur [13].

#### 3.7.2.1. Bloc pré/traitement OQAM

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

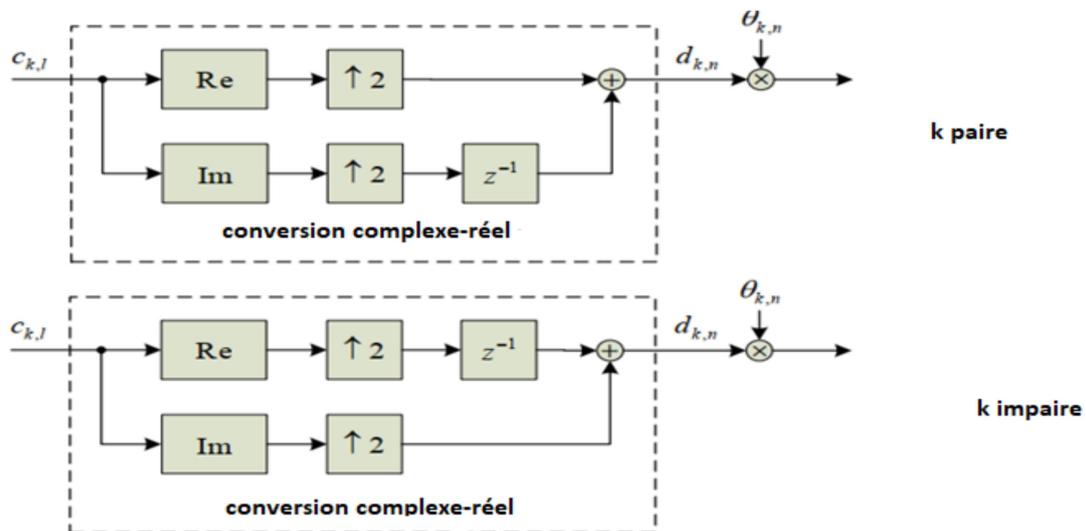


Fig.3. 5. Schéma générale de pré/traitement OQAM.

#### La première opération :

C'est une décomposition d'un symbole complexe  $C_k[l]$  sur deux parties réel et imaginaire pour former deux nouveaux symboles  $d_k[n]$  et  $d_k[n +$

1].  $d_k[n]$  est transmise à un débit  $1/T$ , cette opération est appelée « conversion complexe/réelle » [14]. Tel que:

$$d_k[n] = \begin{cases} \text{Re}(C_k[l]) & \text{si } k \text{ paire} \\ \text{Im}(C_k[l]) & \text{si } k \text{ impaire} \end{cases} \dots \dots \dots \text{(Eq.3.1)}$$

$$d_k[n+1] = \begin{cases} \text{Im}(C_k[l]) & \text{si } k \text{ paire} \\ \text{Re}(C_k[l]) & \text{si } k \text{ impaire} \end{cases} \dots \dots \dots \text{(Eq.3.2)}$$

Avec :

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

**La deuxième opération :**

C'est une multiplication par  $\theta_k[n]$  afin de maintenir les symboles Orthogonaux.

Tel que:

$$\theta_k[n] = J^{k+n} \dots \dots \dots \text{(Eq.3.3)}$$

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

$$X_k[n] = d_k[n] * \theta_k[n] \dots \dots \dots \text{(Eq.3.4)}$$

**3.7.2.2. Bloc Post-traitement OQAM**

La figure ci-dessus illustre le schéma fonctionnel du post-traitement OQAM qui se trouve à la réception, il constitue de deux opérations principales [24].

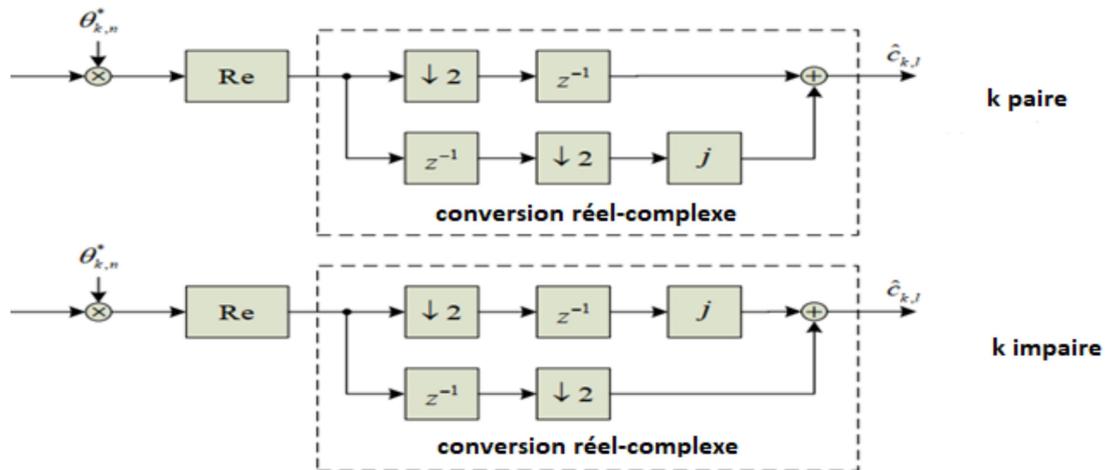


Fig.3. 6. Schéma fonctionnel du post-traitement OQAM.

**La première opération :**

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

**La deuxième opération :**

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

La forme complexe notée  $\hat{C}_k[l]$  s'exprime comme suit :

$$\hat{C}_k[l] = \begin{cases} \hat{d}_k[n] + j \hat{d}_k[n+1] & \text{si } k \text{ paire} \\ \hat{d}_k[n+1] + j \hat{d}_k[n] & \text{si } k \text{ impaire} \end{cases} \dots \dots \dots \text{(Eq.3.5)}$$

**3.7.3. Emetteur FBMC/OQAM**

A l'émission, les symboles de données  $C_k$  sont envoyés par le bloc de conversion série/parallèle puis passe par le bloc prétraitement OQAM qui consiste à introduire un décalage temporel d'une demi-période  $T/2$  entre la partie réelle et la partie imaginaire du symbole QAM transmis sur une sous-porteuse donnée. Ce qui permet d'éliminer les interférences entre symboles. On peut écrire le signal à la sortie du  $X(z)$  sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{X}\left(\frac{z^M}{z^2}\right) = [\mathbf{X}_0\left(\frac{z^M}{z^2}\right) \cdot \mathbf{X}_1\left(\frac{z^M}{z^2}\right) \dots \dots \dots \mathbf{X}_{M-1}\left(\frac{z^M}{z^2}\right)]^T \dots \dots \dots \text{(Eq. 3.6)}$$

En outre, le signal résultant passe par un banc de filtre de synthèse qui contient des multiplicateurs  $\beta_k$ , IFFT, des filtres polyphasés  $A_q(z^M)$  et bloc de conversion série/parallèle (sur-échantillonneurs et chaînes de retard). Le signal à la sortie du banc de filtre de synthèse  $Y(m)$  peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{Y}(m) = \sum_{k=0}^{M-1} \mathbf{x}_k[n] \cdot \beta_k[n] \cdot \mathbf{p}\left[m - n\left(\frac{m}{2}\right)\right] \exp\left(j\left[\frac{2 * \pi}{M} \mathbf{K} m\right]\right) \dots \dots \dots \text{(Eq. 3.7)}$$

Avec :  $m$  est l'indice d'échantillon à l'entrée/sortie SFB et AFB,  $M$  est le nombre de sous-porteuses dans la banque du filtre.

En notation matricielle [16] :

$$\mathbf{Y}(z) = \mathbf{z}^T(z) \cdot \mathbf{X}\left(\frac{z^M}{z^2}\right) \dots \dots \dots \text{(Eq. 3.8)}$$

Finalement, Le signal  $Y(z)$  est envoyé à travers un canal de transmission.

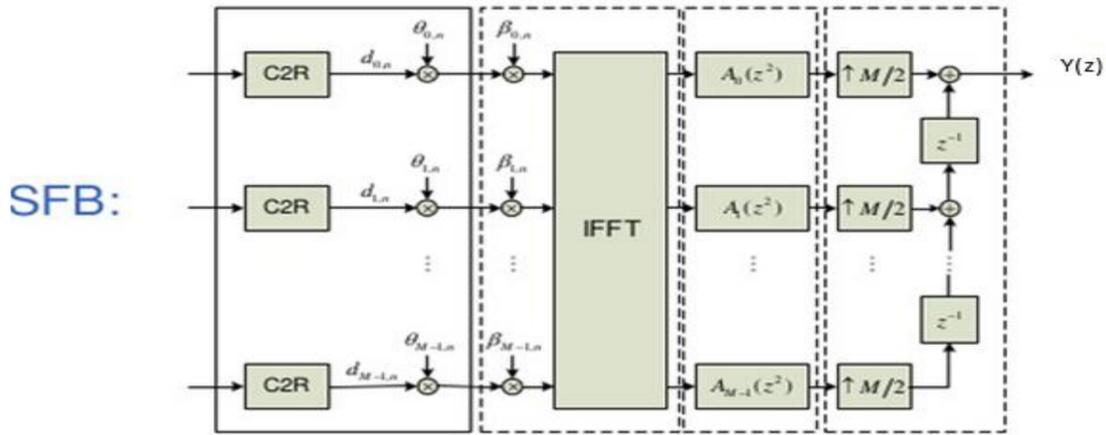


Fig.3. 7. Schéma de principe de l'émetteur FBMC/OQAM.

**3.7.4. Récepteur FBMC/OQAM**

Après la transmission le signal traverse le canal sans fil et peut être exprimé comme suit :

$$Y(m) = y_k(m)h_k(m) + w_k(m) \dots \dots \dots (Eq. 3. 9)$$

Avec :  $h_k(m)$  est un processus d'évanouissement complexe évalué la sous porteuse pour le symbole FBMC/OQAM et  $w_k(m)$  est un processus de bruit gaussien blanc additif (AWGN).

A la réception, le signal d'entrée  $y(m)$  passe par un banc de filtres d'analyse qui contient un bloc de conversion série/parallèle (chaîne de retard et sous-échantillonneurs), des filtres polyphasés et bloc de transformation « FFT et multiplicateurs conjugué  $\beta_k^*$  [16].

On peut écrire le signal  $\hat{X}(z)$  à la sortie d'AFB par la forme matricielle suivante [18] :

$$\hat{X}\left(z^{\frac{M}{2}}\right) = F(z^M). \hat{Y}(z) \dots \dots \dots (E . 3. 10)$$

$$\hat{X}\left(z^{\frac{M}{2}}\right) = BW.A(z^M). c(z). \hat{Y}(z) \dots \dots \dots (E . 3. 11)$$

A la fin, le signal  $\hat{X}(z)$  passe par le bloc de pré-traitement qui contient un multiplicateur conjugué  $\beta_k^*$  et bloc de conversion réel/complexe pour obtenir à la sortie de la réception les nouveaux symboles  $\hat{C}_k[l]$ .

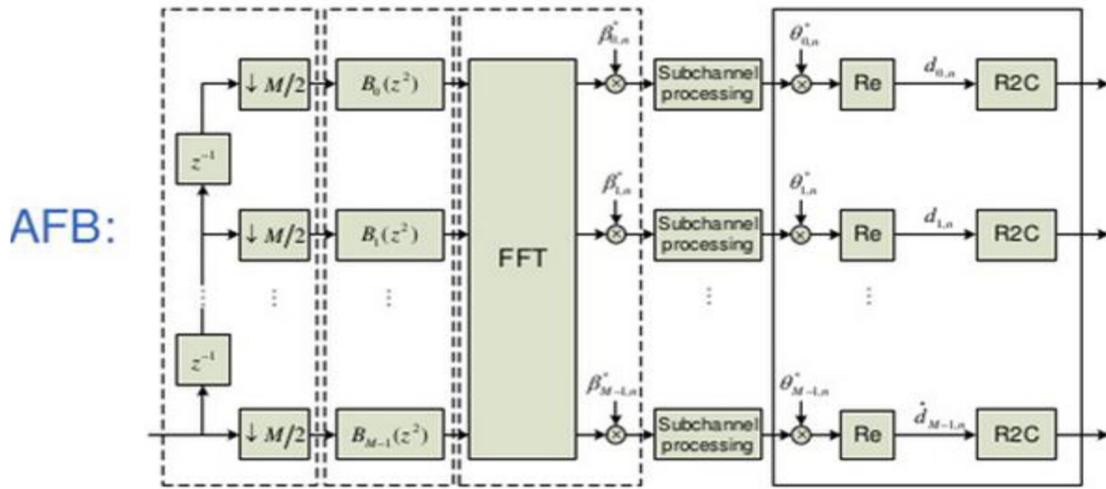


Fig.3. 8. Schéma de principe du récepteur FBMC/OQAM.

### 3.8. Comparaison entre L'OFDM et FBMC

L'OFDM est très similaire au Trans-multiplexeur. Il se compose d'une banque de filtres de synthèse et d'un banc de filtres d'analyse. Dans ce prototype de filtre, l'impulsion rectangulaire est utilisée. Il en résulte une mauvaise réponse en fréquence en raison de la fenêtre rectangulaire pour le filtre prototype.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé un Trans-multiplexeur avec des fenêtres non rectangulaires et la mise en forme d'impulsion de Nyquist est employée, la cascade de bancs de filtre de synthèse et de banc de filtre d'analyse devrait répondre au critère de Nyquist. Une efficacité de bande passante optimale est obtenue en utilisant le critère de Nyquist. La figure 3.7 ci-dessous présente le diagramme fonctionnel OFDM ainsi que la modification FBMC proposée.

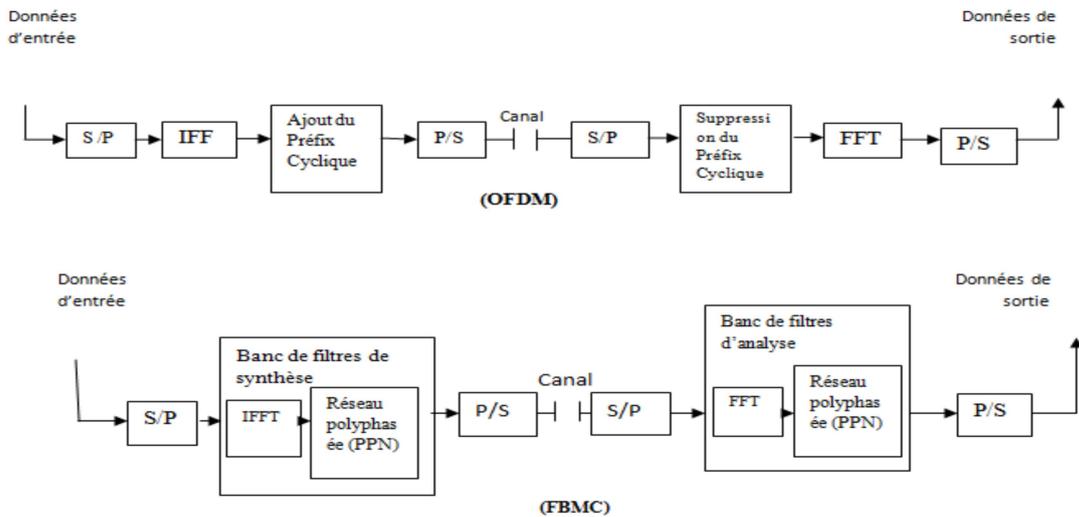


Fig.3. 9. Schéma fonctionnel de l'OFDM et de la FBMC.

### 3.8.1. Les avantages et les défis de FBMC

#### 3.8.1.1. Avantages

- Efficacité spectrale : pas de CP, une sous-carresse vide suffit comme bande de garde entre les différents utilisateurs secondaires.
- Le même banc de filtres peut être utilisé pour le traitement du signal de réception et pour la détection de spectre flexible et haute résolution avec une dynamique élevée.
- Mode efficace du point de vue spectral pour introduire des blocs silencieux dans les transmissions secondaires pour la détection du spectre.

#### 3.8.1.2. Défis

- Les «queues» de la réponse impulsionnelle de banc de filtre (c'est-à-dire le chevauchement temporel des symboles de sous-porteuses) introduisent la surcharge dans un fonctionnement à multiplexage temporel serré.
- Haute linéarité est nécessaire pour l'amplificateur de puissance de l'émetteur pour maintenir le spectre propre fourni par le banc de filtres de synthèse
- Les performances RF analogiques sont essentielles pour la mise en œuvre de la détection générique du spectre avec une bande passante large et une dynamique élevée [24].

### 3.9. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre l'utilisation de la technique FBMC pour la 5G qui a presque la même complexité que CP-OFDM mais avec une puissance d'émission inférieure.

Les techniques FBMC ont le potentiel d'améliorer les performances de synchronisation des réseaux conventionnels et d'ajouter de nouvelles fonctionnalités. Ils sont une technologie habilitante pour le déploiement efficace et l'acceptation de réseaux opportunistes. La technique FBMC/OQAM est considérée comme étant plus favorable pour la cinquième génération, elle conserve les caractéristiques d'OFDM et améliore ses points faibles.

Nous allons faire dans le dernier chapitre des simulations sous l'environnement MATLAB pour pouvoir faire des comparaisons en termes du taux d'erreur binaire en fonction du signal sur bruit à la sortie du récepteur

# **Chapitre 4**

**Simulation et comparaison  
entre la 4G et 5G**

## 4.1. Introduction

Après avoir finalisé la partie théorique, nous passons dans ce chapitre aux simulations.

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

On va simuler les modulations FBMC/OQAM et OFDM/IG en étudiant leurs performances avec le changement de quelques paramètres.

## 4.2. Les performances

### 4.2.1. Le taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur binaire constitue le paramètre primaire décrivant la qualité de la transmission numérique. Il se définit comme étant le rapport entre les bits erronés et le nombre total de bits reçus. Ce taux détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation, il augmente à cause des perturbations : équipement ou réseau défectueux, pointage incorrect d'une antenne, longueur de canal, etc.

### 4.2.2. Le rapport signal sur bruit (SNR)

Ce terme fait référence au signal démodulé perçu après le processus de démodulation. Le bruit total est celui extrait du réseau de transmission plus le bruit intégré au signal de modulation sous la forme de bruit d'amplitude, de bruit de phase et d'interférence inter symboles ainsi que d'autres dégradations de la modulation.

On le calcule à l'aide de l'une ou l'autre des formules représentées ci-dessous :

$$(SNR) (db) = 10 \log (Ps/Pn) \dots \dots (Eq. 4. 1)$$

Ps : Puissance du signal en W.

Pn : Puissance de bruit en W.

### 4.2.3. La densité spectrale

C'est un outil mathématique permettant de représenter les différentes composantes spectrales d'un signal et d'en effectuer l'analyse harmonique. Elle est utilisée en particulier en physique, en ingénierie et en traitement du signal.

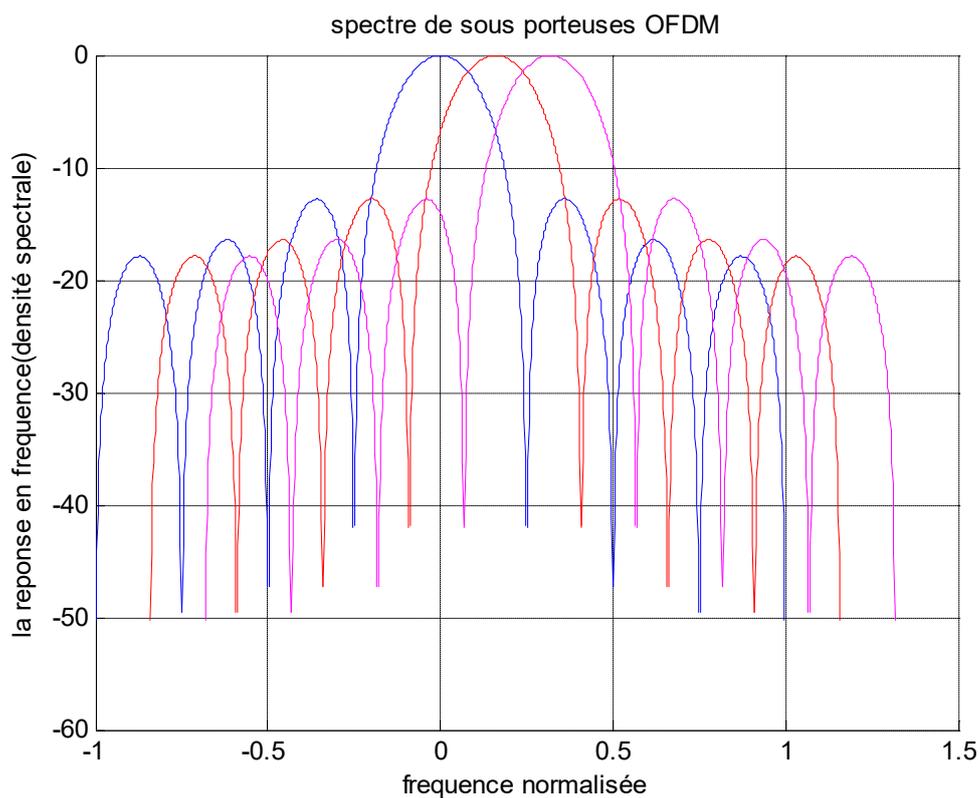
La densité spectrale de puissance (DSP) représente un des critères fondamentaux dans l'évaluation des performances spectrales d'un système donné [25].

## 4.3. Les critères de comparaison

### 4.3.1. Le spectre de sous porteuses

On a essayé de faire une comparaison entre le spectre de la technique FBMC/OQAM et OFDM/CP à l'aide d'un code MATLAB qui nous donne les figures suivantes :

\*. Pour 8 sous canaux



**Fig.4. 1.** Spectre de sous porteuse OFDM pour 8 sous canaux.

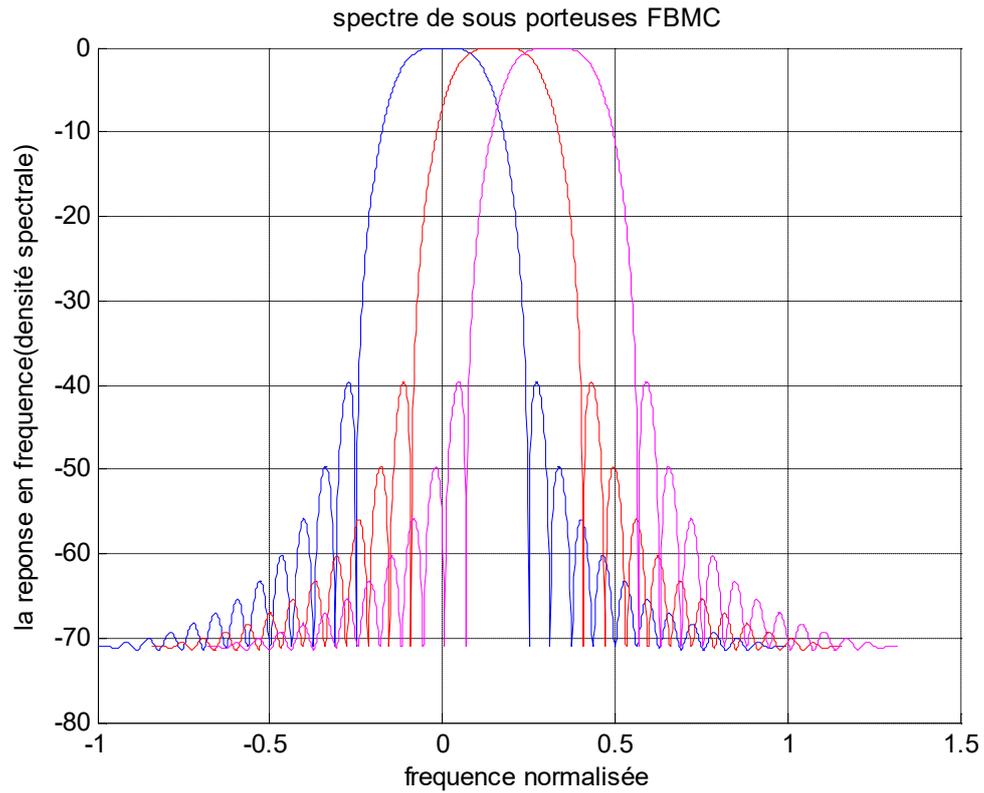


Fig.4. 2. Spectre de sous porteuse FBMC pour 8 sous canaux.

**\*pour 64 sous canaux**

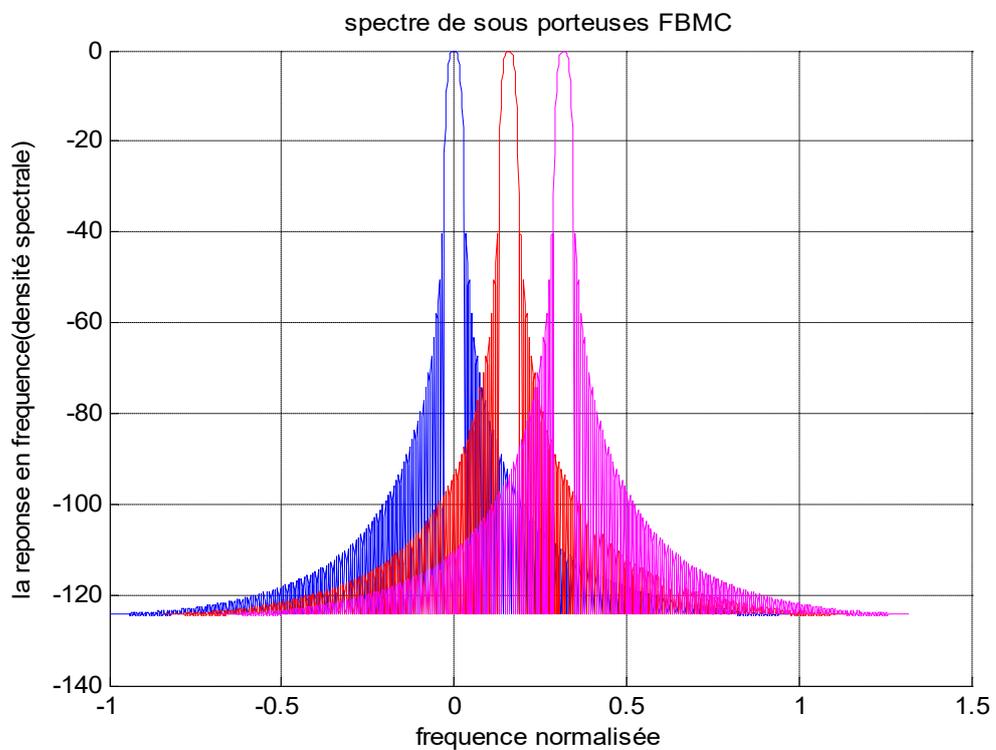
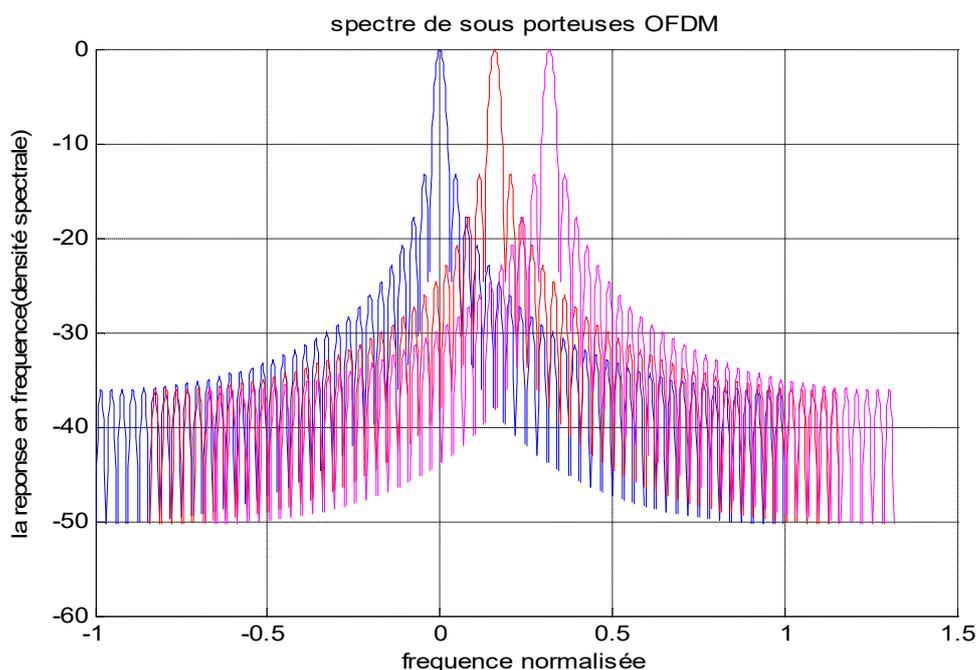


Fig.4. 3. Spectre de sous porteuse FBMC pour 64 sous canaux.



**Fig.4. 4.** Spectre de sous porteuse FBMC pour 64 sous canaux.

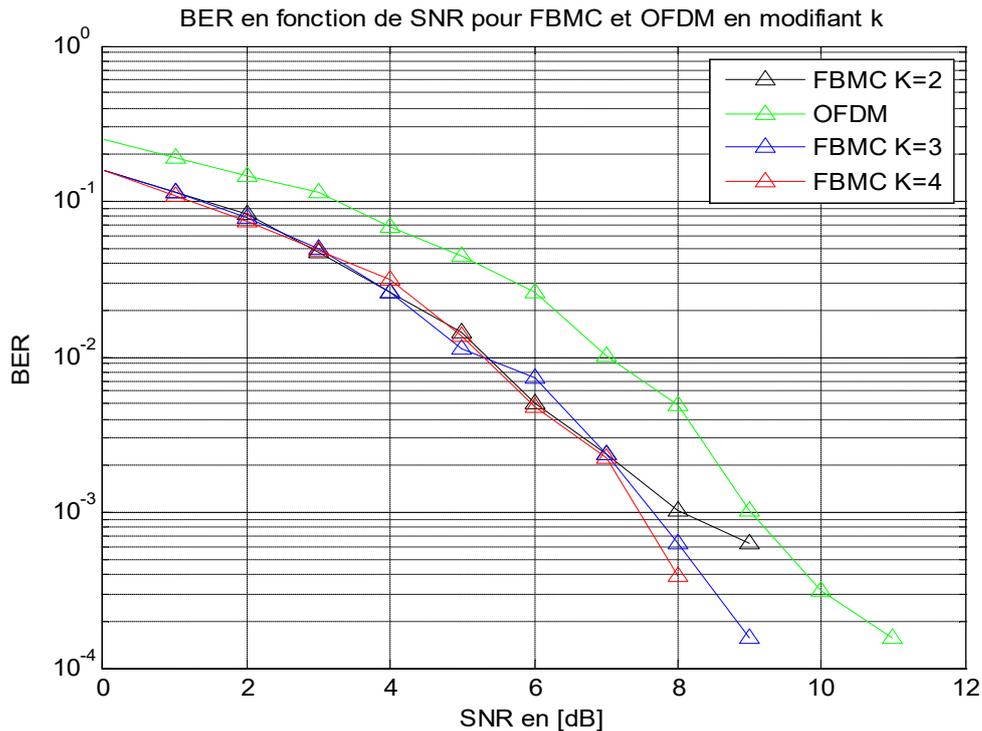
### Commentaire

Nous observons que la largeur des lobes latéraux du spectre OFDM est toujours supérieure à celle du spectre FBMC.

L'OFDM utilise le préfixe cyclique (CP) ou un intervalle de garde (IG) avec un filtre rectangulaire en forme d'impulsion et un niveau très élevé des lobes latéraux entraînant une fuite de puissance entre les différentes sous-porteuses par contre la FBMC a une efficacité spectrale plus élevée car ils ne nécessitent pas de préfixe cyclique (CP). De plus ce système a des lobes latéraux spectraux plus faibles en raison de l'utilisation des filtres bien conçu.

### 4.3.2. Facteur de chevauchement k

On a réalisé ensuite deux chaînes de communication (une est basée sur l'OFDM/IG et l'autre est basée sur FBMC/OQAM), en modifiant le facteur de chevauchement K. Nous avons obtenu la figure suivante :



**Fig.4. 5.** L'effet de la modification de facteur de chevauchement k.

### Commentaire

-On observe que le BER est toujours petit aux niveaux de la technique de transmission FBMC pour  $k=2,3$  et 4, par contre le BER pour l'OFDM est un peu grand, ce qui implique que le nombre de bits erronés au niveau de la réception dans la chaîne de la 4G est toujours grand par rapport au nombre de bit erronés dans la chaîne de la 5G

### 4.3.3. Le nombre de sous canaux M

Le nombre de sous-canaux M est essentiellement un nombre pair aléatoire, mais caractéristique, c'est une puissance de deux acceptable pour une application efficace.

On a réalisé deux chaînes de communication (une est basé sur l'OFDM/IG et l'autre est basé sur FBMC/OQAM) en modifiant le nombre de sous canaux Nous avons obtenu la figure suivante :

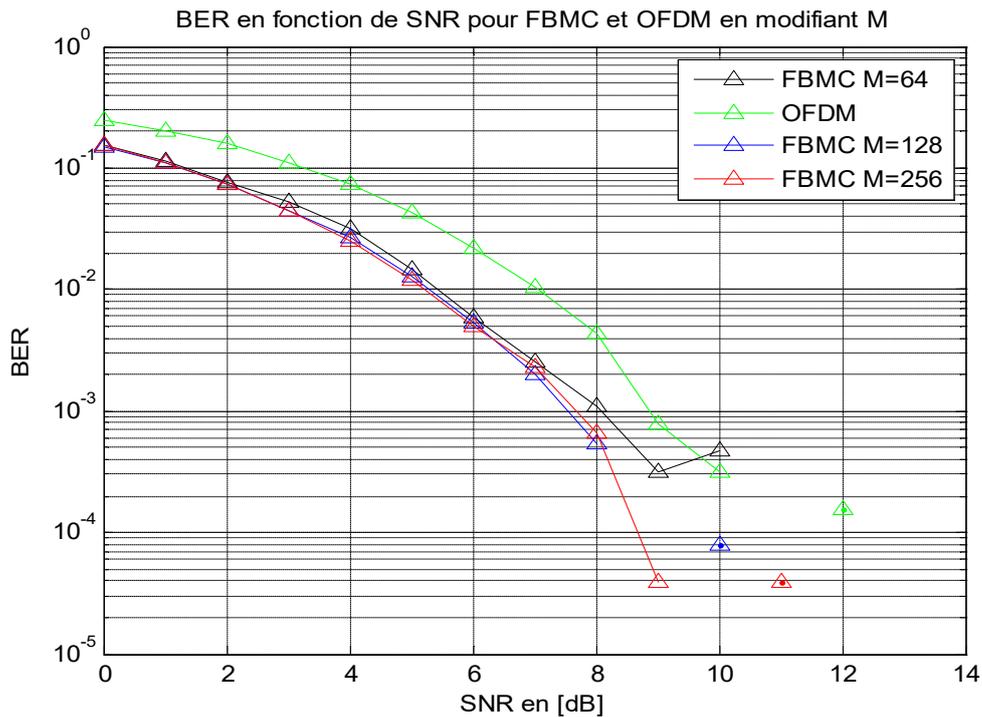


Fig.4. 6. L'effet de la modification de nombre de sous canaux M.

#### Commentaire

Le BER de la technique FBMC est toujours petit par rapport au BER de l'OFDM Quel que soit le nombre de sous canaux.

#### 4.3.4. L'intervalle de garde IG

La modification du pourcentage de l'IG sur la technique de l'OFDM nous a donné la figure suivante :

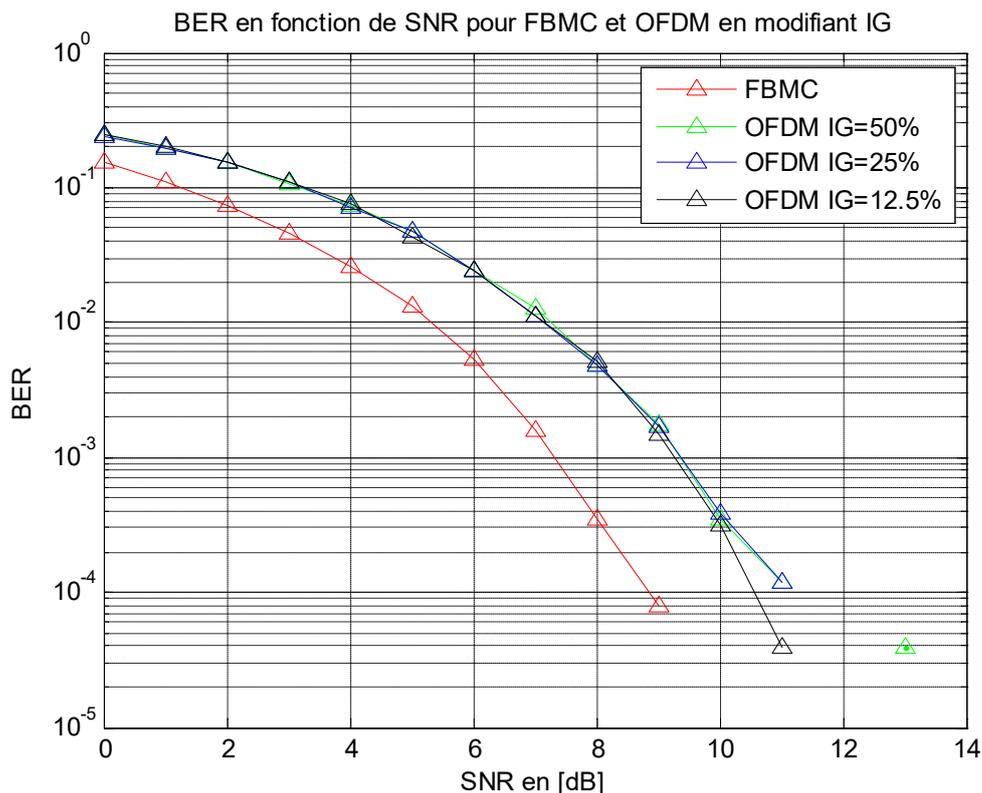


Fig.4. 7. L'effet de la modification de la taille de l'intervalle de garde IG.

#### Commentaire

Le BER de l'OFDM est supérieur au BER de FBMC quel que soit le pourcentage de l'intervalle de garde utilisé

#### 4.3.5. Le type d'antennes utilisé

Dans la 4G on utilise les antennes de type MIMO OFDM par contre la 5G utilise les MIMO massive qui sont basées sur la technique de formation de faisceau, on a essayé de réaliser ces deux types d'antennes dans les bandes centimétriques pour avoir cette figure :

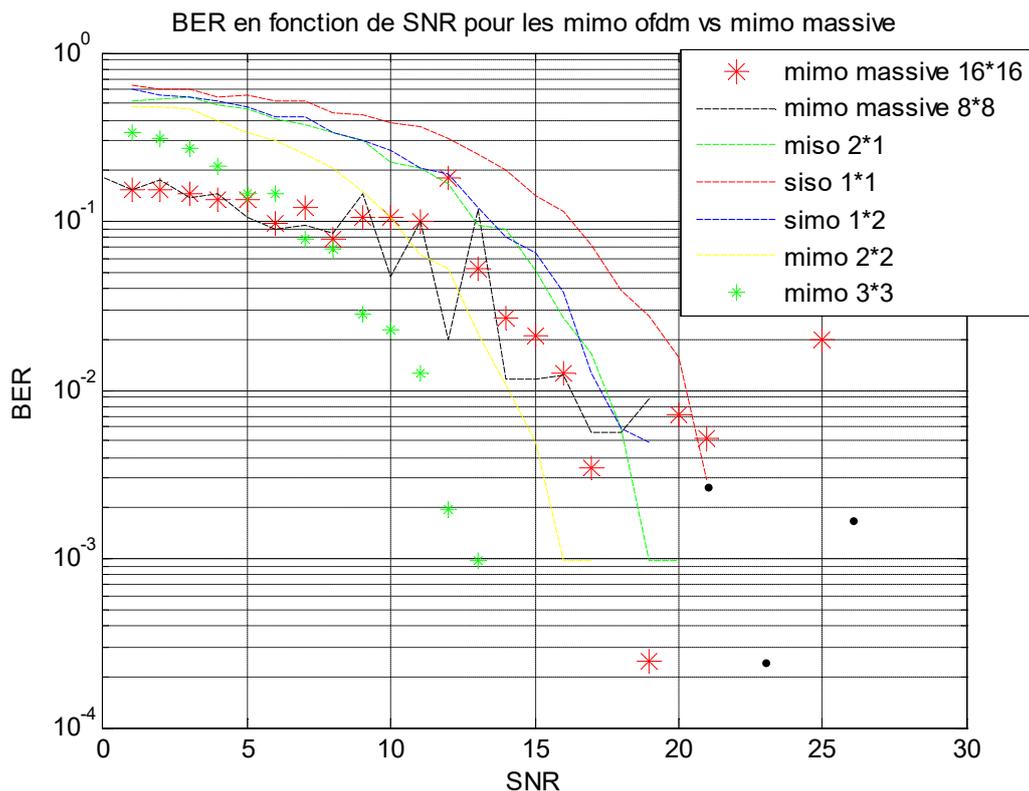


Fig.4. 8. L'effet de changement type d'antenne MOMO-OFDM / MIMO Massive.

#### Commentaire

On voit bien que le BER diminue lorsque le nombre d'antennes augmente ce qui implique l'importance des antennes intelligentes dans la future génération

#### 4.4. Conclusion

Nous avons fait dans ce chapitre quelques simulations en termes du BER en fonction du SNR pour faire des comparaisons entre les techniques de modulations OFDM et la FBMC. Nous avons remarqué que la technique FBMC apporte une nette amélioration par rapport à l'OFDM. Nous avons vu l'influence du facteur K ainsi que l'influence du nombre de canaux sur les performances de ces deux types de modulation. Dans une dernière phase nous avons changé le nombre d'antennes de notre système MIMO

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

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

Dans ce mémoire on a essayé d'étudier un sujet trop demandé dans la télécommunication et faire une comparaison entre les deux générations.

Les simulations que nous avons réalisé a permis de simuler deux chaines communications numériques et de montrer l'avantage apporté par la FBMC sur la densité spectrale et le BER par rapport à l'OFDM.

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

Nous espérons à l'avenir d'essayer d'autre formes d'ondes à la place de la forme d'onde de type sinus ou cosinus utilisée pour l'OFDM pour apporter une amélioration encore en BER. .

. Comme perspective, on peut dire que notre mémoire est basé sur la comparaison entre les deux générations des réseaux mobiles 4G et 5G notamment leurs applications caractéristiques et leurs principes de fonctionnement des techniques de transmission OFDM/CP et FBMC/OQAM qui sera la modulation la plus courante grâce à l'usage des filtres RIF de types phydyas qui sont importants pour diminuer les largeurs des lobes secondaires du spectre et aussi à diminuer le taux d'erreur binaire en fonction de SNR

Aussi on a fait une comparaison entre les antennes utilisées MIMO/OFDM et MIMO massive qui utilisent la technique de formation de faisceau pour détecter le

récepteur et diriger le lobe principale du rayonnement vers lui en diminuant le BER d'une façon tares importante

Le travail de simulation par MATLAB est réalisé au bandes de fréquences (centimétriques) dont la fréquence  $F < 6$  GHZ c à d les mêmes fréquences qu'on les utilise dans les générations précédentes (3G, 4G) dans les canaux AWGN et Rayleigh

On conseille les futures étudiants d'entamer d'autres performances comme le QOS ou étudier le SNR et BER dans les bandes millimétriques ( $F > 6$ GHZ) dans d'autres canaux comme RICE pour pouvoir avoir d'autres résultats dans les recherches et le développement de du domaine de la télécommunication en général.



## *Bibliographie*

- [1] Benyahiahafsa ,Cherifiwafa Mémoire, ''étude des techniques MIMO à base de FBMC pour la 5G'' – juin/2017.
- [2]<https://developer.orange.com/wp-content/uploads/Generalites-et-architecture-de-la-4G.pdf>
- [3][https://fr.wikipedia.org/wiki/4G#Normes\\_4G](https://fr.wikipedia.org/wiki/4G#Normes_4G)
- [4] mémoire,Chihi Lamia (migration d'un réseau mobile 3G vers 4G) la Tunisie 2014/2015(page 22, 23)
- [5]<https://www.aclmodelisme.fr/4g-avantages-et-inconvenients/>
- [6] mémoire, Mr.KHOBZAOUIAbderrahim,Mr .CHAIBI Boussaad. 'Planification d'un réseau 4 G en zone urbaine',**2015/2016**, Université Abderrahmane Mira Bejaia
- [7] mémoire, 'HACINI Khaled,ABADELIA Anes', Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations,2019,univ Guelma
- [8] <https://www.silicon.fr/imt-2020-petit-nom-normatif-de-5g-119988.html>
- [9] Bendahmane Amira Meriem, GhermoulRania, ''Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC''Mémoire,Année universitaire 2017/2018.
- [10]<https://www.prixtel.com/decouvrir-prixtel/actualite/news/reseau-5g-les-avantages-et-les-inconvenients/>
- [11] J.G. Proakis and M. Salehi, Digital Communications, 5th ed. McGraw-Hill,2008.
- [12] Andrews JG, Claussen H, Dohler M, Rangan S, Mark C. OFDM: Past, present, and future. IEEE Journal on Selected Areas in Communications .2012 April 30.
- [13] Ramjee Prasad. "OFDM for wireless communication system".Artech house, 2004.
- [14] 3GPP TS 36.401, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Architecture description (Release 8)".
- [15] Eric Phillip LAWREY BE (Hons). "Adaptive Techniques for Multiuser OFDM". Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering Thesis , science School of Engineering, JamesCook University ,December 2001.

- [16] Carole Devlin, A. Zhu and T. J. Brazil. "Peak to Average Power Ratio Reduction Technique for OFDM Using Pilot Tones and Unused Carriers". The IEEE Radio and Wireless Symposium, Orlando, FL, USA, January 2008.
- [17] A. Prasina, M. Thangaraja, "Interoperability of Wireless Mesh and Wi-Fi network using FPGA for 4G Solutions", IEEE-International Conference on Recent Trends in Information Technology, Anna University, Chennai, pp.491–496, June 3-5, 2011
- Mustafa Ergen, "Mobile Broadband Including WiMAX and LTE", Berkeley, CA USA ISBN: 978-0-387-68189-4, Springer, 2009
- [18] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB*: John Wiley & Sons, 2010.
- [19] MAXIME BOULAY ÉTUDE COMPARATIVE DES TECHNIQUES D'ANNULATION DES INTERFÉRENCES DANS UN SYSTÈME MIMO-OFDM , UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2009
- [20] Zhou, X.; Ye, Z.; Liu, X.X.; Wang, C.Y. Chi-square distribution-based confidence measure channel estimation method in OFDM Systems. IETE J. Res. **2017**, 63, 662–670
- [21] Virginie Dégardin. Analyse de la faisabilité d'une transmission de données haut Débit sur le réseau électrique basse tension. Thèse de doctorat en électronique Université des sciences et technologies de Lille Décembre 2002
- [22]: GHASSEN.A.A, MAHAMOD.I et KASMIRAN.J, "Modeling and Performance Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants", Académie mondiale des sciences, 2011.
- [23]: GHASSEN.A.A, MAHAMOD.I et KASMIRAN.J, "Modeling and Performance Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants", Académie mondiale des sciences, 2011.
- [24] Bellanger , "FBMC physical layer à primer", PHYDYAS'' , Jan 2010.
- [25] BOUNEGAB Abdelhamid, BELKHAIRI Abderrahmane' Performances d'un système de communication sans fil à base de la technique FBMC pour la 5G'2017/2018 univ Ouargla.

## *Annexe*

### Conception du filtre prototype - critère de Nyquist

La transmission numérique est basée sur la théorie de Nyquist: la réponse impulsionnelle de la transmission le filtre doit traverser l'axe zéro à tous les multiples entiers de la période du symbole. La condition traduit dans le domaine fréquentiel par la condition de symétrie par rapport à la fréquence de coupure, qui est la moitié du taux de symbole. Ensuite, une méthode simple pour concevoir un filtre de Nyquist consiste à considérer les coefficients de fréquence et imposer la condition de symétrie.

Dans les systèmes de transmission, le filtre de Nyquist global est généralement divisé en deux parties, un demi-Filtre de Nyquist dans l'émetteur et un demi-filtre de Nyquist dans le récepteur. Ensuite, la symétrie condition est satisfaite par les carrés des coefficients de fréquence. Les coefficients de fréquence du filtre demi-Nyquist obtenu pour K = 2,3 et 4 sont donnés dans le tableau suivant :

K	H <sub>0</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	σ <sup>2</sup> (dB)
2	1	√2/2	-	-	-35
3	1	0.911438	0.411438	-	-44
4	1	0.971960	√2/2	0.235147	-65

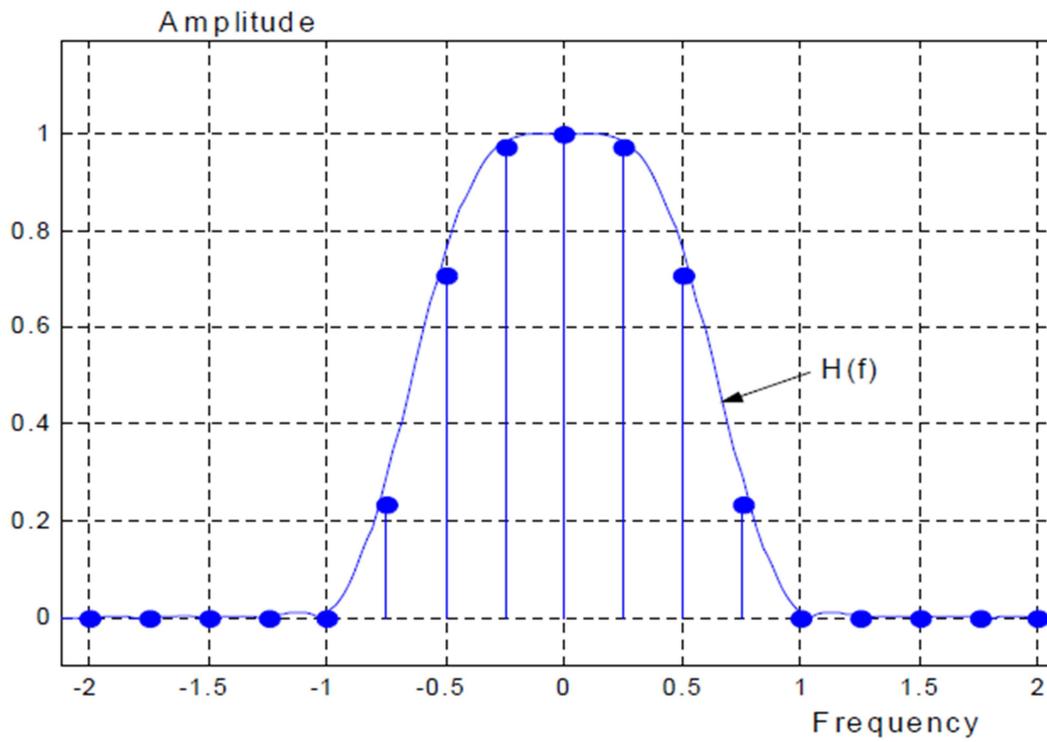
**Tab.1.** Les coefficients du filtre prototype dans le domaine fréquentiel

Dans le domaine fréquentiel, la réponse du filtre se compose d'impulsions 2K-1 comme le montre la **Fig.1** suivante

Pour k = 4. La réponse en fréquence continue, également représentée sur la Fig.5, est obtenue à partir de la fréquence coefficients par la formule d'interpolation pour les signaux échantillonnés qui donne

$$H(f) = \sum_{k=-(k-1)}^{k-1} H_k \frac{\sin(\pi(f - \frac{k}{MK})MK)}{MK \sin(\pi(f - \frac{k}{MK}))}$$

Les ondulations hors bande ont presque disparu et un filtre hautement sélectif a été obtenu.

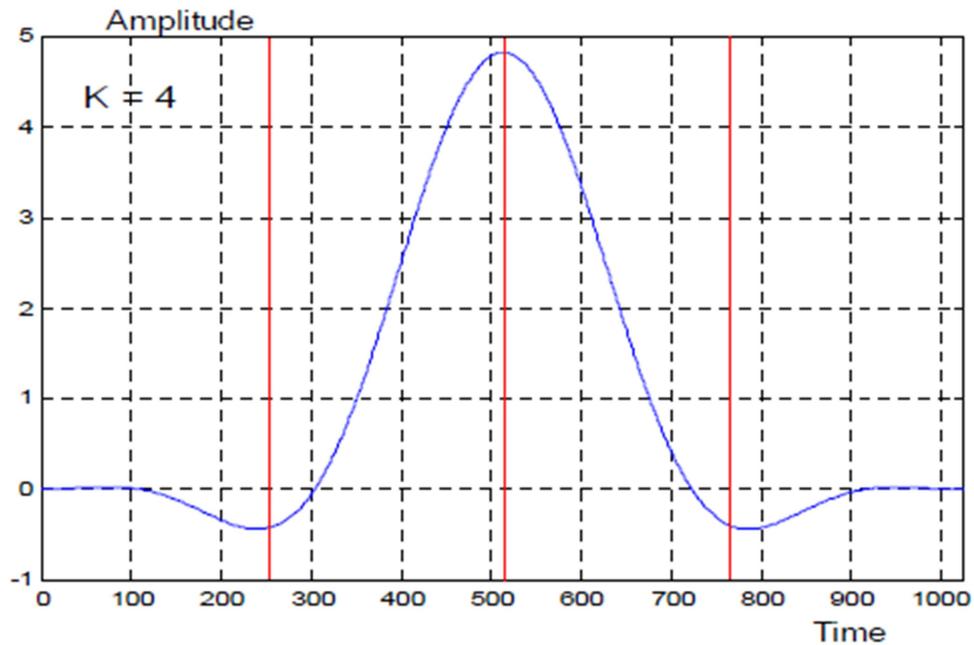


**Fig.1.** Coefficients de fréquence du filtre prototype et réponse en fréquence pour  $K = 4$ .

La réponse impulsionnelle  $h(t)$  du filtre est donnée par la transformée de Fourier inverse de l'impulsion réponse en fréquence, qui est

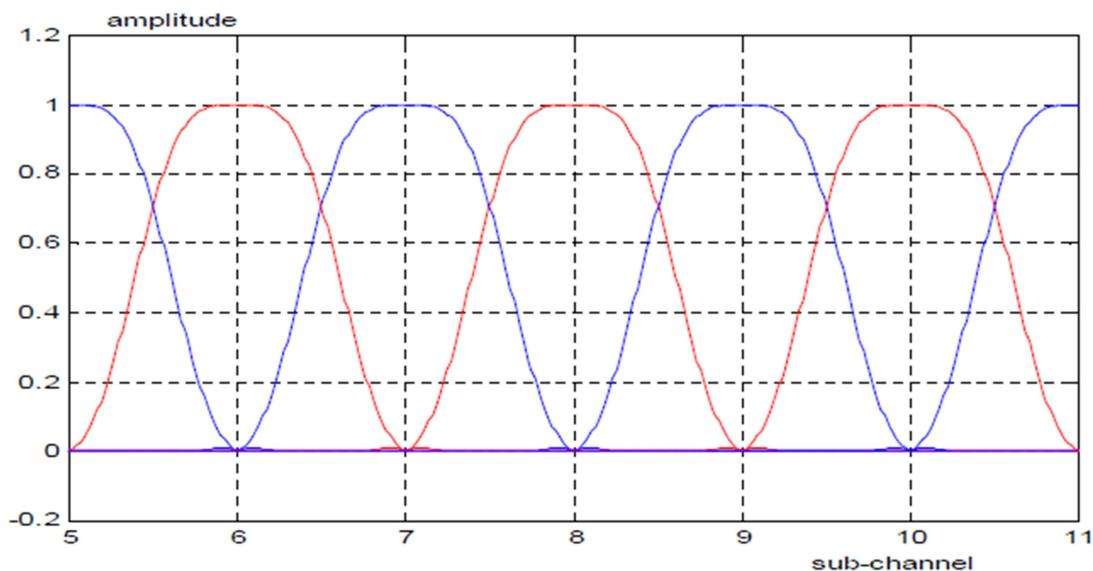
$$h(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k \cos\left(2\pi \left(\frac{k t}{M K T}\right)\right)$$

Il est représenté sur la figure 6 pour la longueur de filtre  $L = 1024$ , le nombre de sous-canaux  $M = 256$  et  $K = 4$ .



**Fig.2.** Réponse impulsionnelle du filtre prototype pour le facteur de chevauchement  $K = 4$ .

Une fois le filtre prototype conçu, le banc de filtres est obtenu par les décalages de fréquence  $k / M$ , comme dans le cas de la FFT. Le filtre d'indice  $k$  est obtenu en multipliant le prototype filtre les coefficients par  $e^{j2\pi k / M}$ , comme mentionné dans la section 2 pour la FFT. Une section du filtre banque dérivée de cette manière est illustrée à la **Fig.3**. L'indice de sous-canal correspond au l'axe des fréquences et l'espacement de la sous-porteuse est l'unité. Une observation clé est que les sous-canaux avec un indice pair (indice impair) ne se chevauchent pas. Cela a un grand impact sur les systèmes comme souligné ci-dessous. En fait, un sous-canal particulier chevauche en fréquence avec ses voisins seulement.



**Fig.3.** Coupe d'un banc de filtres basé sur le prototype avec  $K = 4$

La réponse en fréquence des interférences entre sous-canaux est importante car elle détermine la schéma de modulation.

Comme illustré sur la **Fig.4**, pour un sous-canal donné, le filtre récepteur de ce sous-canal se chevauche avec le filtre émetteur du sous-canal voisin. Compte tenu de la fréquence coefficients de deux sous-canaux voisins, le chevauchement concerne les coefficients  $K-1$  et les coefficients de fréquence du filtre d'interférence sont

$$G_k = H_k H_{K-k} \quad ; \quad k = 1, \dots, K - 1$$

L'ensemble des coefficients est symétrique et pour  $K = 4$

$$G_1 = 0.228553 = G_3 \quad ; \quad G_2 = 0.5$$

Comme mentionné précédemment, la réponse en fréquence d'interférence est dérivée à l'aide du formule d'interpolation qui donne

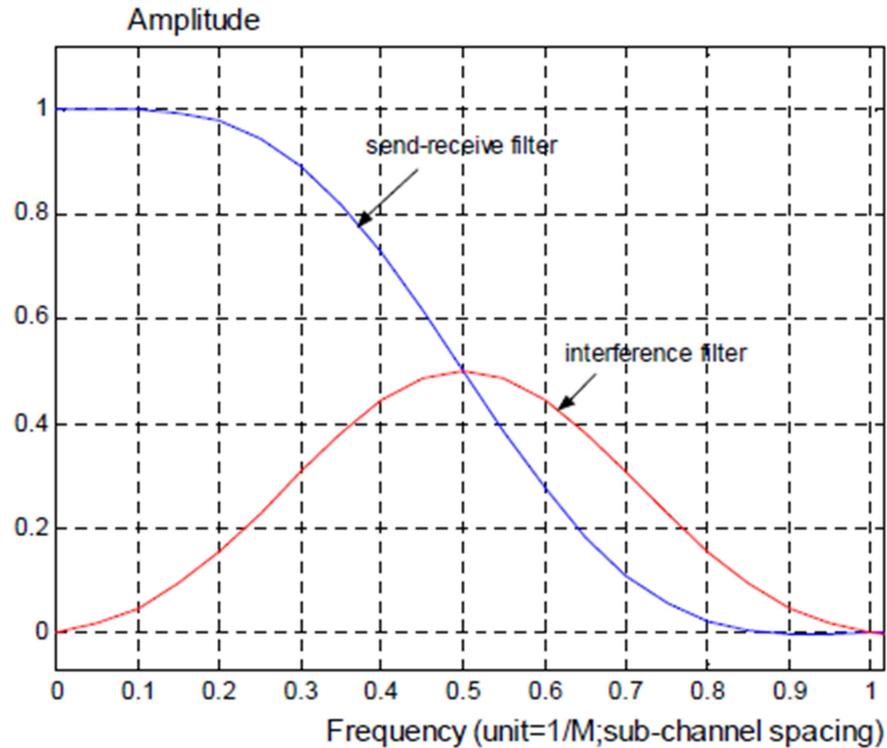
$$H(f) = \sum_{k=1}^3 H_k \frac{\sin(\pi (f - \frac{k}{MK}) MK)}{MK \sin(\pi (f - \frac{k}{MK}))}$$

La réponse en fréquence du filtre d'interférence est représentée sur la **Fig.8** pour

$K = 4$ . Dans le temps domaine, la réponse impulsionnelle du filtre d'interférence est donnée par la transformée de Fourier inverse

$$g(t) = \left[ G_2 + 2 G_1 \cos\left(2 \pi \frac{t}{MK T}\right) \right] e^{j2\pi t / 2T}$$

C'est un résultat crucial, qui détermine le type de modulation qui doit être utilisé pour esquiver l'ingérence. Le facteur  $e^{j2\pi t / 2T} = \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) + j \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)$  reflète la symétrie des coefficients de fréquence et, en raison de ce facteur, la partie imaginaire de  $g(t)$  coupe l'axe zéro aux multiples entiers de la période de symbole  $T$  tandis que la partie réelle traverse l'axe zéro à la multiples impairs de  $T / 2$ . Les passages à zéro sont entrelacés et c'est la base de l'OQAM modulation présentée dans une section ultérieure.



**Fig.4.** Réponses en fréquence du filtre de sous-canal et du filtre d'interférence

Maintenant, considérant le système complet, les coefficients de fréquence de l'émetteur-récepteur filtre sont les carrés de ceux du prototype. Les réponses correspondantes sont données par

$$h_2(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} H_k^2 \cos(2 \pi (\frac{k t}{MK T}))$$

et

$$H_2(f) = \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} H_k^2 \frac{\sin(\pi (f - \frac{k}{MK}) MK)}{MK \sin(\pi (f - \frac{k}{MK}))}$$

Il s'agit d'un filtre de Nyquist et sa réponse en fréquence est représentée sur la **Fig.4** pour  $K = 4$ .

Un paramètre important lié à la conception du filtre prototype est le «bruit de fond» Puissance. En fait, c'est la puissance d'interférence résiduelle due à la non-orthogonalité du porteuses au-delà des sous-canaux voisins. Elle est mesurée, par exemple, en chargeant tous les sous-canaux mais un avec des signaux de puissance unitaire non corrélés et mesurant la puissance du signal en le sous-canal non chargé. Les valeurs  $\sigma^2$  obtenues pour différents facteurs de chevauchement  $K$  sont indiqués dans la dernière colonne du **tableau 1**.

Le paramètre est important pour la conception du système car il a un impact sur le chargement des bits et la détection du spectre.

Une fois qu'une conception est disponible, vient l'implémentation.

### Les paramètres de la simulation

Sur les programmes MATLAB qu'on a exécuté, on a utilisé les paramètres suivants

#### 1/Densité spectrale de puissance

paramètres	4G	5G
Facteur de chevauchement(K)	-	4
Nombre de sous porteuse (M)	8, 64	8, 64

#### 2/Facteur de chevauchement

paramètres	4G	5G
nd(nombre d'échantillons OQAM par symboles)	-	2
M (nombre de Sous canaux)	128	128
K (facteur de chevauchement)	-	2, 3,4
Lp (longueur du filtre)	-	254, 381,508
Nloop (nombre de boucle de simulation)	100	100
SNR	0-15	0-15
m(niveaux de modulation)	4QAM	4OQAM
IG(intervalle de garde)	25%	-
q(type de données)	2(binaire)	2(binaire)

### 3/Le nombre de sous canaux M

paramètre	4G	5G
k	-	4
M	256	64 ,128, 256

### 4/L'intervalle de garde

paramètres	4G	5G
Facteur de chevauchement(K)	-	4
Nombre de sous porteuse (M)	256	256
intervalle de garde(IG)	12,5%,25%,50%	-

### 5/types d'antennes utilisées

Paramètre	MIMO/OFDM	MIMO massive
N(nombre de sous canaux)	1024	1024
nTx(nombre d'antennes d'émission)	1,2,3	8,16
nRx(nombre d'antennes de réception)	1,2,3	8,16
Niveau de modulation	4QAM	40QAM