

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



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

Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Télécommunications**  
Spécialité : **Systèmes de Télécommunications**

---

**Egaliseur LTE-LMS avec différentes modulations**

---

Présenté par :

**HACINI Khaled**

**ABADELIA Anes**

Sous la direction de :

**Dr. GHADJATI Mohamed**

Juillet 2019

# Remerciements

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

*Ce travail a été accompli à l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier absolument.*

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

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

*Je remercie en premier lieu mon encadreur Dr.GHADJATI Mohamed de m'avoir apporté de valeureux conseils et soutiens durant la réalisation de cette mémoire. Je lui transmets l'expression de ma reconnaissance et de ma plus profonde gratitude.*

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

# *Dédicaces*

*Nous dédions mon travail à mes parents,*

*Et mes frères,*

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

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

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

*ABADELIA Anes*

# *Dédicaces*

*Nous dédions mon travail à mes parents,*

*Mes sœurs et mes frères,*

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

*Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à*

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

*HACINI khaled*

# Résumé

Les communications sans fil font l'objet de l'étude d'un grand nombre de chercheurs. Ceci, dans le but d'obtenir une bonne qualité de communications sans fil avec des débits de transmission élevés. L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'égaliseur LTE-LMS avec différentes modulations.

Nous avons trois points essentiels: premièrement nous entamons d'expliquer les modulations M-QAM, OFDM, FBMC/OQAM. En outre, une comparaison entre les modulations multi-porteuses (OFDM et FBMC/OQAM) du point de vue de l'efficacité spectrale. Deuxièmement, nous expliquons la notion d'égalisation, et présente une étude d'égaliseur adaptatif : l'égaliseur transversal linéaire LTE (Linear Transversal equalizer)-LMS. En fin, nous entamons une association entre les modulations BPSK, QPSK, 16-QAM et l'égaliseur du canal adaptatif qui résultent une variation d'un grand nombre de paramètres afin d'améliorer ou optimiser les performances du système.

Les différents résultats ont été simulés en employant le logiciel MATLAB.

**Mots clés** : 5G, M-QAM, OFDM, FBMC/OQAM, EGALIZATION, LTE, LMS.

# Abstract

Wireless communications are the subject of study by a large number of researchers. This, in order to obtain a good quality of wireless communications with high transmission rates. The purpose of this memoir is to study the LTE-LMS equalizer with different modulations.

We have three main points: first we start to explain the modulations M-QAM, OFDM, FBMC/OQAM. In addition, a comparison between multi-carrier modulations (OFDM and FBMC/OQAM) from the point of view of spectral efficiency. Secondly, we explain the notion of equalization, and present an adaptive equalizer study: linear transversal equalizer LTE (Linear Transversal equalizer) -LMS. Finally, we begin an association between the BPSK, QPSK, 16-QAM modulations and the adaptive channel equalizer that result in a variation of a large number of parameters to improve or optimize system performance.

The different results were simulated using the MATLAB software.

**Keywords**: 5G, M-QAM, OFDM, FBMC/OQAM, EQUALIZATION, LTE, LMS.

## تلخيص

الاتصالات اللاسلكية هي موضوع دراسة من قبل عدد كبير من الباحثين، من أجل الحصول على نوعية جيدة من الاتصالات اللاسلكية مع معدلات نقل عالية، الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة معادلة القناة التكيفية بعدة تشكيلات، M-PSK، M-QAM، OFDM، FBMC / OQAM . بالإضافة لـ FBMC/OQAM و OFDM و M-QAM لدينا ثلاث نقاط رئيسية: أولاً نبدأ في شرح التشكيلات من وجهة نظر (FBMC/OQAM و OFDM) إلى ذلك، مقارنة بين التشكيلات متعددة الموجات الحاملة الكفاءة الطيفية.

ثانياً، نوضح فكرة المعادلة، ونقدم دراسة موازنة معادلة LTE باستخدام خوارزمية LMS، أخيراً نبدأ ارتباطاً بين التشكيلات المتعددة وموازنة القناة التكيفية التي تؤدي إلى اختلاف عدد كبير من المعلمات لتحسين أداء النظام أو تحسينه.

تم محاكاة النتائج المختلفة باستخدام برنامج MATLAB.

**الكلمات المفتاحية:** الجيل الخامس، التشكيلات، المعادلة، خوارزمية LMS، المعادلة الخطية.

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## **Chapitre 1 : GENERALITES SUR LE 5G**

1.1 Introduction .....	3
1.2 Évolution .....	4
1.2.1 Première génération (1G) .....	4
1.2.2 Deuxième génération (2G) .....	5
1.2.3 Troisième génération (3G) .....	5
1.2.4 Quatrième génération (4G) .....	6
1.3 Cinquième génération (5G).....	7
1.3.1 Exigences de cinquième génération .....	8
1.3.2 Architecture de la 5G .....	9
1.3.2.1 Le service innovant .....	9
1.3.2.2 La plate-forme de validation (Architecture réseau) .....	10
1.3.2.3 La radio Hyper-Connecté .....	11
1.3.3 MIMO massive .....	12
1.3.4 Schémas d'accès multiple .....	12
1.3.5 Méthodes duplex .....	13
1.3.6 Formes d'ondes .....	14
1.3.7 Type de modulation .....	14
1.3.8 Réseaux denses .....	15
1.3.9 La bande passante .....	15
1.3.10 Applications .....	16
1.4 Comparaison de toutes les générations de technologies mobiles.....	19
1.5 Conclusion .....	20

## **Chapitre 2: FBMC/OQAM**

2.1. Introduction .....	21
2.2. Modulation QAM .....	22
2.2.1 Modulations M-ASK par sauts d'amplitude .....	22
2.2.2 Modulation M-PSK par sauts de phase .....	22
2.2.3 Modulation M-QAM par sauts d'amplitude et de phase .....	23

2.3 Système OFDM .....	23
2.3.1 Principe de la modulation multi-porteuse .....	24
2.3.2 Interférence entre symboles (ISI) .....	26
2.4 Structure du Système FBMC/OQAM .....	26
2.4.1 Principe de traitement OQAM .....	27
2.4.2 Bancs de filtres (Analyse et synthèse) .....	29
2.4.3 Conception de filtre de prototype .....	31
2.4.4 Structure polyphasée .....	33
2.4.5 Emetteur FBMC/OQAM .....	35
2.4.6 Récepteur FBMC/OQAM .....	37
2.5 Comparaisons entre l'OFDM et FBMC .....	38
2.6 Conclusion .....	39

### **Chapitre 3 : EGALISATION**

3.1 Introduction à l'égalisation .....	40
3.2 Interférence entre symbole .....	41
3.3 La fonction d'égalisation .....	47
3.4 Critères d'optimisation .....	47
3.4.1 Egaliseur par « zero forcing » .....	47
3.4.2 Egaliseur à erreur quadratique moyenne minimale .....	48
3.4.3 Comparaison entre le critère de « EQM » et « ZF » .....	50
3.5 Types d'égaliseurs .....	50
3.6 Egaliseur linéaire .....	52
3.6.1 Egaliseur LTE .....	52
3.7 Egalisation Adaptative.....	53
3.7.1 Algorithmes Adaptative .....	53
3.7.1.1 Algorithme des moindres carrés LMS (Lest Mean Square) .....	54
3.8 Égaliseur LMS complexe .....	56
3.9 Conclusion .....	57

### **Chapitre 4 : SIMULATION ET RESULTAT**

4.1 Introduction .....	58
4.2 Canaux à phase non minimale utilisé dans la simulation .....	60
4.3 Egalisation du canal $H_1$ avec des différentes modulations .....	60



4.3.1 Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation BPSK .....	60
4.3.2 Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation QPSK .....	61
4.3.3 Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation 16-QAM .....	64
4.4 Egalisation du canal $H_2$ avec des différentes modulations .....	66
4.4.1 Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation BPSK .....	66
4.4.2 Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation QPSK .....	66
4.4.3 Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation 16-QAM .....	69
4.5 Conclusion .....	71
CONCLUSION GENERALE .....	72
BIBLIOGRAPHIE .....	

# Liste des figures

## Chapitre 1

- Figure 1.1.** Évolution de la technologie sans fil mobile.
- Figure 1.2.** Évolution vers le 5G.
- Figure 1.3.** Exigences techniques de la 5G.
- Figure 1.4.** Architecture de la 5G.
- Figure 1.5.** Centralisation du plan de contrôle dans un réseau défini par un logiciel (software defined network).
- Figure 1.6.** Illustration d'une architecture réseau CloudRAN.
- Figure 1.7.** MIMO massive.
- Figure 1.8.** Illustration de multiplexage power Domain NOMA.
- Figure 1.9.** Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.
- Figure 1.10.** Bande passante de 5G.
- Figure 1.11.** Conception unifiée divers (bandes/types) de spectre.
- Figure 1.12.** Développement des services de 5G.

## Chapitre 2

- Figure 2.1.** Principe de système OFDM.
- Figure 2.2.** Modulation OFDM.
- Figure 2.3.** Schéma générale modulateur/démodulateur OFDM.
- Figure 2.4.** Insertion du préfixe.
- Figure 2.5.** Structure générale de FBMC/OQAM
- Figure 2.6.** Schéma générale de pré/traitement OQAM.
- Figure 2.7.** Réponse fréquentielle d'un filtre prototype
- Figure 2.10.** Réponse impulsionnelle d'un filtre prototype.
- Figure 2.11.** Schéma bloc d'un banc de filtre de synthèse avec structure polyphasée.
- Figure 2.12.** Schéma bloc d'un banc de filtre d'analyse avec structure polyphasée.
- Figure 2.13.** Emission FBMC/OQAM.
- Figure 2.14.** Récepteur FBMC/OQAM
- Figure 2.15.** (a) Réponse impulsionnelle en temps et en fréquence (b) spectre de fréquence pour OFDM et FBMC / OQAM conventionnels

## Chapitre 3

**Figure 3.1.** Chaîne de transmission en présence d'égalisation.

**Figure 3.2.** Transmission des symboles dans un système idéal.

**Figure 3.3.** Effet de Trajets multiples et le retard de la propagation.

**Figure 3.4.** Interférence entre symbole.

**Figure 3.5.** Transmission en bande de base d'un signal QAM ou PAM.

**Figure 3.6.** Illustration des interférences entre symboles.

**Figure 3.7.** Différents types, structures, et algorithmes d'égaliseurs.

**Figure 3.8.** Structure d'un égaliseur transversal linéaire.

**Figure 3.9.** Egaliseur adaptatif.

**Figure 3.10.** Égaliseur de canal en bande de base complexe.

## Chapitre 4

**Figure 4.1.** Caractéristiques du canal (1) de simulation ; (a) réponse impulsionnelle ; (b) fonction de transfert ; (c) fréquence normalisée ; (d) partie réelle.

**Figure 4.2.** Caractéristiques du canal (2) de simulation ; (a) réponse impulsionnelle ; (b) fonction de transfert ; (c) fréquence normalisée ; (d) partie réelle.

**Figure 4.3.** Canal (1) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal BPSK.

**Figure 4.4.** Canal (1) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

**Figure 4.5.** Canal (1) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

**Figure 4.6.** Canal (1) diagramme de constellation (après égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

**Figure 4.7.** Canal (1) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

**Figure 4.8.** Canal (1) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

**Figure 4.9.** Canal (1) diagramme de constellation (après l'égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

**Figure 4.10.** Canal (2) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal BPSK

**Figure 4.11.** Canal (2) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

**Figure 4.12.** Canal (2) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

**Figure 4.13.** Canal (2) diagramme de constellation (après l'égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

**Figure 4.14.** Canal (2) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

**Figure 4.15.** Canal (2) diagramme de constellation (après l'égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

**Figure 4.16.** Canal (2) diagramme de constellation (après le canal ) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

# Liste des tableaux

**Tableau 1.1** Evolution des générations de téléphone et leurs caractéristiques.

# Abréviations

<b>AFB</b>	Analysis Filter Bank.
<b>AMTS</b>	Advanced Mobile Telephone System
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise.
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>BS</b>	Base Station.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.
<b>Cloud RAN</b>	Cloud Radio Access Network
<b>CP</b>	Cyclic Prefix
<b>C2R</b>	Complex to Real
<b>DFE</b>	Decision Feedback Equalizer
<b>DL</b>	Down Link.
<b>DVB</b>	Digital Video Broadcasting
<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>FBMC</b>	Filter Bank based Multi Carrier.
<b>FDD</b>	Frequency division duplex.
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform.
<b>GFDM</b>	Generalized Frequency Division Multiplexing
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>H+</b>	Dual Carrier
<b>HSDPA</b>	High Speed Downlink Packet Access.
<b>HSPA+</b>	Dual Cell High Speed Packet Access+
<b>ICI</b>	Inter-Carrier-Interference.

<b>IES</b>	Interférence Entre Symboles
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform.
<b>IG</b>	Intervalle de Garde.
<b>IMTS</b>	Improved Mobile Telephone Service)
<b>IOT</b>	Internet of Thing
<b>IP</b>	Internet Protocol.
<b>Ipv4/ipv6</b>	Internet Protocol version 4 et 6
<b>LMDS</b>	Local Multipoint Distribution Service
<b>LMS</b>	Least Mean Square
<b>LTE</b>	Linear Transversal Equalizer
<b>LTE</b>	Long Terme Evolution
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MC-CDMA</b>	Multi-Carrier Code Division Multiple Access
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MLP</b>	Multi-Layer Perceptron
<b>MLSE</b>	Maximum Likelihood Sequence Estimation
<b>MMS</b>	Multimedia Messaging Service
<b>MSE</b>	Mean Square Error (EQM : Erreur Quadratique Moyenne)
<b>NOMA</b>	Non Orthogonal Multiple Access.
<b>NFV</b>	Network Functions Virtualization
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OQAM</b>	Offset Quadrature Amplitude Modulation.
<b>PAM</b>	Pulse Amplitude Modulation
<b>P/S</b>	Parallel to serial
<b>PHYDYAS</b>	PHYSical layer for DYnamic spectrum AccesSand cognitive radio.
<b>PTT</b>	Push to Talk
<b>QAM</b>	Quadratique Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RBF</b>	Radial Basis Function
<b>RIF</b>	Réponse Impulsionnelle Finie
<b>RII</b>	Réponse Impulsionnelle Infinie
<b>RLS</b>	Recursive Least Square
<b>SCMA</b>	Sparse Code Multiple Access.
<b>SDN</b>	Software Defined Networking.
<b>SDR</b>	Software Defined Radio
<b>SFB</b>	Synthesis Filter Bank.

<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio ( <b>RSB</b> : Rapport Signal sur Bruit)
<b>S/P</b>	Serial to Parallel.
<b>TDD</b>	Time Division Duplex.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TD-SCDMA</b>	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access
<b>UFMC</b>	Universal Filtered Multicarrier
<b>UIT</b>	Union Internationale des Télécommunications
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication System
<b>UP</b>	Up Link.
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>ZF</b>	Zero Forcing
<b>1G</b>	1ère Génération.
<b>2G</b>	2ème Génération.
<b>3G</b>	3ème Génération.
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project.
<b>4G</b>	4ème Génération.
<b>4G+</b>	LTE-Advanced
<b>5G</b>	5ème Génération.



# **INTRODUCTION**

# ***GENERALE***

---

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 élevés, s'accroissant 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, 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.

La technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 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 [16]. 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 importantes) qui motive les chercheurs à développer d'autres solutions.

Notre travail trouve des applications au niveau de la couche physique. L'objectif visé par ce travail est de contribuer à des algorithmes de localisation et des techniques pour l'amélioration de performances et l'optimisation de la conservation de l'énergie dans le réseau afin de pouvoir répondre aux enjeux du 5G.

Dans le premier chapitre nous allons définir comment le monde est arrivé à la 5G. Tout d'abord, Le réseau de communication mobile de première génération (1G) était analogique et utilisé uniquement pour les appels vocaux. La deuxième génération (2G) est une

technologie numérique et prend en charge la messagerie texte. La technologie mobile de troisième génération (3G) a fourni un taux de transmission de données plus élevé, une capacité accrue et un support multimédia. La quatrième génération (4G) intègre la 3G avec Internet fixe pour soutenir Internet mobile sans fil qui est une évolution vers la technologie mobile et surmonter les limitations de 3G. Cela augmente également la bande passante et réduit le coût des ressources. Nous assistons actuellement au début d'une révolution intelligente sans précédent sous l'impulsion de la dernière-née des technologies numériques et mobiles évolués : la 5G qui regroupe plusieurs technique parmi eux la technique FBMC et le MIMO beamforming qui est une technique de formation de faisceaux pour des systèmes Multi-antennes (MIMO) qui permet l'exploitation de la diversité spatiale, constitue en effet une composante fondamentale des systèmes 4G actuels et son importance va croître avec la 5G [6].

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

Lorsque le canal est variant dans le temps les égaliseurs adaptatifs constituent une bonne solution pour lutter les interférences entre symboles. Ils sont construits à partir de filtres transverses dont les coefficients sont généralement actualisés à partir d'un algorithme du gradient ou éventuellement, des moindres carrés récursifs. Pour favoriser la convergence d'un égaliseur on utilise usuellement une séquence d'apprentissage c'est-à-dire, un préambule constitué de données connues du récepteur [28].

Le troisième chapitre explique la notion d'égalisation, et présente une étude d'égaliseur transversal linéaire LTE (Linear Transversal Equalizer), les différents critères d'optimisation et l'égalisation adaptative. Il expose une égalisation adaptative avec un égaliseur (LTE) à l'aide d'un algorithme LMS (Least Mean Square).

# Chapitre 1

## *GENERALITES SUR LE 5G*

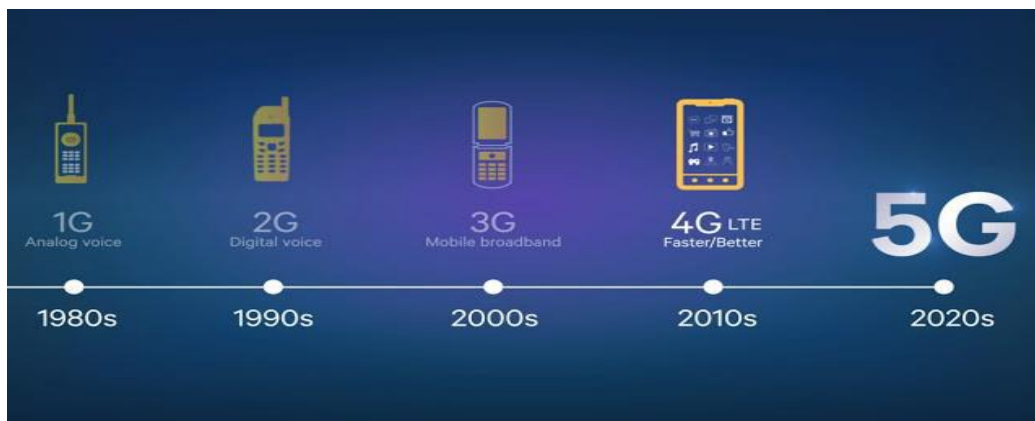
---

### **1.1. Introduction**

Au cours des vingt dernières années, les systèmes de communication mobile sans fil ont connu un changement remarquable. La génération sans fil mobile (G) fait généralement allusion à un ajustement de l'idée de cadre, de vitesse, de technologie, de fréquence, de capacité de données, de temps de latence, etc. Chaque génération possède des normes, des capacités différentes, de nouvelles techniques et de nouvelles fonctionnalités qui la séparent de la précédente. Le réseau de communication sans fil mobile de première génération (1G) était utilisé de manière analogique uniquement pour les appels vocaux. La deuxième génération (2G) est une technologie numérique et la messagerie texte prise en charge. La technologie mobile de troisième génération (3G) offre un débit de transmission de données supérieur, une capacité accrue et un support multimédia interactif. La quatrième génération (4G) intègre la 3G avec l'internet fixe pour aider l'internet mobile sans fil, ce qui constitue un progrès de la technologie mobile et dépasse les limites de la 3G. Il y a eu une augmentation de la bande passante et une réduction du coût des ressources [1]. (5G) représente la technologie mobile de cinquième génération et sera dévoilé comme une nouvelle agitation sur le marché des portables, qui changera la manière d'utiliser les téléphones cellulaires dans une bande passante très élevée. Un utilisateur n'aura jamais expérimenté une technologie aussi prestigieuse qui incorporera toutes sortes de fonctionnalités avancées et la technologie 5G sera la plus intense et la plus demandée dans les années à venir [1].

## 1.2. Évolution

La communication mobile s'est avérée bien connue ces dernières années en raison de son passage rapide de la 1G à la 5G dans le domaine de la technologie mobile. Ce changement est dû à la nécessité d'une technologie de transmission compatible avec le service et à l'augmentation importante du nombre de clients télécoms. Fondamentalement, la génération désigne la technologie de transmission et les nouvelles bandes de fréquences compatibles avec la nature des services. En 1980, le système cellulaire mobile a été introduit pour la première fois et, depuis lors, les communications mobiles ont connu d'énormes changements qui ont poursuivi leur vaste maintien en puissance [1].



**Figure 1.1.** Évolution de la technologie sans fil mobile.

### 1.2.1. Première génération (1G)

Ces téléphones ont été le premier et le premier téléphone portable à être utilisés. Il a été présenté en 1982 et achevé au milieu de 1990. Il était utilisé pour les avantages vocaux et dépendait de la technologie appelée Advanced Mobile Phone System (AMPS). La structure AMPS était modulée en fréquence et utilisait l'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) avec un canal limité à 30 kHz et avec une bande de fréquences de 824 à 894 MHz et une vitesse de 2.4 Kbps [1].

Il présente les technologies mobiles, par exemple, le système de téléphonie mobile (MTS: Mobile Telephone System), le système de téléphonie mobile avancé (AMTS: Advanced Mobile Telephone System), le service de téléphonie mobile amélioré (IMTS: Improved Mobile Telephone Service) et le Push to Talk (PTT: Push to Talk) [1].

Le principal inconvénient de la technologie 1G est qu'elle utilise des signaux analogiques plutôt que numériques, c'est un moyen moins efficace de transmettre l'information, elle a une faible capacité, un transfert problématique, une qualité vocale à besoin d'amélioration et aucune sécurité du tout puisque la voix est restituée dans les stations de radio, rendant ces appels impuissants à indésirables dans une écoute furtive par des étrangers. La 2G est donc en mesure de surmonter ces problèmes [1].

### 1.2.2. Deuxième génération (2G)

La 2G fait allusion à la deuxième génération basée sur le GSM et a été développée à la fin des années 1980. Il utilise des signaux numériques pour la transmission vocale. Le concentré fondamental de cette technologie portait sur les signaux numériques et fournissait des services permettant de transmettre du contenu et de fournir un message image à faible vitesse (en kbps). Il utilisait la bande passante de 30 à 200 KHz. Trois types de développements ont eu lieu dans le système de communication sans fil de deuxième génération, IS-54 (TDMA) en 1991, IS-95 (CDMA) en 1993 et IS-136 en 1996. Outre la 2G, la structure 2.5G utilise le domaine de la commutation de paquets et de la commutation de circuits et donne un débit de données pouvant atteindre 144 kbps, par exemple les protocoles GPRS (2.5G), CDMA et EDGE (2.75G) [1].

Les principaux points forts de la 2G (GSM) et de la 2,5G (GPRS) sont [1] La vitesse des données était de 64-144 Kbits / s, Utiliser des signaux numériques, Activer les services, par exemple, messages instantanés, MMS (messages multimédia), Offre une qualité et une capacité supérieures que la 1G [1].

La technologie GSM a été constamment améliorée pour offrir de meilleurs services, ce qui a entraîné une amélioration de la technologie de pointe entre 2G et 3G. Fournit des appels téléphoniques, Envoyer / Recevoir des e-mails, Navigation sur le Web, Téléphones cellulaires avec appareil photo, et Prendre une période de 6 à 9 minutes. Pour télécharger un 3 min. Mélodie MP3 [1].

Un signal numérique plus faible est l'un des principaux inconvénients de la technologie 2G, Requis en continu signaux numériques pour permettre aux téléphones cellulaires de fonctionner. Au cas où il n'y aurait pas de couverture réseau dans une zone donnée, les signaux numériques seraient fragiles, Nécessité d'améliorer la qualité de la transmission, Couverture inégale, Inapte à traiter des données complexes, par exemple la vidéo, Capacité du système, Les tours cellulaires ont une zone de couverture limitée, et Appels interrompus inattendus. Pour surmonter ces problèmes. La technologie 3G est en train de se développer [1].

### 1.2.3. Troisième génération (3G)

La 3G (UMTS) dépend du GSM et a été propulsée en 2000. Le but de cette technologie était d'offrir des données à haut débit. La première technologie a été améliorée pour permettre des données allant jusqu'à 14 Mbps et utilisant en outre la commutation par paquets. Il utilise un réseau sans fil large bande. Elle propose également des services de données, un accès à la TV/vidéo, ainsi que de nouveaux services tels qu'International Roaming. Il fonctionne dans une plage de 2100 MHz et a une largeur de bande de 15-20 MHz utilisée pour l'accès Internet à haute vitesse et le chat vidéo [1].

Le système mobile 3G s'appelait UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) en Europe, tandis que CDMA 2000 était le nom de la variante 3G américaine. En outre, les IMT 2000 ont reconnu une autre norme 3G de la Chine, à savoir TD-SCDMA, WCDMA est la technologie d'interface radio pour UMTS [1].

Avec la 3.5G ou 3G+ ou "HSDPA" ou "High Speed Downlink Packet Access", le débit augmente encore pour atteindre les 14.4 Mbit/s. Ce réseau est encore régulièrement utilisé en France et il recouvre presque entièrement le territoire. Avec une vitesse de transfert encore 5 fois supérieure à la 3G [2].

Le H+, aussi appelé Dual Carrier ou HSPA+ "Dual Cell High Speed Packet Access+", est encore très répandu et utilisé aujourd'hui. Il permet d'atteindre une vitesse de 42 Mbit/s soit environ 3 fois plus rapide que la 3G+ que je vous présentais juste au dessus. Cette norme a été annoncée comme la "Pré-4G", même si son débit max est bien inférieur à cette norme [2].

Les principaux points forts de la 3G sont [1] : Vitesse : 2-42 Mbit/s, Téléphones mobiles avancés, Augmentation de la bande passante et des taux de transfert de données pour obliger les applications Web et les documents vidéo, Fournit des communications plus rapides, Envoi / recevoir des e-mails expansifs, Haut débit Web / une plus grande sécurité/ vidéoconférence/ jeux 3D. Grandes capacités et capacités large bande, TV en streaming / Mobile TV / appels téléphoniques.

Le fournisseur de services doit payer le montant élevé des licences et accords 3G, le problème de la disponibilité des combinés dans quelques régions et leurs coûts, les téléphones mobiles de grande taille, les réseaux 3G ont besoin d'appareils différents et la consommation d'énergie est élevée sont les principaux inconvénients de la 3G pour surmonter cette 4G arrive [1].

#### **1.2.4. Quatrième génération (4G)**

La technologie sans fil 4G doit associer différentes technologies de réseau sans fil existantes et potentielles (par exemple, OFDM, MC-CDMA, LAS-CDMA et réseau-LMDS) afin de garantir la liberté de mouvement et l'itinérance parfaite d'une technologie à l'autre [1].

La 4G offre une vitesse de téléchargement de 100 Mbps. La 4G offre les mêmes fonctionnalités que la 3G et des services supplémentaires tels que des journaux multimédias, permettant de regarder des programmes de télévision avec plus de clarté et d'envoyer des données considérablement plus rapidement que les générations précédentes [1].

LTE (évolution à long terme) est considérée comme une technologie 4G. La 4G est en cours de création pour répondre aux exigences de qualité de service et de débit définies par les applications attendues telles que l'accès large bande sans fil, le service de messagerie

multimédia (MMS), le chat vidéo, la télévision mobile, le contenu HDTV, la diffusion vidéo numérique (DVB : Digital Video Broadcasting), des services minimaux tels que la voix et les données et différents services utilisant la bande passante.

Les principales caractéristiques de la 4G sont les suivantes [1] : Capable de fournir une vitesse de transmission de 10 Mbits / s à 1 Gbit / s, une vidéo en streaming de haute qualité, une combinaison de Wi-Fi et Wi-Max, une sécurité élevée, un système de toute sorte, en tout lieu, services multimédias, faible coût par bit, maintenir de la consommation de la batterie.

Obtenir des informations des personnes illégalement devient plus facile, la technologie 4G implique la possibilité d'interférences bien que minimes, elle peut être attaquée (fréquences de brouillage) et l'invasion de la vie privée a augmenté. Le consommateur est obligé d'acheter un nouvel appareil compatible avec la 4G, Nouvelles fréquences signifiant de nouveaux composants dans les tours de téléphonie cellulaire, Prix de données plus élevés pour le consommateur, Votre équipement actuel ne peut pas être compatible avec le réseau 4G, Il a différentes bandes de réseau pour différents téléphones Il est coûteux et difficile à mettre en œuvre. La technologie 4G nécessite une infrastructure d'exploitation coûteuse. C'est ce que reflètent les eNodeB (points d'accès) et principalement les EPC's (passerelles ou routeurs). La 4G est optimale pour les débits de données, mais pas nécessairement la meilleure solution pour les services vocaux. , Certains de ces services sont déchargés vers les technologies cellulaires Wi-Fi ou 3G / GSM sur votre téléphone. Pour surmonter les inconvénients ci-dessus de la 4G, la 5G arrive [1].

### 1.3. Cinquième génération 5G



**Figure 1.2.** Évolution vers le 5G

La technologie de communication sans fil a considérablement évolué au fil des ans grâce à la recherche et à l'innovation. Le temps est venu de pouvoir connecter simultanément diverses technologies sans fil, réseaux et applications. Cette dernière technologie s'appelle 5G. Le système sans fil de cinquième génération (ou 5G en abrégé) est désormais la

prochaine génération de systèmes de communication sans fil. C'est la prochaine phase majeure des normes de télécommunications mobiles au-delà de la 4G actuelle. La 5G nous déplace au-delà de la conception de réseaux pour les périphériques mobiles uniquement vers des systèmes qui connectent différents types de périphériques fonctionnant à grande vitesse [3].

La technologie 5G offre certaines capacités de spectre uniques, dont la capacité d'utiliser des bandes autorisées et non autorisées et de partager un spectre, permettant ainsi d'améliorer l'utilisation des bandes à haute fréquence (plus de 24 GHz), des bandes intermédiaires (1 à 6 GHz), et des sous-bandes ou bandes à faible fréquence [3]. Les bandes de 3 300 à 4 200 MHz et de 4 400 à 4 990 MHz comprises dans les bandes 5G inférieures sont d'un intérêt particulier. Elles sont déjà utilisées dans des essais sur la technologie 5G en Chine. Les bandes supérieures incluent 26, 28, 38 et 42 GHz, lesquelles sont envisagées pour le déploiement rapide de la technologie 5G aux États-Unis, en Chine et en Europe. Les autres bandes d'intérêt incluent 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,5 GHz, 2,1 GHz, 2,3 GHz et 2,6 GHz [4].

Les principales caractéristiques de la 5G comprennent un débit élevé, une efficacité du spectre améliorée, une latence réduite, une meilleure prise en charge de la mobilité et une densité de connexion élevée. Il prend en charge le multimédia interactif, la voix, la vidéo, Internet et d'autres services à large bande. Pour prendre en charge l'augmentation des besoins en débit de la 5G, un nouveau spectre a été assigné aux bandes 5G en mmWave. La 5G utilisera plusieurs entrées multiples (MIMO) pour augmenter considérablement la capacité du réseau [3].

Bien que la 5G ne soit pas attendue avant 2020, un nombre croissant d'entreprises investissent maintenant et créent des produits 5G. Le développement de la nouvelle norme sans fil pour mobiles est mené par des sociétés telles qu'Intel, Qualcomm, Nokia, Ericsson, BT, Verizon, AT & T et Samsung [3].

### 1.3.1. Exigences de la cinquième génération

La technologie 5G repose sur 8 exigences techniques [5] :

- Jusqu'à 10 Gbit/s de débit de données → de 10 à 100 fois plus que les réseaux 4G et 4,5G
- 1 milliseconde de latence
- 1 000 fois plus de bande passante par unité de surface
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface (par rapport à la 4G LTE)  $10^6$  (par km<sup>2</sup>).
- 99,999 % de disponibilité
- 100 % de couverture
- 90 % de réduction en utilisation d'énergie du réseau
- Jusqu'à 10 ans de durée de vie de la batterie pour les appareils IoT à faible-consommation



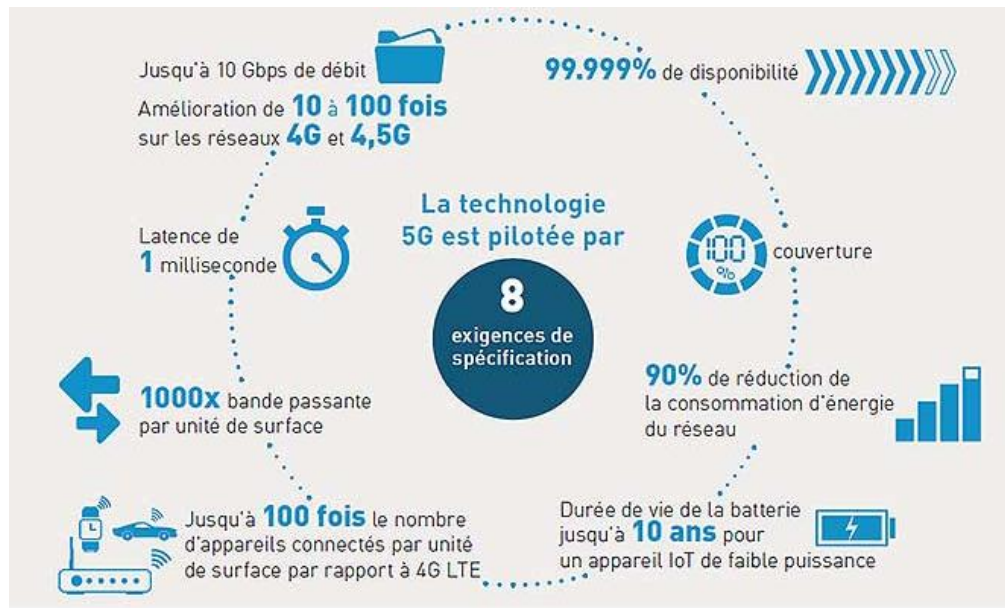


Figure 1.3. Les exigences techniques de la 5G.

### 1.3.2. Architecture de la 5G

L'architecture 5G est principalement composée de trois couches horizontales, à savoir « l'activation de service innovante », « la plate-forme d'activation » et « la radio hyper-connectée », que nous décrivons dans cette section en détail [6].

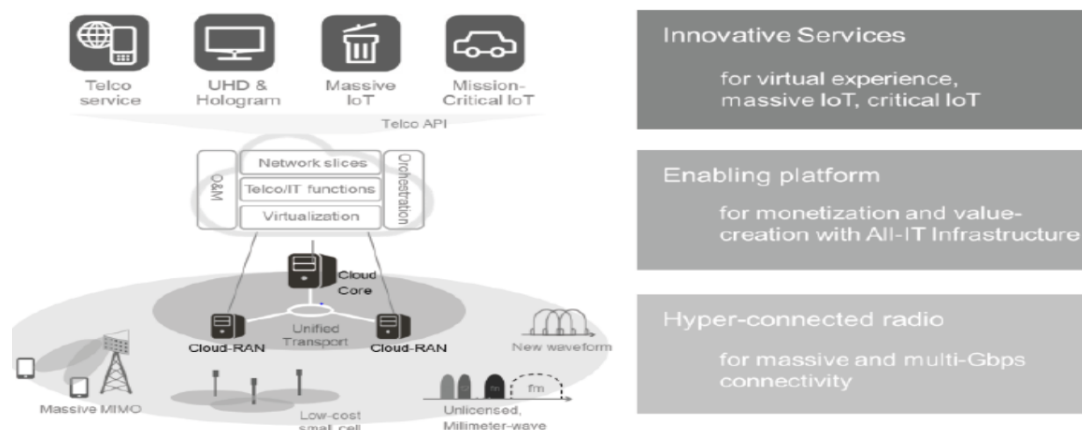


Figure 1.4. L'architecture de la 5G.

#### 1.3.2.1. Le service innovant

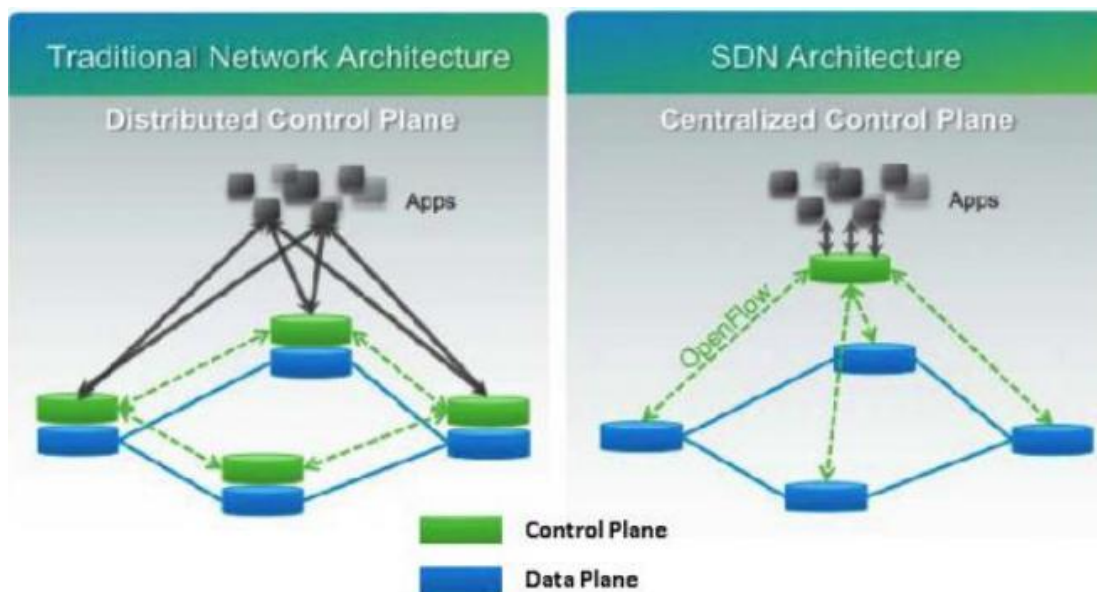
Est la couche supérieure qui inclut des services 5G innovants. Basé sur des capacités d'infrastructure 5G différenciées, les services 5G seront en mesure d'offrir une expérience utilisateur hautement fiable et immersive. En particulier, le streaming vidéo en ultra-haute définition finira par devenir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

bande passante suffisante et la grande fiabilité offerte par la 5G faciliteront l'émergence de services de contrôle de robots à distance et de services d'Internet des objets (IoT) essentiels à la mission [6].

### 1.3.2.2. La plate-forme de validation (Architecture réseau)

Est la couche intermédiaire qui crée des valeurs significatives et centrées sur le service pour prendre en charge la couche supérieure de « service innovant » en transformant correctement les éléments mécaniques et disjoints.

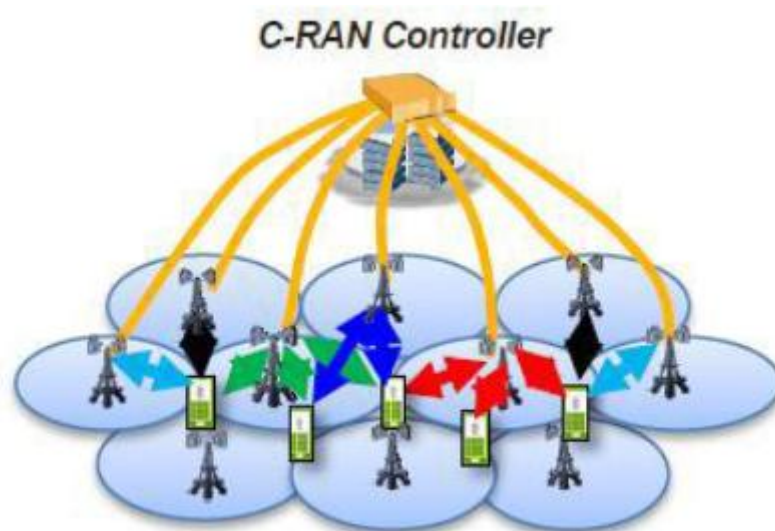
Réseaux sous-jacents à une infrastructure orientée services. Il utilise deux activateurs clés pour effectuer cette tâche. L'un est la virtualisation des fonctions réseau (NFV) et le réseau SDN (Software Defined Networking), qui virtualisent l'infrastructure et les services pour offrir toujours plus de souplesse, d'intelligence et d'ouverture, sont l'avenir des télécommunications [6].



**Figure 1.5.** Centralisation du plan de contrôle dans un réseau défini par un logiciel (Software Defined Network).

- Le **SDN** : a pour objectif de dissocier la partie contrôle d'un réseau de sa partie opérationnelle, ces deux parties étant traditionnellement liées et distribuées (dernière figée) dans le réseau. Le contrôle du réseau, autrefois dévolu à des composants matériels spécialisées et non évolutif, est centralisé sous forme de logiciel sur des serveurs plus puissants et affranchis (en théorie) des spécifications des équipementiers. Cela permet de déploiement de services à forte valeur ajoutée (équilibrage de charge, routage intelligent, configuration dynamique ...) dans des environnements hétérogènes [6].

- Le **NFV** : complémentaire du **SDN**, a pour l'objectif de virtualisation, c'est-à-dire remplacer par du logiciel sur un serveur, le but est d'accélérer les déploiements et permettre des évolutions rapides [6].
- **CloudRAN** : cette fonctionnalité, connue aussi sous le nom de *centralized-RAN*, implique une architecture réseau très différente de ce qui se fait actuellement. C'est une évolution du **SDN** : les unités de traitement du signal des stations de base, actuellement placées au niveau de la station elle-même, sont déportées dans le cloud et centralisées ; elles communiquent avec les têtes de réseau, situées au plus proche de l'antenne, via un réseau fibre optique (technologie *Radio over fiber*). Cette centralisation permet une vision d'ensemble de toutes les stations déployées et de coordonner le traitement de signal et la gestion des interférences entre cellules et terminaux [7].



**Figure 1.6.** Illustration d'une architecture réseau CloudRAN.

L'autre est un ensemble bien défini d'interfaces de programmation d'application (API), qui offre la possibilité d'automatiser le réseau en interne pour un réseau automatisé.

### 1.3.2.3. La radio Hyper-Connecté

Est la couche inférieure qui peut fournir une quantité massive de données à la couche "Enabling Platform" d'une manière très efficace et transparente. En raison de l'énorme quantité de données de transmission et des exigences de latence strictes, cette couche inclura non seulement les technologies de réseau radio existantes (à la fois telles quelles et évoluées), mais aussi de nouvelles technologies de réseau radio. Il est nécessaire de développer une gamme de technologies capables d'améliorer le fractionnement des cellules, l'efficacité spectrale, la bande passante de la fréquence du canal et l'efficacité du fonctionnement du réseau [6].

- ❖ Il y a Plusieurs technologie, parfois concurrent, sont en cours d'étude par les organismes de recherche. Ceux-ci inclus :

### 1.3.3. 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 à 6Ghz). L'attrait l'utilisation du massive MIMO est double [6] :

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

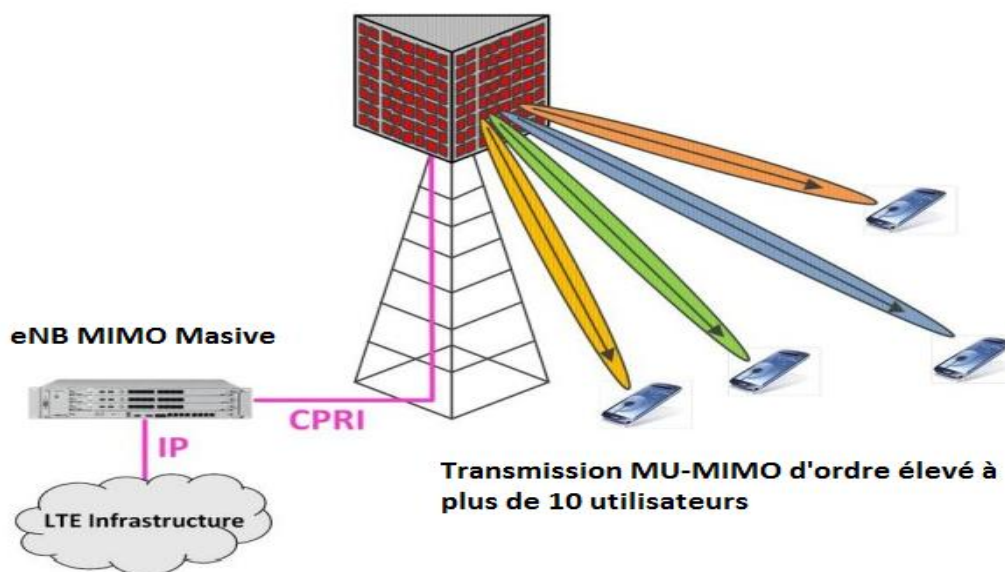
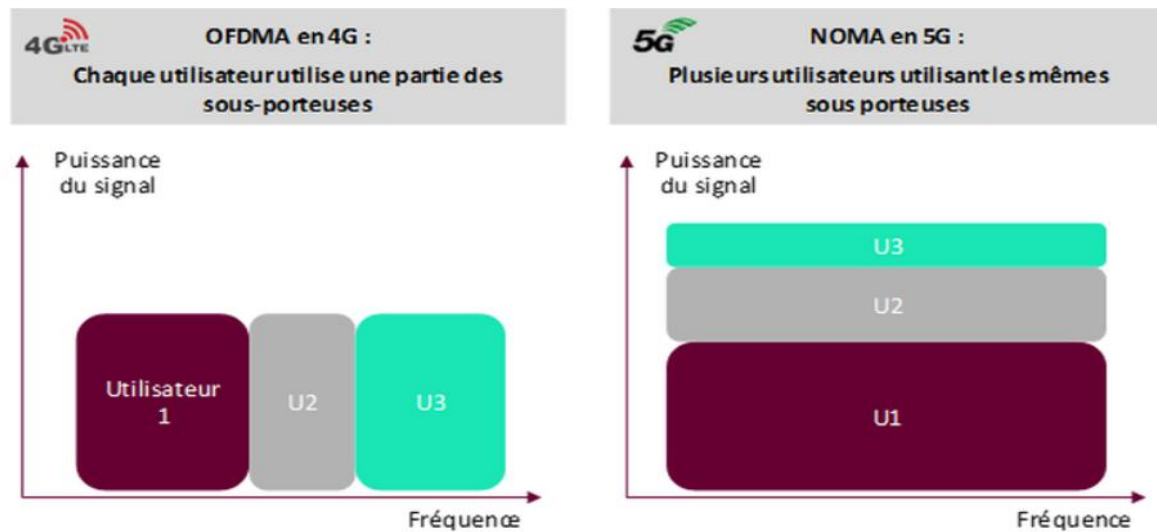


Figure 1.7. MIMO massive.

### 1.3.4. Schémas d'accès multiple

- **Multiplexage NOMA** : LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilise, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné. Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G par rapport à la 4G des méthodes de multiplexage non orthogonale, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, CDMA) [6].



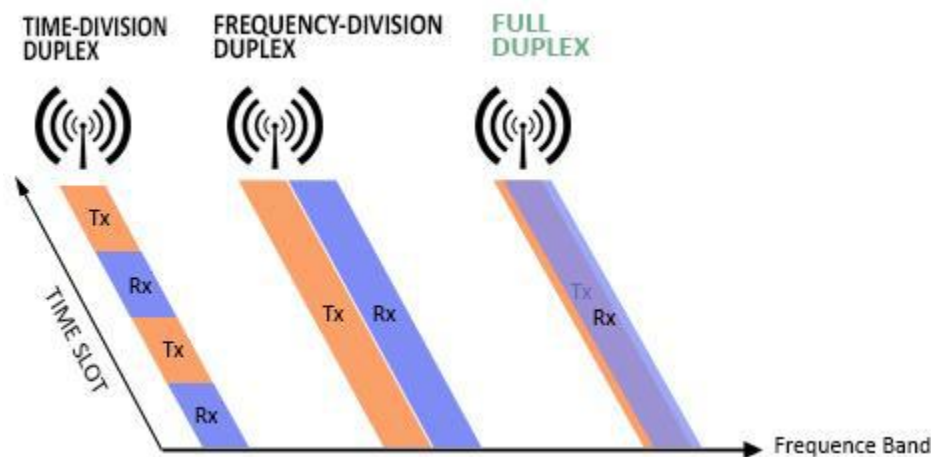
**Figure 1.8.** Illustration de multiplexage power Domain NOMA

### 1.3.5. Méthodes duplex

Pour les communications mobiles, il est important de pouvoir communiquer simultanément ou virtuellement dans les deux sens [6].

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 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. Et des 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 reporté sur même canal avec même fréquence. Les canaux sont relativement courts et ce fait la transmission dans les deux directions est pratiquement instantané.

- 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.



**Figure 1.9:** Illustration du full-duplex, comparé au FDD et TDD.

### 1.3.6. Formes d'ondes

Bien que l'**OFDM** nécessite l'utilisation d'un préfixe cyclique mais il a eu un grand succès et présente encore de nombreux avantages. Maintenant que la 5G est étudiée, il y a une excellente opportunité de considérer les formes d'onde optimales qui seront utilisées jusqu'à au moins 2040 [6].

Quelques formes d'ondes 5G à l'étude [6] :

- **FBMC** : son principe de base est de diviser le spectre de fréquence en plusieurs sous-porteuses qui sont très étroites et 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-bandes 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 porteurs ne sont pas orthogonaux entre eux. GFDM fournit un meilleur contrôle des émissions hors bande et réduit le rapport puissance/puissance moyenne.

### 1.3.7. 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 l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, via des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation peut atteindre 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 [6].

### 1.3.8. Réseaux denses

La réduction de la taille des cellules permet une utilisation beaucoup plus efficace du spectre disponible. Des techniques permettant de garantir que les petites cellules du macro-réseau sont déployées en tant que femtocells (des petites cellules) qui peuvent fonctionner de manière satisfaisante [6]. Les petites cellules seront un complément pour améliorer l'efficacité des communications dans ces zones.

Les points d'accès de type petite cellule et la technologie massive MIMO d'antennes multiples sont deux voies prometteuses pour réaliser des déploiements denses de connexions qui devraient permettre d'améliorer considérablement les débits et l'efficacité énergétique [8].

### 1.3.9. 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 trajet plus élevée, 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 [9].

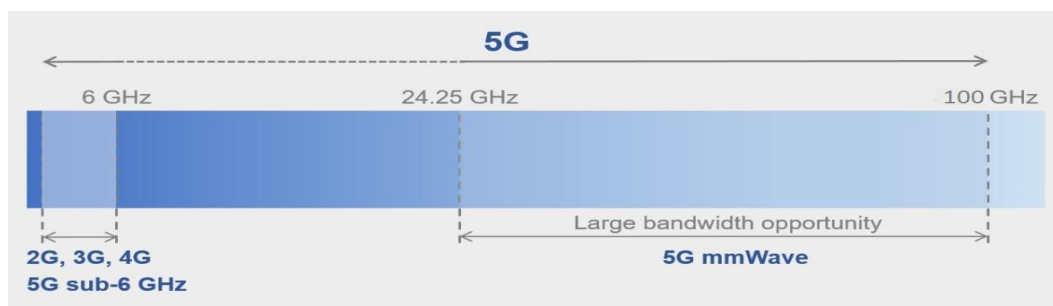
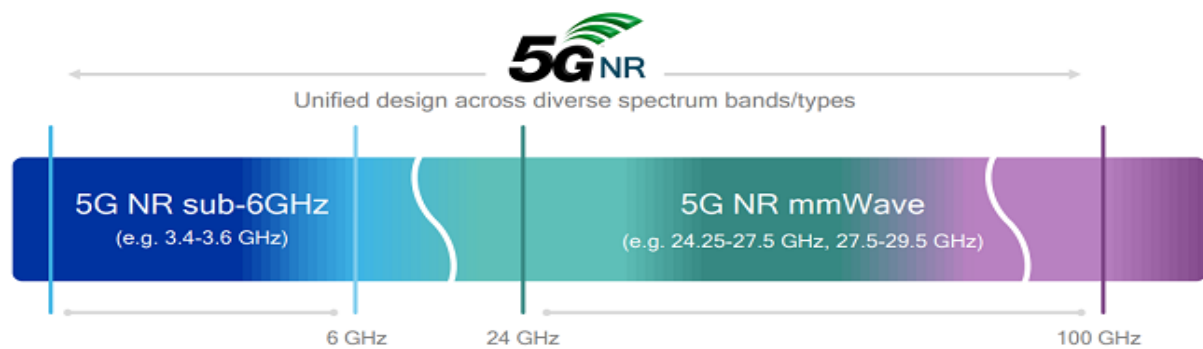


Figure 1.10. Bande passante de la 5G.

- **5G NR : New Radio** est une nouvelle norme pour les réseaux 5G ultra rapides. Il utilisera un spectre sans licence inférieur à 6 GHz et supérieur à 6 GHz (gamme millimétrique). La 5G NR est conçu pour prendre en charge un réseau hautement évolutif capable de futures améliorations [10].



**Figure 1.11.** Conception unifiée divers (bandes/types) de spectre

- **Bandes millimétriques :** Il s'agit tout simplement des fréquences supérieures à 6GHz qui n'ont encore jamais pris pour déploiement des 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 leurs utilisation impose le développement de toutes les technologies nécessaires, miniaturisés bas cout et avec une consommation énergétique compatible avec des terminaux portable (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 mètre, Chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de 'beamforming' (MIMO) [6].

### 1.3.10. Applications

La technologie 5G est la technologie sans fil de cinquième génération, qui est dans sa phase de développement, et devrait être commercialisé 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 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 [11].



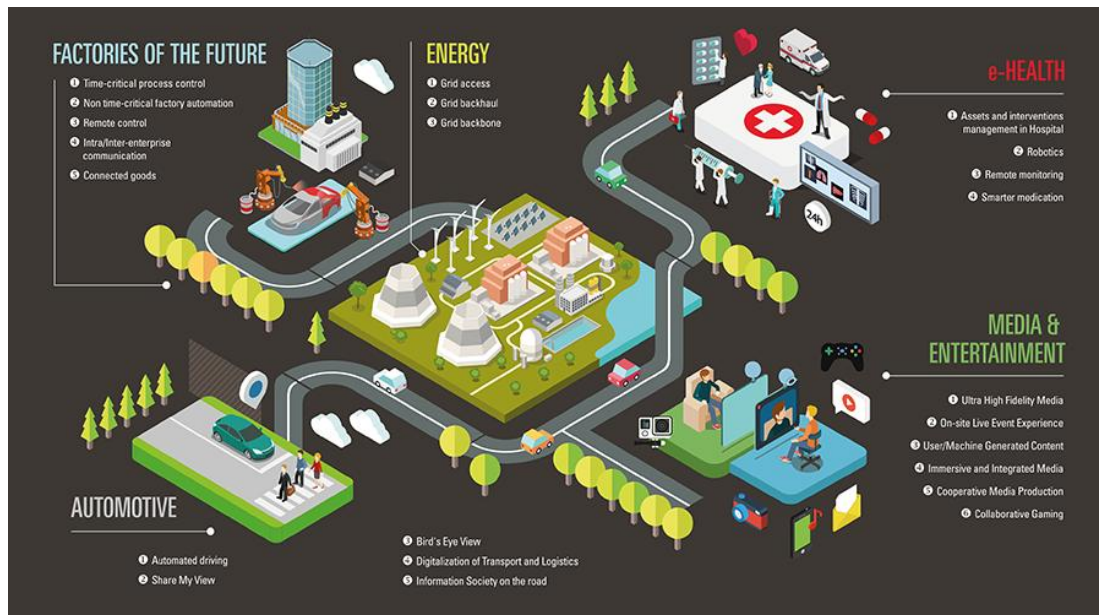


Figure 1.12 : Développement des services de 5G

- 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 [12].
- 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 [12].
- Applications vidéo HD :** Des ondes millimétriques peuvent être utilisées pour transmettre sans fil des vidéos UHD (Ultra Haute Définition) 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 [11].

- **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 [11].
- **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 [11].

#### 1.4. Comparaison de toutes les générations de technologies mobiles [13].

Génération → Fonctionnalités ↓	1G	2G	3G	4G	5G
Déploiement	1970-1980	1990-2001	2001-2010	2011	2015- à partir de 2020
Débits de données	2Kbps	14.4-64Kbps	2Mbps	200Mbps à 1Gbps	1Gbps et plus haut
La technologie	technologie cellulaire analogique	technologie cellulaire numérique : -bande étroite numérique. -données de circuit -données par paquets	haut débit numérique : - données par paquets -CDMA -UMTS -EDGE	haut débit numérique données par paquets : -WiMax LTE -Wifi	Wwww  LAN PAN MAN WLAN
Service	-Service vocal analogique - pas de service de données	voix numérique avec une grande clarté SMS, MMS données empaquétées de plus grande capacité	streaming audio / vidéo amélioré. vidéo conférence support Navigation sur Internet à des vitesses plus élevées Prise en charge IPTV support	Améliorés Audio, vidéo Streaming Téléphonie IP HD mobile TV	Dynamique Information accès appareils portables. avec toutes les capacités.
Commutation par Multiplexage	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Réseau Central	PSTN	PSTN	Packet N/W	Internet	Internet
Normes	MTS AMTS IMTS	2G : GSM 2.5 : GPRS 2.75 : EDGE	IMT-2000 3.5G-HSDPA 3.75G-HSUPA	Un seul standard unifié LTE WiMAX	Un seul standard unifié
Normes WEB		www	www(IPv4)	www(IPv4)	www(IPv6)
Hand-off	Horizontale	Horizontale	Horizontale et verticale	Horizontale et verticale	Horizontale et verticale
Shortfalls	faible capacité transfert peu faible mauvaise liaison vocale, moins sécurisé	les signaux numériques dépendaient de l'emplacement et de la proximité, nécessitant des signaux numériques puissants pour aider les téléphones mobiles	Besoin d'accommoder une plus grande capacité de réseau	En cours de déploiement	Pas encore a implémenté

**Tableau 1.1:** Evolution des générations de téléphone et leurs caractéristiques.

## **1.5. Conclusion**

Ce chapitre comporte deux parties, dans la première partie nous avons abordé à les différents générations de la téléphoné, ces caractéristiques et ces carences. Et dans la deuxième nous avons expliqué la 5<sup>ème</sup> génération précisément.

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

Les exigences 5G couvrent les considérations de bout en bout, y compris les exigences relatives aux utilisateurs, aux systèmes, aux services améliorés, à la gestion et à l'exploitation, aux dispositifs et aux modèles commerciaux.

Dans le deuxième chapitre, nous allons voir la technique de modulation FBMC/OQAM.

# Chapitre 2

## *FBMC/OQAM*

---

### 2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons définir une nouvelle technologie de transmission principale pour la prochaine communication sans fil standard 5G qui s'appelle FBMC (filtre Bank multi-carrier). Elle est aussi considérée comme une suite ou plutôt une alternative au fameux multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM).

L'OFDM utilise le préfixe cyclique (CP) 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 conçus.

En effet, la FBMC utilise un filtre de prototype et un schéma de modulation différents que l'OFDM pour améliorer ses points faibles.

## 2.2. Modulation QAM

On s'intéresse dans cette section aux modulations M-aires QAM.

On appelle modulations M-aires, les modulations utilisées pour des sources à M symboles différents. En général, ces M symboles proviennent du groupement de k bits, avec  $M = 2^k$ . Dans ce cas, la durée d'un symbole  $T_s$  est égale à k fois la durée d'un bit  $T_b$ ,  $T_s = kT_b$ . Le rythme des symboles est appelé rythme baud, ou vitesse de modulation. Le rythme baud est k fois plus petit que le rythme binaire [14].

Les modulations QAM sont des modulations par saut d'amplitude ou de phase ou d'amplitude et de phase combinées. Quand seule l'amplitude de la porteuse porte l'information du symbole émis, il s'agit d'une modulation ASK (Amplitude Shift Keying). On utilise le terme PSK (Phase Shift Keying) quand l'information n'est transmise que par des sauts de phase. L'expression QAM (Quadrature Amplitude Modulation) regroupe les trois possibilités [14]:

### 2.2.1. Modulations M-ASK par sauts d'amplitude

Dans une modulation M-ASK, à chaque symbole  $s_i$  (choisi parmi M symboles) est associée une amplitude  $A_i$ , pour le symbole  $S_i$  émis dans l'intervalle  $[kT_s, (k+1)T_s]$ , on émet le signal  $S_i(t) = A_i s(t - kT_s) \cos(2\pi f_c t)$ , où  $s(t)$  est une impulsion d'énergie finie. Le cas le plus simple correspond à une impulsion  $s(t)$  rectangulaire de durée  $T_s$ . On appelle aussi cette modulation : modulation PAM [14].

Le signal modulé ASK s'écrit :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k s(t - kT_s) \cos(2\pi f_c t) \quad (2.1)$$

Où  $a_k$  représente l'amplitude  $A_i$  émis dans l'intervalle k,  $f_c$  est la fréquence porteuse.

### 2.2.2. Modulation M-PSK par sauts de phase

Dans une modulation M-PSK, à chaque symbole  $s_i$  est associée une phase  $\Phi_i$ . Pour le symbole  $S_i$  transmis dans l'intervalle  $[kT_s, (k+1)T_s]$ . On émet le signal  $S_i(t) = s(t - kT_s) \cos(2\pi f_c t + \Phi_i)$ .

Le signal modulé M-PSK s'écrit :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \cos(2\pi f_c t + \Phi_k) \cdot s(t - kT_s) \quad (2.2)$$

Où  $\Phi_k$  représente la phase  $\Phi_i$  émise dans l'intervalle  $k$ ,  $f_c$  est la fréquence porteuse.

### 2.2.3. Modulation M-QAM par sauts d'amplitude et de phase

Pour une modulation M-aires d'amplitude et de phase combinée, on associe à chaque symbole  $S_i$ , une amplitude  $A_i$  et une phase  $\Phi_i$ . Pour le symbole  $S_i$ , transmis dans l'intervalle  $[kT_s, (k+1)T_s]$ , on émet le signal  $S_i(t) = A_i s(t - kT_s) \cos(2\pi f_c t + \Phi_i)$ , de durée  $T_s$ . Le signal modulé à M niveaux d'amplitude et de phase, souvent appelée M-QAM et parfois quadrature PAM, s'écrit :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \cos(2\pi f_c t + \Phi_k) \cdot s(t - kT_s) \quad (2.3)$$

Où  $a_k$  et  $\Phi_k$  représentent l'amplitude  $A_i$  et la phase  $\Phi_i$  émises dans l'intervalle  $k$ ,  $f_c$  est la fréquence porteuse.

## 2.3. système OFDM

OFDM est une technique de transmission de données analogiques apparue dans les années 60. Pour émettre un signal, OFDM divise une bande de fréquence en plusieurs sous canaux appelés « porteuses » espacés par des zones de taille fixes (intervalle de garde).

Cette technique divise la bande du système en un grand nombre de porteuse individuelles appelés sous-porteuse, ces dernières sont dites orthogonale car pour une transmission idéale, un symbole transmis sur une sous porteuse peut être démodulé sans interférence de la part des sous porteuse adjacentes.

D'un point de vue implémentation numérique, les systèmes OFDM transmettent les données par blocs : le flux original de donnée de débit  $R$  est multiplexé en  $N$  flux parallèles de débit  $R/N$ . Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises sur  $N$  canaux différents.

Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuses, les schémas OFDM transmettent les données par bloc en introduisant aux informations utiles de la redondance (appelée intervalle de garde) dont la structure cyclique permet, à l'aide de transformées de Fourier, une inversion simple (scalaire) du canal de propagation [15] [16].

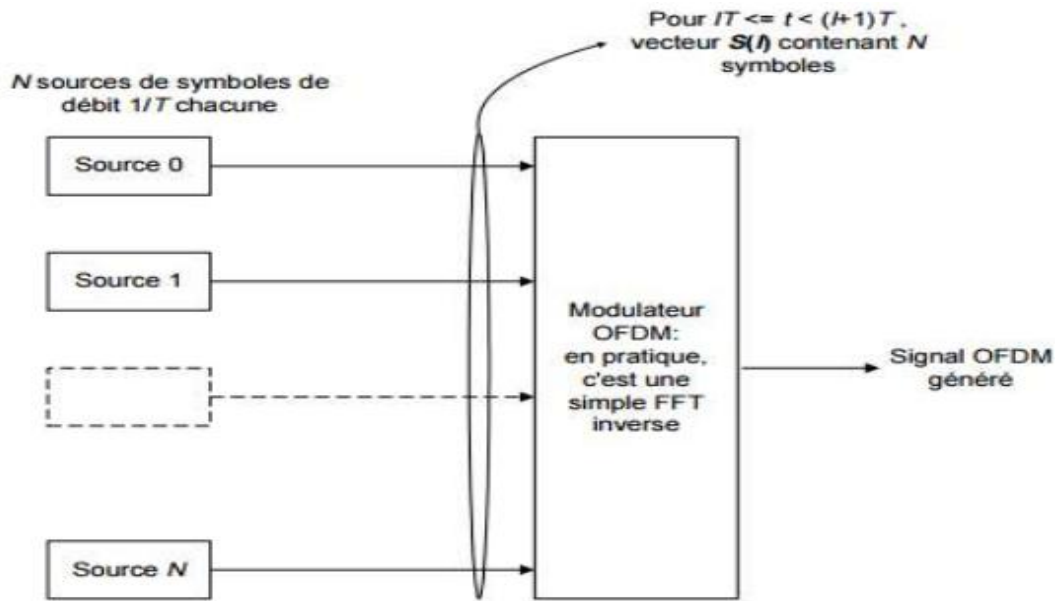


Figure 2.1. Principe de système OFDM.

### 2.3.1. Principe de la modulation multi-porteuse

Le principe de la modulation multi-porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur  $N$  porteuses modulées à un débit de  $R_s/N$ . Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation.

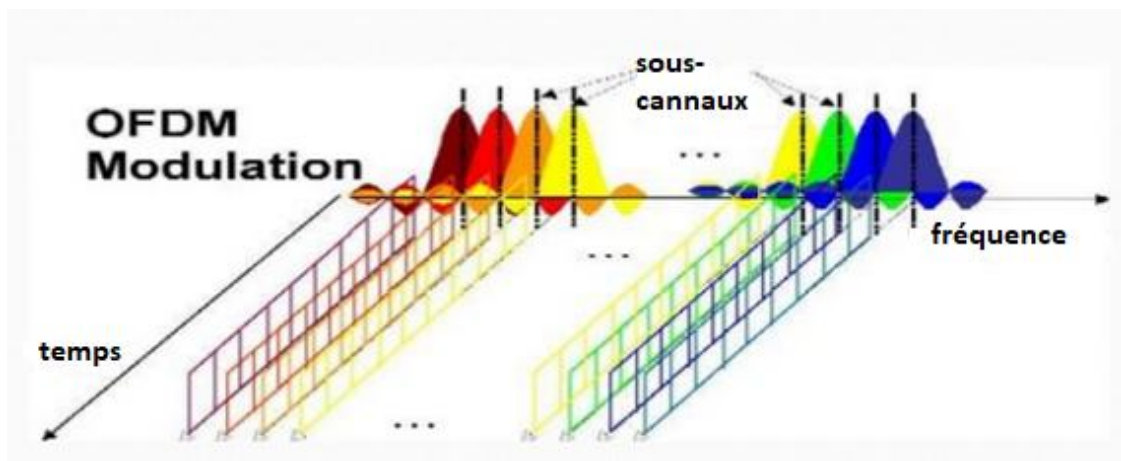


Figure 2.2. Modulation OFDM.

Le schéma de principe d'un modulateur OFDM illustre dans la figure 2.2 en bande de base: après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre, les symboles complexes  $\{X_l\}$   $l=1,2,\dots$  sont successivement regroupés par blocs de  $N$  (conversion série/parallèle), mis en forme



sur une durée  $T$  (forme d'onde  $g(t)$ ) puis envoyés sur les  $N$  porteuses  $\{fn\}_{n=-N/2...N/2-1}$  afin de former le signal de sortie.

Durant l'intervalle du temps  $[iT, (i+1)T[$  le signal OFDM généré s'écrit :

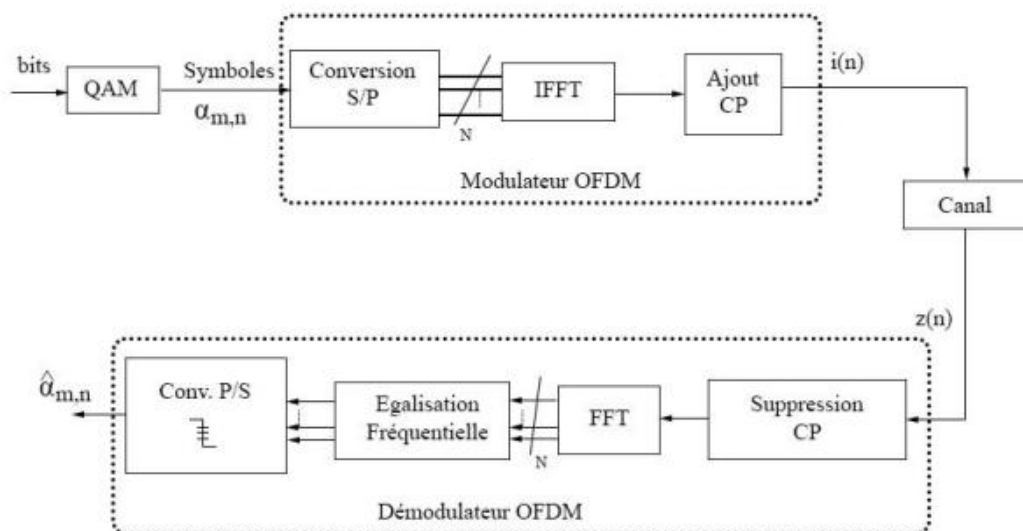
$$S_i(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} \quad (2.4)$$

Il représente le  $i^{\text{ème}}$  symbole OFDM, tandis que les  $\{X_{i,n}\}_{n=-N/2...N/2-1}$  représentent les  $N$  symboles complexes  $\{X_l\}$  qu'il transporte.

Le signal reçu s'écrit de façon suivante :

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \quad (2.5)$$

Où  $n_n(t)$  est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la  $n$ -ième porteuse.



**Figure 2.3.** Schéma générale modulateur/démodulateur OFDM.

Les symboles de flux de bits qui passent par la modulation QAM sont envoyés par le convertisseur série/ parallèle où les bits modulés seraient disposés d'une manière telle qu'il serait alimenté en entrée du bloc IFFT. Nous obtiendrons à la sortie, des signaux modulés et multiplexés qui sont dans le domaine temporel. Cependant, pour éviter complètement l'ISI et ICI, on ajoute un intervalle de garde entre les symboles OFDM adjacents. La séquence résultante va passer à travers un convertisseur numérique/analogique, qui sera

transmis à travers le canal radio mobile. La sortie du canal est obtenue après convolution du signal de sortie avec la réponse impulsionnelle du canal et l'addition du bruit.

Le signal reçu va passer à travers un convertisseur analogique/numérique. Puisque l'ISI existe seulement dans les premiers échantillons de la séquence reçue, ces échantillons sont enlevés avant une démodulation multi-porteuse. La partie des échantillons libre d'ISI est démodulé par inverse OFDM en utilisant l'FFT. A la sortie, on récupère le flux de données initial après une conversion parallèle-série [16].

### 2.3.2. Interférence entre symboles (ISI)

Les signaux OFDM sont transmis à des intervalles égaux, et ils doivent parcourir un certain trajet pour atteindre le récepteur. Dans le cas d'un canal multi-trajets, un symbole transmis prend différents retards pour arriver au récepteur à cause des différents chemins de propagation, ce qui cause des étalements temporels. La prolongation de la durée des symboles fait chevaucher les symboles entre eux, ce qui donne naissance à l'interférence entre symboles [17]. L'insertion de ce préfixe est présentée par la figure ci-dessus :

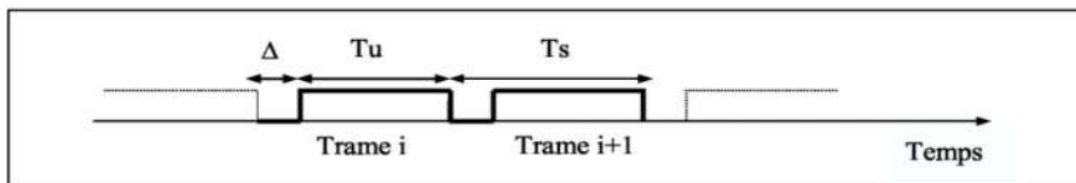


Figure 2.4 : insertion du préfixe.

Le préfixe est ajouté à l'émission après l'IFFT, puis enlevé à la réception avant le module de la FFT.

Où  $\Delta$  est l'intervalle de garde,  $T_u$  est l'intervalle du symbole émis,

Tel que :  $T_s = \Delta + T_u$

## 2.4. 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 réelles et la partie imaginaire d'un symbole QAM donné. Si la partie imaginaire est retardée de  $T/2$  sur un sous-porteuse, c'est la partie réelle qui sera retardée sur la sous-porteuse suivante [18].

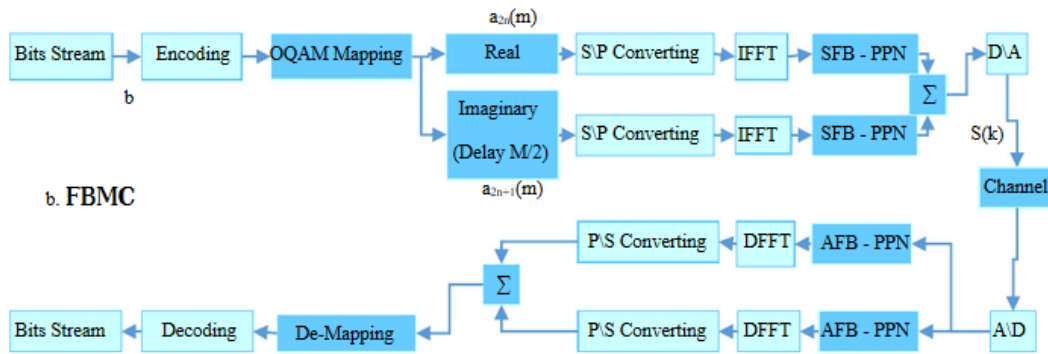


Figure 2.5. Structure générale de FBMC/OQAM.

### 2.4.1. 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 [18] [6].

#### Bloc pré/traitement OQAM

La figure ci-dessus illustre le principe de pré/traitement OQAM qui se compose de deux opérations [16] [17].

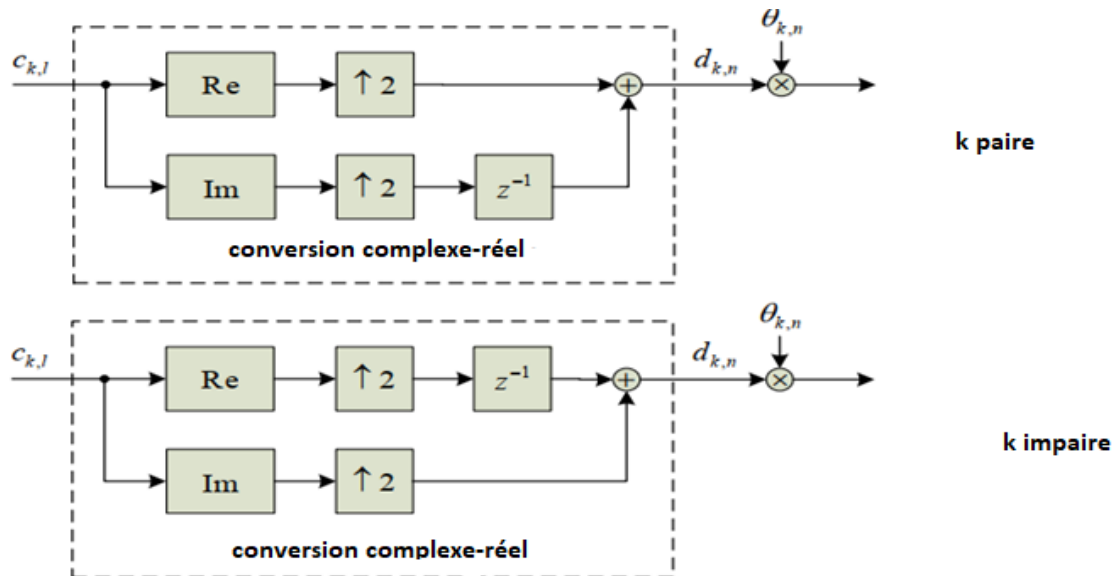


Figure 2.6. Schéma générale de pré/traitement OQAM.

**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  $d_k[n+1]$  qui transmise à un débit  $1/T$ , cette opération appelle « conversion complexe/réelle » [18] [6]

Tel que :

$$d_k[n] = \begin{cases} \mathbf{R}_e(C_k[l]) & \text{si } k \text{ paire} \\ \mathbf{I}_m(C_k[l]) & \text{si } k \text{ impaire} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$d_k[n+1] = \begin{cases} \mathbf{I}_m(C_k[l]) & \text{si } k \text{ paire} \\ \mathbf{R}_e(C_k[l]) & \text{si } k \text{ impaire} \end{cases} \quad (2.7)$$

Avec :

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

**La deuxième opération** : c'est une multiplication par  $\theta_k[n]$  afin de maintenir les symboles orthogonaux.

Tel que :

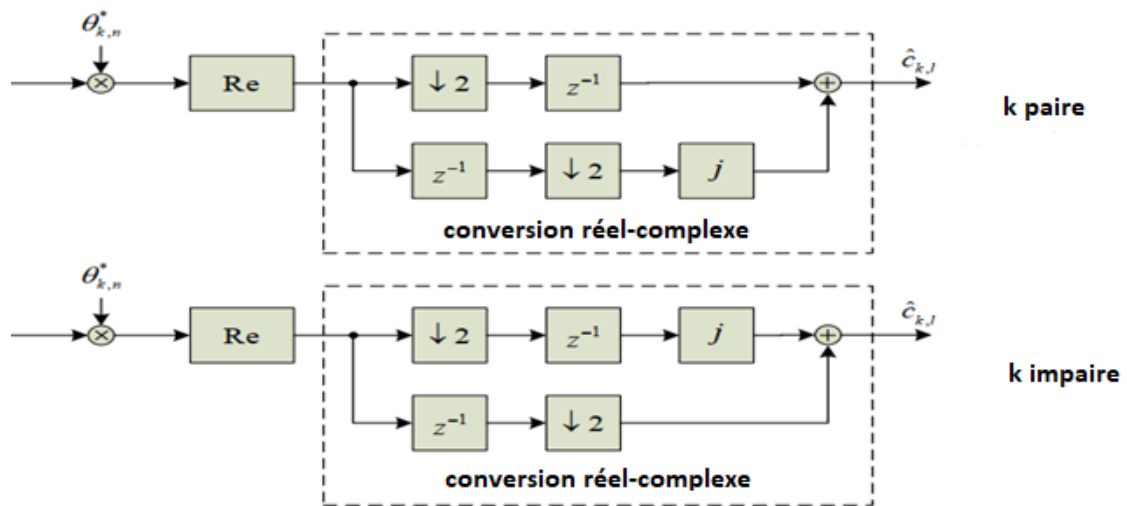
$$\theta_k[n] = J^{k+n}$$

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

$$X_k[n] = d_k[n] \cdot \theta_k[n] \quad (2.8)$$

### **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 [18] [6].



**Figure 2.7.** 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.

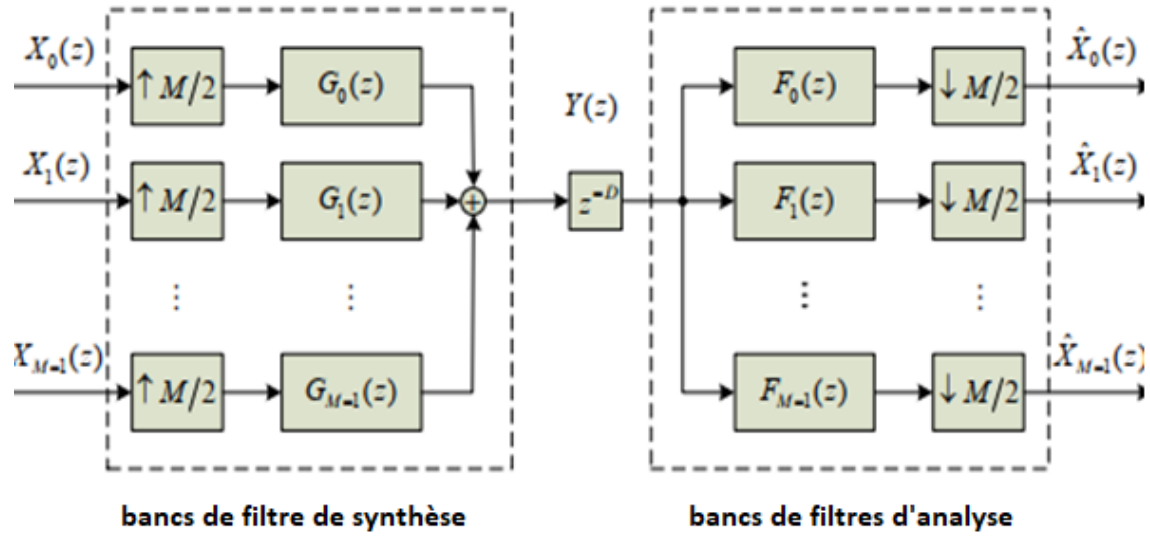
**La deuxième opération :** c'est la conversion réelles/complexe dans laquelle deux symboles réelles successifs forment un symbole de valeur complexe (l'un des symboles est multiplié par  $j$ )

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

$$\hat{C}_k(l) = \begin{cases} \hat{d}_k[n] + j\hat{d}_k[n+1] & \text{si } k \text{ paire} \\ \hat{d}_k[n+1] + j\hat{d}_k[n] & \text{si } k \text{ impaire} \end{cases} \quad (2.9)$$

#### 2.4.2. bancs de filtres (Analyse et synthèse)

Un banc de filtre est un ensemble de  $M$  filtres qui traite  $M$  signaux d'entrée pour produire  $M$  signaux de sorties, généralement Les bancs de filtres d'analyse et de synthèse sont associés, l'un décompose un signal pour appliquer un traitement à chaque signal de sous-bande, et l'autre recombine les signaux de sous-bandes traités pour construire le signal modifié [20].



**Figure 2.8.** Bancs de filtres de synthèse /d'analyse.

La figure 2.8 illustre un tel banc de filtres, le principe de cette transformée est :

**A l'émission :** Les signaux d'entrée  $x_k(z)$  ou  $k=0, \dots, k-1$  sont d'abord sur-échantillonnées par un facteur de  $M/2$  puis filtré par un filtre de synthèse  $G_k(z)$ . sa réponse impulsionnelle est donnée par l'équation suivante [18] :

$$g_k[m] = p[m] \exp\left( j \frac{2\pi k}{M} \left( m - \frac{L_p - 1}{2} \right) \right) \quad (2.10)$$

Avec :  $\mathbf{m} = 0, 1, \dots, L_p - 1$

$L_p$  : Est la longueur du filtre.

Ensuite, le signal de sortie  $y_k(z)$  d'un banc de filtre de synthèse est formé lorsque tous les sous-signaux (appelé sous-bandes) sont recombinaés.

**A la réception :** de forme directe Un banc de filtre d'analyse est construit à l'aide de M filtres d'analyse et de M sous-échantillonneurs, comme indiqué dans la figure 2.8. Le signal d'entrée  $Y(z)$  est d'abord filtré par des filtres d'analyse  $F_k(z)$ .

La réponse impulsionnelle de banc de filtre d'analyse  $F_k(z)$  est donnée par l'équation suivante [18] :

$$\begin{aligned}
f_k[m] &= g_k^*[L_p - 1 - m] \\
f_k[m] &= p[L_p - 1 - m] \exp\left(-j \frac{2\pi k}{M} \left(L_p - 1 - m - \frac{L_p - 1}{2}\right)\right) \quad (2.11) \\
f_k[m] &= p[m] \exp\left(j \frac{2\pi k}{M} \left(m - \frac{L_p - 1}{2}\right)\right)
\end{aligned}$$

Puis ces signaux sont sous-échantillonnés par un facteur de  $M/2$  pour former les signaux de sorties  $\hat{x}_k(z)$ .

**Note:** Le banc de filtres d'analyse est simplement une version du filtre de synthèse correspondant, inversée dans le temps et à complexe [18].

### 2.4.3. Conception de filtre de prototype

L'étude des filtres prototypes présente un intérêt particulier pour FBMC / OQAM parce qu'il représente un degré important de liberté [6].

Selon la théorie de Nyquist (Condition d'absence d'IES), la réponse impulsionnelle d'un filtre utilisé dans un système de communication doit être à l'axe zéro pour toutes les périodes de symbole et leurs multiples entiers respectifs. Ce principe est réalisé dans le domaine de la fréquence en utilisant une condition d'asymétrie appliquée à la demi-Fréquence d'arrêt. Pour concevoir et mettre en œuvre un tel filtre, il faut tenir compte de ses coefficients de fréquence. Dans un émetteur récepteur, le filtre de Nyquist est divisé en deux moitiés. Une moitié pour l'émetteur et l'autre moitié pour le récepteur [21].

Les filtres doivent fonctionner à de nombreuses fréquences, impédances et largeurs de bande différentes. L'utilité d'un filtre prototype provient de la propriété que tous ces autres filtres peuvent en être dérivés en appliquant un facteur d'échelle aux composants du prototype. La conception du filtre ne doit donc être réalisée qu'une seule fois. Parmi les filtres prototype on a le filtre PHYDYAS. Ce filtre a été introduit par Bellanger [6].

Pour obtenir la réponse impulsionnelle pour ce filtre, on utilise la formule d'interpolation suivante [22] :

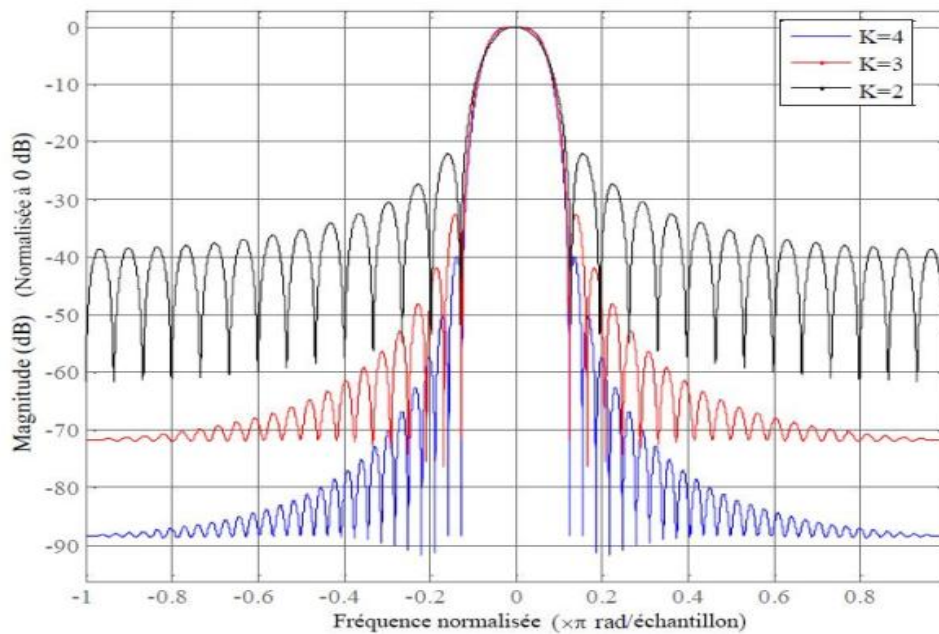
$$p(m) = \frac{1}{KM} \left( p(0) + 2 \sum_{k=1}^u (-1)^k p(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{KM} (m+1)\right) \right) \quad (2.12)$$

Ou  $m = 0, 1, \dots, L_p$

Et :

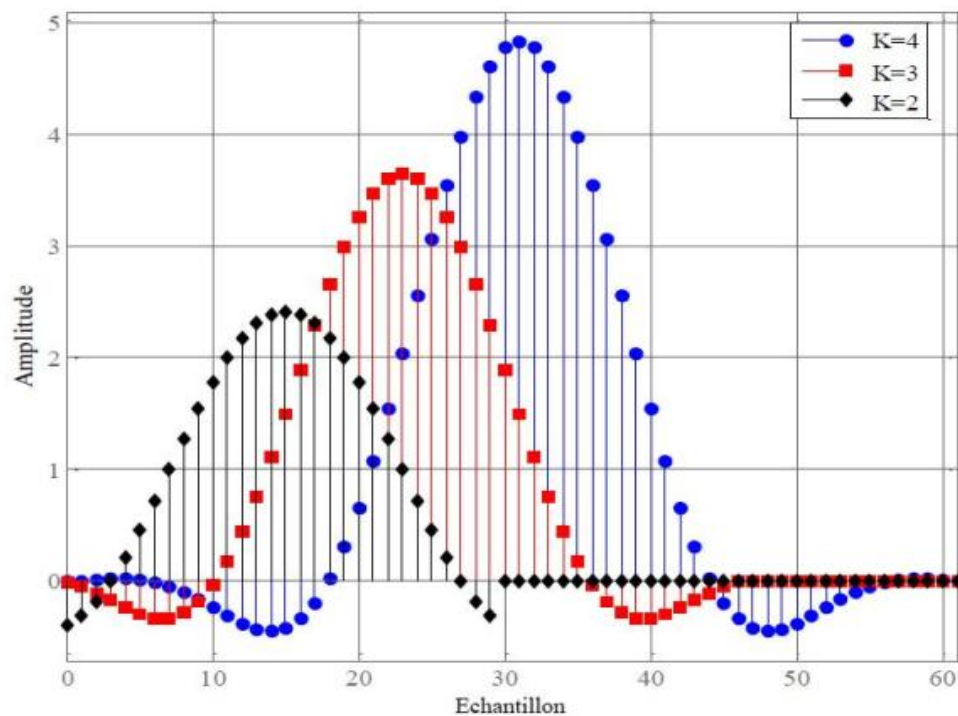
$$\left\{ \begin{array}{l} p(0) = 1 \\ p[k]^2 + p[K-k]^2 = 1 \quad \text{pour } k=1,2,\dots,\frac{K}{2} \\ P(k) = 0 \quad \text{pour } k=K,K+1,\dots,u=\frac{KM-2}{2} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Les figures 2.9 et 2.10 ci-dessus illustrent respectivement la réponse fréquentielle et la réponse impulsionnelle d'un filtre prototype utilisé dans un système FBMC/OQAM avec différentes valeurs  $k$ , on constate que la valeur optimale du facteur de chevauchement en termes de suppression de bande latérale est  $K = 4$  [22].



**Figure 2.9.** La réponse fréquentielle d'un filtre prototype.





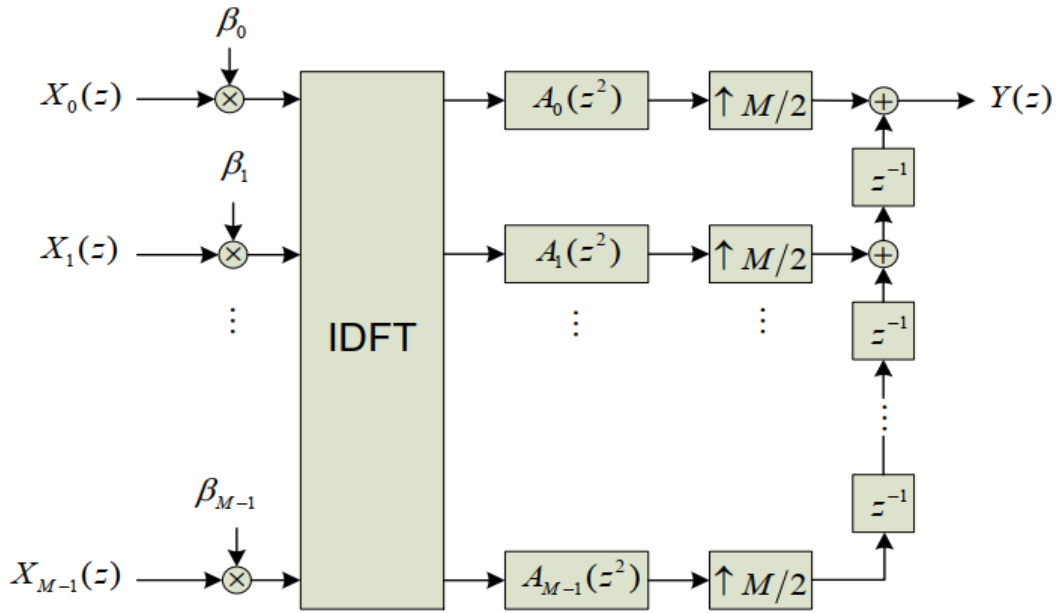
**Figure 2.10.** La réponse impulsionnelle d'un filtre prototype.

#### 2.4.4. Structure polyphasée

Les systèmes FBMC/OQAM (Filter Bank multi-carrier) sont mis en œuvre selon une technique efficace appelée implémentation polyphasée. La mise en œuvre polyphasée utilise des techniques de traitement de signal multi-niveaux pour réduire la complexité par la mise en œuvre conjointe de tous les filtres de synthèse ou d'analyse du banc de filtres.

En outre Les implémentations sous forme directe ne sont pas très efficaces pour les applications pratiques car les opérations de filtrage sont effectuées à un taux d'échantillonnage élevé, ce qui entraîne une quantité énorme de calculs inutiles. Heureusement, il existe différentes structures efficaces à plusieurs niveaux pour les bancs de filtres nécessaires, notamment les transformations chevauchées, les structures en treillis et les structures polyphasées. Le point commun à toutes ces structures est qu'elles se composent d'une section de filtre, dont les coefficients sont déterminés par la conception du filtre prototype, et d'une section de transformation mettant en œuvre la modulation. La complexité de calcul peut être réduite en exploitant des représentations polyphasées de SFB et AFB avec des opérations IFFT / FFT. Leur principale L'avantage est qu'ils peuvent offrir des simplifications drastiques car les opérations de filtrage sont effectuées à un taux d'échantillonnage inférieur et aucun calcul inutile n'est effectué. Ensuite, les structures polyphasées pour les Bancs de filtre de synthèse et les Bancs de filtres d'analyses sont dérivées [18].

Les figures 2.11 et 2.12 illustre les schémas bloc d'un banc de filtre de synthèse et d'analyse à l'aide d'une structure polyphasé.



**Figure 2.11.** Schéma bloc d'un banc de filtre de synthèse avec structure polyphasée.

Le banc de filtre de synthèse comme démontrée a [18] peut-être exprimé sous la forme de filtres polyphasés avec l'équation suivante :

$$G_k(z) = \sum_{q=0}^{M-1} \beta_k \theta_{k,q} z^{-q} A_q(z^M) \quad (2.14)$$

On peut représenter le banc de filtre de synthèse avec la notation matricielle suivante :

$$G(z) = B.W.A(z^M).C(z) \quad (2.15)$$

Tel que :

$$G(z) = [G_0 G_1 \dots G_{M-1}]^T$$

$$B = \text{diag}[\beta_0 \beta_1 \dots \beta_{M-1}]$$

$$[W]_{k,q} = \theta_{k,q}$$

$$A(z^M) = \text{diag}[A_0(z^M) A_1(z^M) \dots A_{M-1}(z^M)]$$

$$C(z) = [1, z^{-1}, \dots, z^{-(M-1)}]^T$$

Comme nous nous connaissons que le banc de filtre d'analyse est un banc de filtre de synthèse inversé dans le temps et a complexe, donc ils ont presque la même équation [18]:

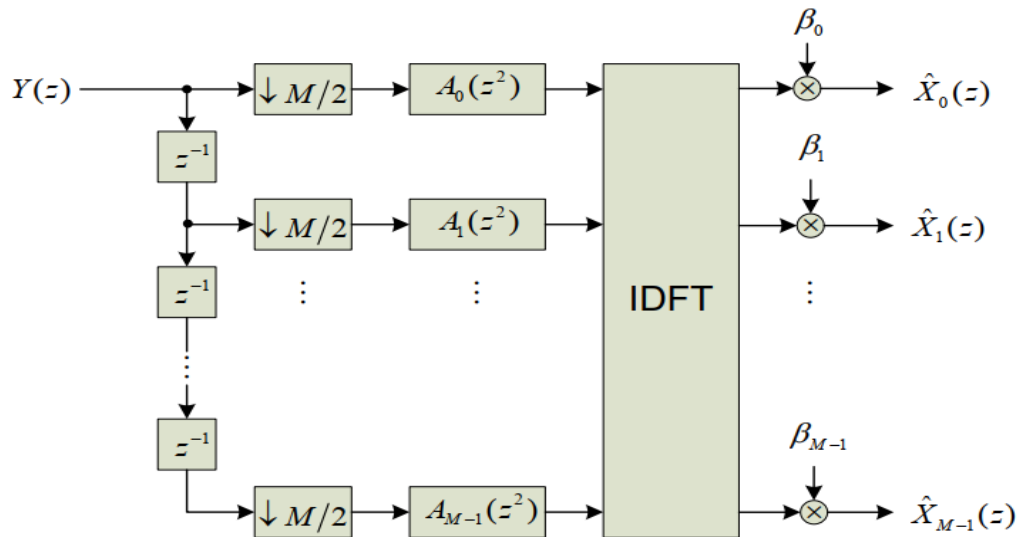
$$F_k(z) = \sum_{q=0}^{M-1} \beta_k \theta_{k,q} z^{-q} A_q(z^M) \quad (2.16)$$

De plus, on peut exprimer le banc de filtre d'analyse avec la notation matricielle suivante :

$$F(z) = B.W.A(z^M).C(z) \quad (2.17)$$

Et :

$$F(z) = [F_0 F_1 \dots F_{M-1}]^T$$



**Figure 2.12.** Schéma bloc d'un banc de filtre d'analyse avec structure polyphasée

#### 2.4.5. 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 pré-traitement 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 [6]. On peut écrire le signal à la sortie du  $X(z)$  sous la forme matricielle suivante [18] :

$$X\left(z^{M/2}\right)=\left[X_0\left(z^{M/2}\right)X_1\left(z^{M/2}\right)\dots\dots\dots X_{M-1}\left(z^{M/2}\right)\right]^T \quad (2.18)$$

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 chaines de retard) [6]. Le signal à la sortie du banc de filtre de synthèse  $Y(m)$  peut s'écrire comme suit :

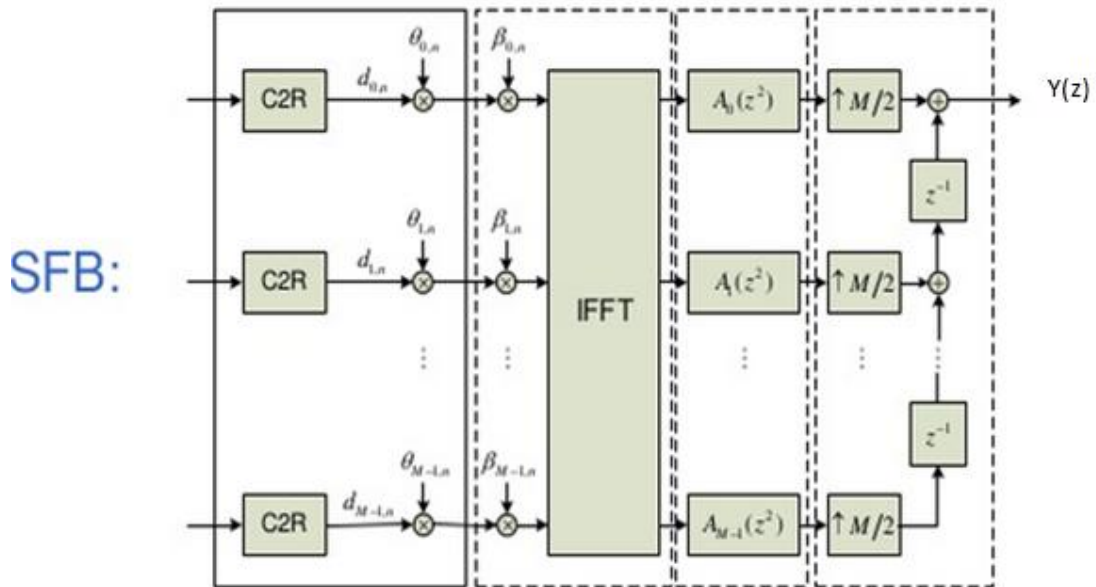
$$y(m)=\sum_{k=0}^{M-1}x_k[n]\beta_k[n]p\left[m-n\frac{m}{2}\right]\exp\left(j\frac{2\pi}{M}KM\right) \quad (2.19)$$

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 [18] :

$$Y(z)=G^T(z).X\left(z^{M/2}\right) \quad (2.20)$$

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



**Figure 2.13.** Émission FBMC/OQAM.

### 2.4.6. Récepteur FBMC/OQAM

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

$$y(m) = y_k(m)h_k(m) + w_k(m) \quad (2.21)$$

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  $\hat{y}(m)$  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  $\beta_k^*$  » [19].

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

$$\begin{aligned} \hat{X}\left(z^{M/2}\right) &= F\left(z^M\right) \cdot \hat{Y}(z) \\ \hat{X}\left(z^{M/2}\right) &= B.W.A\left(z^M\right) \cdot c(z) \cdot \hat{Y}(z) \end{aligned} \quad (2.22)$$

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

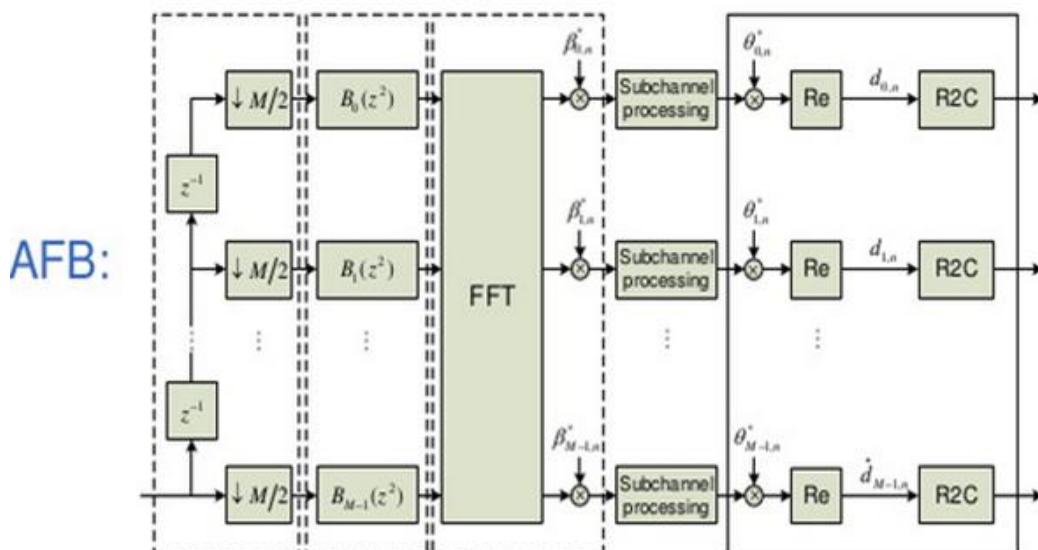
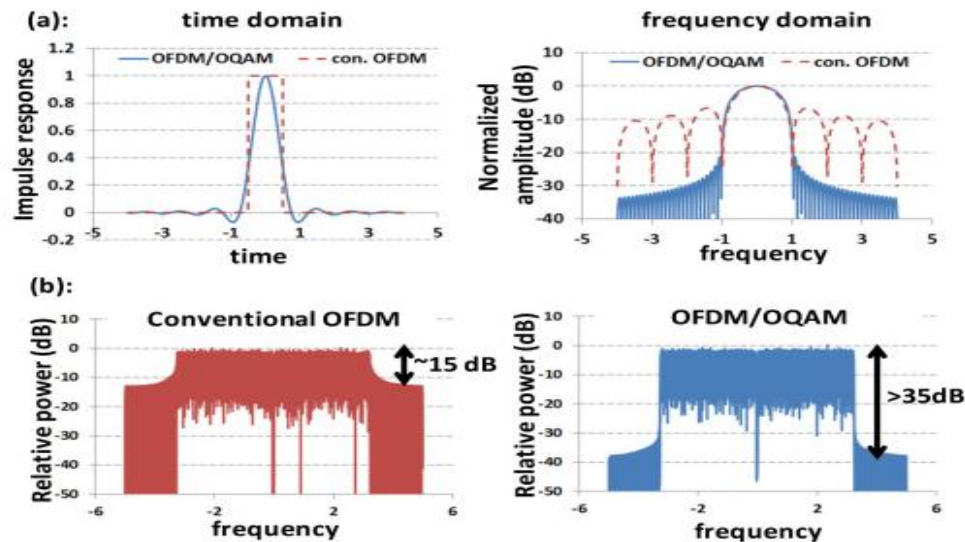


Figure 2.14. Récepteur FBMC/OQAM.

## 2.5. comparaisons entre l'OFDM et FBMC

La figure ci-dessus illustre la différence entre la technique OFDM et FBMC/OQAM [15] [16] [6] [22][23].



**Figure 2.15.** (a) réponse impulsionnelle en temps et en fréquence (b) spectre de fréquence pour OFDM et FBMC / OQAM conventionnels.

L'OFDM offrent plusieurs avantages :

- L'OFDM permet de supprimer très simplement l'influence des multi-trajets qui est un des problèmes majeurs des systèmes mono-porteuses lorsque le débit de transmission augmente.
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multi-utilisateurs
- L'utilisation de la bande de fréquence allouée est optimale par orthogonalisation des porteuses.
- La modulation est basée sur un algorithme bien connu et peu complexe : la FFT.
- Simplicité de l'égalisation grâce au l'ajout du « préfixe cyclique ».
- Un codage et entrelacement adapté permettent d'améliorer la qualité de la transmission des données.

Malgré tous les avantages la technique OFDM a limitée par certains inconvénients :

- L'utilisation de l'intervalle de garde fait des pertes à l'efficacité spectrale.
- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence puisque ce dernier engendre de l'interférence entre porteuses qui peut détruire l'orthogonalité des porteuses.

- Problèmes du facteur de crête : l'enveloppe du signal OFDM présente de grands pics ce qui sature rapidement l'amplificateur de puissance.
- Problèmes de synchronisation.

Comme nous connaissons que la technique FBMC/OQAM conserve les avantages d'OFDM et améliore ses inconvénients. Voilà les caractéristiques de la technique FBMC/OQAM :

- La technique n'utilise pas le préfixe cyclique, on trouve une efficacité spectrale plus élevée.
- La technique FBMC/OQAM est beaucoup moins sensible au décalage temporel et fréquentiel.
- Plus robuste à l'effet doppler.
- La technique FBMC/OQAM Peut-être Utilise le même banc de filtre pour le traitement de signal à la réception et pour la détection de spectre flexible et haute résolution et une dynamique élevée.
- La modulation FBMC est un meilleur choix pour remplir les trous du spectre.

## 2.6. Conclusion

A nos études de ce chapitre, nous avons présenté le cadre principal de deux techniques multi-porteuses : OFDM et FBMC/OQAM. D'abord nous expliquons le principe de modulation OFDM et l'utilité du préfixe cyclique pour éviter le problème de l'ISI. Deuxième partie de chapitre nous avons expliqué le principe de traitement OQAM et examiné la mise en œuvre polyphasée à l'aide de transformé de fourrier (IFFT/FFT) des émetteurs-récepteurs de banc de filtres et discuté du choix des filtres prototypes utilisables dans FBMC/OQAM. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons comparé les deux techniques.

Finalement, nous concluons que la technique FBMC/OQAM est plus favorable pour la 5<sup>eme</sup> génération, elle conserve les caractéristiques d'OFDM et améliore ses points faibles.

# Chapitre 4

## *SIMULATION ET RESULTAT*

---

### **4.1. Introduction**

Afin de valider les modèles théoriques décrits dans les chapitres précédentes, nous allons examiner leurs performances pour une transmission numérique en différentes modulations sur le canal à phase non minimale décrit ultérieurement. Les simulations sont réalisées au moyen du logiciel MATLAB.



## 4.2. Canaux à phase non minimale utilisé dans la simulation

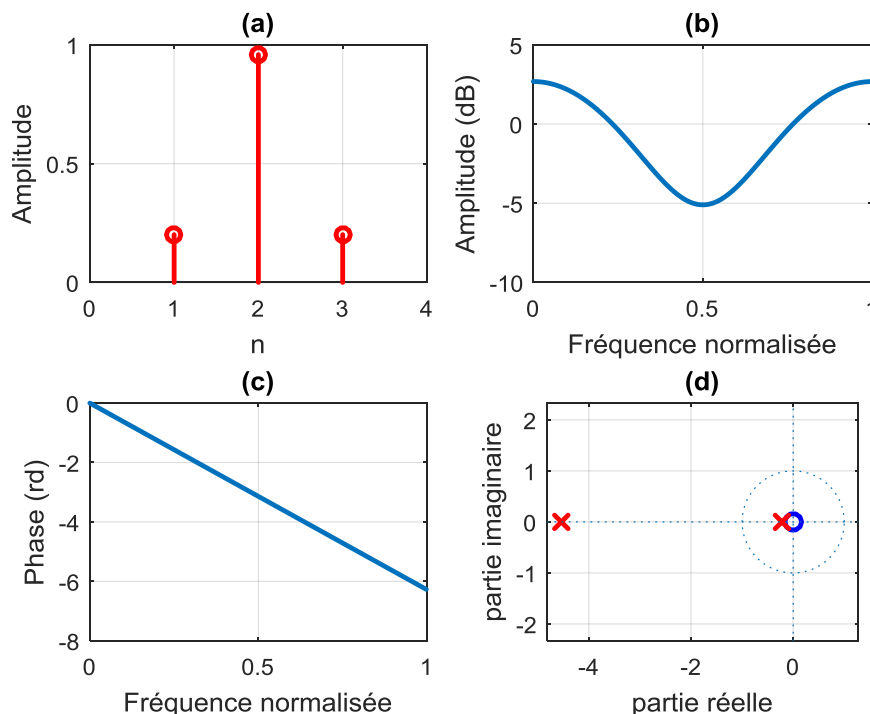
Le modèle des canaux discret équivalent utilisé pour tester les performances des égaliseurs est des canaux à phase non minimale ; ils sont représenté par la fonction de transfert en « z » définie par :

$$H_1(z)=0.2014 + 0.9586 z^{-1} + 0.2014 z^{-2} \quad (4.1)$$

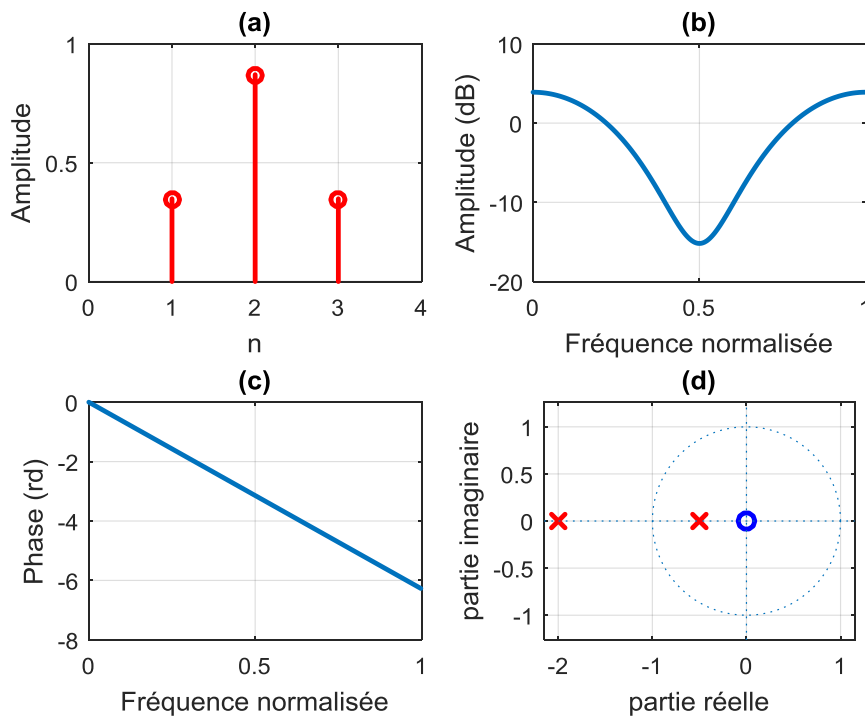
$$H_2(z)=0.3482 + 0.8704 z^{-1} + 0.3482 z^{-2} \quad (4.2)$$

Sont des canaux représentatif de la majorité des canaux rencontrés en pratique, ils sont très utilisés pour la simulation des égaliseurs [25].

Les caractéristiques de ces canaux sont illustrées par la **figure 4.1.** et la **figure 4.2.** ces figures représentent **(a)** Les coefficients de la réponse impulsionnelle du canal qui sont au nombre de trois.**(b)** représente la réponse en amplitude du canal qui comporte des zones où le signal sera amplifié (amplitude > 0) et des zones où le signal sera très affaibli (amplitude < 0), **(c)** représente la réponse en phase qui est linéaire et **(d)** donne la représentation dans le plan Z et montre que le canal possède deux zéros : l'un est à l'intérieur du cercle unité et l'autre est à l'extérieur de ce cercle.



**Figure 4.1.** Caractéristiques du canal (1) de simulation ; (a) réponse impulsionnelle ; (b) fonction de transfert ; (c) fréquence normalisée ; (d) partie réelle.



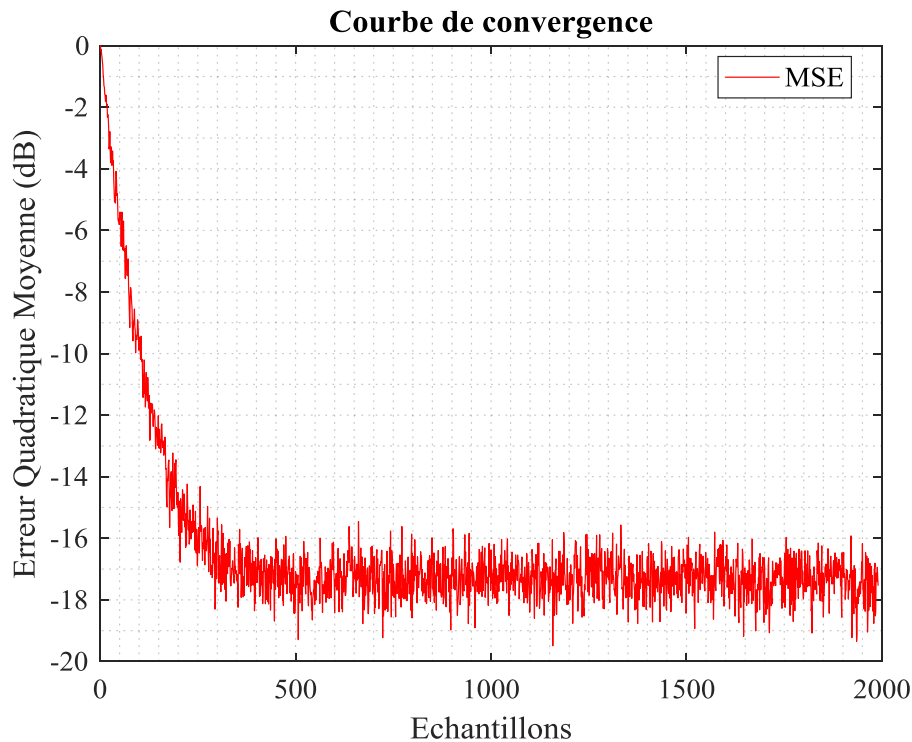
**Figure 4.2.** Caractéristiques du canal (2) de simulation ; (a) réponse impulsionnelle ; (b) fonction de transfert ; (c) fréquence normalisée ; (d) partie réelle.

### 4.3. Egalisation du canal $H_1$ avec des différentes modulations

#### 4.3.1. Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation BPSK

La figure 4.3 présente la courbe de convergence de l'égaliseur linéaire transverse (*LTE*) pour l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) avec un pas d'adaptation  $\mu = 0.035$ , L'égaliseur LTE est de l'ordre de sept coefficients ( $N=7$ ). Cette courbe décrit l'évolution de l'erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error*) en fonction du nombre de durée symbole pour un rapport signal sur bruit (*SNR*) de 30dB.

Comme le montre la **figure 4.3.**, l'EQM atteint sa valeur optimale après environ 500 échantillons pour le LTE-LMS, cette valeur optimale est autour de -18 dB.

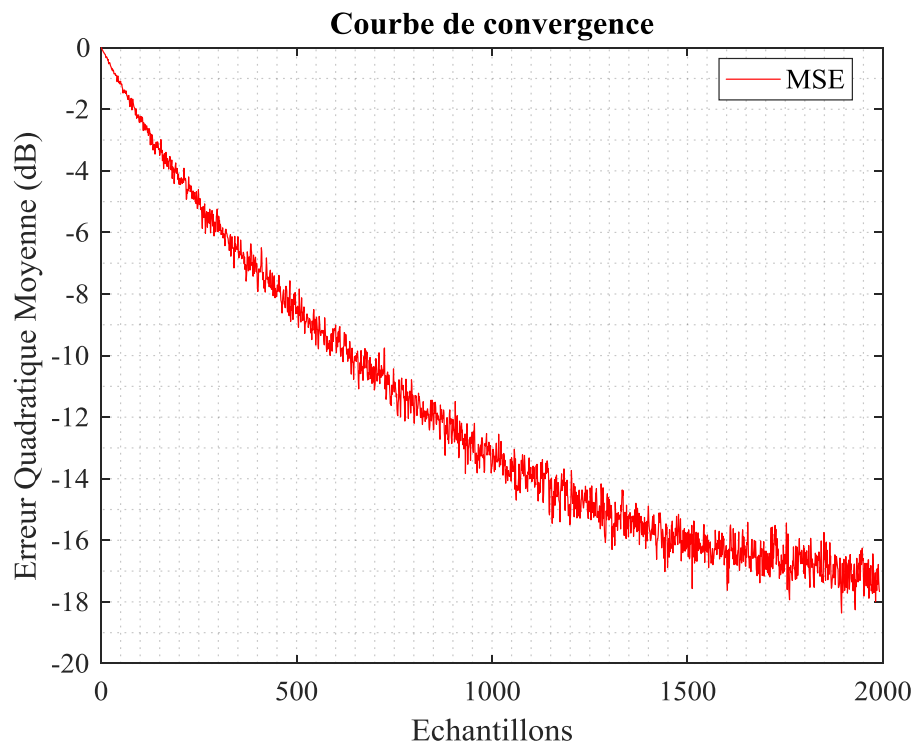


**Figure 4.3.** Canal (1) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal BPSK.

### 4.3.2. Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation QPSK

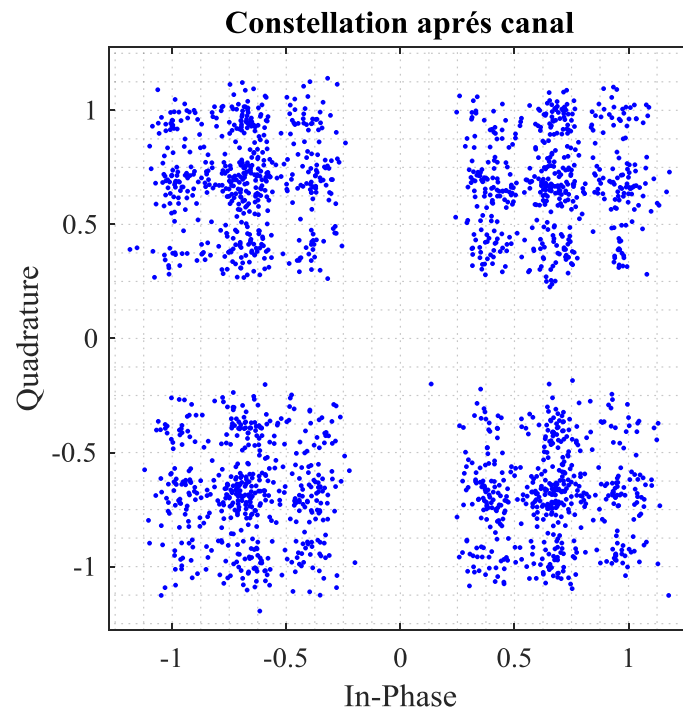
La **figure 4.4.** présente la courbe de convergence d'égaliseur linéaire transverse (*LTE*) pour l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) avec un pas d'adaptation  $\mu = 0.035$ , L'égaliseur LTE est de l'ordre de sept coefficients ( $N=7$ ). Cette courbe décrit l'évolution de l'erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error*) en fonction du nombre de durée symbole pour un rapport signal sur bruit (*SNR*) de 30dB.

Comme le montre la figure 4.4, l'EQM atteint sa valeur optimale après environ 1800 échantillons, cette valeur optimale est autour de -18 dB, la courbe d'égaliseur LMS-LTE avec La modulation QPSK converge faiblement que l'égaliseur avec la modulation BPSK.

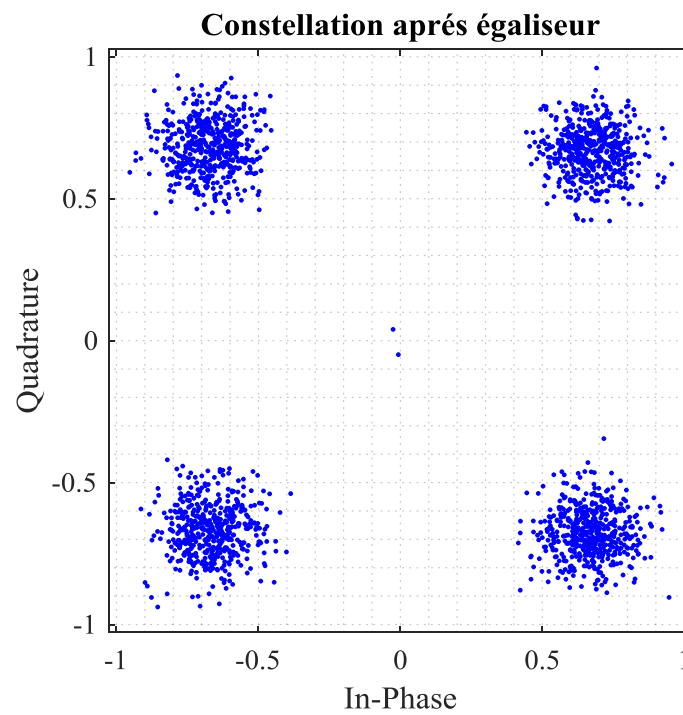


**Figure 4.4.** Canal (1) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

Les **figures 4.5** et **4.6** présentent Diagramme de constellation après le canal et l'égaliseur LTE-LMS respectivement, comme elles montrent que l'égaliseur minimise l'effet du canal.



**Figure 4.5.** Canal (1) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

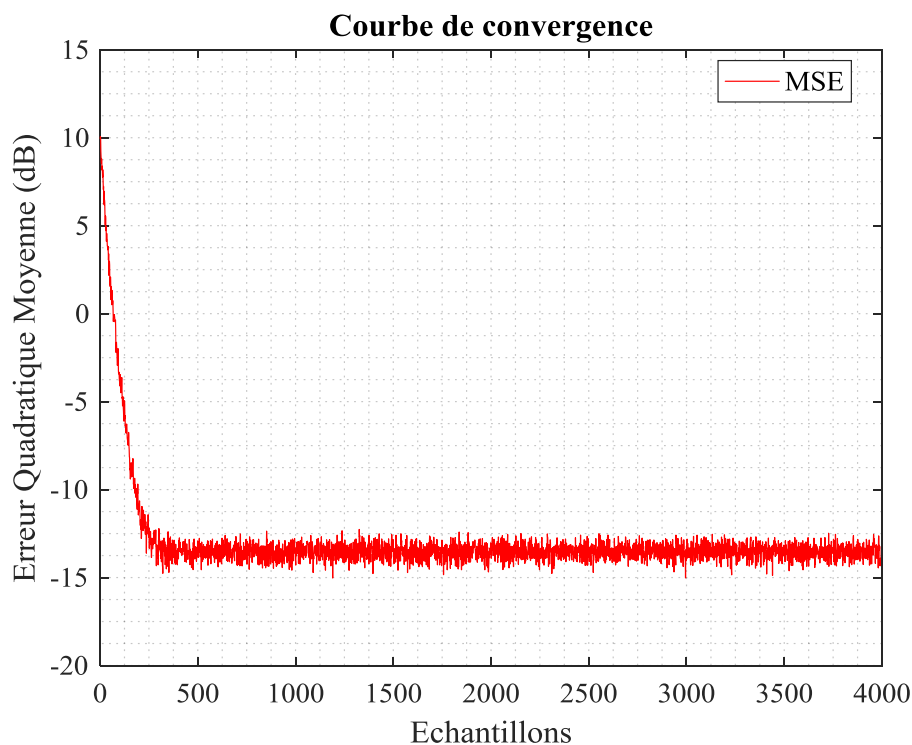


**Figure 4.6.** Canal (1) diagramme de constellation (après égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

### 4.3.3. Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation 16-QAM

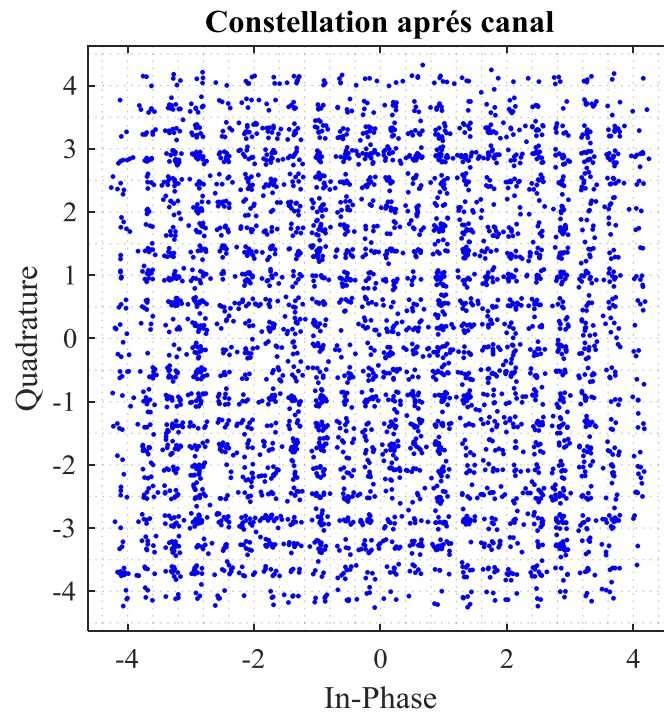
La **figure 4.7.** présente la courbe de convergence d'égaliseur linéaire transverse (*LTE*) pour l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) avec un pas d'adaptation  $\mu = 0.035$ , L'égaliseur LTE est de l'ordre de sept coefficients ( $N=7$ ). Cette courbe décrit l'évolution de l'erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error*) en fonction du nombre de durée symbole pour un rapport signal sur bruit (*SNR*) de 30dB.

Comme le montre la **figure 4.7.**, l'EQM atteint sa valeur optimale après environ 1800 échantillons, cette valeur optimale est autour de -18 dB, la courbe d'égaliseur LMS-LTE avec La modulation 16-QAM converge plus rapidement que l'égaliseur avec la modulation BPSK et QPSK.

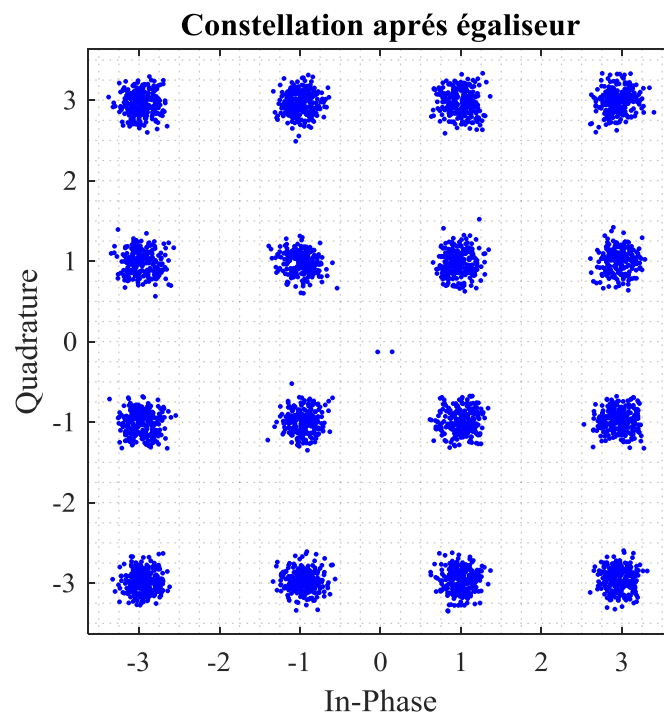


**Figure 4.7.** Canal (1) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

Les **Figure 4.8** et **4.9.** présentent Diagramme de constellation après le canal et l'égaliseur LTE-LMS respectivement, comme elles montrent que l'égaliseur minimise beaucoup plus l'effet du canal.



**Figure 4.8.** Canal (1) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM



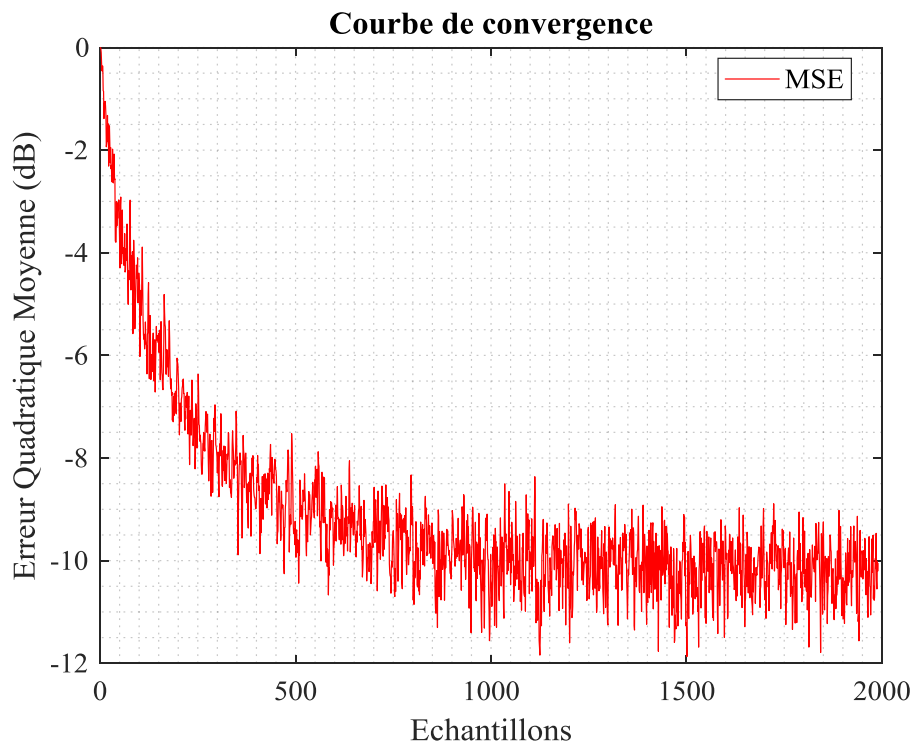
**Figure 4.9.** Canal (1) diagramme de constellation (après l'égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

## 4.4. Egalisation du canal H<sub>2</sub> avec des différentes modulations

### 4.4.1. Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation BPSK

La **figure 4.10** présente la courbe de convergence de l'égaliseur linéaire transverse (*LTE*) pour l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) avec un pas d'adaptation  $\mu = 0.035$  , L'égaliseur LTE est de l'ordre de sept coefficients ( $N=7$ ) . Cette courbe décrit l'évolution de l'erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error*) en fonction du nombre de durée symbole pour un rapport signal sur bruit (*SNR*) de 30dB.

Comme le montre la **figure 4.10.**, l'EQM atteint sa valeur optimale après environ 1000 échantillons pour le LTE-LMS, cette valeur optimale est autour de -10 dB.



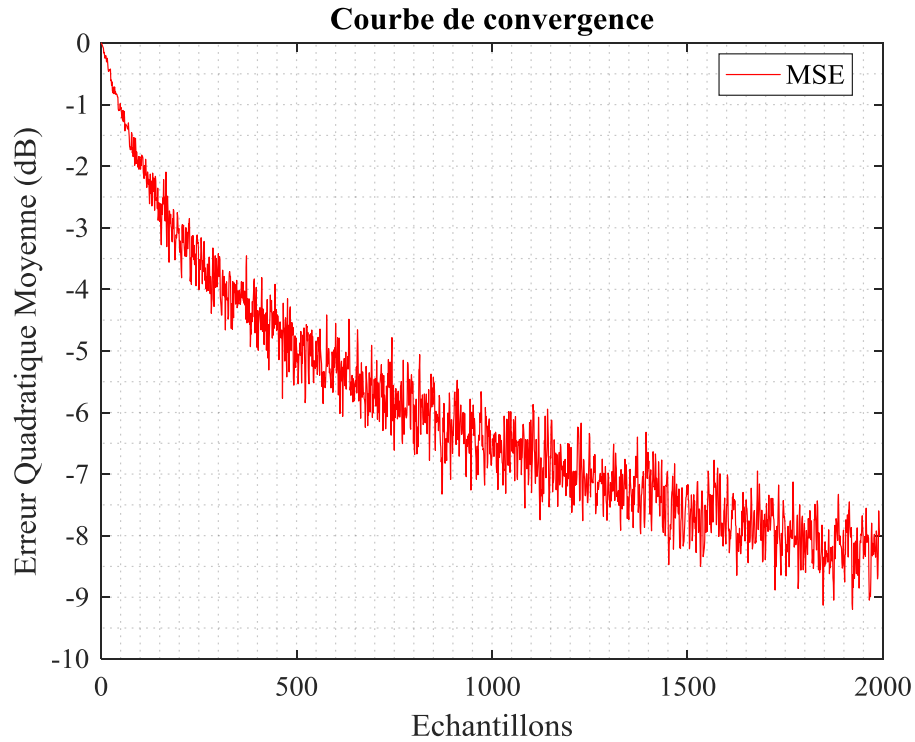
**Figure 4.10.** Canal (2) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal BPSK

### 4.4.2. Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation QPSK

La **figure 4.11.** présente la courbe de convergence de l'égaliseur linéaire transverse (*LTE*) pour l'algorithme LMS (*Least Mean Square*) avec un pas d'adaptation  $\mu = 0.035$  , L'égaliseur LTE est de l'ordre de sept coefficients ( $N=7$ ) . Cette courbe décrit l'évolution de l'erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error*) en fonction du nombre de durée symbole pour un rapport signal sur bruit (*SNR*) de 30dB.

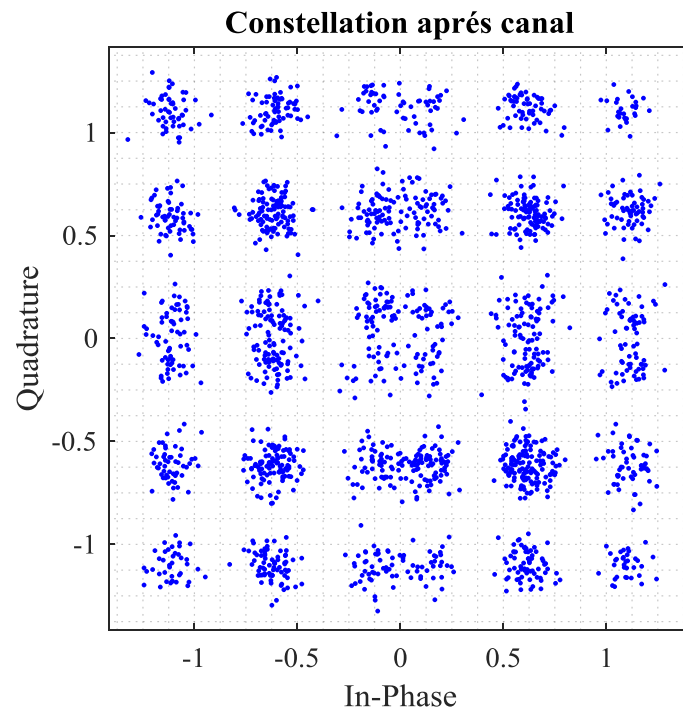


Comme le montre la **figure 4.11.**, l'EQM atteint sa valeur optimale après environ 2000 échantillons pour le LTE-LMS, cette valeur optimale est autour de -9 dB, la courbe est converge lentement.

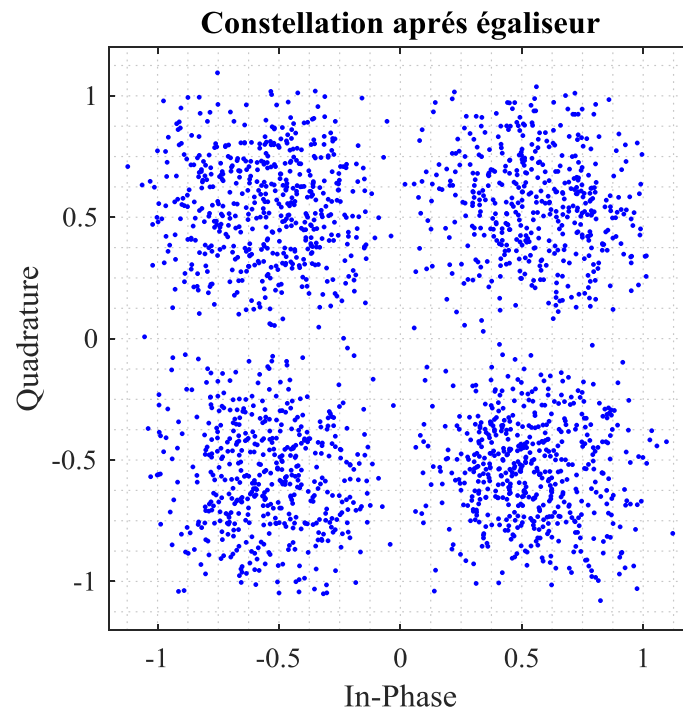


**Figure 4.11.** Canal (2) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

Les **figures 4.12.** et **4.13.** présentent Diagramme de constellation après le canal et l'égaliseur LTE-LMS respectivement, comme elles montrent que l'égaliseur minimise beaucoup plus l'effet du canal.



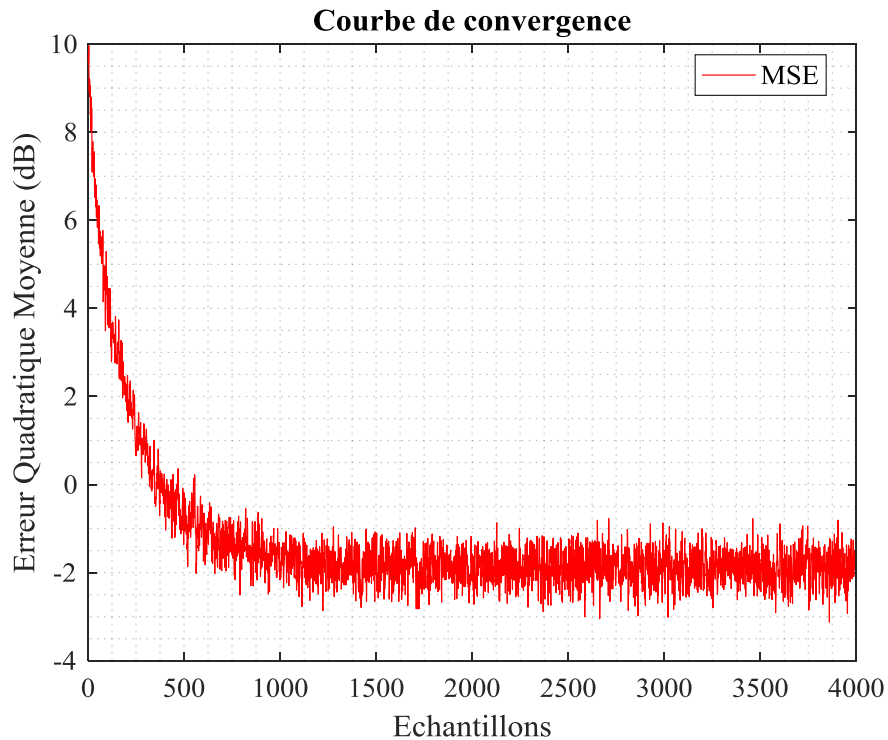
**Figure 4.12.** Canal (2) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK



**Figure 4.13.** Canal (2) diagramme de constellation (après l'égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal QPSK

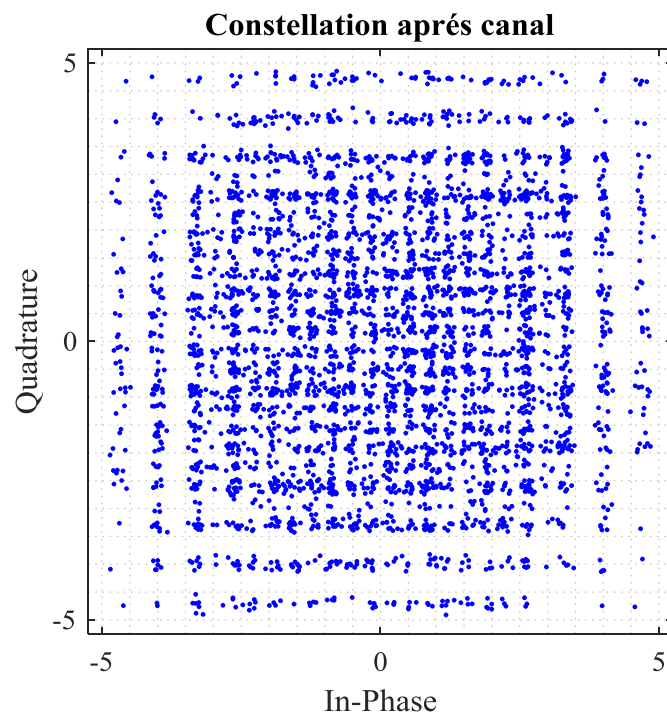
### 4.4.3. Egaliseurs LMS-LTE avec La modulation 16-QAM

la Figure 4.14 montre que l'EQM atteint sa valeur optimale après environ 500 échantillons pour le LTE-LMS, cette valeur optimale est autour de -2 dB, la courbe converge plus en plus rapide que la convergence au signal BPSK et QPSK .

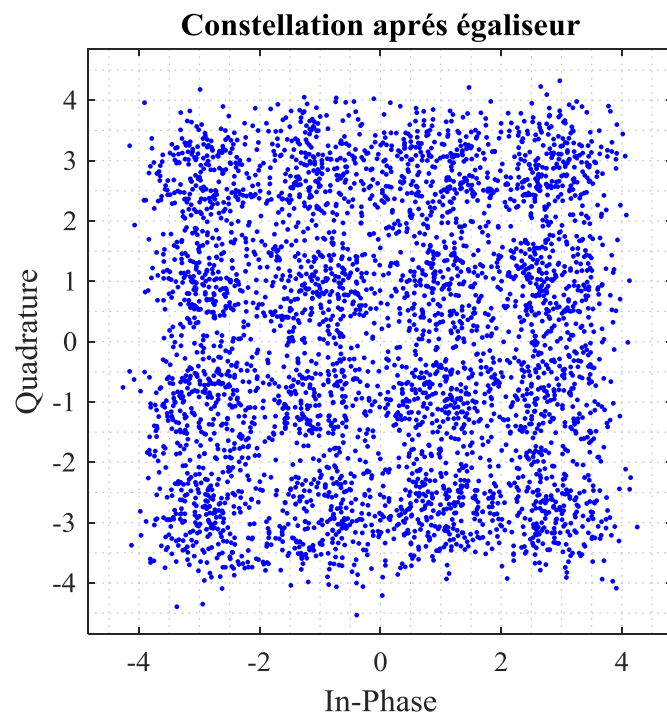


**Figure 4.14.** Canal (2) courbe de convergence de l'EQM d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

Les figures 4.15. et 4.16. présentent Diagramme de constellation après le canal et l'égaliseur LTE-LMS respectivement, comme elles montrent que l'égaliseur minimise l'effet du canal.



**Figure 4.15.** Canal (2) diagramme de constellation (après l'égaliseur) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM



**Figure 4.16.** Canal (2) diagramme de constellation (après le canal) d'égaliseur LTE-LMS pour un signal 16-QAM

## **4.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté des résultats de simulation de l'égaliseur LTE-LMS avec trois types de modulation BPSK, QPSK et 16-QAM et ceci pour deux canaux différentes. En termes de vitesse de convergence la modulation 16-QAM montre la meilleure performance. Concernent le niveau de convergence la modulation BPSK montre meilleurs resultats. La modulation QPSK présente le résultat le plus faible.

# CONCLUSION *GENERALE*

---

Le besoin de toujours améliorer les débits de transmission de données pousse les chercheurs dans le domaine des communications sans fils à améliorer sans cesse les systèmes de communications existants et à imaginer de meilleures solutions pour les futurs standards.

Premièrement on a expliqué le standard 5G et sa place par rapport à les générations précédents dans un scénario de communication sans fil, donc est un robuste alternative pour reprendre à les exigences et les besoins du futur.

Ensuite, On a pu prévoir une alternative à l'OFDM qui ne nécessite pas l'utilisation de CP c'est la modulation multi-porteuses de banc de filtres (FBMC). La principale différence entre FBMC et OFDM est qu'au lieu d'utiliser une fenêtre rectangulaire, on utilise un filtre prototype plus avancé, cela peut réduire le problème de fuite spectrale de l'OFDM entraînant une ISI et une ICI négligeables. De plus, la combinaison de FBMC avec modulation d'amplitude en quadrature décalée (FBMC/OQAM) conduit à un débit de transmission de données plus élevé.

D'une manière générale, nous avons eu l'occasion d'introduire des notions générales sur les systèmes de communications numériques, telles que la nouvelle génération 5G, les modulations numériques et l'interférence entre symboles qui représentent des vrais problèmes justifiant le recours à l'égalisation.

De même, Nous avons donné un aperçu sur l'égaliseur conventionnel (LTE) à l'aide d'algorithme d'adaptation LMS et nous avons testé leur performance par les courbes de convergence des erreurs quadratiques moyennes (MSE) et le diagramme de constellation avec trois types de modulations BPSK, QPSK et 16QAM.

On propose comme perspectives les réseaux de neurones (MLP, RBF) pour remplacer les filtres RIF. En fait la structure non linéaire de réseaux de neurones peut résister efficacement à des niveaux très bas de SNR ce qui n'est pas possible avec les filtres RIF à cause de leur structure linéaire.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Swati Yadav, "Sugandha Singh Review paper on development of mobile wireless technologies," 1g to 5g ,International Journal of Computer Science and Mobile Computing, "A Monthly Journal of Computer Science and Information Technology," *IJCSMC*, Vol. 7, Issue. 5, May 2018, pg.94 – 100.
- [2]<https://routeur-4g.com/4g-h-4g-4g-5g-comprendre-les-reseaux-mobiles-et-leurs-normes/24-06-2019>.
- [3] Kelechi G. Eze, Matthew N. O. Sadiku, Sarhan, M. Musa, "International Journal of Scientific Engineering and Technology" 1 July 2018 ,Page 62 , 5G Wireless Technology, A Primer , Roy G, Perry College of Engineering, Prairie View A&M University, Prairie View.
- [4] Joe Barrett, "5G Spectrum Bands (Global Mobile Suppliers Association," February 2017.
- [5] <https://www.gemalto.com/france/telecom/inspiration/5g> 19/06/2019.
- [6] Bendahmane Amira Meriem, Ghermoul Rania, "Etude de méthodes de beamforming à maximisation du rapport signal sur bruit pour des systèmes FBMC" Mémoire, Année universitaire 2017/2018.
- [7] "les enjeux de la 5g , Autorité de régulation des communications électroniques et des postes," république française-mars 2017.
- [8] <https://cordis.europa.eu/project/rcn/108761/brief/fr> 24/06/2019.
- [9][https://www.rohde-schwarz.com/hu/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/5g-wideband-signals/5g-wideband-signals\\_229599.html#media-gallery-5](https://www.rohde-schwarz.com/hu/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/5g-wideband-signals/5g-wideband-signals_229599.html#media-gallery-5) 22/06/2019.
- [10] <https://www.rfpage.com/what-are-5g-frequency-bands/> 22/06/2019.
- [11] <https://www.rfpage.com/applications-of-millimeter-waves-future/> 22/06/2019.
- [12] <https://www.sganalytics.com/blog/5g-coming-soon-bridge-digital-divide/> 22/06/2019.
- [13] Ravali Kolli, Swetha Mile, Shreya Shetty, Dr. Sunanda Dixit, "Review on 5G Wireless Technology-International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering," ISO 3297:2007 Certified ,Vol. 5, Issue 12, December 2016
- [14] Genevieve baudoin, coll , "radio-communications numériques /1 , principes,modélisationet simulation,2eme édition" .
- [15] Merouane Debbah , article tiré de " hommages à Shannon", de Gérard Batail (OFDM).
- [16] Benyahia hafsa , Cherifi wafa Mémoire, "étude des techniques MIMO à base de FBMC pour la 5G" – juin/2017.

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

[18] Bellanger , "FBMC physical layer à primer", PHYDYAS" , Jan 2010.

[19] Mahmoud Aldababseh, Ali Jamoos , "Estimation of FBMC/OQAM Fading Channels Using Dual Kalman Filters," The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 586403, 9 pages.

[20] Hocine Bekkouche, "Synthèse de bancs de filtres adaptés, application à la compression des images," Soutenue le 18 juin 2007.

[21] Aamir Habib, Atif Basheer, "Filter Bank Multi Carrier Based MIMO Systems for 5G Wireless Communication".

[22] "ETUDE DE LA TECHNIQUE DE MODULATION FBMC/OQAM," Theodoret N.1 , Randriamitantsoa P.A.2 , Randriamitantsoa A. A.3 Laboratoire de recherche en télécommunication, Automatique, Signal Et Images (LR-TASI) Ecole Doctorale en Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'innovation (ED -STII) Ecole Supérieur Polytechnique - Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101 – Madagascar, MADA-ETI, ISSN 2220-0673, Vol.2, 2016, [www.madarevues.gov.mg](http://www.madarevues.gov.mg)

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

[24] ZEHARI KADDOUR, "Etude et Implémentation des différents égaliseurs (simple et adaptatif) appliqués à plusieurs canaux de transmission," Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, 2017.

[25] GHADJATI Mohamed, "Thème Applications des réseaux de neurones aux systèmes de communication numériques," 2012.

[26] J.F. Bercher, sous la direction de G. Baudoin, Chapitre 4, "Égalisation Extrait de *Radiocommunications numériques*," Tome 1, Dunod, Paris 2002, (ESIEE-Paris)..

[27] <http://www.telecomhall.com/what-is-isi-inter-symbol-interference-in-lte.aspx> 21/062019.

[28] CHERIFI KHALFALLAH, "L'égalisation dans les systèmes multiple Input – Multiple output« MIMO » ," Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.

[29] Andrea Goldsmith , Chapter 11, " Equalization "WIRELESS COMMUNICATIONS," Stanford University; Press 2005.

[30] Ilia Kempfi , Adaptive Channel Equalization-Multicore Processor Implementation- Helsinki Metropolia University of Applied Sciences- Bachelor of Engineering-Degree Programme in Electronics-Bachelor's Thesis-12.05.2015