

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 en
Télécommunication**

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

**Etude des performances de modulation UFMC
Pour le réseaux 5G**

Présenté par :
OULEHA OUASSIM et DIDOUNA SALAHDINE

Sous la direction de :
Dr.BOUCHEMEL AMMAR

Juin 2019

Remerciements



C'est avec un très grand honneur que nous réservons cette page en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

*Nos remerciements vont plus particulièrement à notre encadreur **M. Bouchemel Ammar** pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.*

Nous tenons à remercier nos famille de nous avoir soutenu, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.

Enfin, nous remercions tous nos enseignants du département d'électronique et de Télécommunications de l'université de 08 mai 1945 de Guelma pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont bien voulu prodiguer durant nos études et aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.

Ouleha & Didouna

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont Chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la

Vivacité

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de

Succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

OULEHHA OUASSIM

Dédicace

Nous remercions dieu qui nous a donné
Le courage et la volonte De poursuivremes étude,

Je dédie ce travail

A ma famille, qui m'a doté d'une éducation digne d'amour, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

Particulièrementa mes parents

Mon père qui a tous sacrifié pour mon bien et qui ma éclaire ma route par sa compréhension et son soutien

A ma mère qui m'a soutenu et encourage durant ces années d'étude qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance

A mes deux grand-mèrequi m'ont soutenu durant toute ma vie et m'ont appris le bon comportement, pour leurs amours infinis que dieu vous garde en bonne sante

A mes frères Maamer, Bader-dine, Hatem, qui ont partages avec moi tous les moments d'émotion lors de tous mon parcours

A ma sœur Linda qui est un exemple d'encouragement et d'aide

A mes petites anges Basma, Hadjer, Meryem que dieu vous garde

Je remercie aussi mes oncles et tantes spécialement oncle Maamer

A mes amis Ouassim, Hamza, Khaled, Lyes, Sofia, Selma, Khaadidja, Racha et Narimen merci les amis pour tous les moments quand a passé ensemble

Merci à tous les personnes qui m'ont aides

A toute ma famille, mes proche

Didouna salahdine

ملخص

شهدت شبكات المحمول و اللاسلكي نمواً غير مسبوق في السنوات الأخيرة مما أزم إصدار عدة أجيال متتالية من شبكات الاتصالات المكرسة بشكل رئيسي للاتصالات الهاتفية **G2**، ثم أكثر توجهاً إلى الشبكات اللاسلكية متعددة الوسائط **3G**، **4G** و **5G**، مما يتيح زيادة إنتاجية حقيقية متيحاً بذلك إمكانية التشغيل البيني مع الشبكات الأخرى.

تحدثنا في هذا العمل عن نوعين من التشكيل و هو تعدد الإرسال بتقسيم التردد المتعامد، **OFDM**، المستخدم في **4G** و **UFMC** تصفية عالمية متعددة الناقل وهو أحد التشكيلات المحتملة في 5G، لغرض رؤية الخصائص الرئيسية لهذين التشكيلين. مثل **PAPR**، **BER**، و **DSP**، تمت محاكاة النتائج باستخدام برنامج **MATLAB**.

الكلمة المفتاحية: شبكات الهاتف، المحاكاة، التشكيل، **OFDM**، **UFMC**

RESUME

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Il s'agit d'une part du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés à la téléphonie (2G), puis plus orientés vers le multimédia (3G), la 4G et la 5G de réseaux sans fil apporte une véritable augmentation du débit et permet l'interopérabilité avec les autres réseaux.

Dans ce travail on a parlé sur deux type de modulation multi porteuse l'OFDM qui est utiliser dans la 4G et l'UFMC qui est l'une des modulations utiliser dans la 5G, pour un but de voir les principales caractéristiques de ces deux modulations comme le PAPR, BER, et le DSP, Les déférents résultats ont été simulés en employant le logiciel MATLAB.

Mot clé : réseaux mobiles, simulation, modulation, UFMC, OFDM.

ABSTRACT

Mobile and wireless networks have experienced unprecedented growth in recent years. This is on the one hand the deployment of several successive generations of telecommunications networks mainly dedicated to telephony (2G), then more oriented to multimedia (3G), 4G and 5G wireless networks brings a real increase throughput and allows interoperability with other networks.

In this work we talked about two types of multi-carrier modulation, OFDM, which is used in 4G and UFMC which is one of the modulations used in 5G, for a purpose to see the main characteristics of these two modulations. like the PAPR, BER, and the DSP, the deferent results were simulated using the MATLAB software.

Keyword: mobile networks, simulation, modulation, UFMC, OFDM.

Table des matières

Introduction générale	3
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les réseaux mobiles

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Evolution des réseaux mobiles	5
I.3.1 La première génération - 1G	6
I.3.2 La deuxième génération -2G	6
I.3.2.1 Architecture du réseau GSM	6
I.3.3 La troisième génération – 3G	11
I.3.3.1 Architecture du réseau UMTS.....	12
I.3.4 La quatrième génération – 4G	17
I.3.4.1 Architecture du réseau 4G	18
I.3.5 La qualité de service dans les réseaux mobiles	20
I.4 Conclusion	21

Chapitre II : la modulation OFDM et UFMC

II.1 Introduction	23
II.2 Modulation	24
II.2.1 Principe de Modulation	24
II.2.2 Les intérêts de modulation	24
II. 2 .3 Modulation mono-porteuse	25
II. 2.4 Modulation multi porteuse	26
II.3 Modulation OFDM	27
II.3.1 Chaîne de transmission OFDM	27
II.3.2 Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM	28
II.3.3 L'Orthogonalité	28
II.3.4 Conversion série en parallèle	29

II.3.5 Intervalle de garde	30
II.3.6 Implémentation numérique	31
II .3.7 Implémentation numérique de la séquence de modulation	32
II.3.8 Implémentation numérique du démodulateur	33
II.3.9Avantages et Inconvénient de l’OFDM	33
II.3.9.1 Avantages de l’OFDM	33
II.3.9.2 Inconvénient de l’OFDM	34
II.4 La technologie 5G	34
II.4.1 La 5G pour l’Internet des objets	35
II.5 Modulation UFMC	35
II.5 .1 définition de UFMC	35
II.5 .2 Emetteur et récepteur UFMC	36
II.7 Conclusion	39

Chapitre III : Simulation et comparaison des résultats

III.1 Introduction	40
III.2 Résultat de simulation	40
III.2.1 Peak-to-Average Power Ratio PAPR	40
III.2.1.1 Influence de type de modulation sur PAPR	44
III.2.1.2 Influence du nombre de points FFT sur PAPR.....	45
III.2.1.3 Influence de paramètres de conception de la fenêtre Dolph-Chebyshev sur le PAPR	45
III.2.2 Taux d’erreur binaire BER	47
III.2.2.1 Influence de type de modulation sur BER.....	49
III.2.2.2 Influence du nombre de points FFT sur BER.....	50
III.2.2.3 Influence de paramètres de conception de la fenêtre Dolph-Chebyshevsur BER	51
III.2.3 La densité spectrale de puissance DSP (OFDM, UFMC)	52
III.3 Conclusion	54
Conclusion générale	55

Liste des figures

- Figure I.1** l'Architecture globale du GSM
- Figure I.2** Technique d'accès multiple FDMA et TDMA
- Figure I.3** l'Architecture globale de l'UMTS
- Figure 1.4** exemple d'un signal CDAMA
- Figure 1.5** l'architecture générale du réseau 4G
- Figure II.1** Schéma d'une modulation
- Figure II.2** Schéma de principe d'un modulateur OFDM
- Figure II.3** Chaîne de transmission OFDM
- Figure II.4** Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM
- Figure II.5** Spectre en sortie du modulateur OFDM
- Figure II.6** Intervalle de garde
- Figure II.7** Les différents intervalles de garde
- Figure II.8** la modulation OFDM numérique
- Figure II.9** la démodulation OFDM numérique
- Figure II.10** les caractéristiques du filtre
- Figure II.11** Schéma fonctionnel de l'émetteur UFMC
- Figure II.12** Schéma fonctionnel du récepteur UFMC
- Figure III.1** la variation de PAPR pour la modulation OFDM 4QAM
- Figure III.2** les variations de PAPR pour la modulation UFMC 4QAM
- Figure III.3** les variations de PAPR pour la modulation UFMC 16QAM
- Figure III.4** les variations de PAPR pour la modulation UFMC 64QAM
- Figure III.5** les variations de PAPR pour la modulation UFMC 256QAM
- Figure III.6** variation du PAPR pour la modulation UFMC FFT_512
- Figure III.7** variation du PAPR pour la modulation UFMC FFT_1024
- Figure III.8** variation du BER pour la modulation OFDM
- Figure III.9** variation du BER pour la modulation UFMC
- Figure III.10** variations du BER pour des différents nombres de FFT
- Figure III.11** variation du BER pour la modulation UFMC FFT_512
- Figure III.12** variation du BER pour la modulation UFMC FFT_1024
- Figure III.13** la densité spectrale de puissance d'un système OFDM
- Figure III.14** la densité spectrale de puissance d'un système UFMC

Liste des tableaux

Tableau I.1 **les caractéristiques de LTE**

Liste des abréviations

A

AUC	Authentication Center
AMPS	Advanced Mobile Phone System

B

BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Sub-system
BTS	Base Transceiver Station
BER	Bit Error Rate

C

CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CS	Circuit Switched

D

DCS	Digital Communication System
-----	------------------------------

E

EIR Equipement Identity Register

F

FDMA Fre-quency Division Multiple Access

FFT Fast Fourier Transform

FBMC Filter Bank Multicarrier

F.E.C Forward Error Correction

G

GPRS General Packet Radio Service

GSM Global System for Mobile communication

GMSC Gateway Mobile Switching Centre

GGSN Gateway GPRS Support Node

H

HLR Home Location Register

HSDPA High Speed Downlink Packet Access

HSPA High Speed Packet Access

HSUPA High Speed Uplink Packet Access

HSS Home Subscriber Server

I

IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT	International Mobile Telecommunications
IN	Intelligent Network
IES	Interférence Entre symboles
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform

L

LTE	Long Term Evolution
LA	Location Area

M

M2M	Machine To Machine
MSISDN	Mobile Station International ISDN Number
MME	Mobile Management Entity
MSC	Mobile Switching Centre

N

NSS	Network Switching Subsystem
NGN	Next Generation Network

O

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	architecture standard des télécommunications numériques

P

PS	Packet Switched
PDN Gateway	Paquet Data Network Gateway
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PSD	Power Spectral Density

Q

QoS	Quality of Service
QAM	Quadrature Amplitude
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying

R

RNC	Radio Network Controller
------------	--------------------------

S

SIM	Subscriber Identity Module
SGSN	Serving GPRS Support Node
SNR	Signal-To-Noise Ratio

T

TACS	Total Access Communication System
TMSI	Temporary Mobile Station Identity
TDMA	Time Division Multiple Access

U

UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
UFMC	Universal Filtered Multi Carrier

V

VLR	Visitor Location Register
------------	---------------------------

Introduction Générale

L'industrie des communications mobiles a connu un essor prodigieux au cours de la dernière décennie. Elle est développée au-delà de toutes les attentes. Ainsi, actuellement, plus de milliard d'abonnés profitent des services offerts par les réseaux cellulaires.

Depuis l'époque du service de téléphonie mobile évolué (AMPS), les avancées technologiques dans le domaine de Télécommunication et notamment les systèmes cellulaires mobile n'ont pas cessé. Au cours des deux dernières décennies, nous avons vu l'introduction de plusieurs générations des réseaux mobiles, de la 1G à la 4 G en passant par la 3 G et la tendance sera vers la 5G.

Les systèmes mobiles de la 1G sont caractérisés par une transmission purement analogique, ensuite l'apparition de réseaux 2G qui est le système GSM. Le GSM est le premier système radio mobile numérique à commutation de circuits. Pour la 3G, les systèmes sont basés sur la technique d'accès W-CDMA. Par contre, le standard LTE est le portail vers les réseaux 4G qui propose une autre technique d'accès pour la voix appelée le SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Et actuellement les futurs systèmes 5G ont l'intention de réaliser des débits de données encore plus élevés.

Les systèmes à base de modulation OFDM (4G) sont capables de fournir un débit élevé, une réduction de la complexité du récepteur et une amélioration de l'efficacité spectrale. Cependant les inconvénients de l'OFDM sont le niveau élevé du PAPR et des lobes hors bande. Par conséquent, la modulation UFMC proposée par le réseau 5G est considérée comme un nouveau format de modulation permettant de remplacer l'OFDM.

L'objectif de ce mémoire est l'étude et l'évaluation des performances de la modulation UFMC candidate pour les futurs systèmes cellulaires mobiles 5G.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, dans le premier chapitre on se verra de présenter les différentes normes (générations) de téléphonie mobile, on commencera tout d'abord par l'ancienne génération qui est connu sur le nom de AMPS ou la 1G après on va parler sur la génération très connu et très répondu dans le monde la 2G (GSM), ensuite on passera à la 3G (UMTS), après en présentera les réseaux 4G.

Le second chapitre traite deux types de modulation l'OFDM ou le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) utilisé pour la norme 4G dans laquelle, au lieu d'utiliser une seule porteuse, plusieurs sous-porteuses non chevauchantes et orthogonales sont utilisées pour la transmission de données. Les systèmes OFDM sont capables de fournir un débit binaire élevé, de réduire la complexité du récepteur et d'améliorer l'efficacité spectrale et l'UFMC (Universal Filtered MultiCarrier) utilisé dans la 5G qui est reposé sur l'idée selon laquelle un certain nombre de sous-porteuses peuvent être regroupées en sous-bandes, ce qui permet d'effectuer une opération IFFT et de filtrage accordé par sous-bande.

Enfin le troisième chapitre montre une simulation pour les deux modulations présentées précédemment tel que l'OFDM et l'UFMC. Ainsi une présentation des critères d'évaluation de performances comme le PAPR, BER et DSP. Le PAPR est un paramètre très important pour définir la qualité de modulation, et aussi le BER ou le taux d'erreur binaire qui mesure à la réception la qualité de transmission, indiquant le niveau de perturbation ou l'erreur de transmission des bits binaires. Le dernier paramètre concerne la densité spectrale de puissance ou DSP qui représente la répartition fréquentielle de la puissance d'un signal.

Chapitre I :

Généralités sur les réseaux mobiles

I.1 Introduction :

L'évolution et la progression technologiques ont connu un sommet avec la création d'Internet et sa propagation à travers les quatre coins du monde. Ce dernier joue un rôle efficace dans la distribution et le partage rapide et gratuit de l'information, toutefois, on remarque une lacune dans le mode des communications à grande échelle.

Les téléphones cellulaires sont en progression constante. Ils sont utilisés non seulement pour les communications vocales (GSM), mais également, grâce aux avancées technologiques, pour la partie vision comme dans (3G, 4G), dans le partage d'applications et même comme modems sans fil ou navigateurs web.

. Dans le début des années 2000, plusieurs opérateurs mobiles et équipementiers télécoms et organisations se sont réunies dans le but de développer un réseau de mobile dit nouvelle génération basée sur la 3G et appelée LTE (Long Term Evolution). Le principal avantage de ce nouveau standard est de permettre des débits pouvant aller jusqu'à 1 Gigabits en vitesses fixes (stable), et 100 Mbits pour les utilisateurs mobiles [2].

I.2 Historique :

Avant d'expliquer l'état actuel des technologies utilisées aujourd'hui, il me semble intéressant de rappeler l'évolution de ces techniques : cela a pour avantage d'une part de savoir de quoi on est parti pour mieux se positionner à l'heure actuelle et d'autre part de voir l'évolution du réseau structurant de l'opérateur

- **Les années 80 :**

La 1^{ère} génération des téléphones mobiles a débuté dans le début des années 80 en offrant un service médiocre de communication mobile, médiocre mais très coûteux. La 1G avait beaucoup de défauts : Des normes incompatibles d'une région à une autre, une transmission analogique non sécurisée (on pouvait écouter les appels), pas de roaming vers l'international (roaming est la possibilité de conserver son numéro sur un réseau autre que celui de son opérateur).

- **Les années 90**

Dans les années 90, le GSM est apparu. Il s'agit de la norme 2G, s'appuyant sur les transmissions numériques permettant une sécurisation des données (avec cryptage). La norme est mondiale, elle autorise le roaming entre pays exploitant le réseau GSM. Le GSM permettait aussi l'émission de SMS (limités à 80 caractères). Le principe du GSM, dois-je le rappeler, est de passer

des appels téléphoniques. Aussi, le GSM s'appuie sur une connexion dite orientée circuit, déjà utilisée par la téléphonie fixe. L'avantage de cette connexion est d'ouvrir un faisceau entre l'appelant et l'appelé qui ne sera fermé qu'en fin de communication. Un faisceau, c'est comme une voie ferroviaire, supposons deux gares reliées entre elles par plusieurs voies. Si le système de **commutation** des voies ne change pas, tous les trains emprunteront le même chemin. Dans le cas de la téléphonie, le système de commutation s'établit pendant la tonalité de mise en relation, puis est maintenu pendant toute la communication. L'inconvénient est l'utilisation d'un faisceau même si vous ne parlez pas (et quand bien même vous parlez, lorsqu'on communique, il y a plus de 60% de blancs lors de notre conversation), c'est à dire que le faisceau vous est réservé alors que vous ne transmettez rien. L'avantage et la raison de ce choix est que la conversation arrive dans le bon ordre (si vous comptez de 1 à 10, le 1 arrivera en premier à votre correspondant et le 10 en dernier car tous ces nombres auront suivi le même faisceau).

Le GSM a connu un énorme succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des mini-messages.

Devant le succès, il a fallu proposer de nouvelles fréquences aux opérateurs pour acheminer toutes les communications, et de nouveaux services sont aussi apparus, comme le MMS. Le débit de 9.6 kbps proposé par le GSM est insuffisant, de nouvelles techniques de modulations et de codages ont permis d'accroître le débit et les premières connexions IP sont apparues (GPRS, EDGE). Des applications M2M (Machine To Machine) sont aussi apparues comme par exemple commander les produits à approvisionner dans une machine de distribution (machine à café, ...)

- **Les années 2000**

La 3G a été impulsée par les exigences de l'IMT-2000 pour permettre des applications vidéo sur le mobile. Une application vidéo nécessite un débit de 384 kbps au minimum. Les applications visées étaient la possibilité de regarder YouTube, de la visiophonie, ... Outre l'augmentation de débit, un point complexe à résoudre était de passer d'un service de téléphonie (à connexion circuit) vers un service DATA (connexion paquets).

La 3G a démarré lentement après un retard de 2 ans sur les prévisions (autonomie des mobiles insuffisante est due entre autres au dimensionnement des amplificateurs pour transmettre le signal sans trop le déformer. L'amplificateur est situé avant l'antenne, il amplifie le signal pour que celui-ci puisse être reçu par l'antenne, c'est un peu comme si vous souhaitiez écouter de la musique dans votre jardin à partir de votre radio dans votre chambre).

La 3G a commencé à s'introduire sur le marché à partir de la version 3.5 (2005.c), celle-ci, nommée HSDPA a permis d'augmenter le débit descendant. Puis est arrivé le HSUPA pour augmenter le débit montant et enfin le HSPA et HSPA+.

L'accès aux services de connexions à internet et surtout de messagerie s'est peu à peu installé dans les habitudes des utilisateurs. Les terminaux se sont améliorés (Smartphone,..) permettant un usage plus confortable de la connexion haut débit.

Succédant à la 3G (l'expérience de ces 20 années de téléphonie) et aux évolutions de cette norme (HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+), le LTE apparaît avant tout comme une rupture technique :

- Nouvelle Interface radio basée sur un multiplexage d'accès OFDMA
- Modification de l'Architecture réseau existant afin de fournir une connexion tout IP.

- **En 2010**

La norme LTE-Advanced impose des critères de base sur le débit et sur la latence, comme le résume le tableau suivant :

		LTE	IMT-Advanced	LTE-Advanced
Débits crête maximum	DL	300Mb/s		1Gb/s
	UL	75Mb/s		500Mb/s
Bandes de fréquences		1,4 a 20MHz	40MHz	100MHz
Latence	données	10ms	10ms	10ms (RTT)
	session	100ms	100ms	50ms
Efficacité Spectrale DL/UL	Max	5,0/2,5 b/s/Hz	15/6,75b/s/Hz	30/15b/s/Hz
	Moyen	1,8/0,8 b/s/Hz	2,2/1,4 b/s/Hz	2,6/2,0 b/s/Hz
	En limite	0,04/0,02b/s/Hz	0,06/0,03b/s/Hz	0,009/0,07b/s/Hz

Tableau I.1.les caractéristiques de LTE

I.3 Evolution des réseaux mobiles :

On trouve à leurs actuelles quatre générations de réseau Mobile

I.3.1 La première génération - 1G :

La première génération de téléphonie mobile (noté 1G) a vu le jour dans les années 80. Elle est basée sur une transmission analogique avec une modulation de fréquences. Elle est constituée d'appareils relativement volumineux, utilisant une faible bande passante [3]. Cette norme ne permet que la transmission de la parole. La zone de couverture est divisée en cellules de tailles différentes. On y retrouve essentiellement les standards suivants :

- **AMPS** (Advanced Mobile Phone System) apparu aux USA, constitue le premier standard des réseaux de 1G, il possède de faibles mécanismes de sécurité rendant possible le piratage des lignes téléphoniques.
- **TACS** (Total Access Communication System) est la version européenne du standard AMPS utilisant une bande de fréquence de 900MHz.

I.3.2 La deuxième génération -2G :

GSM (Global System for Mobile communication) est la première norme de téléphonie cellulaire qui soit pleinement numérique. C'est la référence mondiale pour les systèmes radio mobiles. Le réseau GSM offre à ses abonnés des services qui permettent la communication de stations mobiles de bout en bout à travers le réseau. Ce réseau permet la communication entre deux postes mobiles où entre un poste mobile et un poste fixe. Les autres services sont la transmission de données et la transmission de messages alphanumériques courts. Il transporte les informations sans modification de bout en bout en mode circuit dans le réseau GSM ce qui garantit la chronologie des informations échangées. Dans le réseau GSM, les données de l'utilisateur et la signalisation du réseau sont transportées dans des canaux de communication différents [4].

I.3.2.1 Architecture du réseau GSM :

Le réseau GSM est un système qui se divise en plusieurs BTS (station de base) chaque BTS comporte une (ou plusieurs) cellules. Une communication en cours peut passer d'une cellule à l'autre sans interruption ce qui permet une mobilité aux utilisateurs [4].

Le Système GSM est constitué de 3 sous-systèmes :

- Le sous-système radio contenant la station de base et son contrôleur (BSS).
- Le sous-système réseau ou d'acheminement(NSS).
- Le sous-système opérationnel ou d'exploitation et de maintenance(OSS).

La figure I.1 représente l'Architecture globale du GSM :

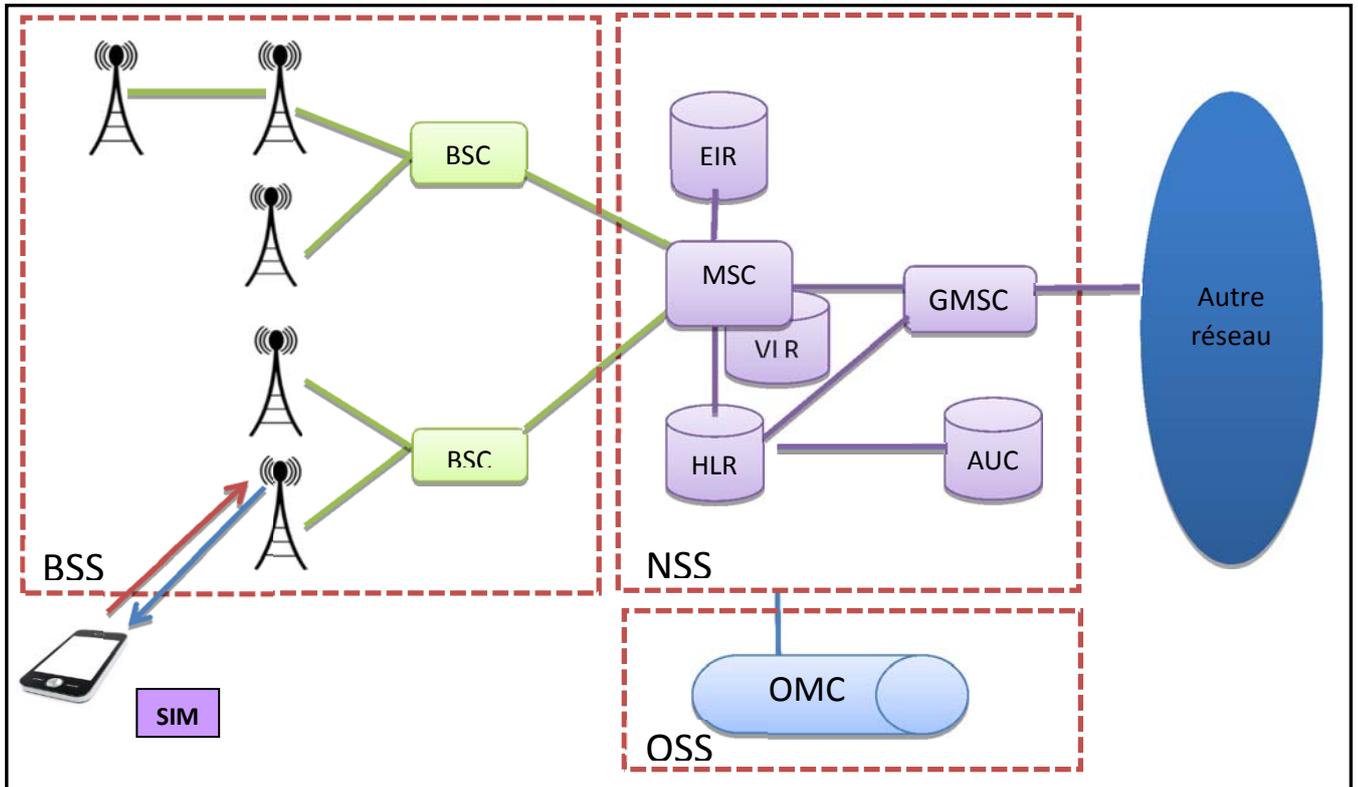


Figure I.1 Architecture globale du GSM

1. La station mobile (le téléphone portable)

La **station mobile** est constituée du téléphone portable à proprement parler mais aussi d'une carte appelée **carte SIM** (Subscriber Identity Module), qui est indispensable pour accéder au réseau. Cette carte contient, sur un microprocesseur, les informations personnelles de l'abonné. Ce dernier peut donc, par insertion de la carte SIM dans n'importe quel téléphone portable, recevoir des appels, en donner et avoir accès à tous les services qu'il a souscrit : le téléphone portable et l'utilisateur sont totalement indépendants [1].

Le téléphone portable est identifié par le numéro **IMEI** (International Mobile Equipment Identity). Ce numéro renseigne sur le type d'équipement, l'identité du constructeur et le numéro de série.

La carte SIM, elle, contient le numéro **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity), mais aussi une clé secrète pour la sécurité, ainsi que d'autres informations. Les numéros IMEI et IMSI sont indépendants, ce qui permet la séparation du téléphone portable et de l'utilisateur. De plus, la carte SIM protège l'abonné des connections frauduleuses par l'introduction d'un numéro d'identité personnel (code PIN) lors de l'accès au réseau.

2. Le sous-système BSS :

Le sous-système BSS ne comporte que deux types d'équipements :

Le **BSC** et la **BTS** :

➤ **BTS** (Base Transceiver Station)

La BTS est l'équipement de transmission radio du réseau GSM. Elle effectue différentes opérations, dont le codage/décodage des informations transmises sur l'interface radio; la modulation/démodulation.

➤ **BSC** est un équipement pouvant contrôler une ou plusieurs BTS.

Les fonctions principales du BSC sont les suivantes :

- Le routage de l'appel entre la BTS et le MSC.
- L'allocation des ressources utilisées sur l'interface radio. Cette fonction comprend l'allocation initiale, ainsi que le contrôle des ressources radio lors de la procédure de Handover;
- Le contrôle de la BTS (démarrage, supervision, activation des ressources radio utilisées par la communication) [5].

3. Le sous-système NSS(*Network Switching Subsystem*)

Cette section donne une description rapide des rôles et des fonctions des constituants du réseau cœur GSM. Il est constitué de [6] :

➤ **MSC**: (Mobile Switching Centre)

Le MSC est un commutateur de données et de signalisation. Il est chargé de gérer l'établissement de la communication avec le mobile.

➤ **Le GMSC** (Gateway MSC): est un MSC un peu particulier servant de passerelle entre le réseau GSM et les autres réseaux Mobile (les autres opérateurs) ou Fixe (RTCP Réseau Téléphonique Commuté Public, RNIS Réseau Numérique à Intégration de Services...). Lorsque

l'on cherche à joindre un abonné GSM à partir d'un point extérieur au réseau GSM (on parle alors d'appel entrant), l'appel passe par le GSMC, qui effectue une interrogation du HLR avant de router l'appel vers le MSC dont dépend l'abonné.

➤ **Le VLR** (Visitor Location Register) est une base de données attachée à un ou plusieurs MSC.

Le VLR est utilisé pour enregistrer les abonnés qui se trouvent dans une zone géographique donnée, appelée LA (Location Area). Lorsque le mobile se déplace en mode veille et détecte un changement de LA, il doit signaler ce changement au VLR. Cette mise à jour est nécessaire au réseau pour pouvoir joindre le mobile en cas d'appel entrant.

Le VLR contient des données assez similaires à celles du HLR. Par ailleurs, le VLR mémorise pour chaque abonné les informations suivantes:

- L'identité temporaire du mobile TMSI (Temporary Mobile Station Identity) le VLR alloue un numéro temporaire unique à chaque mobile se localisant dans sa zone de couverture ; ce numéro est appelé TMSI, le TMSI est utilisé pour identifier le mobile lors des interactions station mobile, et n'est connu que sur la partie MS.

Dans la plupart des réseaux, le MSC et le VLR sont un seul et même équipement : MSC/VLR.

➤ **Le HLR** (Home Location Register) est la base de données contenant les informations relatives aux abonnés gérés par l'opérateur. Pour chaque abonné, le HLR mémorise les informations suivantes:

- Les informations de souscription (abonnement data ou non, souscription à tel service supplémentaire, débit maximal autorisé, etc.).
 - L'identité du mobile, ou IMSI (International Mobile Station Identity).
 - Le numéro d'appel de l'abonné, ou MSISDN (Mobile Station International ISDN Number).
- Par ailleurs, le HLR mémorise le numéro de VLR sous lequel l'abonné est enregistré de manière à pouvoir joindre facilement l'abonné dans le cas d'un appel qui lui est destiné.

➤ **AuC** (Authentication Center) L'AuC est un élément permettant au réseau d'assurer certaines fonctions de sécurité du réseau GSM:

- L'authentification de l'IMSI de l'abonné;

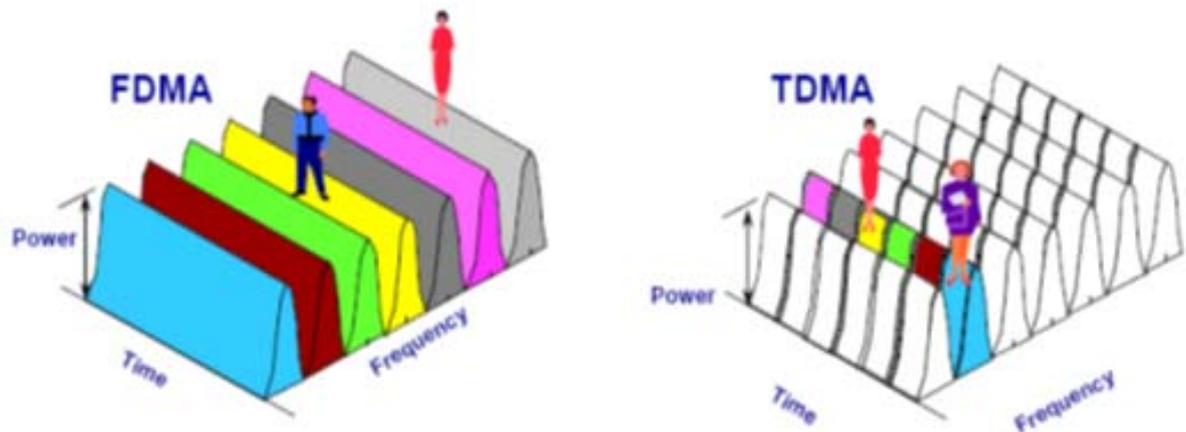
- Le chiffrement de la communication.

Ces deux fonctions de sécurité sont activées au début de l'établissement d'appel avec l'abonné. En cas d'échec de l'une ou l'autre des procédures, l'appel est rejeté. L'AuC est couplé au HLR et contient pour chaque abonné une clé d'identification lui permettant d'assurer les fonctions d'authentification et de chiffrement.

➤ **EIR** (Equipment Identity Register): L'EIR est un équipement optionnel des réseaux GSM destiné à lutter contre le vol des terminaux mobiles. L'EIR est en fait une base de données contenant la liste des mobiles interdits, appelée black list.

I.3.2.2 Techniques d'accès :

La majorité des systèmes 2G utilisent la technique TDMA (Time Division Multiple Access) ou le multiplexage temporel, cette technique consiste à diviser chaque canal de communication en trames de 8 intervalles de temps [4]. Les techniques FDMA et TDMA présentés aux figures I.2.



Figures I.2 Technique d'accès multiple FDMA et TDMA

Chaque porteuse est divisée en 8 intervalles de temps appelés time-slots. La durée d'un slot a été fixée pour le GSM à 7500 périodes du signal de référence fourni par un quartz à 13 MHz qui rythme tous les mobiles GSM :

$$T_{\text{slot}} = 7500/13 \text{ MHz} = 0,5769 \text{ ms soit environ } 577 \mu\mu\mu\mu$$

#Sur une même porteuse, les slots sont regroupés par paquets de 8 qui constituent une trame TDMA.

$$\text{La durée de la trame est donc : } T_{\text{TDMA}} = 8 T_{\text{slot}} = 4,6152 \text{ ms}$$

Il est alors possible d'effectuer un multiplexage fréquentiel, appelé Fréquence Division Multiple Access (FDMA), en attribuant un certain nombre de fréquences porteuses par station de base, c'est la méthode la plus ancienne. Le spectre disponible est divisé en plusieurs canaux radio avec une largeur de bande fixée. Chaque canal fréquentiel est assigné à un seul utilisateur simultanément [4].

I.3.2.3 La bande de fréquences de réseau GSM :

Dans le système GSM/DCS, deux bandes de fréquences sont utilisées, l'une autour des 900 MHz et l'autre autour de 1800 MHz.

La norme GSM prévoit que la téléphonie mobile par GSM occupe deux bandes de fréquences aux alentours des 900 [MHz] :

- La bande de fréquence 890 –915 [MHz] pour les communications montantes (du mobile vers la station de base) et
- La bande de fréquence 935 –960 [MHz] pour les communications descendantes (de la station de base vers le mobile).

Chaque porteuse GSM est identifiée de manière unique par un numéro n , désigné par le sigle ARFCN, codé sur 10 bits conformément au plan suivant où la fréquence de la voie descendante est exprimée en MHz :

- Pour $1 \leq n \leq 124$ $f = 935 + (0,2 \times n)$ (GSM)
- Pour $975 \leq n \leq 1024$ $f = 935 + (0,2 \times (n-1024))$ (GSM étendu EGSM)

Dans le DCS-1800 (Digital Communication System) dont les caractéristiques sont quasi identiques au GSM en termes de protocoles et de service. Les communications montantes se faisant alors entre 1710 et 1785 [MHz] et les communications descendantes entre 1805 et 1880 [MHz].

I.3.3 La troisième génération – 3G :

La norme 3G a été définie et spécifiée par l'Union Internationale de Télécommunications, L'objectif initial était d'avoir un seul standard universel fournissant des services multimédia mobiles à haut débit et à travers une seule bande de fréquences [8].

L'Universal Mobile Télécommunications System (UMTS) est l'une des technologies de téléphonie mobile de troisième génération (3G). Elle est basée sur la technologie W-CDMA,

standardisée par le 3GPP et constitue l'implémentation dominante, d'origine européenne, des spécifications IMT-2000 de l'UIT pour les systèmes radio cellulaires 3G [8].

L'UMTS est parfois appelé 3GSM, soulignant la filiation qui a été assurée entre l'UMTS et le standard d GSM auquel il succède. Elle est également appelée 3G, pour troisième génération.

I.3.3.1 Architecture du réseau UMTS :

Le réseau UMTS est composé des éléments suivants : le réseau terrestre d'accès radio UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network), les terminaux mobiles et le réseau cœur (Core Network - CN) dérivé de celui du réseau GSM, assurant les connexions internes et le réseau intelligent (Intelligent Network - IN) qui a pour rôle d'assurer les fonctions de localisation, d'enregistrement, de gestion de ressources, de mobilité, ...etc, La figure suivante représentée l'Architecture globale de réseau UMTS

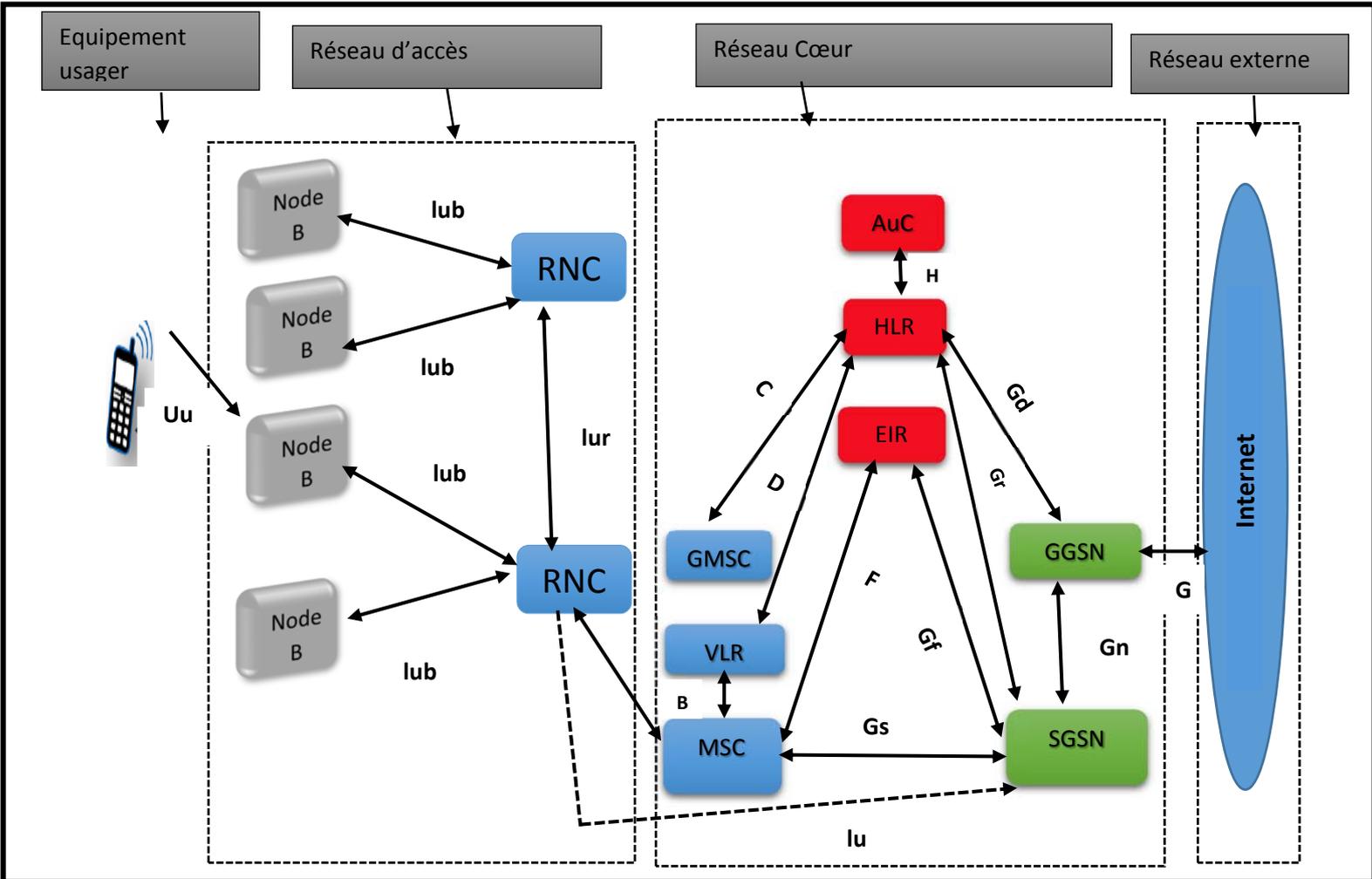


Figure I.3 représentée l'Architecture globale du UMTS

1. Le terminal utilisateur(UE) :

Le terminal utilisateur contient les éléments suivants

- Equipement mobile (ME) : Les mobiles UMTS ne seront plus de simples téléphones mais des terminaux multimédias capables d'offrir simultanément des services de transmission de données, d'audio et de vidéo en tout moment.
- Universal Subscriber Identity Module (USIM) : il s'agit d'une carte à puce, version améliorée de la SIM (cas GSM), dédiée à la téléphonie 3G.

2. Le réseau d'accès radio (UTRAN) :

Le réseau d'accès radio propose les fonctions permettant d'acheminer les informations depuis l'utilisateur jusqu'au réseau cœur. Il est une passerelle entre l'équipement usager et le réseau cœur via les interfaces Uu et Iu.

Le réseau d'accès UTRAN est composé de plusieurs éléments : une ou plusieurs stations de base (appelées NodeB), des contrôleurs radio RNC (Radio Network Controller) et des interfaces de communication entre les différents éléments du réseau UMTS.

- NodeB : La NodeB est une station de base. Réparties géographiquement sur l'ensemble du territoire, Le rôle principal du NodeB est d'assurer les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules du réseau d'accès de l'UMTS avec un équipement usager
- RNC : Le RNC est un contrôleur de NodeB. Le RNC est encore ici l'équivalent du BCS dans le réseau GSM. Le rôle principal du RNC est de router les communications entre le NodeB et le réseau cœur de l'UMTS. Le RNC constitue le point d'accès pour l'ensemble des services vis-à-vis du réseau cœur.

Plusieurs types d'interfaces de communication coexistent au sein du réseau UMTS :

- **Uu** : Interface entre un équipement usager et le réseau d'accès UTRAN. Elle permet la communication avec l'UTRAN via la technologie CDMA.
- **Iu** : Interface entre le réseau d'accès UTRAN et le réseau cœur de l'UMTS. Elle permet au contrôleur radio RNC de communiquer avec le SGSN
- **Iur** : Interface qui permet à deux contrôleurs radio RNC de

communiquer.

- **Iub** : Interface qui permet la communication entre un NodeB et un contrôleur radio RNC.

3. Le réseau cœur (CN) :

Le réseau cœur (CN Core Network) est la partie du système UMTS chargée de la gestion des services souscrits par l'abonné. Il permet de communiquer à l'intérieur d'un même réseau de téléphonie mobile et assure l'interconnexion de ce dernier avec des réseaux externes, fixes ou mobiles, numérique ou analogique, assure aussi le contrôle de la sécurité et la gestion de l'interface avec les réseaux externes.

Le réseau cœur est composé de trois parties :

- **Le domaine CS (Circuit Switched)** : utilisé pour la téléphonie c'est-à-dire Il est chargé de la transmission de la voix, de la transmission des messages courts, fax et des services de type temps réel.

Le domaine CS est composé des éléments suivants :

- Le MSC (Mobile-services Switching Center) : est un commutateur qui assure l'interface avec le réseau cœur pour un mobile accédant aux services à commutation de circuit.
- Le GMSC (Gateway MSC) : est une passerelle entre le réseau UMTS et le réseau téléphonique commuté PSTN (Public Switched Telephone Network).
- Le VLR (Visitor Location Register) : est une base de données, assez similaire à celle du HLR, attachée à un ou plusieurs MSC. Le VLR garde en mémoire des informations sur la position de l'abonné et son déplacement dans la zone de localisation reliée à un ou plusieurs MSC.

- **Le domaine PS (Packet Switched)** : qui permet la commutation de paquets c'est-à-dire Il assure la connexion aux réseaux utilisant le protocole IP (Intranet, WAP) et aux réseaux X.25.

Le domaine PS est composé des éléments suivants :

- Le SGSN (Serving GPRS Support Node) : s'occupe des services des transmissions de données entre les mobiles et le réseau mobile. Ses tâches incluent la gestion de la mobilité (attach/détach/mise à jour RA), la gestion de session (établissement/libération PDP), le routage et transfert des paquets.

- Le GGSN (Gateway GPRS Support Node) : est une passerelle vers les réseaux à commutation de paquets extérieurs tels que l'Internet. Le GGSN décapsule des paquets IP arrivant sur un contexte PDP en provenance du SGSN et les envoie au réseau IP externe correspondant (internet, ATM, RTC...). Le GGSN permet aussi d'acheminer les paquets IP provenant des réseaux IP externes vers le SGSN du destinataire sur un tunnel.

○ **Éléments communs :**

Ce sont des éléments partagés par le domaine de commutation de paquet et le domaine de commutation de circuit, ces éléments sont :

- HLR (Home Location Register) : est une base de données qui contient toutes les informations relatives aux abonnés : l'identité de l'équipement usager, le numéro d'appel de l'utilisateur, les informations relatives aux possibilités de l'abonnement souscrit par l'utilisateur.
- L'EIR (Equipment Identity Register) : est une base de données contenant la liste des mobiles interdits listés par un numéro unique propre à chaque équipement usager, le numéro IMEI (International Mobile station Equipment Identity).
- L'AuC (Authentication Center) : est en charge de l'authentification de l'abonné, ainsi que du chiffrement de la communication pour assurer la sécurité d'accès au système.
- Le domaine à commutation de circuits :

Le domaine circuit permettra de gérer les services temps réels dédiés aux conversations téléphoniques (vidéo-téléphonie, jeux vidéo, streaming, applications multimédia). Ces applications nécessitent un temps de transfert rapide.

I.3.3.2 Techniques d'accès :

L'UMTS a adopté un système CDMA nouveau, appelé WCDMA, ou CDMA large bande, parce que supportant des informations usager pouvant atteindre 2 Mbit/s, au lieu que quelques dizaines de kilobits par seconde pour les systèmes précédents [5].

Le principe de base du CDMA consiste à affecter à tous les usagers en communication dans une même cellule la même fréquence au même moment, la discrimination entre les appels se faisant grâce à un codage selon un code différent pour chaque usager.

Ce codage est le produit du signal à transmettre par une séquence pseudo-aléatoire de rythme nettement plus élevé (huit fois en W-CDMA) que le signal. Le signal binaire d'origine à transmettre est juste encodé en NRZ (code sans retour à zéro) puis multiplié par la séquence de codage pseudo-aléatoire. Il en résulte un signal de fréquence égale à celle de la séquence pseudo-aléatoire. On dit qu'on a effectué une modulation à séquence directe. On a également procédé à une opération d'étalement de spectre, puisque pour un signal de fréquence maximale F , après modulation, le signal prêt à transmettre à une fréquence maximale nF , où n est le rapport entre le rythme de la séquence de codage et celui du signal à transmettre. On appelle gain de traitement ou facteur d'étalement [5].

Le récepteur reçoit un signal multiplexé comprenant toutes les séquences codées. Par multiplication avec l'une des séquences de codage, il retrouve un seul signal de départ, les autres étant trop peu décodés, car insuffisamment corrélés, pour être perçus.

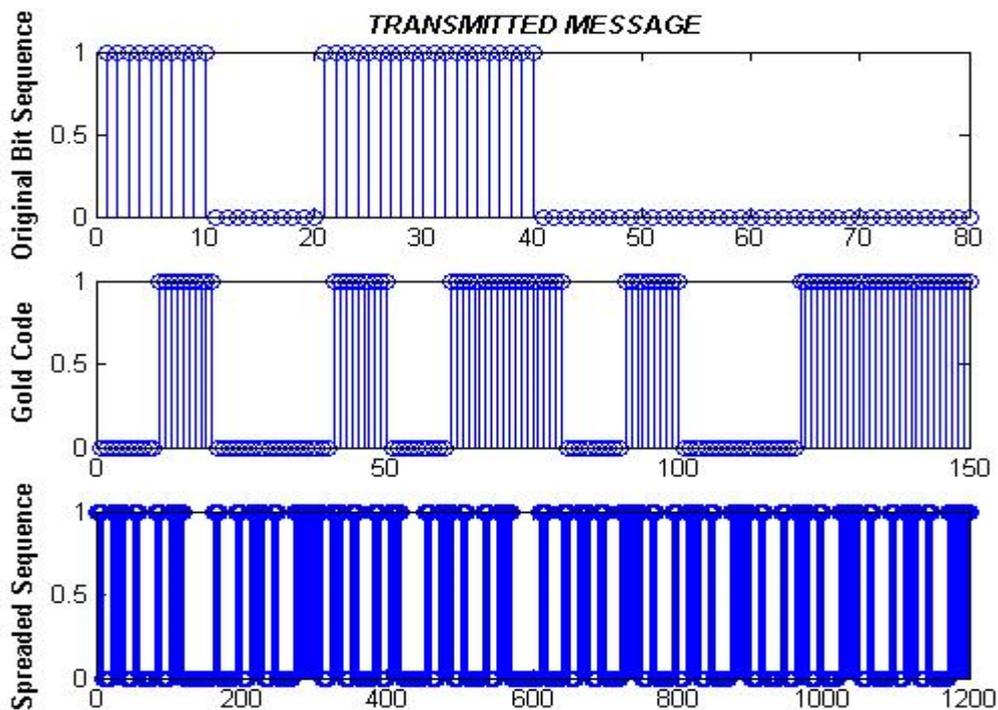


Figure 1-4 exemple d'un signal CDAMA

I.3.3.3 Attribution des fréquences et le débit d'un réseau 3G :

Les spécifications IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications for the year 2000*) de l'Union Internationale des Communications (UIT), définissent les caractéristiques de la 3G (troisième génération de téléphonie mobile). Ces caractéristiques sont notamment les suivantes [9] :

- Un haut débit de transmission :
 - 144 Kbps avec une couverture totale pour une utilisation mobile,
 - 384 Kbps avec une couverture moyenne pour une utilisation piétonne,
 - 2 Mbps avec une zone de couverture réduite pour une utilisation fixe.
- Compatibilité mondiale.
- Compatibilité des services mobiles de 3ème génération avec les réseaux de seconde génération.

La 3G propose d'atteindre des débits supérieurs à 144 kbit/s, ouvrant ainsi la porte à des usages multimédias tels que la transmission de vidéo, la visio-conférence ou l'accès à internet haut débit. Les réseaux 3G utilisent des bandes de fréquences différentes des réseaux précédents : 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz.

I.3.4 La quatrième génération – 4G :

La 4G est la quatrième génération de téléphonie mobile. Elle est marquée par l'arrivée de la nouvelle technologie LTE (Long Term Evolution), qui se caractérise par un débit théorique de 150 Mbit/s.

Les évolutions principales de la 4G résident dans l'augmentation des débits maximum théoriques (meilleur débit réel et meilleure capacité des réseaux à écouler le trafic) et des délais de latence plus réduits (temps de réaction réduit permettant une meilleure interactivité). L'utilisateur dispose ainsi d'une connexion environ 3 fois plus rapide qu'en 3G (résultat constaté sur les débits médians lors de l'enquête de qualité de service de l'ARCEP menée en 2013/2014).

I.3.4.1 Architecture du réseau 4G :

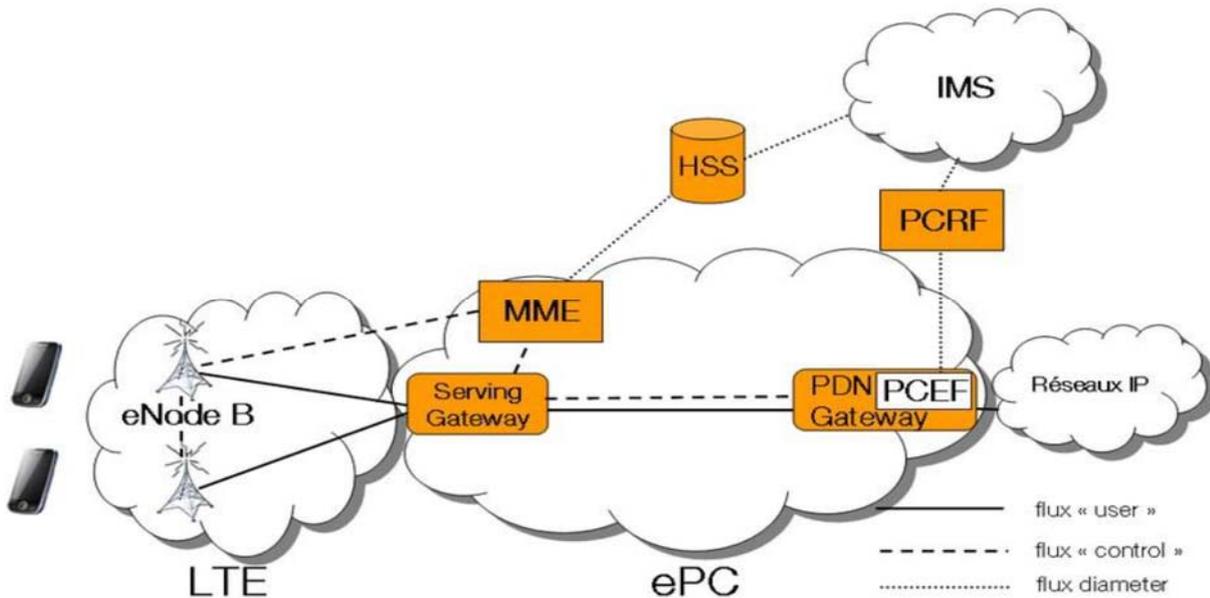


Figure 1-5 l'architecture générale du réseau 4G

1. Le nouveau réseau cœur : ePC

Contrairement au passage de la 2G à la 3G, la 4G s'appuie sur un tout nouveau réseau cœur : l'evolved Packet Core. Ce nouveau réseau cœur utilise de nouveaux équipements, mais l'on y retrouve un peu l'esprit du réseau cœur paquet 2G et 3G.

L'évolution majeure de l'ePC est la séparation des plans contrôle et usage pour les équipements cœur. A l'image du NGN (Next Generation Network) pour le circuit, les flux « contrôle » et « usage » ne seront plus, dans la plupart des cas, à destination des mêmes équipements [10].

Les nouveaux éléments de la 4G :

Le SGSN est séparé en deux entités fonctionnelles différentes : le MME (Mobile Management Entity) pour le plan « contrôle » et le Serving Gateway pour le plan « usage ». Le MME va ainsi gérer les sessions (authentification, autorisations, session voix et donnée) et la mobilité (localisation, « paging », « hand-over » ...) du terminal.

La Serving Gateway sera responsable de l'acheminement des flux « utiles » dans le réseau cœur (les communications voix, le trafic data, etc.).

Le **GGSN** quant à lui est remplacé par une **PDN Gateway** (Paquet Data Network Gateway). La **PDN Gateway** est responsable du lien avec les autres réseaux (publics ou privés), et notamment avec le monde Internet [3].

Le **HLR** est remplacé par un **HSS** (Home Subscriber Server). Le **HSS** est responsable d'à peu près les mêmes fonctionnalités que le **HLR** (base des profils des abonnés, avec leurs droits et leurs caractéristiques). Le **HSS** inclut en plus un lien possible avec le monde **IMS**, pour la gestion des services de voix enrichis [13].

Un nouvel élément du cœur de réseau 4G est le **PCRF** (Policy and Charging Rules Fonction), qui permet la gestion dynamique de la facturation et de Policy de qualité de service des flux (flux best effort, flux « premium » avec bande passante et latence garanties, tarification dynamique suivant le flux, etc.).

Le **PCEF** (Policy and Charging Enforcing Function), module fonctionnel logé dans la **PDN Gateway**, applique les règles fixées par le **PCRF**.

Enfin, l'**IMS** (IP Multimedia Subsystem), bien que ne faisant pas partie véritablement de la 4G, est un ensemble d'éléments permettant d'offrir des services multimédias sur les réseaux IP (et donc entre autres sur le réseau mobile) [3]. L'**IMS** permettra des services interpersonnels multimédia riches : voix sur IP, conférence vidéo, agenda enrichi, messagerie instantanée, sonnerie sur plusieurs terminaux, etc.

I.3.4.2 Techniques d'accès :

Pour tout système radio mobile, il faut définir une technique d'accès qui permet une gestion des ressources radio disponibles. Pour les réseaux LTE-Advanced, la technique OFDMA est utilisée dans le sens descendant et la technique SC-FDMA (single carrier Frequency Division Multiple Access) est appliquée dans le sens montant.

I.3.4.3 Les débits et La mobilité d'un réseau 4G :

Les exigences pour la technologie LTE ont porté également sur des gains de débit en comparaison avec le HSPA (High Speed Packet Acces). Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

- 100 Mbit/s en voie descendante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 5 bit/s/Hz ;
- 50 Mbit/s en voie montante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale crête de 2,5 bit/s/Hz.

Ces chiffres supposent une UE de référence comprenant :

- Deux antennes en réception ;
- Une antenne en émission.

La mobilité est une fonction clé pour un réseau mobile. Le LTE vise à rester fonctionnel pour des UE se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'UE faibles (entre 0 et 15 km/h). Les services temps-réel comme le service voix doivent être proposés avec le même niveau de qualité qu'en UMTS. L'effet des Handover intra système (procédure de mobilité entre deux cellules LTE) sur la qualité vocale doit être moindre qu'en GSM, ou équivalent. Le système doit également intégrer des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets lors d'un Handover intra système. Le LTE doit aussi coexister avec les autres technologies 3GPP. Pour ce faire, les exigences suivantes ont été définies [12].

I.3.5 La qualité de service dans les réseaux mobiles

La qualité de service (QoS) est la capacité d'un élément du réseau de fournir un niveau de Garantie afin d'assurer un bon acheminement des données. Certaines applications sont Plus exigeantes que d'autres tels que les applications temps réel [6].

La QoS est une condition nécessaire au passage du multimédia. Une valeur de QoS S'applique à l'ensemble d'une connexion réseau. Elle doit être identique aux deux extrémités De la connexion [11].

La QoS est décrite à l'aide de paramètres. Plusieurs paramètres de qualité de service ont été définies, dont voici les principaux :

- Délai d'établissement de la connexion réseau : correspond au temps s'écoulant entre la demande de connexion et la confirmation de connexion. Ce paramètre de QoS indique le temps maximal acceptable par l'utilisateur.

- Probabilité d'échec de l'établissement de la connexion : est établie à partir des demandes de connexion non satisfaites.
- Temps de transit lors du transfert des données : correspond au temps écoulé entre une demande de transfert de données et l'indication de transfert.
- Taux d'erreurs binaire : se calcule à partir du nombre de paquets qui arrivent erronés, perdus ou en double sur le nombre total de paquets émis.
- Probabilité de rupture de la connexion réseau : se calcule à partir du nombre de libérations et de réinitialisations d'une connexion réseau par rapport au nombre de transferts effectués
- Délai de libération de la connexion réseau : c'est le délai maximal acceptable entre une demande de connexion et la libération effective.
- Protection de la connexion réseau : détermine que la connexion réseau est en état de marche durant toute la période où elle est ouverte par un utilisateur.
- Priorité de la connexion : détermine la priorité d'accès à une connexion réseau, la priorité de maintien d'une connexion et la priorité des données sur la connexion.

I.4 Conclusion :

Les réseaux mobiles sont des réseaux sans fil dans lesquels au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaisons filaires. Grâce à ce type de réseau, un utilisateur (abonné) a la possibilité de rester connecté au réseau tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on parle de « mobilité ».

Ces réseaux sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques et utilisent l'interface radio comme support de transmission.

Le déploiement du réseau de télécommunications à haut débit nécessite le développement de nouveaux composants et architectures optoélectroniques adaptés à ces vitesses de transmission. Les enjeux stratégiques et économiques de ces développements découlent notamment de la

nécessité de disposer, à assez court terme, de composants et d'outils économiquement viables (en matière de bas coûts de production et d'utilisation)

Chapitre II :

*La modulation OFDM et
UFMC*

II.1 Introduction :

Selon les besoins le futur mobile 5G les réseaux devraient fournir des performances supérieures à celles Réseaux LTE-Advanced, y compris taux de transmission de données en hausse jusqu'à 20 Gb / s, la latence du réseau jusqu'à 1 ms et le nombre de appareils desservis jusqu'à 1 million par kilomètre carré. Développement de nouvelles méthodes de transmission de données pour améliorer L'efficacité spectrale donne lieu à la quantité de données transmises dans les réseaux mobiles et haut débit de transmission de données en 5G réseaux à ressource de fréquence limitée. De nos jours, la transmission de données la plus utilisée la technologie des systèmes sans fil à large bande est orthogonale Multiplexage par répartition en fréquence (OFDM). OFDM est utilisé dans systèmes de communication tels que LTE / LTE-Advanced et IEEE 802.11a / g / n / ac, garantissant leur efficacité spectrale élevée. Cependant, ces caractéristiques qu'OFDM fournit dans 4 G les réseaux ne suffisent plus pour répondre aux exigences élevées des réseaux 5G. Par conséquent, une technologie prometteuse pour la 5G réseaux est de nouvelles technologies telles que Filter Bank Multicarrier (FBMC) et Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC).

Ce chapitre traite un nouveau format de modulation UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier) pour le futur de réseaux mobile 5 G. La technologie UFMC est comparée à la technologie OFDM utilisé dans les réseaux 4G. Un inconvénient de la technologie OFDM est la nécessité d'utiliser un intervalle de garde (cyclique préfixe), qui réduit le taux de transmission de données. Pour le format de modulation UFMC, le préfixe cyclique peut être rejeté [14]. En outre, la technologie UFMC est moins sensible aux erreurs d'estimation de la fréquence et des décalages horaires [14].

II.2 Modulation :

II.2.1 Principe de Modulation :

La modulation et la démodulation sont deux étapes de la transmission d'une information entre deux utilisateurs. Par exemple, pour faire communiquer deux utilisateurs (voix data) par une ligne téléphonique. Les éléments suivants : un ordinateur, logiciels, des protocoles, un modulateur et un démodulateur sont nécessaires. La ligne téléphonique est le canal de transmission, sa bande passante est réduite, il est affecté d'atténuation et de distorsions. La modulation convertit les informations binaires issues des protocoles et des logiciels, en tension et courant dans la ligne. Le type de modulation employé doit être adapté d'une part au signal (dans ce cas numérique), aux performances demandées (taux d'erreur), et aux caractéristiques de la ligne.

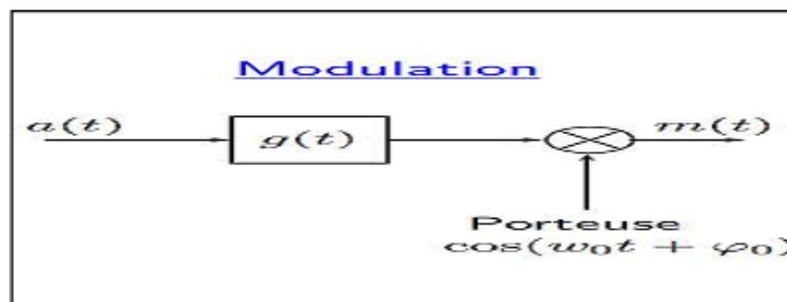


Figure II.1 – Schéma d'une modulation

La modulation permet donc de traduire le spectre du message dans un domaine de fréquences qui est plus adapté au moyen de propagation et d'assurer après démodulation la qualité requise par les autres couches du système.

Le but des modulations analogiques est d'assurer la qualité suffisante de transmission d'une information analogique (voix, musique, image) dans les limites du canal utilisé.

Le but des modulations numériques est d'assurer un débit maximum de données binaires, avec un taux d'erreur acceptable. Dans le modèle des couches OSI (architecture standard des télécommunications numériques), la modulation est l'élément principal de la couche physique [15].

II.2.2 Les intérêts de modulation :

- **Facilite l'accès multiple** : en traduisant le spectre en bande de base des signaux provenant de différents utilisateurs pour différentes bandes de fréquence, de multiples utilisateurs peuvent être logés à l'intérieur d'une bande du spectre électromagnétique.
- **Augmente la portée de communication** : les signaux en bande de base de basse fréquence souffrent de l'atténuation et ne peuvent donc pas être transmis sur de longues distances. La conversion à une bande de fréquence plus élevée se traduit par une longue distance de transmission.
- **Réduction de la taille de l'antenne** : La hauteur de l'antenne est inversement proportionnelle à la fréquence de signal rayonné et donc le rayonnement du signal haut fréquence diminue la taille de l'antenne [16].

II. 2 .3 Modulation mono-porteuse :

Les systèmes de transmission mono-porteuse sont des systèmes qui transmettent les données de façon séquentielle sur une seule bande de fréquence ou canal physique, autour d'une seule porteuse, Cette technique est certes très simple à mettre en œuvre mais présentent des inconvénients majeurs lorsque nous sommes en présence de canaux multi-trajets très sélectifs.

En effet les multiples trajets du canal introduisent une interférence entre symboles (IES) qui affecte la qualité de transmission. Ce phénomène est d'autant plus accentué que le temps symbole du système est faible. Pour combattre cette dégradation, des techniques de compensation et d'égalisations existent dans la littérature mais on peut déjà limiter ces dégradations en adoptant des mesures de prévention à l'émission comme des formes d'ondes particulières limitant IES et qui seront utilisées comme support physique de transmission du signal.

D'autres part, chaque symbole de ce système, occupant toute la bande passante de communication, va subir la sélectivité fréquentielle du canal. Ce phénomène sera d'autant plus probable que la bande passante du système est importante c'est à dire lorsque le temps symbole est faible. Au regard de ces deux phénomènes on comprend mieux pourquoi cette technique de transmission n'est pas adaptée aux nouveaux systèmes de communication qui requièrent une largeur de bande passante plus importante pour véhiculer plus de débit. Ainsi, d'autres systèmes de transmissions plus adaptés doivent être pensés pour supporter les exigences actuelles en termes de débit [17].

II. 2.4 Modulation multi porteuse :

Contrairement aux systèmes mono porteurs qui modulent sur une porteuse unique à un débit de R_s , 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 $\frac{R_s}{N}$. Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation.

La figure II.2 décrit le schéma de principe d'un modulateur OFDM en bande de base : après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre, les symboles complexes $\{X_i\}_{i=1,2,\dots}$ 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 $\{f_n\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ afin de former le signal de sortie.

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

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

$s_i(t)$ représente le i^{eme} symbole OFDM, tandis que les $\{X_{i,n}\}_{n=-N/2 \dots N/2-1}$ représentent les N symboles complexes $\{X_i\}$ qu'il transporte.

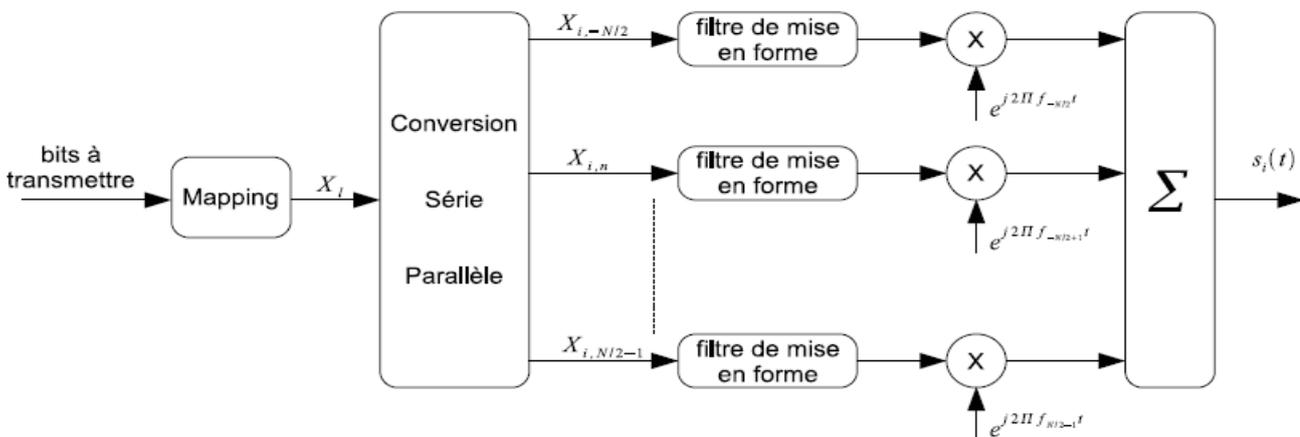


Figure II.2 – Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Le signal reçu s'écrit de façon suivante :

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

Où $n_n(t)$ est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la n_i ème *porteuse*.

Les symboles transmis peuvent être retrouvés en réception à l'aide d'un filtre adapté suivi d'un échantillonneur. La figure II.2 illustre le schéma de principe d'un récepteur OFDM.

II.3 Modulation OFDM :

II.3.1 Chaîne de transmission OFDM :

La Figure II.3 représente un schéma bloc simplifié d'un système OFDM à une seule entrée et une seule sortie (SISO). Sur le côté de l'émetteur, les symboles (QAM/PSK) modulés sont mappés à N sous porteuses orthogonales. Ceci est effectué à l'aide d'une opération de transformée de Fourier discrète inverse (IDFT). Souvent, l'IDFT est effectuée avec un algorithme de transformée de Fourier rapide inverse (IFFT), qui est efficace du point de vue calcul. Ensuite, le CP est inséré et une conversion parallèle-série est effectuée préalablement à la transmission sur l'interface air [18].

Au niveau du récepteur, les opérations inverses sont effectuées. Une fois le signal est au niveau du récepteur, le CP, qui aurait subi des interférences de la part des symboles OFDM précédents, est enlevé. Puis, une opération de transformé de Fourier rapide (FFT) amène les données au domaine fréquentiel. De cette manière, l'estimation du canal et l'égalisation est simplifiée

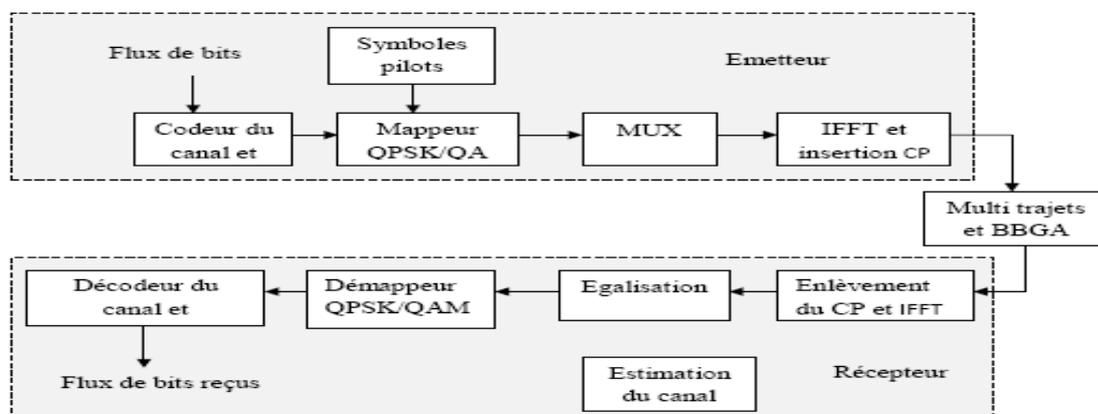


Figure II.3 – Chaîne de transmission OFDM

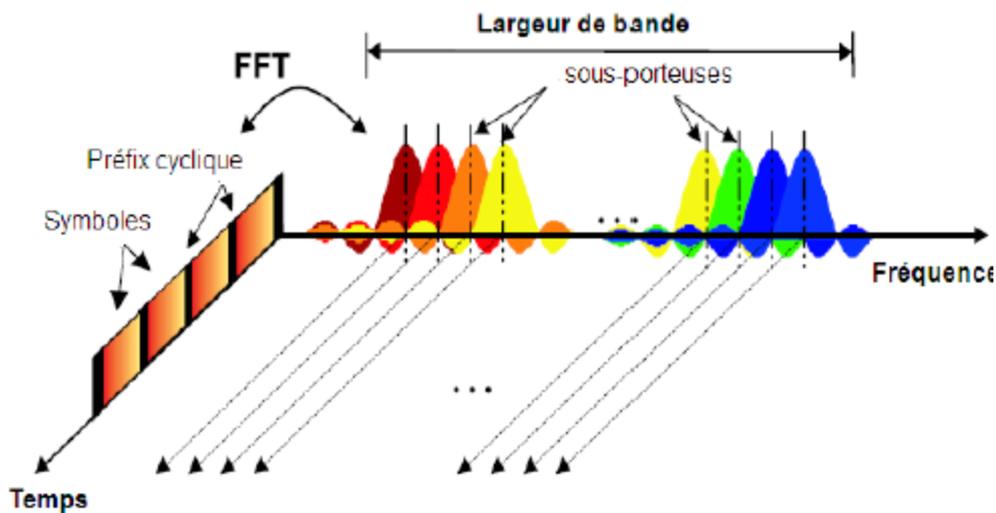


Figure II.4 – Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM.

II.3.2 Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM :

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés par la modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying), ou QAM. On peut augmenter le débit binaire en augmentant le nombre d'états dans une constellation, entraînant une diminution de distance entre les points de la constellation, ce qui accroît la sensibilité du système au bruit.

En général, la constellation de chaque sous-porteuse montre un changement aléatoire d'amplitude et de phase provoqué par l'environnement par trajets multiples. Parmi les modulations utilisées dans un système OFDM, la plus robuste est la modulation QPSK qui Code 2 bits par symbole.

II.3.3 L'Orthogonalité :

La technique de modulation OFDM autorise un fort recouvrement spectral entre les sous porteuses. Cependant, les porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité dans les domaines temporel et fréquentiel au même temps pour un bon fonctionnement. L'orthogonalité se réalise si l'espace entre deux fréquence adjacentes $f_n = 1/T_n$.

En effet chaque symbole moduler par une porteuse pendant une fenêtre rectangulaire de durée temporelle, sinus cardinal représente sous spectre en fréquence.

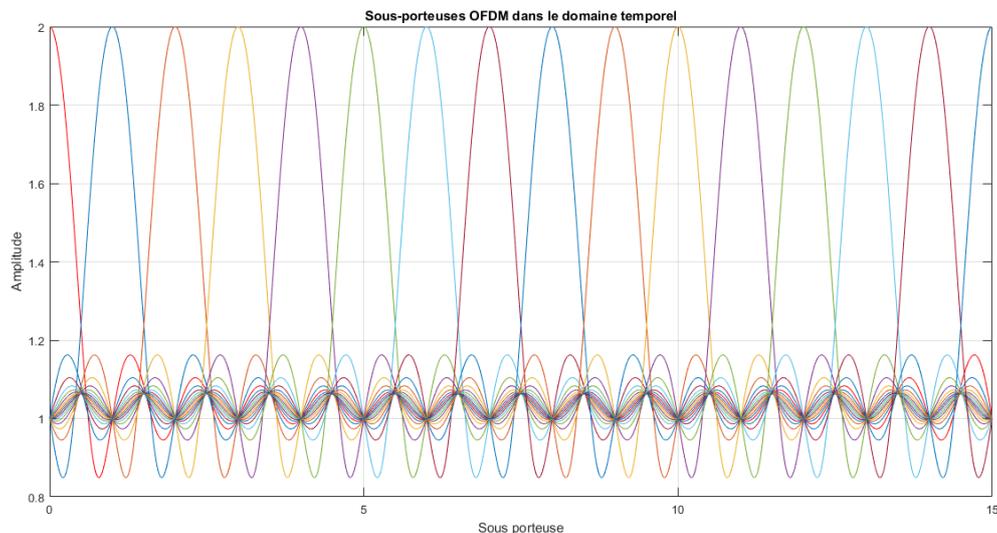


Figure II.5 – Spectre en sortie du modulateur OFDM.

Ainsi, il n'existe pas des interférences avec les autres sous porteuse, c'est ce qui permet recouvrement de spectre des différentes porteuses et une occupation optimale du spectre.

En doit choisir le nombre de sous porteuse N a fin qui remplir les deux conditions primordiales $T_s \gg T_m$ afin de pouvoir considérer le canal plat, et $T_s \ll 1/Bd$.

II.3.4 Conversion série en parallèle :

Les données à transmettre sont typiquement sous une forme de flux de données périodique. Dans un système OFDM une conversion série en parallèle est nécessaire pour convertir le train binaire périodique en données parallèles.

Les données assignées à chaque symbole dépendent de l'arrangement de modulation utilisé et du nombre de sous-porteuses. Par exemple, pour une modulation 16-QAM qui porte 4 bits des données par symbole, et une transmission employant 50 sous-canaux, le nombre de bits par symbole requis est de 200. Au récepteur le processus inverse aura lieu, les données parallèles doivent être converties à nouveau au flux de données périodique original.

Pour une transmission OFDM dans un environnement radio à trajets multiples la sélectivité fréquentielle des canaux de propagation peut avoir comme conséquence les groupes

de sous-porteuses fortement atténués entraînant la dégradation considérable du système. Il convient donc de prendre des mesures préventives avant modulation pour permettre la détection et la correction dans le récepteur de la plupart des erreurs apportées par le canal de transmission. Ces mesures, dont la principale consiste toujours à réintroduire une redondance dans le signal, sont appelées un codage de protection d'erreurs ou F.E.C (Forward Error Correction) et constituent l'essentiel du codage. Pour que le récepteur sache où est le bit altéré, il faut que l'émetteur envoie des informations supplémentaires pour localiser l'erreur. Le signal est ensuite modulé.

La partie du traitement qui concerne la dispersion d'énergie n'est pas à proprement parler destinée à la correction des erreurs, mais elle est spécifiée à l'émission pour uniformiser le spectre RF. Afin d'éviter les longues suites de 0 ou de 1 qui créeraient une raie à forte énergie dans le spectre, le signal doit être rendu quasi aléatoire pour assurer la répartition uniforme de l'énergie dans le canal d'émission. Ceci est obtenu au moyen d'un brouillage des données par une séquence pseudo aléatoire. Pour un décodage correct, le récepteur doit être équipé du même générateur pseudo-aléatoire, qui délivre la même séquence et qui démarre au même moment.

II.3.5 Intervalle de garde :

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

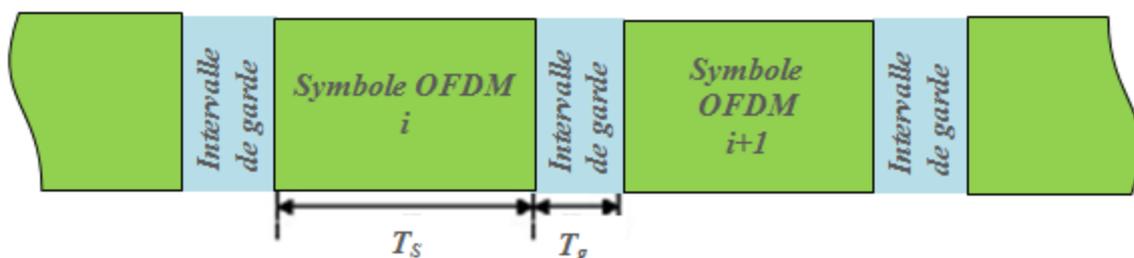


Figure II.6 – Intervalle de garde

Trois types d'intervalle de garde

- **CP** : Est une technique qui consiste à insérer une copie d'un bloc d'information à transmettre en amont de la trame. Plus clairement, il s'agit de récupérer une

partie des informations à transmettre et d'insérer ces informations en début de trame appelé cyclic-préfix (CP-OFDM) (figure II.7.a) [19].

- **ZP** : Insérer des zéros au lieu d'intervalle de garde et aucun signal est transmise pendant l'intervalle de garde, appelé zero-padding (ZP-OFDM) [20] ((figure II.7.b
- **KSP** : Où l'intervalle de garde est constitué de symboles pilotes, cette technique d'intervalle de garde peut être utile pour résoudre l'ambiguïté de synchronisation temporelle qui se produit avec d'autres techniques d'intervalle de garde (figure II.7.c) [20].

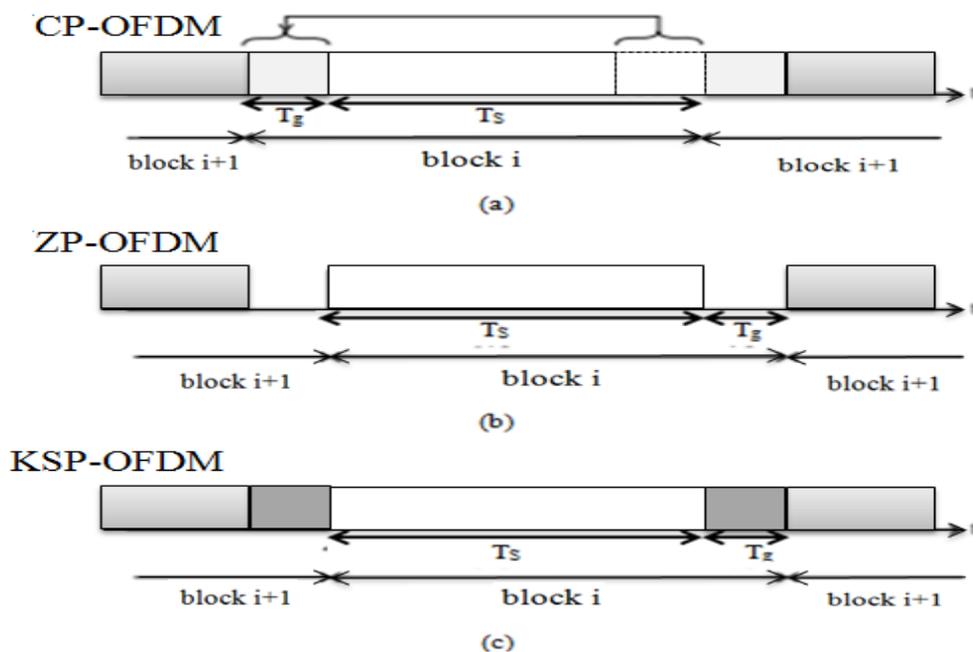


Figure II.7 – Les différents intervalles de garde

Mais les deux types d'intervalles de garde sont couramment utilisés : ZP, CP.

II.3.6 Implémentation numérique :

Dans les communications à haut débit, les débits sont limités par des contraintes physiques : Le bruit dû aux imperfections des systèmes et la nature physique des composants affectent la transmission du signal émis.

On réduit dans ce cas les erreurs de transmission en numérisant les informations.

De plus l'implémentation numérique offre aussi l'opportunité d'ajouter des codes correcteurs d'erreurs afin de protéger le signal des perturbations engendrées par le canal de transmission.

II .3.7 Implémentation numérique de la séquence de modulation :

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

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (II.3)$$

En discrétisant ce signal et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique on obtient une sortie $s(n)$ sous la forme [17] :

$$s_n = \sum_{K=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{K_n}{N}} \quad (II.4)$$

Les $s(n)$ sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des $c(k)$. En choisissant le nombre de porteuses N , le calcul de la transformée de Fourier inverse se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT menant au schéma numérique suivant :

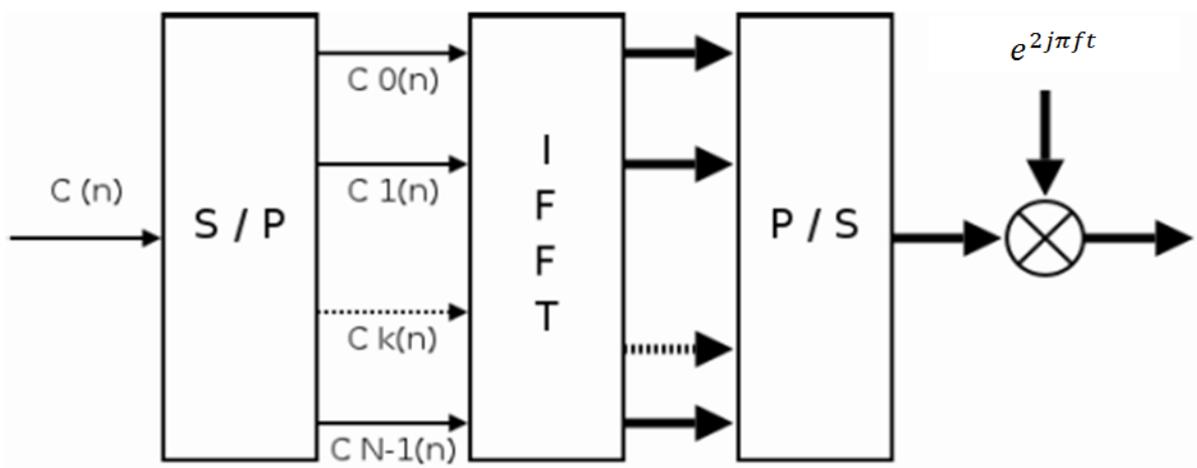


Figure II.8– la modulation OFDM numérique

II.3.8 Implémentation numérique du démodulateur :

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

$$\mathbf{z}(\mathbf{t}_n) = \mathbf{z}\left(\frac{nT_s}{N}\right) = \mathbf{z}_n = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{c}_k \mathbf{H}_k e^{2j\pi \frac{K_n}{N}} \quad (II.5)$$

\mathbf{z}_n est la transformée de Fourier discrète inverse de $\mathbf{c}_k \mathbf{H}_k$, la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète. Le nombre de porteuses ayant été choisi tel que $N = 2n$, on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT. On obtient alors le schéma de principe suivant :

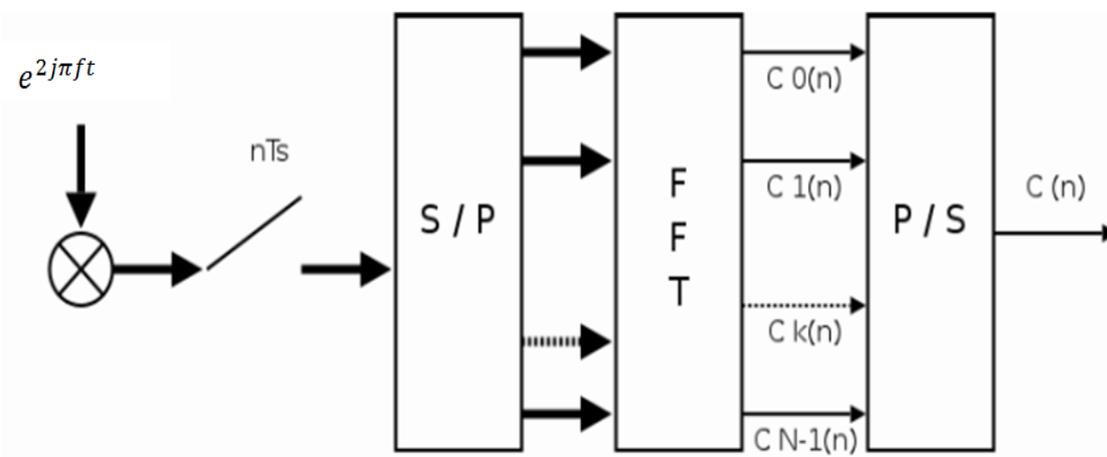


Figure II.9 – la démodulation OFDM numérique

II.3.9 Avantages et Inconvénient de l'OFDM :

II.3.9.1 Avantages de l'OFDM :

Pour la modulation OFDM, on trouve plusieurs avantages tel que :

- Utilisation optimale de la bande passante, en comparaison avec le multiplexage fréquentiel classique. Ceci est dû à l'orthogonalité entre les porteuses qui leur permet de se chevaucher sans interférer entre elles.
- L'OFDM diminue l'ISI du au retard de propagation multi trajets en augmentant la durée du symbole.
- Égalisation simple grâce au préfixe cyclique.

- Les canaux deviennent non sélectifs en fréquence, car on divise la bande passante du signal OFDM en plusieurs sous-bandes de largeur petite et donc la réponse du canal est considérée plate sur chaque sous-bande [21].

II.3.9.2 Inconvénient de l'OFDM :

Plusieurs problèmes limitent la simplicité et l'efficacité de la technique de modulation OFDM

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

II.4 La technologie 5G :

Les technologies IMT-2020 de cinquième génération (5G) l'arrivent à grands pas, et elles possèdent un potentiel de transformation immense pour rendre nos vies meilleures.

De meilleurs soins de santé, des villes plus intelligentes, une industrie bien plus efficace ; tout cela devient possible à l'heure où l'Internet des objets prend de l'ampleur et s'accompagne d'une large gamme de solutions innovantes, qui font tourner notre économie moderne. Toutefois, sans les réseaux 5G, aucun de ces éléments ne peut exprimer tout son potentiel. Bientôt, en effet, les systèmes 5G intelligents deviendront indispensables pour satisfaire la forte demande de données des milliards de personnes qui utilisent des quantités de vidéos chaque jour plus importantes.

La 5G permettra des débits de données nettement plus rapides, une connectivité fiable ainsi qu'une faible latence pour les télécommunications mobiles internationales

(IMT) autant de points nécessaires à notre nouvel écosystème de communications mondial, constitué de dispositifs connectés envoyant de grandes quantités de données via le large bande à ultra-haut débit.

II.4.1 La 5G pour l'Internet des objets :

L'Internet des objets désigne les évolutions apportées par la 5G . Ces évolutions représentent un enjeu important pour plusieurs secteurs de notre société notamment l'économie. Des organismes sont présents afin de faire en sorte que les opérateurs respectent des normes pour ces évolutions technologiques. Pour faire en sorte que ces enjeux aboutissent et afin de suivre l'évolution croissante des objets connectés présents sur le marché, les réseaux évoluent vers plus de virtualisation. La 5G introduit de nouvelles architectures, de nouvelles fonctionnalités à tous les niveaux. Cela va de l'objet lui-même aux applications hébergées dans le Cloud, en passant par les diverses couches réseaux. Les usages que l'on fait de cette technologie sont divers et variés. Par exemple, l'enrichissement de la maison connectée, le véhicule autonome, les vidéos immersives et l'arrivée de la médecine L'objectif étant de simplifier la vie des personnes [21].

II.5 Modulation UFMC :

I. II.5 .1 définition d'UFMC :

UFMC (Universal Filter Multicrier) est une technologie de forme d'onde candidate pour les systèmes sans fil 5G et au-delà. Il combine la simplicité d'OFDM avec les avantages de FBMC. Cependant, ces avantages vont de pair avec une augmentation de la complexité au niveau de l'émetteur provoquée par la mise en œuvre d'un filtre et l'application d'une FFT pour chaque sous-bande, tandis qu'au niveau du récepteur, il est nécessaire de doubler la taille de la FFT mise en œuvre. Il faut ensuite trouver des solutions peu complexes. La forme d'onde UFMC et l'élagage FFT ont été largement étudiés récemment, mais séparément.

La technologie UFMC est une forme d'onde prometteuse de faible complexité qui fournit une propriété quasi orthogonale entre les sous-porteuses [22]. De plus, il peut offrir de bien meilleures performances d'émission hors bande qu'un système de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM).

UFMC promet d'être l'une des meilleures technologies candidates pour la prise en charge de la couche physique du réseau mobile sans fil de prochaine génération. Ses fonctionnalités sont

particulièrement bien adaptées en tant que moteur principal des scénarios d'application IoT. En outre, son implémentation dans Open Air Interface a apporté cette nouvelle amélioration également en 4G, prouvant ainsi la coexistence avec la forme d'onde existante et représentant l'un des meilleurs exemples d'intégration de nouvelles fonctionnalités dans la norme actuelle.

II.5 .2 Emetteur et récepteur UPMC :

Cette section décrit le schéma fonctionnel de l'émetteur et du récepteur de l'UPMC et compare UPMC avec OFDM. UPMC combine les avantages d'OFDM et du groupe de filtres dans FBMC. Dans UPMC, la bande passante totale est d'abord divisée en sous-bandes. Chaque sous-bande a des sous-porteuses. Au lieu de filtrer chaque sous-porteuse comme dans La **figure II.11** montre le schéma synoptique de l'émetteur UPMC. Dans UPMC, la bande passante totale est d'abord divisée en B sous-bandes. Chaque sous-bande a k sous-porteuses. Maintenant, les bits de données sont donnés à chaque sous-bande [22]. Après cela, les bits de données deviennent parallèles

Grâce à l'utilisation d'un convertisseur série-parallèle. Maintenant, la sortie du convertisseur S/P est donnée au mappeur de symboles. Le mappeur de symboles assigne des symboles aux bits. La sortie du mappeur de symboles est donnée à IFFT. Ici, l'IFFT agit comme un modulateur. Il est très difficile de concevoir des modulateurs pour chaque sous-porteuse. La sortie de l'IFFT est sérialisée par convertisseur parallèle à série et cette sortie sera filtrée avec un filtre de mise en forme d'impulsions de longueur L. Le filtre est un filtre de chebyshev, la **figure II.10** décrit les caractéristiques dans le domaine temporel et fréquentiel pour certains paramètres (longueur du filtre : 84, atténuation du lobe latéral : 60 dB).

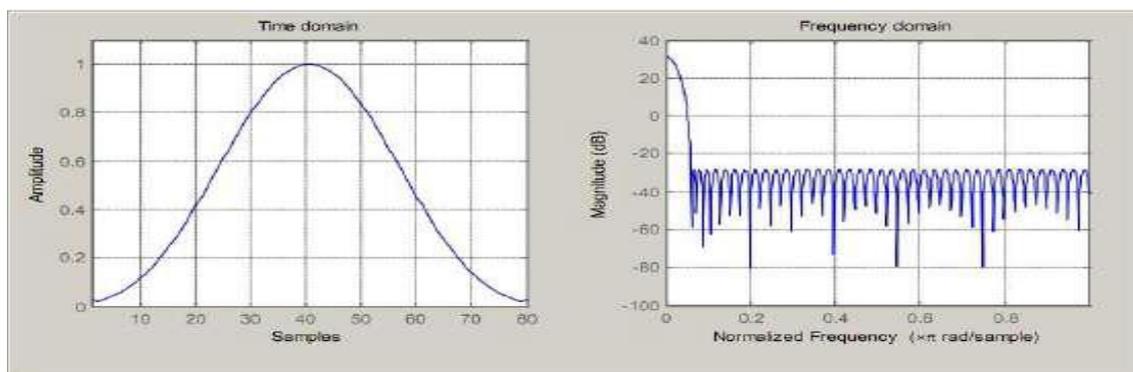


Figure II.10 les caractéristiques du filtre

La sortie de chaque filtre est ajoutée et le signal résultant passe à travers le canal. Les données d'entrée représentées par X sont converties en B sous-blocs. Et chaque sous-bloc passe par N points IFFT représentant la matrice 'V'. La sortie de IFFT sera sérialisée et passera à travers un filtre représentant la matrice 'F', cette technique permet de filtrer un bloc de sous-porteuses.

Pour la i^{th} sous-bande, les blocs de données représentent avec $S_{i,k}$, la matrice IFFT avec $V_{i,k}$ et le filtre avec $f_{i,k}$. La sortie de la banque de filtres est indiquée dans l'équation

$$x_k = \sum_{i=1}^B F_{i,k} \cdot V_{i,k} \cdot S_{i,k} \quad (II.6)$$

Où $f_{i,k}$ représente le filtre de Chebyshev

$V_{i,k}$ Représente la matrice IFFT.

$S_{i,k}$ Représente des blocs de données

$$F_{i,k} = \frac{\cos\{M \cos^{-1}[\beta \cos(\frac{\pi k}{M})]\}}{\cos[M \cos^{-1}(\beta)]} \quad (II.7)$$

$$\beta = \cosh\left[\frac{1}{M} h^{-1}(10^\alpha)\right], \alpha = 2, 3, 4 \quad (II.8)$$

Où α représente l'atténuation du lobe latéral.

Avec : $k = 0, 1, 2, \dots, M - 1$

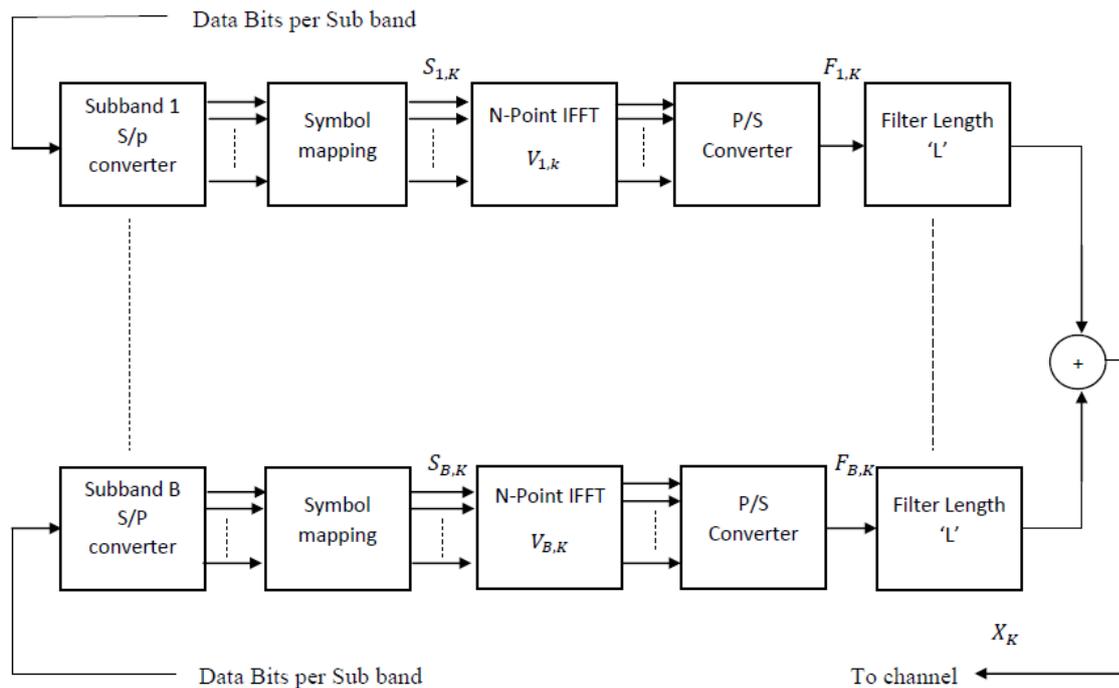


Figure II.11 Schéma fonctionnel de l'émetteur UFMC.

La figure II.12 montre le schéma fonctionnel du récepteur UFMC. Les données reçues du canal sont transmises au convertisseur série-parallèle puis transmises via FFT pour démoduler les données. Après cela, la sortie de FFT est transmise au convertisseur parallèle au convertisseur série. Il convertit tous les flux de données parallèles en un seul flux. Le démappeur de symboles convertit les symboles en bits et les données d'origine sont récupérées.

UFMC a une efficacité spectrale supérieure à celle de l'OFDM. Il n'y a pas d'insertion de préfixe cyclique comme dans OFDM. Il n'y a pas de répétition des mêmes bits, par conséquent, il utilise efficacement tout le spectre attribué. UFMC a moins de lobes latéraux qu'OFDM. Au fur et à mesure que les lobes latéraux diminuent, les interférences sur les sous-porteuses adjacentes ont également diminué. En OFDM, le signal consiste en un grand nombre de sous-porteuses modulées indépendamment qui peuvent donner un PAPR volumineux lorsqu'elles sont ajoutées en phase. Dans UFMC, la bande passante totale est divisée en sous-bandes. Comme la probabilité que le nombre de sous-porteuses s'additionnent en phase est moindre dans UFMC, la puissance maximale diminue. Par conséquent, le PAPR est faible pour UFMC par rapport à OFDM [23].

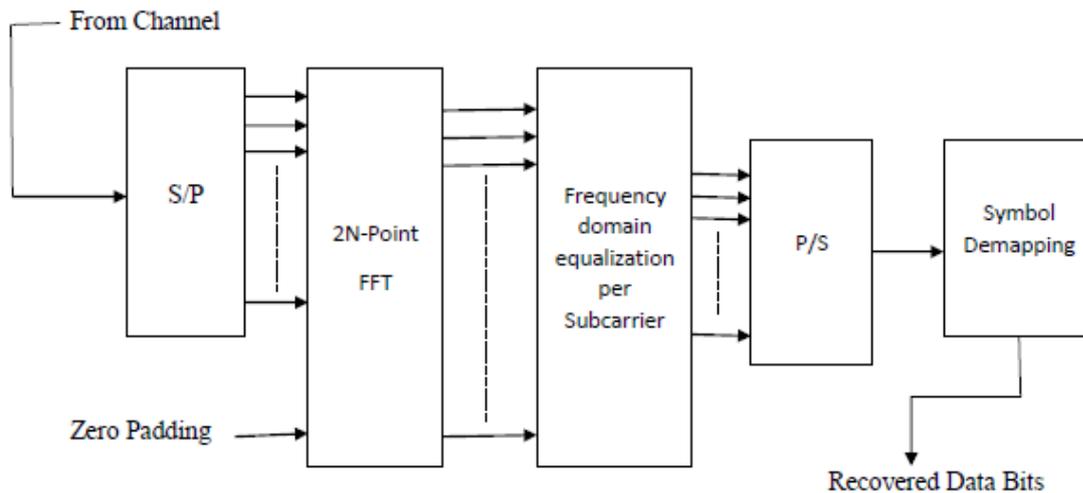


Figure II.12 Schéma fonctionnel du récepteur UFMC.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné la conception de la forme d'onde de la 4G (basée sur l'OFDM) et soulignons la nécessité d'une nouvelle conception de la 5G. L'avènement de l'Internet des objets et le passage au traitement centré sur l'utilisateur rendent OFDM irréalisable. Par conséquent, nous avons étudié une nouvelle forme d'onde appelée UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier), collectant les avantages offerts par OFDM tout en évitant ses inconvénients. Contrairement à OFDM, UFMC applique une fonctionnalité IFFT et de filtrage par sous-bande plutôt que IFFT sur toute la bande.

Nous allons simuler dans le chapitre suivant les deux techniques de la partie théorique : la modulation UFMC et la modulation OFDM et la comparaison entre eux.

Chapitre III :

*Simulation et comparaison
des résultats*

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va décrire les aspects du système UFMC (Universal Filtered Multi Carrier) et souligner les avantages de la nouvelle méthode de modulation pour les systèmes de communication sans fil de cinquième génération (5G) émergents. Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est un excellent choix pour la quatrième génération (4G) [23]. Les méthodes de modulation 4G souffrent du problème du rapport de puissance crête/puissance moyenne (PAPR) élevé. La fuite de la bande latérale est un autre problème dans OFDM. Nos systèmes 4G actuels reposent sur la forme d'onde OFDM [24], qui n'est pas capable de prendre en charge les diverses applications offertes par la 5G. Le trafic généré par la 5G devrait avoir des caractéristiques et des besoins très différents de ceux de la technologie sans fil actuelle. En conséquence, d'autres systèmes d'accès multiples sont à l'étude. La technique UFMC est le meilleur moyen de surmonter les limites connues de la technologie OFDM [25].

III.2 Résultat de simulation :

III.2.1 Peak-to-Average Power Ratio PAPR:

Le PAPR est la relation entre la puissance maximale d'un échantillon dans un symbole d'émission OFDM donné, divisée par la puissance moyenne de ce symbole OFDM. En termes simples, PAPR est le rapport entre la puissance de crête et la puissance moyenne d'un signal. Il est exprimé en unités de dB. Le PAPR survient lorsque, dans un système à plusieurs porteuses, les différentes sous-porteuses sont déphasées les unes par rapport aux autres. A chaque instant, ils sont différents les uns des autres à des valeurs de phase différentes. Lorsque tous les points atteignent la valeur maximale simultanément ; l'enveloppe de sortie se propage soudainement, ce qui provoque un «pic» dans l'enveloppe de sortie.

Le facteur de crête (PAPR, peak-to-average power ratio) est un paramètre critique de la description d'une forme d'onde, telles que l'OFDM. Les formes d'ondes candidatent à la 5G, telles que FBMC, UFMC et GFDM, sont également basées sur l'OFDM.

Les signaux PAPR élevés poussent les amplificateurs de puissance à fonctionner la plupart du temps dans la zone linéaire. Ce dernier correspond à une faible efficacité énergétique.

Cela conduit à un compromis entre efficacité spectrale et énergétique. Pour cette raison, les techniques de réduction des PAPR ont été largement abordées dans la littérature.

- La relation du PAPR :

$$PAPR = \frac{\max_{t \in [0, NT]} (x(t)^2)}{P_{moy}} \quad (III.1)$$

Avec :

- N : représente le nombre de symbole observé.
- $P_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt$: la puissance moyenne du signal.

Dans cette partie de simulation, nous allons comparer les valeurs de PAPR pour les deux type de modulation (OFDM, UFMC), ont changé l'ordre de modulation (4QAM ,16QAM.....) pour la modulation UFMC et pour chaque ordre on va changer la taille de FFT (128, 256, 512, et 1024), et à la fin en faire une comparaison entre la modulation UFMC et OFDM pour le cas de 4QAM.

- La figure III.1 présente la variation de PAPR pour le changement de la taille de FFT pour la modulation OFDM 4QAM.

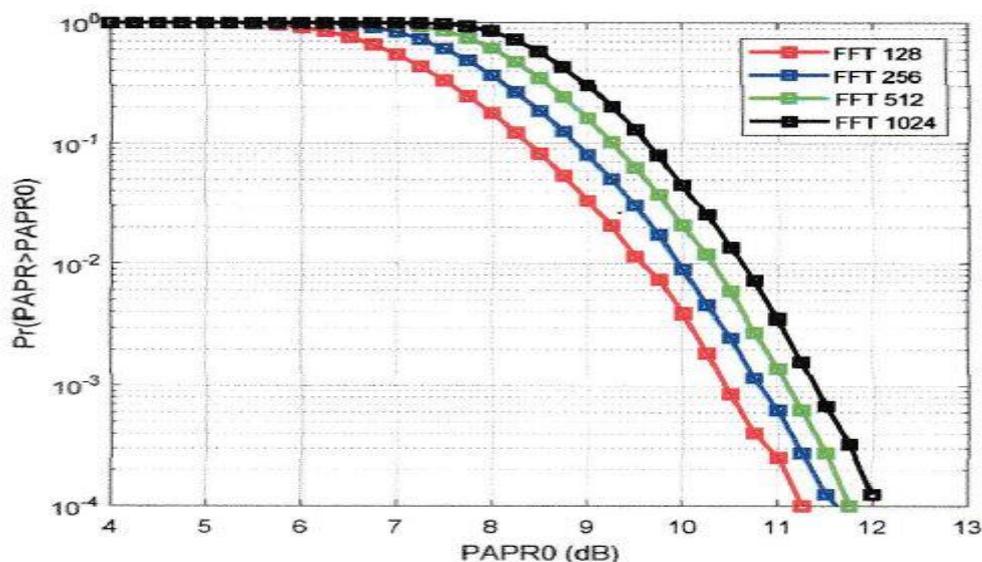


Figure III.1 : Variation de PAPR pour la modulation OFDM 4QAM

- Dans les figures suivantes on va présenter les variations du PAPR à des ordres de modulation différents (4QAM, 16QAM, 64QAM et 256QAM).

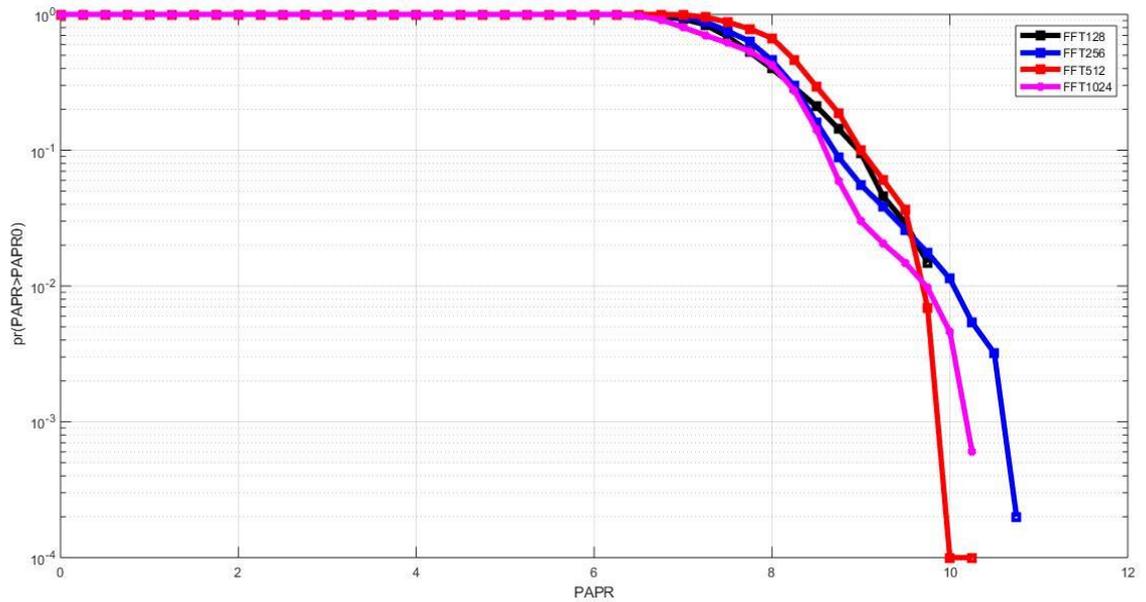


Figure III.2 : Variations de PAPR pour la modulation UFMF 4QAM

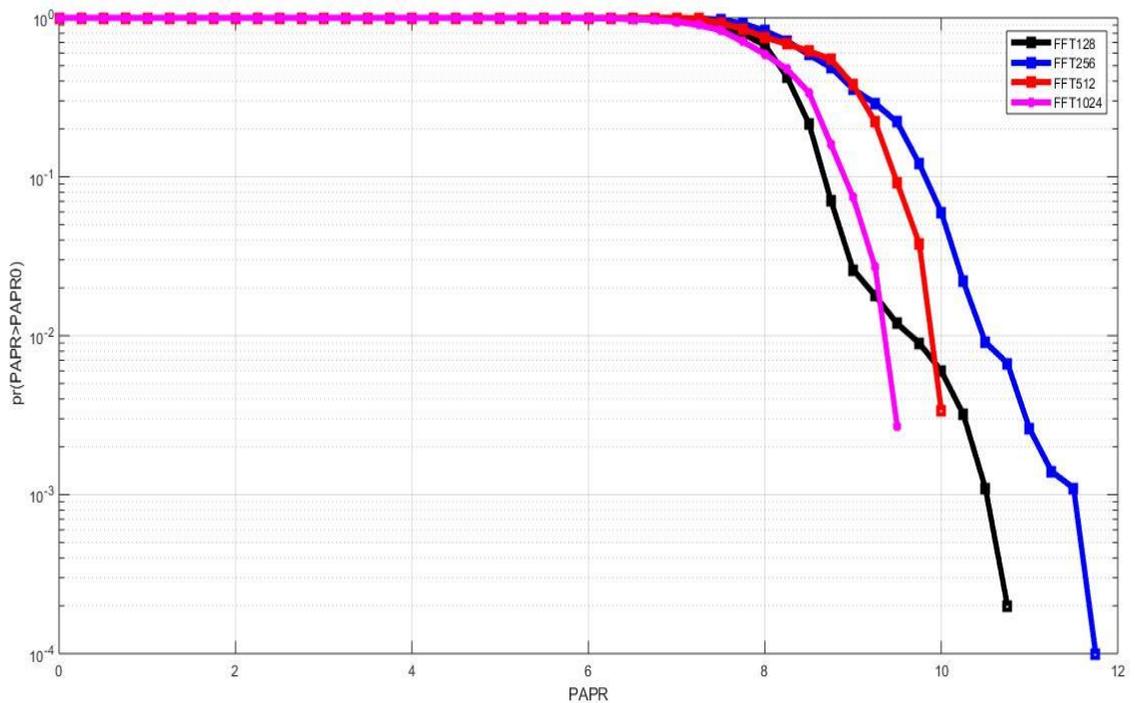


Figure III.3 : Variations de PAPR pour la modulation UFMF 16QAM

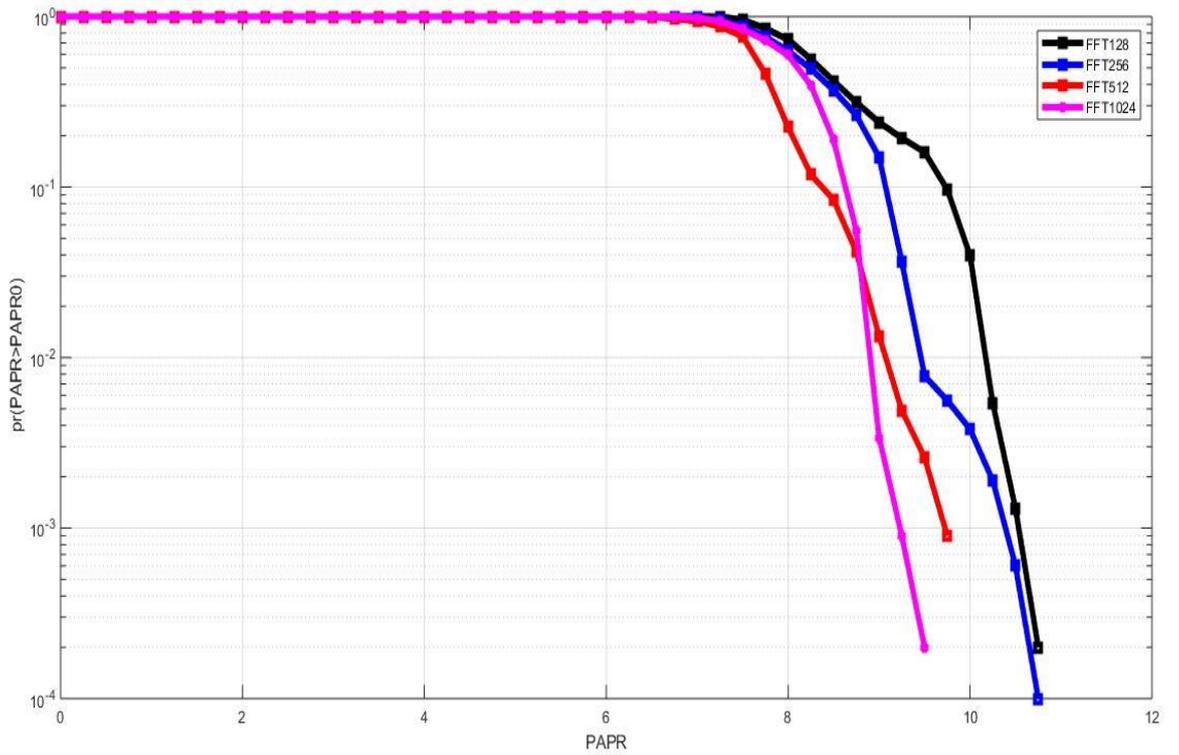


Figure III.4 : Variations de PAPR pour la modulation UFM 64QAM

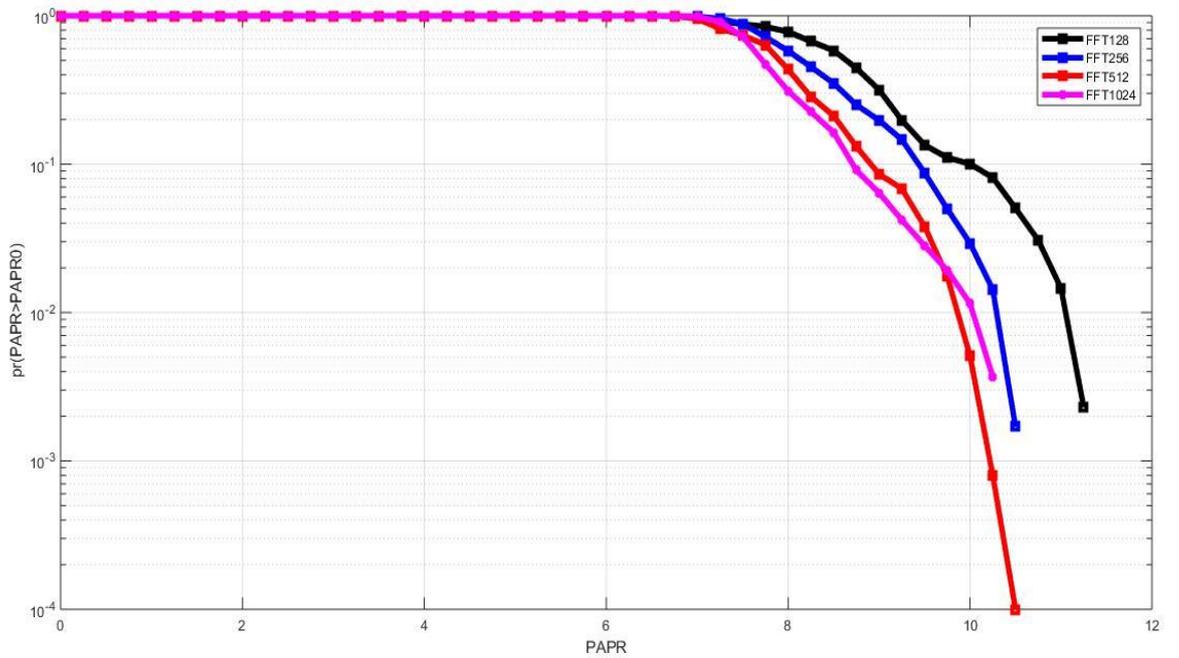


Figure III.5 les variations de PAPR pour la modulation UFM 256QAM

III.2.1.1 Influence de type de modulation sur PAPR :

CCDF= 10^{-2}

- Pour 4QAM (OFDM) :
 - Pour FFT 128 → PARR=9.8db
 - Pour FFT 256 → PARR=10.4db
 - Pour FFT 512 → PARR=10.7db
 - Pour FFT 1024 → PARR=10.9db

Pour UFMC:

- Pour 4QAM :
 - Pour FFT 128 → PARR=10.5db
 - Pour FFT 256 → PARR=10.2db
 - Pour FFT 512 → PARR=10db
 - Pour FFT 1024 → PARR=9.8db
- Pour 16QAM :
 - Pour FFT 128 → PARR=9.7db
 - Pour FFT 256 → PARR=11db
 - Pour FFT 512 → PARR=10db
 - Pour FFT 1024 → PARR=9.5db
- Pour 64QAM :
 - Pour FFT 128 → PARR=10db
 - Pour FFT 256 → PARR=9.5db
 - Pour FFT 512 → PARR=9.4db
 - Pour FFT 1024 → PARR=9db
- Pour 256QAM :
 - Pour FFT 128 → PARR=11db
 - Pour FFT 256 → PARR=10.6db
 - Pour FFT 512 → PARR=9.8db
 - Pour FFT 1024 → PARR=10.3db

On remarque que :

- le système UFMC présente le plus faible PAPR par rapport au système OFDM pour la modulation 4QAM et toutes les valeurs de FFT
- La valeur de PAPR diminue si l'ordre de modulation QAM (4QAM, 16QAM, 64QAM, 256QAM) augmente pour la modulation UFMC

III.2.1.2 Influence de nombre de point FFT sur PAPR :

On remarque pour la modulation OFDM que la valeur de PAPR augmente à chaque fois en augmentant la taille de FFT (CCDF= 10^{-4}).

- Pour FFT 128 → PARR=11.2db
- Pour FFT 256 → PARR=11.5db
- Pour FFT 512 → PARR=11.7db
- Pour FFT 1024 → PARR=12db

Mais d'après les résultats de modulation UFMC on remarque que le PAPR se varie en manière aléatoire en fonction de la taille de FFT.

III.2.1.3 Influence de paramètres de conception de la fenêtre Dolph-Chebyshev sur le PAPR :

Les figures suivantes expliquent l'influence du filtre sur la variation du PAPR pour FFT_512 et FFT_1024 :

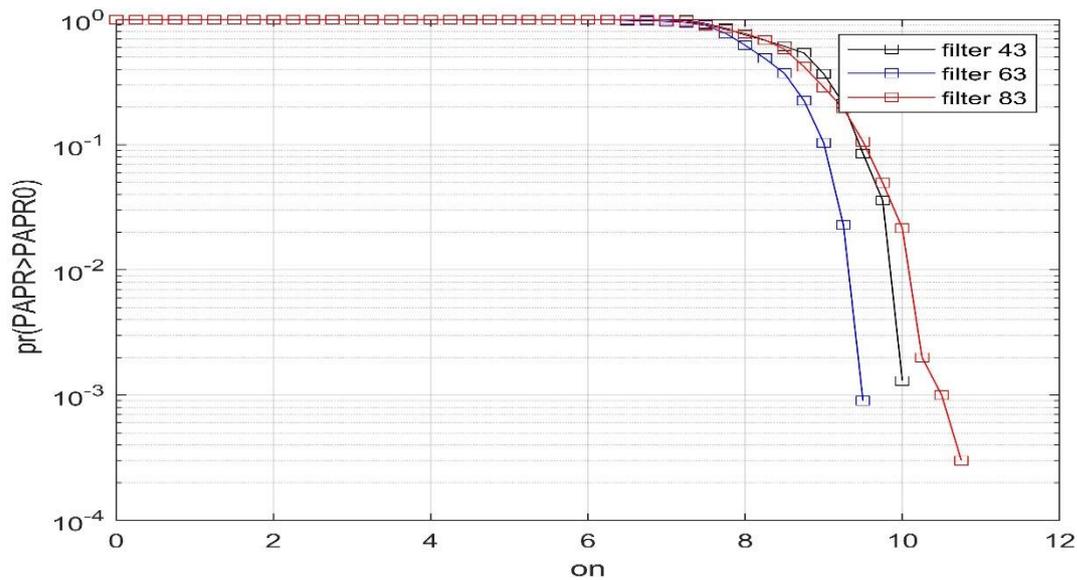


Figure III.6 : Variation du PAPR pour la modulation UFMC FFT_512

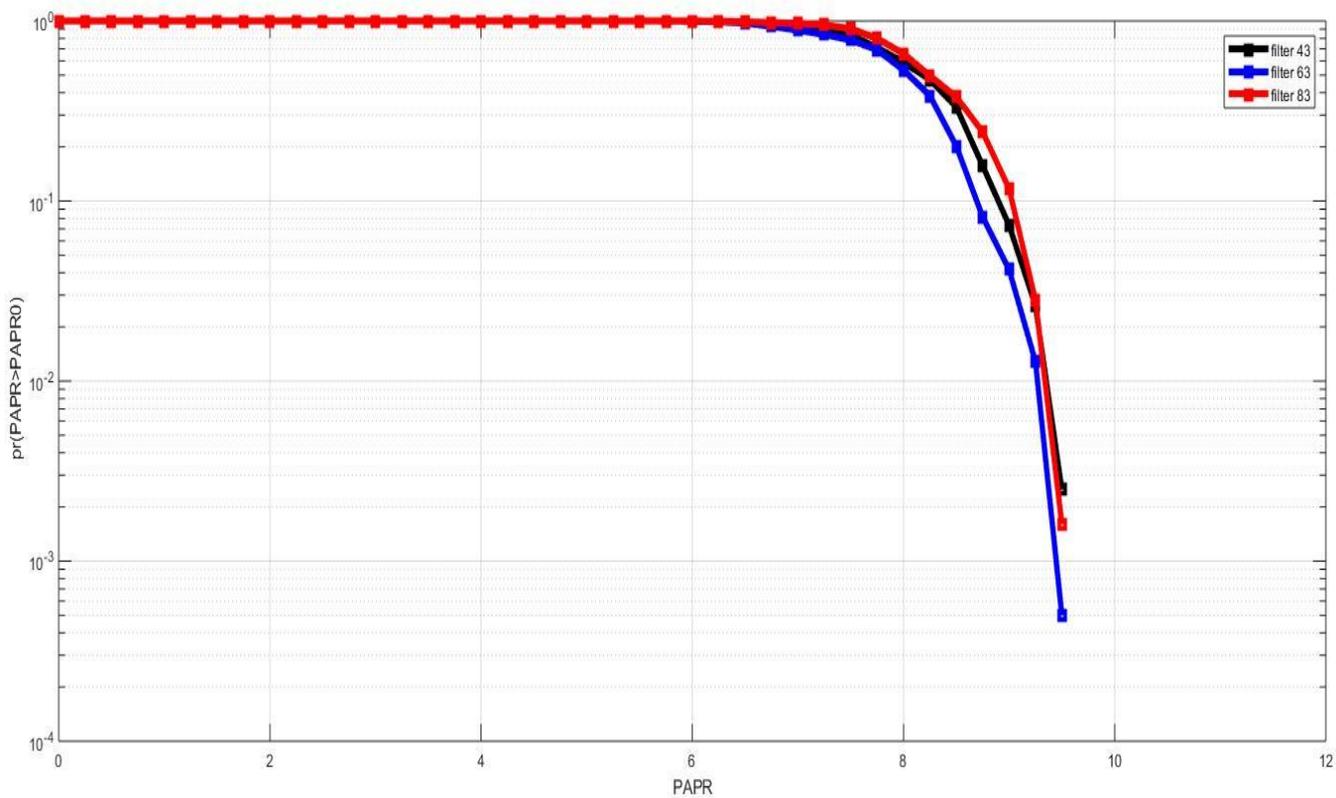


Figure III.7 : Variation du PAPR pour la modulation UFMC FFT_1024

- Pour FFT_512 (CCDF=10⁻²). :

On remarque que la valeur du PAPR atteindre la plus petite valeur si la longueur du filtre égale 63 (PAPR=9,5db).

Pour longueur de filtre = 43 → PAPR=9.8db

Pour longueur de filtre = 83 → PAPR=10,2db

- Pour FFT_1024 :

Comme dans FFT_512 nous vu que la plus petites valeur du PAPR est enregistrer c'est la longueur 63 (PAPR =9,5db).

Pour longueur de filtre = 43 → PAPR=9,7db

Pour longueur de filtre = 83 → PAPR=9,7db

III.2.2 Taux d'erreur binaire BER :

En transmission numérique, le taux d'erreur sur les bits (BER) est le pourcentage de bits comportant des erreurs par rapport au nombre total de bits reçus dans une transmission, généralement exprimé par dix à une puissance négative. Par exemple, une transmission peut avoir un TEB de 10 à la puissance moins 6, ce qui signifie que, sur 1 000 000 bits transmis, un bit était en erreur. Le BER est une indication de la fréquence à laquelle un paquet ou une autre unité de données doit être retransmis à cause d'une erreur. Un BER trop élevé peut indiquer qu'un débit de données plus lent améliorerait réellement le temps de transmission global pour une quantité donnée de données transmises, car le BER pourrait être réduit, ce qui réduirait le nombre de paquets à renvoyer.

$$BER = \frac{\text{Nombres de bits erronés}}{\text{Nombres de bits transmis}} \quad (III.2)$$

Dans cette étape on va étudier la Variation de **BER** pour différents ordre de la modulation QAM (4, 16, 32, 64,128 et 256QAM) pour les deux systèmes OFDM et UPMC et en va changer la taille de FFT pour chaque modulation.

- La figure suivante présente les variations de BER dans la modulation OFDM pour des ordres de modulation différent.

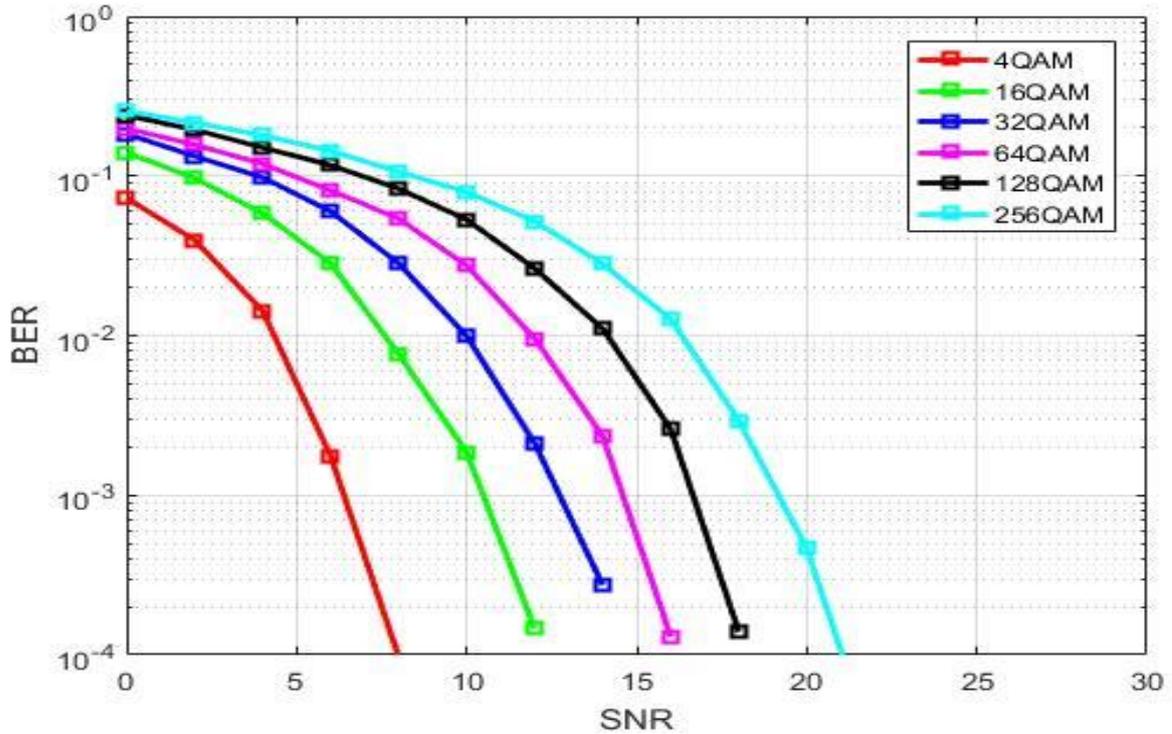


Figure III.8 : Variation du BER pour la modulation OFDM

- La figure présente les variations de BER dans la modulation UPMC pour des ordres de modulation différent.

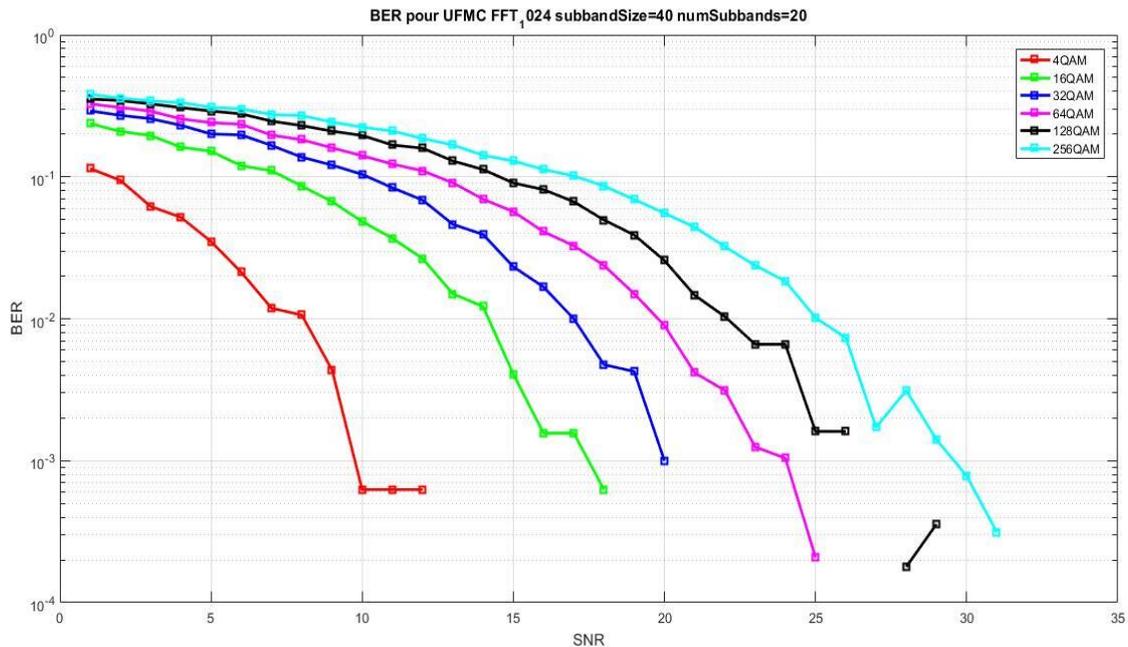


Figure III.9 : Variation du BER pour la modulation UFMC

III.2.2.1 Influence de type de modulation sur BER :

Pour l'OFDM :

- Chaque fois dans chaque diminution de BER le SNR augmente.
- A chaque augmentation de l'ordre de modulation le SNR augmente :
 - Pour 4QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 6.8$
 - Pour 16QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 10.2$
 - Pour 32QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 13$
 - Pour 64QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 14.8$
 - Pour 128QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 16.8$
 - Pour 256QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 19$

Pour l'UFMC :

- Comme dans L'OFDM On remarque que chaque fois le BER diminuer le SNR augmente.

- On observe aussi à chaque fois on change l'ordre de modulation le SNR prend une valeur plus grande et le BER diminue lentement et plus lent que la modulation OFDM :

- Pour 4QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 10$
- Pour 16QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 17,5$
- Pour 32QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 20$
- Pour 64QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 24$
- Pour 128QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 27$
- Pour 256QAM : $BER = 10^{-3} \rightarrow SNR = 29$

III.2.2.2 Influence de nombre de point FFT sur BER :

Dans cette étape on va changer le nombre de FFT (128,256,512,1024) et on vérifier les variations du BER pour une modulation UPMC d'ordre de 4QAM.

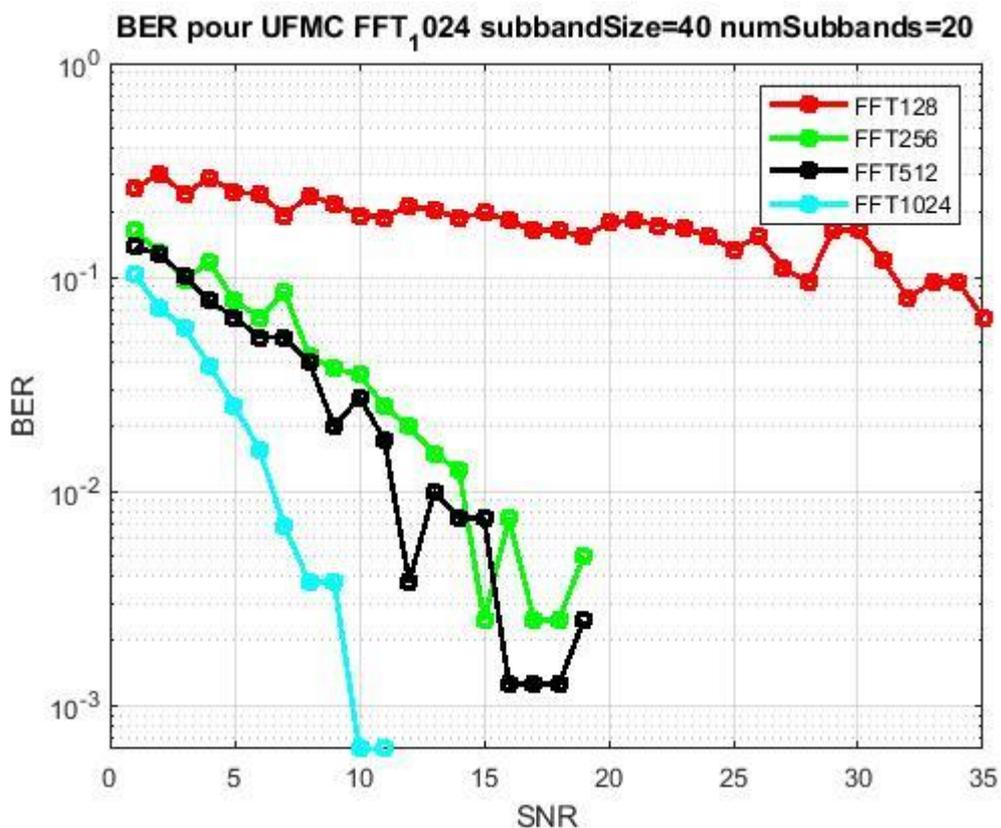


Figure III.10 variations du BER pour des différents nombres de FFT

On remarque que le BER diminue rapidement si le nombre de FFT est grand.

- Les résultats pour un SNR=5 :
 - Pour FFT 128 → $BER = 10^{-0.6}$
 - Pour FFT 256 → $BER = 10^{-1.1}$
 - Pour FFT 512 → $BER = 10^{-1.3}$
 - Pour FFT 1024 → $BER = 10^{-1.6}$

III.2.2.3 Influence de paramètres de conception de la fenêtre Dolph-Chebyshev sur le BER :

Dans cette partie on va changer la longueur du filtre et en remarque les variations de BER dans la modulation UFMC.

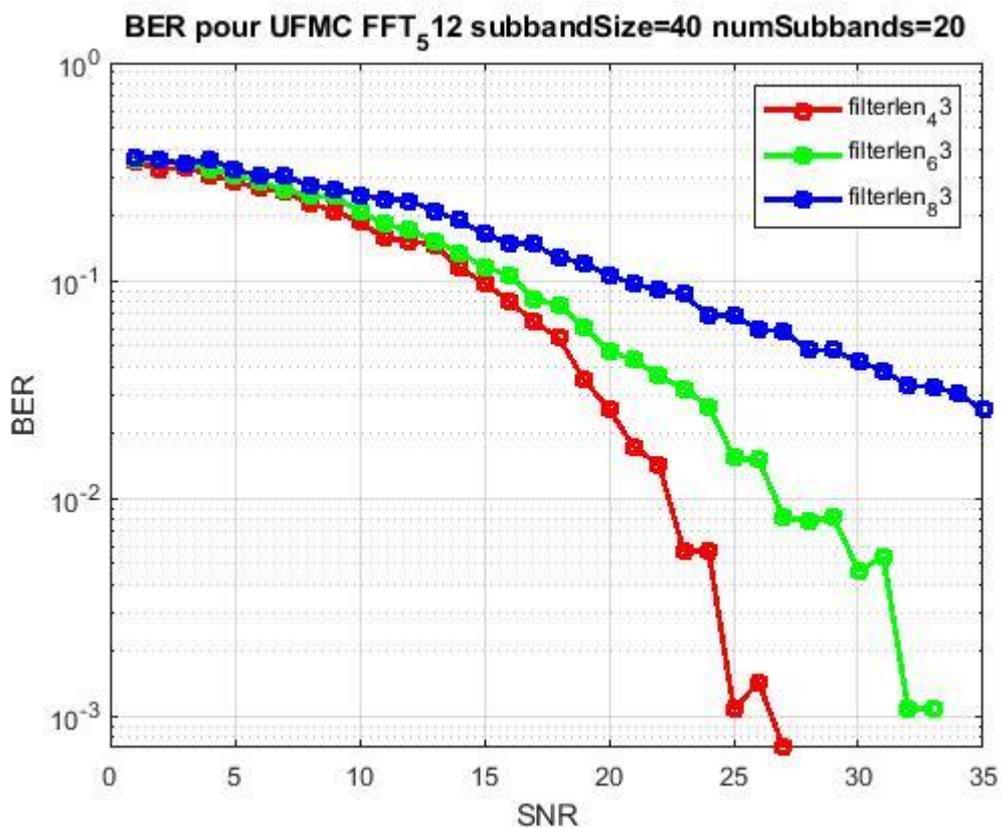


Figure III.11 variation du BER pour la modulation UFMC FFT_512

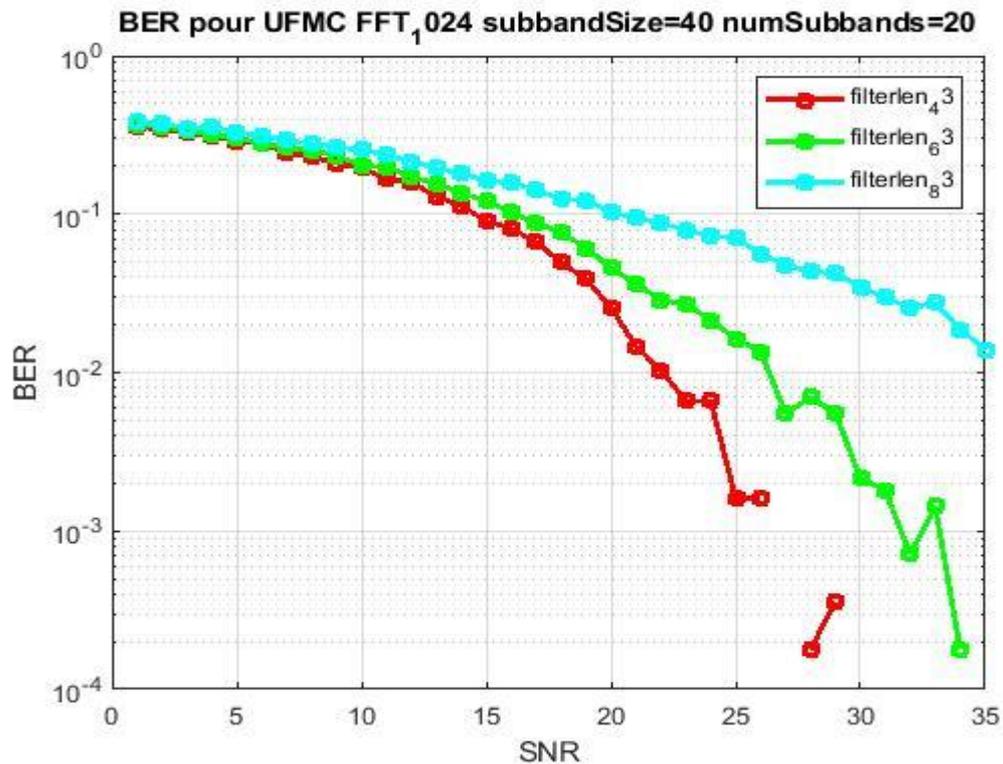


Figure III.12 variation du BER pour la modulation UPMC FFT₁₀₂₄

On remarque que le BER diminue de manière plus rapide si la longueur du filtre est petite.

Pour FFT=1024 :

- Pour filterlen=43 : $SNR = 20 \rightarrow BER = 10^{-1.6}$
- Pour filterlen=63 : $SNR = 20 \rightarrow BER = 10^{-1.3}$
- Pour filterlen=83 : $SNR = 20 \rightarrow BER = 10^{-1}$

Pour FFT=1024 :

- Pour filterlen=43 : $SNR = 20 \rightarrow BER = 10^{-1.4}$
- Pour filterlen=63 : $SNR = 20 \rightarrow BER = 10^{-1.2}$
- Pour filterlen=83 : $SNR = 20 \rightarrow BER = 10^{-1}$

III.2.3 La densité spectrale de puissance DSP (OFDM, UPMC):

Une densité spectrale de puissance (PSD) est la mesure du contenu en puissance du signal en fonction de la fréquence. Une PSD est généralement utilisée pour caractériser les

signaux aléatoires à large bande. L'amplitude de la densité PSD est normalisée par la résolution spectrale utilisée pour numériser le signal.

Selon l'analyse de Fourier, tout signal physique peut être décomposé en un certain nombre de fréquences discrètes ou en un spectre de fréquences sur une plage continue. La moyenne statistique d'un certain signal ou type de signal (y compris le bruit) telle qu'analysée en termes de contenu fréquentiel est appelée son spectre.

Le PSD est égale à la transformée de fourrier de la fonction d'autocorrélation :

- transformée de Fourier de la Fonction d'autocorrélation :

$$s_{xx}(f) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} r_{xx}(l) e^{-i2\pi ft} \quad (III.3)$$

$$r_{xx}(l) = E\{x(n+1)x(n)\} \text{ fctd' autocoorelation } (III.4)$$

La figure 3.1 et la figure 3.2 montre la densité spectrale de puissance pour un système OFDM et UFMC respectivement :

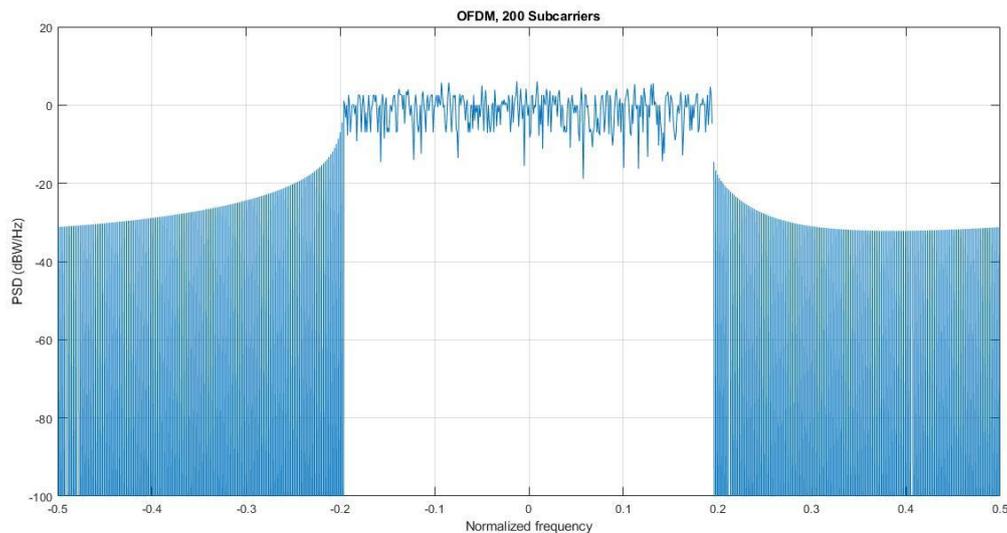


Figure III.13 la densité spectrale de puissance d'un système OFDM

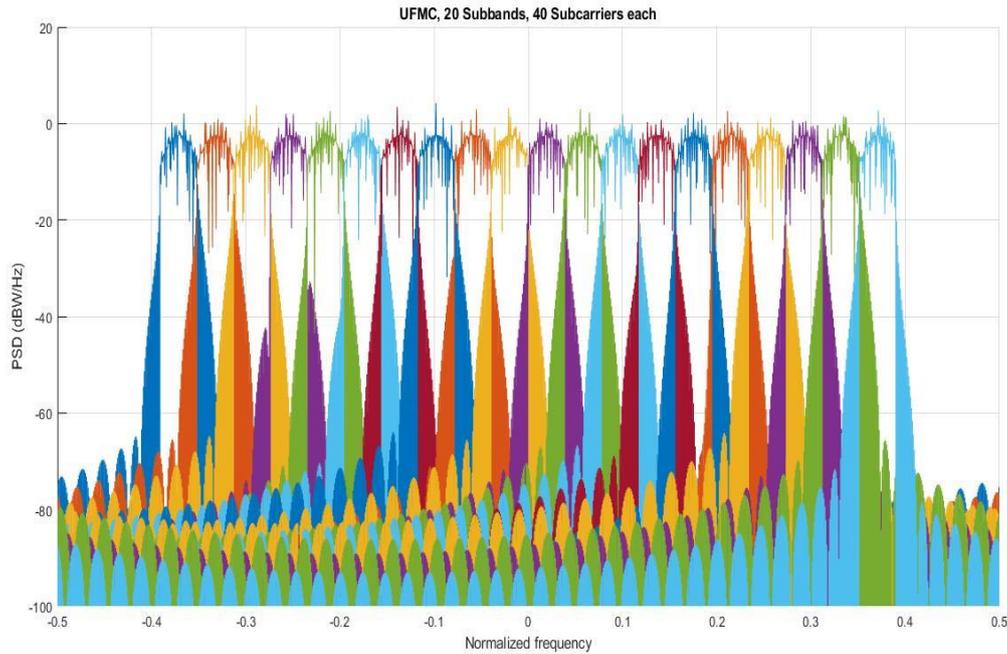


Figure III.14 la densité spectrale de puissance d'un système UFMC

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre on a décrit es aspects des systèmes UFMC (Universal Filtered MutiCarrier), et nous avons montré les avantages de cette modulation pour les systèmes de communication sans fils de cinquième génération (5G) émergents.

Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est un excellent choix pour la quatrième génération (4G), les méthodes de modulation 4G souffrent du problème du rapport puissance crête /puissance PAPR très élevé.

Nos systèmes 4G actuels reposent sur la forme d'onde OFDM, qui n'est pas capables de prendre en charge les diverses applications offertes par la 5G, le trafic générer par le 5G devrait avoir des caractéristiques et des besoins très différents de ceux de la technologie sans fils actuelle.

En conséquence le système d'accès multiple UFMC qui a un avantage de PAPR moins élevé que l'OFDM.

Conclusion Générale

Durant ce travail on peut constater que des générations de téléphones mobiles ont été toutes développées pour garantir une meilleure performance en terme BER et PAPR. Cette progressions importante a donné des nouvelles applications tels que : La vidéoconférence, la visiophonie, la transmission des données très haut débit (vidéo 4K), l'internet des objets.

Les technologies de télécommunication évoluent constamment, après la 4G de réseau mobile on parle aujourd'hui de la cinquième génération (5G) qui la plus contemporaine des réseaux mobiles.

Dans ce mémoire on a abordé d'abord l'évolution des réseaux mobiles de la 1^{ère}G jusqu' à la 5^{ème}G en présentant leurs architectures, les différentes techniques d'accès multiple...etc. Puis, on a étudié la modulation OFDM et la modulation UFMC qui est basée sur l'OFDM. Ensuite, on a fait la simulation des techniques OFDM, et UFMC on les comparant par les critères d'évaluation en termes de PAPR, BER et DSP.

A la fin on peut conclu quela cinquième génération est la plus moderne technologie cellulaire. Elle est développée pour augmenter le débit de la transmission des réseaux mobiles. Le système 5G peut gérer des milliers de trafic par rapport aux réseaux déjà mise en œuvre. Ce dernier est 10 fois plus rapide que la 4G, dans ce sens nous espérons qu'il sera à la portée de tout le monde.

Bibliographie

Ouvrage :

- [1] A. zebdi, "DZ-MAODV : nouveau protocole de routage multicast pour les réseaux Adhoc mobiles basé sur les zones denses ", Université du Québec à Trois Rivières, pages 14-16, Canada, avril 2006. Edition : ‘‘Osman Eyrolles Multimedia’’.
- [2] DJ. Johnston, "IEEE 802.16* WirelessMAN* Specification Accelerates Wireless Broadband Access", Technology Intel Magazine, page 4-5, août 2003. 3- Architecture des réseaux de télécommunications.
- [3] Melle BOUCHENTOUF Hadjer, Mr BOUDGHENE STAMBOULI Riyad : ETUDE DES PERFORMANCES DES RESEAUX 4G (LTE) “, Université ABI BAKR BELAKAID, page 5-9, TELEMEN, 2012 – 2013.
- [4] Mme Taleb Soumia Imane, Melle Boudina Ikram : DEVELOPPEMENT D’UN OUTIL D’OPTIMISATION POUR L’ALLOCATION DES FREQUENCES DANS LE RESEAU GSM", Université ABI BAKR BELAKAID, page 3-6, TELEMEN, 2012/2013.
- [5] MM Bawa Ibrahim Abdoul Razak, Mahamat Charfadine Salim : optimisation des réseaux GSM pour la migration vers l’UMTS", INSTITUT DE TELECOMUNICATION ABDELHAFID BOULSSOUF, ORAN, juin 2005.
- [6] Melle CHAMEK Linda, LOCALISATION DES MOBILES PAR UNE STRATEGIE DE PREDICTION, UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA, BOUMERDES, 2010/2011.
- [7] AMAZIT ABDELGHANI, IMPACT DES INTERFÉRENCES DE LA COUCHE PHYSIQUE SUR LA COUCHE MAC DANS LA TECHNOLOGIE LTE", L’UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, CANADA, juin 2011.
- [8] Abdoulaye TALL, Etude détaillée de l’architecture d’un réseau 3G dans le cadre d’une migration depuis un réseau GSM : Cas de TELECEL Faso, Ecole Polytechnique de TUNISIE », TUNISIE, 2011-2012.
- [9] GHEDDOU Rachida : Etude d’un standard de communication LTE, Université A. MIRA, Bejaia, 2016-2017.
- [10] Documentation technique Orange Developer : Généralités et architecture de la 4G.
- [11] Melle Imène ELLOUMI : Gestion de la mobilité inter réseaux d’accès et de la Qualité de Service Dans une approche NGN/IMS, Université de Carthage, TUNISIE, Juillet 2012.

- [12] livre de LTE et les réseaux 4G par, Yannick Bouguen, Éric Hardouin, François-Xavier Wolff
- [13] Melle HOUDA TOUNSI : Optimisation de la couverture radio du réseau 4G de Tunisie Telecom, UNIVERSITE VIRTUELLE DE TUNISIE, 2015 / 2016.
- [14] Implementation and study of universal filtered multi carrier under carrier frequency offset for 5G, International journal of electronics & communication (IJECE).
- [15] «Transmission d'un signal modulation et démodulation» http://ephz.fr/cours/pc/pc_elec/pc_tp_modulation.pdf.
- [16] « Transmitter and Receiver Technique » http://www.iitg.ernet.in/scifac/qip/public_html/cd_cell/chapters/a_mitra_mobile_communication/chapter6.pdf.
- [17] Yvon Sosthène Yameogo, "*Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système SC-FDMA*", Thèse doctorat, Université Rennes 1, France, 2011.
- [18] M. Mustapha, "Application de la technologie mimo a la 4g du mobile, " Projet fin d'études, la Faculté de Technologie, Sétif, 2014
- [19] Toon van Waterschoot, Vincent Le Nir, Jonathan Duplicy "Analytical Expressions for the Power Spectral Density of CP-OFDM and ZP-OFDM Signals", Member, IEEE, and Marc Moonen, Fellow, IEEE.
- [20] Dieter Van Welden and Heidi Steendam DIGCOM research group "Iterative EM Based Channel Estimation for KSP-OFDM", TELIN Dept., Ghent University Sint Pietersnieuwstraat 41, 9000 Gent, Belgium.
- [21] Boumaaza Saïd, format de modulation pour la 5G, université 08 mai 1945, Guelma, juin 2018
- [22] Hatham Mohamed Elfateh Aougabi Meriem : Performance d'un système de communication sans fils à base de la technique UFMC candidat pour 5G Université Kasdi Merbah Ouargla, Juin 2018
- [23] UFMC The 5G Modulation Technique P. Naga Rani, Pursuing M. Tech (ECE-DECS) D.M.S.S.V.H College of Engineering, Machilipatnam, Andhra Pradesh, India, et Dr. Ch. Santhi Rani, Prof & Head, Department of ECE, D.M.S.S.V.H College of Engineering, Machilipatnam, Andhra Pradesh, India.

Sites Internet :

- [25] www.memoireonline.com
- [26] <http://www.art-telecom.fr/>
- [27] www.cours-gratuit.com
- [28] www.mathworks.com
- [29] <http://4glte.over-blog.com>

ANNEXE -I :

I.1: PSD OFDM

```
%%  
  
%% TRANSMITTER OFDM  
  
close all; clear;clc;  
s = rng(211); % Set RNG state for  
repeatability  
%%  
  
%% SYSTEM PARAMETERS  
  
numFFT = 1024; % Number of FFT points  
numGuards = 256; % Guard bands on both sides  
numSymbols = 5; % Simulation length in  
symbols  
bitsPerSubCarrier = 4; % 2: 4QAM, 4: 16QAM, 6:  
64QAM, 8: 256QAM  
L = numFFT-2*numGuards; % Number of  
symbols per OFDM symbol  
sumOFDMspec = zeros(numFFT*2, 1);  
%  
  
%% QAM SYMBOL MAPPER PREPARATION  
  
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator(...  
    'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier,  
    ...  
    'BitInput', true, ...  
    'NormalizationMethod', 'Average power');  
%%  
  
for symIdx = 1:numSymbols  
    %% DATA GENERATION  
    inpData2 = randi([0 1], bitsPerSubCarrier*L, 1);  
    %% QAM MAPPING  
    modData = qamMapper(inpData2);  
    %% ZP  
    symOFDM = [zeros(numGuards,1); modData;  
zeros(numGuards,1)];  
    %% IDFT
```

Annexes

```
    ifftOut          = sqrt(numFFT).*ifft(ifftshift(symOFDM));
    %% Calcul of PSD
    [specOFDM,fOFDM] = periodogram(ifftOut,
    rectwin(length(ifftOut)), ...
    numFFT*2, 1, 'centered');
    sumOFDMSpec      = sumOFDMSpec + specOFDM;
end
%%
```

```
%% PLOT POWER SPECTRAL DENSITY (PSD)
```

```
sumOFDMSpec = sumOFDMSpec/mean(sumOFDMSpec(1+2*numGuards:end-
2*numGuards));
figure;
plot(fOFDM,10*log10(sumOFDMSpec));
grid on
axis([-0.5 0.5 -180 10]);
xlabel('Normalized Frequency');
ylabel('PSD (dBW/Hz)');
title(['OFDM, numFFT = ' num2str(numFFT)])
```

I.2: PSD UFMC

```
close all;clear ;clc;
numFFT =1024;          % number of FFT points
subbandSize =40;      % must be > 1
numSubbands = 20;    % numSubbands*subbandSize <= numFFT
subbandOffset = 156;
filterLen =43 ;
slobeAtten = 40;
bitsPerSubCarrier = 8;
prototypeFilter = chebwin(filterLen, slobeAtten);
% QAM Symbol mapper
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator('ModulationOrder', ...
    2^bitsPerSubCarrier, 'BitInput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
% Transmit-end processing
% Initialize arrays
inpData = zeros(bitsPerSubCarrier*subbandSize, numSubbands);
txSig = complex(zeros(numFFT+filterLen-1, 1));
figure;
axis([-0.5 0.5 -100 20]);
hold on;
grid on
xlabel('Normalized frequency');
ylabel('PSD (dBW/Hz)');
title(['UFMC, ' num2str(numSubbands) ' Subbands, ' ...
    num2str(subbandSize) ' Subcarriers each'])
% Loop over each subband
for bandIdx = 1:numSubbands

    bitsIn = randi([0 1], bitsPerSubCarrier*subbandSize, 1);
    symbolsIn = qamMapper(bitsIn);
```

```
inpData(:,bandIdx) = bitsIn; % log bits for comparison

% Pack subband data into an OFDM symbol
offset = subbandOffset+(bandIdx-1)*subbandSize;
symbolsInOFDM = [zeros(offset,1); symbolsIn; ...
                 zeros(numFFT-offset-subbandSize, 1)];
ifftOut = ifft(ifftshift(symbolsInOFDM));

% Filter for each subband is shifted in frequency
bandFilter = prototypeFilter.*exp( 1i*2*pi*(0:filterLen-1)'/numFFT* ...
    ((bandIdx-1/2)*subbandSize+0.5+subbandOffset+numFFT/2) );
filterOut = conv(bandFilter,ifftOut);
% Plot power spectral density (PSD) per subband
[psd,f] = periodogram(filterOut, rectwin(length(filterOut)), ...
    numFFT*2, 1, 'centered');
plot(f,10*log10(psd));
% Sum the filtered subband responses to form the aggregate transmit
% signal
txSig = txSig + filterOut;
end
hold off;
savefile='PSD.mat';
save(savefile, 'psd','f')
```

ANNEXE -II:

II.1: PAPR OFDM

```
clear all
clc
close
% -----
% Parameters
% -----
M = 4; % QPSK signal constellatio
fft_size = 128; % have 128 data point
fspacing=15000;
fs=15000*128;
Ts = 1/fs; % Sampling period of channel
Fd = 0; % Max Doppler frequency shift
nsym = 1000;
snr = 0:0.8:30;
% -----
% TRANSMITTER
% -----
% Generate 1 x 128 vector of random data points
source = randsrc(1, 128*(nsym-2), 0:M-1); %the data source
cp_length = .25*fft_size; % length of cyclic prefix
sp = reshape(source , 128 , nsym-2);% s/p
s = size (sp);
tx = [];
for i=2:nsym-1
% QPSK modulation (mapping)
qpsk_mod = pskmod(sp(:,i-1), M);
```

Annexes

```
% making s/p
serial_to_paralle = reshape(qpsk_mod, fft_size, 1); % s/p
% to know the start and end of cp
cp_start = fft_size-cp_length;
cp_end = fft_size;
% make ifft to each block and add CP
ifft_data_matrix = ifft(serial_to_paralle,fft_size);
% Compute and append Cyclic Prefix
for j=1:cp_length,
    cp(j,1) = ifft_data_matrix(j+cp_start,1);
end
% Append the CP to the existing block to create the actual OFDM block
ifft_data = vertcat(cp,ifft_data_matrix);
% s/p for transmission
[rows_ifft_data, cols_ifft_data]=size(ifft_data);
length_ofdm_data = rows_ifft_data*cols_ifft_data;
pilot = zeros(1,length_ofdm_data);
ofdm_signal = reshape(ifft_data, 1, length(ifft_data)); %p/s
Signal_Power = abs(ofdm_signal.^2);
Peak_Power = max(Signal_Power,[],2);
Mean_Power = mean(Signal_Power,2);
PAPR_Orignal(i) = 10*log10(Peak_Power./Mean_Power);
tx = [tx ofdm_signal];
end
[cdf0, PAPR0] = ecdf(PAPR_Orignal);
%-----
semilogy(PAPR0,1-cdf0,'-b')
legend('Orignal')
xlabel('PAPR0 [dB]');
ylabel('CCDF (Pr[PAPR>PAPR0])');
tt =[ pilot tx pilot];
x_abs=abs(tt);
papr=10*log(max(x_abs.^2)/mean(x_abs.^2))
% -----
% CHANNEL
% -----
% Create Rayleigh fading channel object.
% Frequency selective channel with 4 taps
tau = [0 .2e-9 .5e-9 1.6e-9 2.3e-9 5e-9]; % Path delays
pdb = [0.189 0.379 0.239 0.095 0.061 0.037]; % Avg path power gains
h = rayleighchan(Ts, Fd,tau,pdb);
h.StoreHistory = 0;
h.StorePathGains = 1;
h.ResetBeforeFiltering = 1;
% -----
% RECEIVER
% -----
no_of_error=[];
ratio=[];
for ii=1:length(snr)
rx= [];
rx_signal_matrix = reshape(tt,length(ifft_data),nsym);
[~, c] = size(rx_signal_matrix);
for j = 2: nsym-1
hx = filter(h,rx_signal_matrix(:,j).'); % Pass through Rayleigh channel
a = h.PathGains;
AM = h.channelFilter.alphaMatrix;
g = a*AM; % Channel coefficients
G(j,:) = fft(g,fft_size); % DFT of channel coefficients
% Add AWGN no
rx_signal = awgn(hx,snr(ii),'measured');
```

Annexes

```
d=size(rx_signal);
% Convert Data back to "parallel" form to perform FFT
con=reshape( rx_signal , length(iff_data),1);
% Remove CP
con(1:cp_length,:)=[];
% Perform FFT
% FFT
fft_data_matrix = fft(con,fft_size);
% p/s
rx_serial_data = reshape(fft_data_matrix, 1,fft_size);
fftrx = rx_serial_data./G(j,:);
% Demodulate the data
qpsk_dem_data = pskdemod(fftrx,M);
rx =[rx qpsk_dem_data];
end
figure(2)
[no_of_error(ii),ratio(ii)]=biterr(source , rx); % error rate calculation
end
semilogy(snr,ratio,'--*r','linewidth',1);
hold on;
axis([0 30 10^-4 1])
legend('simulated')
grid on
xlabel('snr');
ylabel('BER')
title('Bit error probability curve for qpsk using OFDM');
```

II.2: PAPR UFMC:

```
close all ;clear;clc;
s = rng(211);
numFFT = 512;
subbandSize =20;
numSubbands =15;
subbandOffset =numFFT/2-subbandSize*numSubbands/2;
numSymbols = 10^4 ;
filtelen =64;
slobeatten =40;
bitsperSubCarrier =4;
papr0 = 0:0.25:12;
L_papr0 = length (papr0) ;
CCDF = zeros ( L_papr0,1) ;
prototypeFilter = chebwin(filterLen , slobeAtten);
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator('modulationOrder'
,2^bitsPerSubCarrier,'bitInput', true,
'NormalizationMethod', 'Average power ');
inpData = zeros (bitsPerSubCarrier*subbandSize, numSubbands);
texSig = complex (zeros ( numFFT+filterLen-1, 1) );
for symIdx = 1:numSymbols
    for bandIdx = 1:numSubbands
        bitsIn = randi ([0 1], bitsPerSubCarrier*subbandSize , 1) ;
        symbolsIn = qamMapper (bitsIn);
        inpData (:,bandIdx) = bitsIn ;
        offset = subbandOffset + (bandIdx -1 ) * subbandSize ;
        symbolsInOFDM = [zeros ( offset,1) ; symbolsIn; zeros (numFFT-
offset-subondSize, 1)];
        iffset = subbandOffset+(bandIdx-1)*subbandSize;
```

Annexes

```
symbolsInOFDM = [zeros(offset , 1 ) ; symbolsIn;...
    zeros ( numFFT-offset-subbandSize ,1 )];
ifftOut = ifft (ifftshift(symbolsInOFDM));
bandFilter =prototypFilter.*exp(li*2pi*(0:filterLen-1'/numFFT* ...
    ((bandIdx-2/1)*subbandSize+0.5+subbandOffset+numFFT/2));
filterOut= conv(bandFilter , ifftOut);
txSig = txSig + filterOut;
end
PAPR(symIdx,1) = PAPR_MESURE(txSig)
end
for j = 1: L_PAPRO
    CCDF(j) = sum(PAPR>PAPRO(j))/numSymbols;
end
figure(1)
semilogy(PAPRO, CCDF, '-rs','Linewidth',2);
axis([4 12 10^-4 10^0]);
ylabel (' pr (PAPR>PAPRO) ');
xlabel on ;
rng(s);
```

II.3: PAPR_MESURE:

```
function [PAPR_db] = PAPR_MESURE(x)
Power = x.*conj(x);
AvgP = mean(Power);
PeakP = max(Power);
PAPR_db = 1*log10(PeakP/AvgP);
```

II.4 : CHEBYCHEV FILTER :

```
L = 84;
r=60;
bw = chebwin(L,r);
wvtool(bw)
```

ANNEXE -III:

III.1: BER OFDM

```
clear all; close all;clc;
s = rng(211); % Set RNG state for repeatability
numFFT = 1024; % Number of FFT points
numGuards = 212; % Guard bands on both sides
K = 4; % Overlapping symbols, one of 2, 3, or 4
%numSymbols = 5; % Simulation length in symbols
bitsPerSubCarrier = 2; % 2: 4QAM, 4: 16QAM, 6: 64QAM, 8: 256QAM
TEB = zeros(50,1);
%snrdb = 1; % SNR in dB
L = numFFT-2*numGuards; % Number of complex symbols per OFDM symbol
```

Annexes

```
% QAM symbol mapper
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator(...
    'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, ...
    'BitInput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
sumOFDMSpec = zeros(numFFT*2, 1);

inpData2 = randi([0 1], bitsPerSubCarrier*L, 1);
modData = qamMapper(inpData2(:));

symOFDM = [zeros(numGuards,1); modData; zeros(numGuards,1)];
ifftOut = sqrt(numFFT).*ifft(ifftshift(symOFDM));

[specOFDM,fOFDM] = periodogram(ifftOut, rectwin(length(ifftOut)), ...
    numFFT*2, 1, 'centered');
sumOFDMSpec = sumOFDMSpec + specOFDM;

% Plot power spectral density (PSD) over all subcarriers
sumOFDMSpec = sumOFDMSpec/mean(sumOFDMSpec(1+2*numGuards:end-2*numGuards));
figure;
plot(fOFDM,10*log10(sumOFDMSpec));
grid on
axis([-0.5 0.5 -180 10]);
xlabel('Normalized frequency');
ylabel('PSD (dBW/Hz)');
title(['OFDM, numFFT = ' num2str(numFFT)])
set(gcf, 'Position', figposition([46 50 30 30]));
for snrdB=1:50
% Add WGN
rxSig = awgn(ifftOut, snrdB, 'measured');
[specOFDM,fOFDM] = periodogram(rxSig, rectwin(length(rxSig)), ...
    numFFT*2, 1, 'centered');
    sumOFDMSpec = sumOFDMSpec + specOFDM;
% Plot power spectral density (PSD) over all subcarriers
sumOFDMSpec = sumOFDMSpec/mean(sumOFDMSpec(1+2*numGuards:end-2*numGuards));
figure(2);
plot(fOFDM,10*log10(sumOFDMSpec));
grid on
axis([-0.5 0.5 -180 10]);
xlabel('Normalized frequency');
ylabel('PSD (dBW/Hz)');
title(['OFDM, numFFT = ' num2str(numFFT)])
set(gcf, 'Position', figposition([46 50 30 30]));
% Perform FFT
offset = (numFFT-L)/2;
RxSymbols = fftshift(fft(rxSig));
dataRxSymbols = RxSymbols(offset+(1:L));
% Perform hard decision and measure errors
qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator( ...
    'ModulationOrder', 2^bitsPerSubCarrier, ...
    'BitOutput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
rxBits = qamDemod(dataRxSymbols);
BER = comm.ErrorRate;
ber = BER(inpData2, rxBits);
TEB(snrdB)=ber(1);
%disp(['F-OFDM Reception, BER = ' num2str(ber(1)) ' at SNR = ' ...
% num2str(snrdB) ' dB']);
end
```

III.2: BER UFMC

```
s = rng(211);           % Set RNG state for repeatability
numFFT = 512;          % number of FFT points
subbandSize = 20;      % must be > 1
numSubbands = 20;      % numSubbands*subbandSize <= numFFT
subbandOffset = numFFT/2-subbandSize*numSubbands/2; % numFFT/2-
subbandSize*numSubbands/2 for band center
TEB = zeros(35,1);

% Dolph-Chebyshev window design parameters
filterLen = 83;        % similar to cyclic prefix length
slobeAtten = 40;       % sidelobe attenuation, dB

bitsPerSubCarrier = 7; % 2: 4QAM, 4: 16QAM, 6: 64QAM, 8: 256QAM
%snrdB = 15;           % SNR in dB
% Design window with specified attenuation
prototypeFilter = chebwin(filterLen, slobeAtten);

% QAM Symbol mapper
qamMapper = comm.RectangularQAMModulator('ModulationOrder', ...
    2^bitsPerSubCarrier, 'BitInput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');

% Transmit-end processing
% Initialize arrays
inpData = zeros(bitsPerSubCarrier*subbandSize, numSubbands);
txSig = complex(zeros(numFFT+filterLen-1, 1));

hFig = figure;
axis([-0.5 0.5 -100 20]);
hold on;
grid on

xlabel('Normalized frequency');
ylabel('PSD (dBW/Hz)');
title(['UFMC, ' num2str(numSubbands) ' Subbands, ' ...
    num2str(subbandSize) ' Subcarriers each'])

% Loop over each subband
for bandIdx = 1:numSubbands

    bitsIn = randi([0 1], bitsPerSubCarrier*subbandSize, 1);
    symbolsIn = qamMapper(bitsIn);
    inpData(:,bandIdx) = bitsIn; % log bits for comparison

    % Pack subband data into an OFDM symbol
    offset = subbandOffset+(bandIdx-1)*subbandSize;
    symbolsInOFDM = [zeros(offset,1); symbolsIn; ...
        zeros(numFFT-offset-subbandSize, 1)];
    ifftOut = ifft(iffshift(symbolsInOFDM));

    % Filter for each subband is shifted in frequency
    bandFilter = prototypeFilter.*exp( 1i*2*pi*(0:filterLen-1)/numFFT* ...
        ((bandIdx-1/2)*subbandSize+0.5+subbandOffset+numFFT/2) );
    filterOut = conv(bandFilter,ifftOut);
```

Annexes

```
% Plot power spectral density (PSD) per subband
[psd,f] = periodogram(filterOut, rectwin(length(filterOut)), ...
    numFFT*2, 1, 'centered');
plot(f,10*log10(psd));

% Sum the filtered subband responses to form the aggregate transmit
% signal
txSig = txSig + filterOut;
end
set(hFig, 'Position', figposition([20 50 25 30]));
hold off;
for snrdB=1:35;
% Add WGN
rxSig = awgn(txSig, snrdB, 'measured');
% Pad receive vector to twice the FFT Length (note use of txSig as input)
% No windowing or additional filtering adopted
yRxPadded = [rxSig; zeros(2*numFFT-numel(txSig),1)];

% Perform FFT and downsample by 2
RxSymbols2x = fftshift(fft(yRxPadded));
RxSymbols = RxSymbols2x(1:2:end);

% Select data subcarriers
dataRxSymbols = RxSymbols(subbandOffset+(1:numSubbands*subbandSize));

% % Plot received symbols constellation
% constDiagRx = comm.ConstellationDiagram('ShowReferenceConstellation', ...
%     false, 'Position', figposition([20 15 25 30]), ...
%     'Title', 'UFMC Pre-Equalization Symbols', ...
%     'Name', 'UFMC Reception', ...
%     'XLimits', [-150 150], 'YLimits', [-150 150]);
% constDiagRx(dataRxSymbols);

% Use zero-forcing equalizer after OFDM demodulation
rxf = [prototypeFilter.*exp(1i*2*pi*0.5*(0:filterLen-1)/numFFT); ...
    zeros(numFFT-filterLen,1)];
prototypeFilterFreq = fftshift(fft(rxf));
prototypeFilterInv = 1./prototypeFilterFreq(numFFT/2-
subbandSize/2+(1:subbandSize));

% Equalize per subband - undo the filter distortion
dataRxSymbolsMat = reshape(dataRxSymbols,subbandSize,numSubbands);
EqualizedRxSymbolsMat = bsxfun(@times,dataRxSymbolsMat,prototypeFilterInv);
EqualizedRxSymbols = EqualizedRxSymbolsMat(:);

% % Plot equalized symbols constellation
% constDiagEq = comm.ConstellationDiagram('ShowReferenceConstellation', ...
%     false, 'Position', figposition([46 15 25 30]), ...
%     'Title', 'UFMC Equalized Symbols', ...
%     'Name', 'UFMC Equalization');
% constDiagEq(EqualizedRxSymbols);

% Demapping and BER computation
qamDemod = comm.RectangularQAMDemodulator('ModulationOrder', ...
    2^bitsPerSubCarrier, 'BitOutput', true, ...
    'NormalizationMethod', 'Average power');
BER = comm.ErrorRate;

% Perform hard decision and measure errors
rxBits = qamDemod(EqualizedRxSymbols);
```

Annexes

```
ber = BER(inpData(:), rxBits);
TEB(snrdB)=ber(1);
%disp(['UFMC Reception, BER = ' num2str(ber(1)) ' at SNR = ' ...
      %num2str(snrdB) ' dB']);
end
% Restore RNG state

savefile='PSD.mat';
save(savefile, 'psd','f')
rng(s);
```

III.3: PLOT_BER

```
clear all;close all;clc;

SNR=1:35;
load('43.mat');
semilogy(SNR,TEB,'-rs','linewidth',2);hold on;
load('63.mat');
semilogy(SNR,TEB,'-gs','linewidth',2);%hold on;
%load('BER_UFMC_32QAM.mat');
%semilogy(SNR,TEB,'-bs','linewidth',2);%hold on;
%load('BER_UFMC_64QAM.mat');
%semilogy(SNR,TEB,'-ms','linewidth',2);%hold on;
%load('BER_UFMC_128QAM.mat');
%semilogy(SNR,TEB,'-ks','linewidth',2);%hold on;
load('83.mat');
semilogy(SNR,TEB,'-bs','linewidth',2);hold off;
title('BER pour UFMC FFT_512 subbandSize=40 numSubbands=20');
grid on;
xlabel('SNR');
ylabel('BER');
legend('filterlen_43','filterlen_63','filterlen_83');
```