

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'Etude
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Réseau et Télécommunications**

**Étude des performances de modulations multi-porteuses dans le
contexte de la 4G**

Présenté par :

Hannachi Randa

Ahmed hergaHadil

Sous la direction de : **Pr. Redadaa Salah**

Année Universitaire : 2024-2025

Remerciements

Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant pour ces Faveurs et ses bontés.

Nous tenons à remercier Monsieur Pr. SALAH RDADAA notre encadreur, pour sa patience, sa disponibilité, son soutien, ses précieux conseils, ses remarques pertinentes, ainsi que ses explications ont été déterminants dans la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements aux membres de jury. Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance, également tous les membres du département d'électronique et de télécommunication de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma.

Nous profitons aussi de ce mémoire pour exprimer nos plus vifs remerciements envers tous les professeurs de la faculté qui nous ont apportés du soutien durant nos études.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ceux qui

M'ont donné la vie, aux symboles de tendresse et la joie,

Au cœur et à l'âme, à ma mère et à mon père

A mes deux chères tantes, mes compagnes et la raison de mon succès

A mes adorables sœurs Hanane, Rayane et Manar,

Et à mes chers frères Samir, Yazid et Toufik

Pour leur amour et leur soutien,

A tous mes nièces et neveux et à toute ma famille

A tous ceux qui m'aime et tous ceux que j'aime.

Hannachi Randa

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ceux qui

M'ont donné la vie, aux symboles de tendresse et la joie,

A ceux qui on partage mes joies et mes épreuves à mon cher parent

A mes deux chères frères Chouaib et Louay,

A ma grand-mère au grand cœur

A mes chères tantes Mira et Souad et a mon oncle Nasser

A tous ceux qui m'aime et tous ceux que j'aime.

Ahmad Herga Ha

Résumé

Les applications actuelles de communication sans fil et mobile exigent des débits de transmission élevés ainsi qu'une grande fiabilité. Dans ce contexte, le SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) s'impose comme une solution pertinente pour répondre à ces exigences. Bien que l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) soit largement utilisé comme technique de modulation, ses limites, notamment dans les scénarios liés à la 5G, incitent à explorer des alternatives.

Le SC-FDMA, basé sur un accès multiple en répartition fréquentielle, permet une gestion efficace des ressources entre plusieurs utilisateurs. Il se distingue particulièrement par son faible facteur de crête (PAPR) et sa bonne tolérance aux décalages de fréquence (CFO), ce qui en fait une option attrayante pour les systèmes sans fil.

Ces caractéristiques permettent à l'amplificateur de puissance de fonctionner plus près de sa zone de compression sans introduire de distorsions, ce qui améliore son rendement énergétique. En raison de ces avantages, le SC-FDMA a été adopté dans la norme 3GPP LTE pour la liaison montante (uplink) en tant que technique d'accès multiple privilégiée.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des réseaux 4G-LTE, en retraçant leur évolution depuis la 1G jusqu'à la 5G, et détaille l'architecture, les caractéristiques et les objectifs de la technologie LTE, notamment à travers l'utilisation du MIMO (Multiple Input Multiple Output). Le deuxième chapitre aborde la modulation OFDM et son extension, l'OFDMA, en expliquant leurs principes, leurs avantages et leurs limites dans un contexte de transmission multi-trajets. Le troisième chapitre se concentre sur la modulation SC-FDMA, une alternative à l'OFDM utilisée notamment dans la liaison montante des réseaux LTE, en analysant son principe, ses modes d'allocation de ressources et son impact sur la réduction du PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). Enfin, le quatrième chapitre présente une étude comparative par simulation MATLAB des performances des systèmes OFDM et SC-FDMA en termes de BER (Bit Error Rate), de probabilité d'erreur et de PAPR pour différentes modulations (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

Mots clés : SC-FDMA, OFDM, OFDMA, 5G, 4G-LTE, MIMO, Liaison montante, 3GPP LTE

ABSTRACT

Today's wireless and mobile communications applications demand ever-increasing data rates and reliability. SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) appears to be a suitable solution to meet these needs. Although OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is the most widely used modulation technique, it presents limitations for 5G applications, prompting the search for alternatives.

SC-FDMA is a frequency division multiple access method that optimizes resource allocation between different users. Its main strength lies in its low PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) and its robustness to frequency offset (CFO), making it a promising technology for wireless communications.

Thanks to these advantages, the power amplifier can operate near its compression zone without generating distortion, thus improving its efficiency. This is why SC-FDMA was selected in the 3GPP LTE standard as the multiple access technique for the uplink.

This thesis is structured into four main chapters. The first chapter provides an overview of 4G-LTE networks, tracing their evolution from 1G to 5G, and details the architecture, characteristics, and objectives of LTE technology, particularly through the use of MIMO (Multiple Input Multiple Output). The second chapter discusses OFDM modulation and its extension, OFDMA, explaining their principles, advantages, and limitations in a multipath transmission context. The third chapter focuses on SC-FDMA modulation, an alternative to OFDM used particularly in the uplink of LTE networks, analyzing its principle, resource allocation methods, and its impact on reducing the PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). Finally, the fourth chapter presents a comparative study by MATLAB simulation of the performances of OFDM and SC-FDMA systems in terms of BER (Bit Error Rate), error probability and PAPR for different modulations (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

Keywords : SC-FDMA, OFDM, OFDMA, 5G, 4G-LTE, MIMO, Liaison montante, 3GPP LTE

ملخص

تتطلب تطبيقات الاتصالات اللاسلكية والمتنقلة اليوم معدلات بيانات وموثوقية متزايدة باستمرار. ويبدو أن SC-FDMA (الوصول المتعدد بتقسيم التردد أحادي الناقل) هو الحل المناسب لتلبية هذه الاحتياجات. على الرغم من أن تقنية OFDM (تقسيم التردد المتعامد المتعدد) هي تقنية التعديل الأكثر انتشاراً، إلا أنها تعاني من قيود في تطبيقات الجيل الخامس، مما يحفز البحث عن بدائل.

SC-FDMA هي طريقة الوصول المتعدد بتقسيم التردد، مما يعمل على تحسين تخصيص الموارد بين المستخدمين المختلفين. تتمثل ميزتها الرئيسية في نسبة الطاقة القصوى إلى المتوسطة المنخفضة (PAPR) وقوتها في مواجهة إزاحات التردد (CFO)، مما يجعلها تقنية واعدة للاتصالات اللاسلكية.

بفضل هذه المزايا، يمكن لمضخم الطاقة أن يعمل بالقرب من منطقة الضغط الخاصة به دون إحداث أي تشوهات، وبالتالي تحسين كفاءته. ولهذا السبب تم الاحتفاظ بتقنية SC-FDMA في معيار 3GPP LTE3 باعتبارها تقنية وصول متعددة للارتباط الصاعد. تتكون هذه الرسالة من أربعة فصول رئيسية. يقدم الفصل الأول نظرة عامة على شبكات 4G-LTE، ويتتبع تطورها من 1G إلى 5G، ويوضح بالتفصيل بنية وخصائص وأهداف تقنية LTE، ولا سيما من خلال استخدام MIMO (مدخلات متعددة ومخرجات متعددة). يتناول الفصل الثاني تعديل OFDM وامتداده، OFDMA، موضحاً مبادئه ومزاياه وقيوده في سياق الإرسال متعدد المسارات. يركز الفصل الثالث على تعديل SC-FDMA، وهو بديل لـ OFDM المستخدم على وجه الخصوص في الربط الصاعد لشبكات LTE، من خلال تحليل مبدأه وأوضاع تخصيص الموارد وتأثيره على تقليل نسبة القدرة القصوى إلى المتوسطة (PAPR). وأخيراً، يقدم الفصل الرابع دراسة مقارنة بواسطة محاكاة MATLAB لأداء أنظمة SC-FDMA و OFDM. من حيث BER (معدل خطأ البت) واحتمالية الخطأ و PAPR للتعديلات المختلفة (BPSK، QPSK، 16-QAM، 64-QAM).

الكلمات المفتاحية: SC-FDMA, OFDM, OFDMA, 5G, 4G-LTE, MIMO, Liaison montante, 3GPP, LTE

Table Des Matières

Table Des Matières	I
Liste Des Tableaux	V
Liste Des Figures.....	VI
Liste Des Abréviations.....	VIII
<i>Introduction Générale</i>	1
<i>Chapitre 1 Généralités sur les réseaux de quatrième génération</i> <i>LTE</i>	4
I.1. Introduction :	5
I.2. Évolution des réseaux mobiles :	5
I.2.1 Première génération 1G :	5
I.2.2 Deuxième génération 2G :	6
I.2.3 Troisième génération 3G :	6
I.2.4 Quatrième génération 4G :	7
I.2.5 Cinquième génération 5G :	7
I.3 La technologie LTE (4G) :	8
I.3.1 Architecture générale d'un réseau LTE :	8
I.3.1.1 Réseau d'accès LTE :	8
I.3.1.2 Le réseaux de cœur EPC (Evolved PacketCore) :	9
I.4 Caractéristiques 4G-LTE :	10
I.4.1 Bande de fréquence :	10
I.4.2 Capacité réseau :	10
I.4.3 Performance de transmission :	10
I.4.4 Codage et sécurité :	11

I.4.5	Multiplexage :	12
I.4.5.1	Structure d'une trame LTE :	12
I.4.6	Modulation adaptative et codage :	16
I.5	Buts de la 4G :	16
I.6.	La technologie MIMO :	17
I.7.	Conclusion :	19
	<i>Chapitre 2 Modulation multi porteuses OFDM/OFDMA.....</i>	<i>21</i>
II.1.	Introduction :	22
II.2.	Canaux de transmission :	22
II.2.1.	Canal à bruit additif blanc gaussien :	22
II.2.2.	Canal à trajet multiples :	23
II.3.	La technique d'accès FDMA :	24
II.4.	Modulation OFDM :	25
II.4.1	Chaine de transmission OFDM :	26
II.4.2	Principe et fonctionnement de l'OFDM :	27
II.4.3	La modulation :	28
II.4.4	La démodulation :	29
II.4.5	L'orthogonalité :	30
II.4.6	L'intervalle de garde :	31
II.4.6.1	Préfix cyclique :	32
II.4.7	Avantages et inconvénients de l'OFDM :	33
II.4.7.1	Avantages :	33
II.4.7.2	Inconvénients :	34
II.5.	Modulation OFDMA :	34
II.5.1	Origine et avantages :	34
II.5.2	Principes :	35
II.6.	Conclusion :	36

<i>Chapitre 3 Modulation multi porteuses SC-FDMA.....</i>	<i>37</i>
III.1.Introduction :.....	38
III.2Single Carrier-FDMA :	38
III.3Principe de la modulation :	39
III.4Principe de la démodulation :	39
III.5 Schéma bloc d'un système SC-OFDM :	39
III.5.1 Émetteur SC-FDMA.....	39
III.5.2Récepteur SC-FDMA :	41
III.6 Allocation des ressources du système SC-FDMA :.....	41
III.6.1Allocation de ressource en mode distribué :	42
III.6.2 Allocation de ressources en mode localisé :.....	43
III.7 Comparaison des modes I-FDMA et L-FDMA :	44
III.8 Le facteur PAPR :	45
III.8.1Problème de PAPR :	45
III.8.2Définition de PAPR :	45
III.8.3Le CCDF de PAPR :	46
III.8.4 Le PAPR élevé de l'OFDM :.....	47
III.9.La réduction de PAPR :	47
III.9.1Étude du PAPR du signal SC-FDMA :.....	47
III.10.Capacité du SC-FDMA :	49
III.11La différence entre les deux accès SC-FDMA et OFDMA :.....	50
III.12 Conclusion :	51
<i>Chapitre 4 Simulation MATLAB OFDM & SC-FDMA</i>	<i>53</i>
IV.1Introduction :.....	54
IV.2.Étude comparative des deux accès SC-FDMA et OFDM :.....	54

IV.3.Modélisation du canal et définition des paramètres de simulation et de performance pour les systèmes OFDM et SC-FDMA:	55
IV.3.1. Taux d'erreurs binaires :	56
IV.3.2. Le rapport signal à bruit (SNR) :	56
IV.3.3.Processus BER vs SNR :	57
IV.3.4.Probabilité d'erreur :	57
IV.4.Résultats de simulation :	58
IV.4.1.BER en fonction de SNR pour L'OFDM et SC-FDMA :	58
IV.5.2. Probabilité d'erreur de l'OFDM et du SC-FDMA pour les différentes modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)	61
IV.5.3. PAPR de l'OFDM et du SC-FDMA pour les modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM) :	64
IV.5.3.1.BPSK et QPSK :	64
IV.5.3.2. Cas de 16-QAM et 64-QAM:	65
IV.5.Conclusion :	66
<i>Conclusion Générale.....</i>	68
Références Bibliographique	69

Liste Des Tableaux

TABLEAU IV. 1PARAMETRES UTILISES POUR LA SIMULATION	56
TABLEAU IV. 2 LES VALEURS DU RAPPORT SNR POUR UN TAUX D'ERREUR BINAIRE (BER) DE 10^{-5} POUR LE DIFFERENT TYPE DE MODULATION POUR L'OFDM	59
TABLEAU IV. 3 LES VALEURS DU RAPPORT SNR POUR UN TAUX D'ERREUR BINAIRE (BER) DE 10^{-5} POUR LE DIFFERENT TYPE DE MODULATION POUR SC-FDMA	60
TABLEAU IV. 4 PROBABILITE D'ERREUR EN FONCTION DU SNR POUR L'OFDM	62
TABLEAU IV. 5 PROBABILITE D'ERREUR EN FONCTION DU SNR POUR SC-FDMA.....	63

Liste Des Figures

FIGURE I.1: ÉVOLUTION DES RESEAUX MOBILES. [7]	5
FIGURE I. 2 ARCHITECTURE GENERALE D'UN RESEAU LTE [15]	8
FIGURE I. 3 LE FONCTIONNEMENT D'UNE TRAME RADIO [28]	13
FIGURE I. 4 STRUCTURE DE LA TRAME RADIO [6]	15
FIGURE I. 5 LES SLOTS D'UNE TRAME RADIO [6]	16
FIGURE I. 6 : SYSTEME MIMO A N_t ANTENNES D'EMISSION ET N_r ANTENNES DE RECEPTION [13]	17
FIGURE I.7CAPACITE DES SYSTEMES MIMO (2 x 2) ET SISO (1 x 1) [13]	19
FIGURE II. 1 CANAL A BRUIT ADDITIF [22].	22
FIGURE II. 2SCHEMA DE PRINCIPE DES TRAJETS MULTIPLE [13]	24
FIGURE II. 3 METHODES D'ACCES MULTIPLES FDMA [2]	25
FIGURE II. 4 GAIN EN EFFICACITE SPECTRALE DE L'OFDM PAR RAPPORT A FDM [13]	25
FIGURE II. 5 CHAINE DE TRANSMISSION DU SYSTEM OFDM [12].	26
FIGURE II. 6 REPRESENTATION FREQUENTIELLE ET TEMPORELLE D'UN SIGNAL OFDM. [12]	27
FIGURE II. 7 SCHEMA DU PRINCIPE DE LA MODULATION OFDM [11].	28
FIGURE II. 8 SCHEMA DU PRINCIPE DE LA DEMODULATION [11].	30
FIGURE II. 9 SINUSOÏDES ORTHOGONALES [7].	31
FIGURE II. 10 ORTHOGONALITE FREQUENTIELLE DE L'OFDM [7]	31
FIGURE II. 11INTERVALLE DE GARDE	32
FIGURE II. 12 PREFIXE CYCLIQUE. [7]	32
FIGURE II. 13 LES PORTEUSES DE L'OFDMA. [6]	35
FIGURE III. 1 ÉMETTEUR SC-FDMA [14]	40
FIGURE III. 2 SCHEMA BLOC DU RECEPTEUR SC-FDMA [25]	41
FIGURE III. 3 LE MAPPING I-FDM [1]	43
FIGURE III. 4 LE MAPPING L-FDMA. [1]	43
FIGURE III. 5 SPECTRE DU SIGNAL LSC-FDMA AU RECEPTEUR [1]	44
FIGURE III. 6 SCHEMA DE MAPPAGE DES SOUS-PORTEUSES DANS LE DOMAINE FREQUENTIEL [5].	44
FIGURE III. 7 PRESENTATION DU PAPR A PARTIR D'UN SIGNAL MULTI-PORTEUSE [29]	46
FIGURE III. 8 MODULATION SC-FDMA COMPARE A L'OFDMA [27]	51

FIGURE IV. 1SIMILITUDE ENTRE UNE CHAINE OFDM ET SC-FDMA [27]	54
FIGURE IV. 2BER EN FONCTION DU SNR POUR L'OFDM AVEC DIFFERENTES MODULATIONS (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)	58
FIGURE IV. 3BER EN FONCTION DU SNR POUR L'SC-FDMA AVEC DIFFERENTES MODULATIONS (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)	59
FIGURE IV. 4BER EN FONCTION DU SNR POUR L'OFDM ET LE SC-FDMA AVEC DIFFERENTES MODULATIONS (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)	60
FIGURE IV. 5 PROBABILITE D'ERREUR EN FONCTION DU SNR POUR L'OFDM	61
FIGURE IV. 6 PROBABILITE D'ERREUR EN FONCTION DU SNR POUR L'SC-FDMA.....	62
FIGURE IV. 7 PROBABILITE D'ERREUR POUR L'OFDM ET L'SC-FDMA	63
FIGURE IV. 8PAPR POUR OFDM ET SC-FDMA POUR BPSK	64
FIGURE IV. 9PAPR POUR OFDM ET SC-FDMA POUR QPSK.....	65
FIGURE IV. 10PAPR POUR OFDM ET SC-FDMA POUR 16-QAM.....	65
FIGURE IV. 11PAPR POUR OFDM ET SC-FDMA POUR 64-QAM.....	66

Liste Des Abréviations

• 3GPP	3 rd Génération Partner hip Project
• 1G	Première Génération
• 2G	Deuxième Génération
• 3G	Troisième Génération
• 4G	Quatrième Génération
• 5G	Cinquième Génération
• OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) multiplexage par repartition de frequencies orthogonales
• SC-FDMA	Signal Carrier- Frequency Division Multiple Access
• MIMO	Multiple Input Multiple Output
• FFT	Fast Fourier Transform
• IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
• DFT	Discrete Fourier Transform
• IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
• CP	CyclicPrefix
• ICI	Inter Channel Interférence
• S/P	Série to parallel
• NR	New radio
• PAPR	Peak to Average Power Ratio
• CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
• MME	Mobility Manager Entity
• SGW	Serving Gateway
• WIFI	Wireless Fidelity IEEE
• WIMAX	Worldwide interoperability for microwave Access IEEE
• PSK	Phase-Shift Keying
• QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
• QAM	Quadrature Amplitude Modulation
• DAB	Digital Audio Broadcasting
• L-FDMA	Localized Frequency Division Multiple Access
• I-FDMA	Interleaved Frequency Division Multiple Access.
• ISC-FDMA	Interleaved Single Crier Frequency Division Multiple Access

• IP	Internet Protocol
• ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
• UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
• EPC	Equipement de Protection Collective
• SNR	Signal to noise ratio
• BER	(Bit Error Rate) taux d'erreur binaire
• DSL	(Digital Subscriber Line) ligne digitale d'abonné
• AM/AM	(Amplitude/Amplitude) amplitude/amplitude
• AWGN	(Additive White Gaussian Noise) bruit additif blanc et gaussien
• DVB	(Digital VideoBroadcasting) diffusion de la vidéo digitale
• FDM	(Frequency Division Multiplexing) multiplexage par répartition de fréquence
• IBO	(Input Back Off) reculé d'entrée
• ICI	(Inter Channel Interference) interference entre canaux
• ISI	(Inter Symbol Interference) interference entre symboles
• MCM	(Multi Carrier Modulation) modulation multi-porteuse
• P/S	(Parallel to Serial) conversion parallèle-série
• S/P	(Serial To Parallel) conversion série-parallèle
• CDMA	Code Division Multiple Access
• DVB-T	Digital VideoBroadcasting – Terrestrial
• FDM	Frequency Division Multiplexing
• LTE	Long Term Evolution
• TEB	Taux d'Erreur Binaire
• IEP	Interférence Entre Porteuses
• IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineer
• FDMA	Frequency Division Multiple Access
• TDMA	Time Division Multiple Access
• GSM	Global System for Mobile Communications
• GPRS	General Packet Radio Service
• HSPA	High Speed Packet Access
• TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
• HSS	Home Subscriber Server
• HLR	Home Location Register

Introduction Générale

Ces deux dernières décennies, les systèmes de télécommunications, et plus particulièrement les communications sans fil, ont connu une évolution remarquable, parallèlement aux avancées en électronique numérique. Aujourd'hui omniprésents, ces systèmes intègrent des dispositifs tels que smartphones, assistants personnels et systèmes de géolocalisation, tous interconnectés et en communication permanente.

Parmi les solutions de transmission les plus performantes figurent les modulations multi-porteuses (MCM), qui permettent de lutter contre les interférences inter-symboles (ISI), principalement causées par l'évanouissement du canal radio mobile. Actuellement, l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est la technique MCM la plus répandue, ayant été adoptée dans de nombreux standards comme le DVB, HOMEPLUG, DSL, Wifi, WiMAX et LTE. Son succès repose sur plusieurs atouts majeurs :

- Une orthogonalité temps-fréquence optimale, améliorant significativement l'efficacité spectrale comparée au multiplexage fréquentiel classique (FDM).
- Une robustesse aux effets multi-trajets, grâce à l'insertion d'un préfixe cyclique (CP), évitant ainsi les interférences inter-symboles (ISI) et inter-porteuses (ICI).
- Une implémentation numérique simplifiée, reposant sur la transformée de Fourier rapide (IFFT en émission, FFT en réception).
- Une égalisation simple, utilisant un coefficient constant par sous-porteuse, réduisant ainsi la complexité du récepteur.

L'OFDM s'est imposé comme une technologie clé pour la 4G en raison de sa fiabilité. Toutefois, avec l'avènement de la 5G, ses limites deviennent plus apparentes :

- Une efficacité spectrale réduite à cause du préfixe cyclique (CP), qui introduit une redondance et diminue le débit utile.
- Une sélectivité fréquentielle limitée, liée au filtrage rectangulaire (fonction *sinc* aux lobes secondaires prononcés), obligeant à utiliser des bandes de garde larges et pénalisant encore l'efficacité spectrale.

- Une sensibilité accrue aux décalages de fréquence (CFO), risquant de compromettre l'orthogonalité des sous-porteuses et de dégrader les performances du système.

Par ailleurs, comme toute modulation multi-porteuse, l'OFDM souffre d'un rapport de puissance crête à moyenne (PAPR) élevé, entraînant des distorsions non linéaires lors de l'amplification (effets AM/AM et AM/PM). Ces distorsions altèrent le taux d'erreur binaire (TEB), limitant ainsi les performances du système.

Pour pallier ce problème, plusieurs approches ont été proposées, dont l'SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access), technique prometteuse pour les liaisons montantes hautes débit. Principal objet de ce mémoire, l'SC-FDMA est une variante de l'OFDM où les symboles sont d'abord modulés dans le domaine temporel avant d'être étalés par une DFT. Grâce à sa nature mono-porteuse, l'SC-FDMA présente un PAPR plus faible, en faisant une alternative intéressante à l'OFDM, notamment pour optimiser la consommation énergétique des terminaux mobiles.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre présente une étude des généralités sur les réseaux LTE de quatrième génération, posant ainsi les bases technologiques nécessaires à la compréhension des enjeux. Le deuxième chapitre aborde la modulation multi-porteuse OFDM/OFDMA en détaillant ses architectures, ses principes de fonctionnement ainsi que ses avantages et inconvénients. Le troisième chapitre se consacre dans un premier temps aux principes fondamentaux de la technique SC-FDMA, puis propose dans un second temps une nouvelle approche visant à réduire le PAPR du signal transmis. Enfin, le quatrième chapitre, qui constitue le cœur de ce travail, est divisé en deux parties : la première offre une étude comparative entre les techniques OFDM et SC-FDMA, tandis que la seconde présente et analyse les résultats obtenus grâce à des simulations réalisées sous MATLAB. Cette structure permet une progression cohérente depuis les concepts théoriques jusqu'à l'analyse pratique des performances des systèmes étudiés.

Chapitre 1 Généralités sur les réseaux de quatrième génération LTE

I.1. Introduction :

Les réseaux mobiles ont connu une évolution technologique majeure, passant des systèmes analogiques de première génération (1G) aux réseaux hauts débit de cinquième génération (5G). Ce chapitre retrace cette progression en mettant l'accent sur la technologie 4G LTE, ses caractéristiques techniques, son architecture et ses performances. Nous aborderons également les principes clés tels que le multiplexage, la modulation adaptative, et la technologie MIMO, qui ont révolutionné les communications sans fil. Enfin, nous présenterons les objectifs majeurs de la 4G et son rôle dans la transition vers des réseaux plus performants et intelligents.

I.2. Évolution des réseaux mobiles :

Ces dernières années, les réseaux mobiles et sans fil ont connu un développement remarquable. Dans cette section, nous retraçons leur évolution technologique, des débuts de la 1G jusqu'à la 5G. La figure (I.1) illustre cette progression



Figure I.1: Évolution des réseaux mobiles. [7]

I.2.1 Première génération 1G :

La première génération de téléphonie mobile (1G) a été lancée au début des années 1980. Elle permettait des communications vocales analogiques, mais avec une qualité médiocre et des coûts élevés. Parmi ses principales limitations figuraient :

- L'incompatibilité des normes entre différentes régions, empêchant une interopérabilité mondiale.
- L'absence de chiffrement, rendant les communications vulnérables aux écoutes illégitimes.

- Pas de roaming international, limitant l'utilisation du même numéro chez d'autres opérateurs [6]

De plus, la 1G souffrait de plusieurs problèmes techniques :

- Capacité réseau réduite, due à l'utilisation de la technique FDMA (Frequency Division Multiple Access).
- Interopérabilité limitée entre les réseaux des différents opérateurs.
- Faible sécurité, favorisant la fraude et les intrusions.

Ainsi, malgré son innovation, la 1G était limitée par son architecture analogique et son manque de standardisation, ouvrant la voie à des améliorations avec la 2G.

I.2.2 Deuxième génération 2G :

La 2G marque une avancée majeure avec l'introduction du signal numérique pour les communications vocales et la transmission des données. Contrairement à la 1G analogique, cette technologie offre :

- ✓ Une meilleure qualité d'appel
- ✓ Une capacité réseau accrue
- ✓ Des coûts réduits pour les utilisateurs

Les principaux standards 2G incluent :

- GSM (Global System for Mobile Communications) – Le standard le plus répandu.
- CDMA (Code Division Multiple Access) et TDMA (Time Division Multiple Access) – Techniques d'accès multiple améliorant l'efficacité spectrale.
- GPRS (2.5G) – Transition vers la 3G avec des débits inférieurs à 100 kbit/s.
- EDGE (2.75G) – Évolution du GSM permettant des débits plus élevés (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) [4].

Cette génération a posé les bases de la mobilité numérique, combinant voix et données tout en préparant la transition vers la 3G

I.2.3 Troisième génération 3G :

La 3G représente une révolution dans les télécommunications mobiles en offrant des débits significativement plus élevés que ceux de la 2G. Cette technologie permet :

- ✓ Un téléchargement de données rapide

- ✓ Une navigation Internet fluide
- ✓ L'utilisation d'applications multimédias (envoi/réception d'e-mails avec pièces jointes, streaming vidéo en définition standard, etc.)

Avec l'évolution des réseaux 3G (notamment la 3G+ ou HSPA), les débits théoriques peuvent atteindre jusqu'à 42 Mbit/s , ouvrant la voie à de nouveaux usages mobiles

I.2.4 Quatrième génération 4G :

La 4G/LTE (Long Term Evolution) constitue la quatrième génération des réseaux mobiles, aujourd'hui largement déployée à l'échelle mondiale. Cette technologie, développée par le 3GPP (organisme de normalisation des réseaux 3G UMTS) au milieu des années 2000, marque une avancée significative par rapport aux générations précédentes (GSM/2G et UMTS/3G).

Ses avantages majeurs incluent :

- ✓ Des débits théoriques pouvant atteindre 150 Mbit/s
- ✓ Une latence réduite (meilleur temps de réponse)
- ✓ Une couverture étendue et une capacité réseau accrue

L'innovation principale de la 4G réside dans son architecture entièrement IP (Internet Protocol), permettant un transport unifié des données et des communications vocales. Cette évolution technique ouvre la voie à des usages mobiles plus performants et plus fiables.

I.2.5 Cinquième génération 5G :

Plus qu'une simple évolution des réseaux mobiles, la 5G représente une innovation disruptive capable de transformer en profondeur l'écosystème des télécommunications et de remettre en question les modèles économiques traditionnels des opérateurs [22]

Cette technologie de rupture promet :

- ✓ Des performances inédites : débits dépassant 1 Gbps et capacité réseau décuplée
- ✓ Une qualité de service optimisée répondant aux besoins des applications critiques
- ✓ De nouveaux champs d'application :
 - Industrie 4.0 et IoT industriel

- Déploiement des villes intelligentes
- Gestion des réseaux énergétiques intelligents

En transcendant les limites des générations précédentes, la 5G ouvre la voie à une transformation digitale globale, redéfinissant notre façon de communiquer, de produire et d'interagir avec notre environnement.

I.3 La technologie LTE (4G) :

I.3.1 Architecture générale d'un réseau LTE :

Le réseau est constitué de deux parties : une partie radio (eUTRAN) et un cœur de réseau « EPC » (Evolved PacketCore).

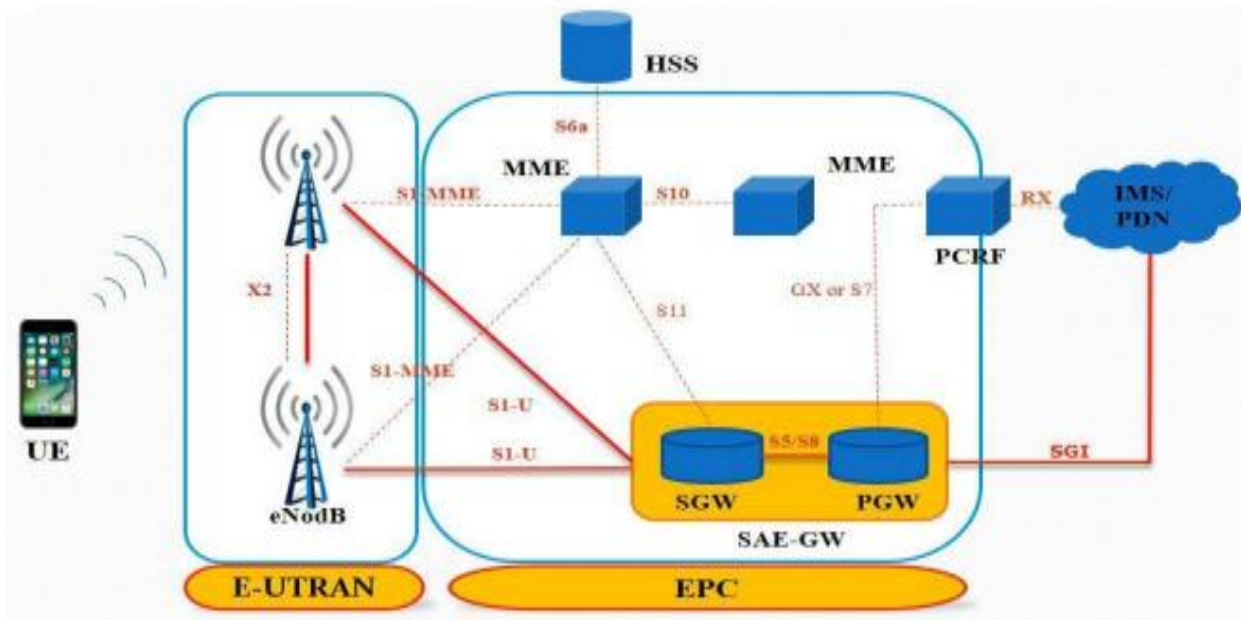


Figure I. 2 Architecture générale d'un réseau LTE [15]

I.3.1.1 Réseau d'accès LTE :

Le réseau d'accès LTE repose sur des stations de base évoluées, appelées eNodeB (ou eNB), héritant du concept Node B de l'UMTS tout en offrant des capacités améliorées. Pour atteindre des débits élevés, le LTE utilise deux technologies distinctes :

- OFDMA (accès multiple par répartition orthogonale de fréquence) pour le lien descendant
- SC-FDMA (accès multiple par répartition de fréquence à porteuse unique) pour le lien montant [16]

Les fonctions principales de l'eNodeB est :

1. Gestion des ressources radio : optimisation de l'utilisation du spectre
2. Compression d'en-tête IP : réduction de la surcharge protocolaire pour une meilleure efficacité radio
3. Sécurité des transmissions :
 - Chiffrement des données
 - Protection de l'intégrité des communications
4. Interconnexion avec le cœur de réseau (EPC) :
 - Connexion au MME (Mobility Management Entity) pour le plan de contrôle
 - Liaison avec la S-GW (Serving Gateway) pour le plan utilisateur [10]

Les rôles des éléments clés du cœur réseau :

- MME :
 - Gestion de la mobilité et localisation des utilisateurs
 - Authentification des abonnés
 - Suivi des états (connecté, inactif, etc.)
- S-GW :
 - Routage des données utilisateur
 - Gestion du handover (y compris vers les réseaux 2G/3G)

Cette architecture permet au LTE d'offrir des performances supérieures tout en maintenant une compatibilité avec les générations précédentes de réseaux mobiles. [10]

1.3.1.2 Le réseaux de cœur EPC (Evolved PacketCore) :

Le protocole TCP/IP constitue le fondement de l'architecture du cœur de réseau (EPC) pour le transport unifié de la voix et des données. Cette infrastructure centrale assure :

1. L'interconnexion globale via des routeurs avec :
 - Les stations de base eNodeB distantes
 - Les réseaux d'autres opérateurs mobiles
 - Les réseaux de téléphonie fixe
 - L'Internet public
2. Les principaux éléments fonctionnels :
 - Serving Gateway (SGW) :
 - Agrège et achemine le trafic utilisateur provenant de multiples eNodeB

- Gère le plan de données (user plane)
- Mobility Management Entity (MME) :
 - Traite la signalisation (plan de contrôle)
 - Accède aux bases de données d'abonnés (HSS/HLR) contenant les identifiants et droits d'accès
- Packet Gateway (PGW) :
 - Interface principale vers Internet
 - Attribue les adresses IP aux terminaux LTE
 - Assure les fonctions de passerelle IP

Cette architecture tout-IP permet une intégration transparente entre les différents réseaux tout en offrant une gestion centralisée des abonnés et des ressources réseau.

I.4 Caractéristiques 4G-LTE :

La 4G permet effectivement d'avoir des performances de Qos très fiables, en citant par la suite quelques paramètres :

I.4.1 Bande de fréquence :

- Large spectre disponible : plus de 30 bandes fréquences normalisées par le 3GPP
- Plage étendue : de 450 MHz à 3,8 GHz
- Flexibilité d'implémentation selon les réglementations locales

I.4.2 Capacité réseau :

- Prise en charge de plus de 200 terminaux actifs simultanément par cellule
- Optimisation de la densité d'utilisateurs

I.4.3 Performance de transmission :

Débits théoriques

- Descendant : 100 Mbit/s (OFDMA) → Efficacité spectrale : 5 bits/s/Hz
- Montant : 50 Mbit/s (SC-FDMA) → Efficacité spectrale : 2,5 bits/s/Hz

Latence :

- Ultra-faible latence : < 5 ms (UE à Access Gateway) en conditions idéales

- Latence moyenne : ~25 ms en charge réseau normale
- Support optimal des services temps réel :
 - Voix sur IP (VoIP)
 - Streaming multimédia
 - Applications interactives

Cette combinaison de hauts débits et de faible latence positionne la 4G-LTE comme une technologie idéale pour les services multimédias avancés et les communications temps réel.

I.4.4 Codage et sécurité :

La 4G-LTE utilise deux principales techniques de modulation pour les transmissions radio :

- Liaison descendante (Downlink) : OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)
 - Une technologie d'accès multiple par répartition en fréquence (*FDMA*).
 - Optimisée pour le partage simultané de la bande de fréquence entre plusieurs utilisateurs.
 - Compatible avec les antennes MIMO (*Multi-Input Multi-Output*).
- Liaison montante (Uplink) : SC-FDMA (*Single-Carrier FDMA*)
 - Une variante du FDMA, plus efficace énergétiquement que le W-CDMA utilisé en 3G/UMTS.
 - Réduit la consommation des terminaux mobiles tout en maintenant de bonnes performances.

Ces deux méthodes sont dérivées de l'OFDM (utilisé en ADSL et Wifi), mais contrairement à ce dernier, elles sont spécialement conçues pour un accès multiple, permettant une répartition dynamique des ressources entre utilisateurs.

Ainsi, l'OFDMA et le SC-FDMA offrent un meilleur débit, une plus grande efficacité spectrale et une adaptation optimale aux transmissions MIMO, ce qui renforce les performances globales du réseau LTE.

I.4.5 Multiplexage :

La norme LTE prend en charge deux modes de multiplexage pour optimiser l'utilisation des fréquences :

FDD (Frequency Division Duplexing)

- Émission et réception sur des fréquences distinctes (liaison montante et descendante séparées).
- Mode majoritaire : Principalement utilisé dans les premiers déploiements 4G LTE, notamment en France.

TDD (Time Division Duplexing)

- Émission et réception sur la même fréquence, mais alternées dans le temps.
- Utilisé sur des bandes spécifiques : Fera l'objet d'attributions ultérieures dans certains pays.

I.4.5.1 Structure d'une trame LTE :

La transmission LTE s'organise selon une trame principale de 10 ms, elle-même subdivisée en :

- 10 sous-frames de 1 ms chacune
- Chaque sous-trame comporte 2 slots de 0,5 ms

Dans chaque slot (0,5 ms) :

- 7 symboles OFDM sont transmis par sous-porteuse
- Avec 12 sous-porteuses actives, cela donne :

$$7 \text{ symboles} \times 12 \text{ sous-porteuses} = 84 \text{ symboles transmis en } 0,5 \text{ ms}$$

Cette structure permet une gestion fine des ressources temporelles et fréquentielles, optimisant ainsi le débit et l'efficacité spectrale du réseau LTE.

La figure I.3 présente la trame radio dans le réseau LTE.

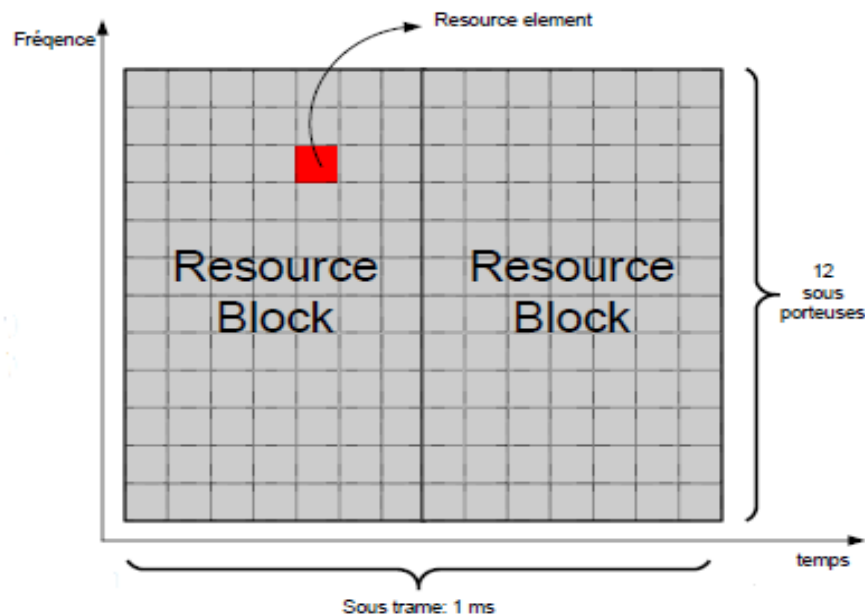


Figure I. 3 Le fonctionnement d'une trame radio [28]

1) Capacité de transmission par symbole

Chaque symbole OFDM peut transporter de 1 à 6 bits, selon le schéma de modulation utilisé :

- Modulations simples (robustes) : QPSK (2 bits/symbole)
- Modulations complexes (haut débit) : 128-QAM (6 bits/symbole)

✚ Analogie explicative :

Imaginez qu'un symbole soit comme un carton de transport :

- Avec QPSK, vous emballez 1 colis par carton (transmission fiable mais faible débit)
- Avec 128-QAM, vous optimisez l'espace avec 6 colis par carton (débit élevé mais sensible aux perturbations)

✚ Choix de modulation :

Le 128-QAM (6 bits/symbole) est privilégié lorsque :

- La station de base et le mobile sont proches
- Le canal radio est peu perturbé
- On recherche un débit maximal

2) Organisation des transmissions

Les échanges LTE s'organisent selon deux architectures principales :

--Type 1: FDD (Frequency Division Duplex)

- Émission et réception sur fréquences distinctes
- Permet des transmissions simultanées en Uplink et Downlink

--Type 2: TDD (Time Division Duplex)

- Émission et réception sur même fréquence mais à instants différents
- Plus flexible pour l'ajustement dynamique des ressources

A. Structure de type 1 : FDD

Le FDD (Frequency Division Duplexing) est une technique de duplexage utilisée dans les réseaux sans fil qui repose sur une séparation fréquentielle des communications. Concrètement, les transmissions montantes (uplink) et descendantes (downlink) s'effectuent sur des porteuses de fréquences distinctes. Ce mécanisme permet d'assurer des émissions et réceptions simultanées, ce qui constitue son principal atout par rapport au TDD (Time Division Duplexing) où les communications montantes et descendantes partagent la même fréquence mais alternent dans le temps. La figure 2.7 illustre précisément l'organisation temporelle d'une trame FDD typique. Cette approche offre une gestion optimisée des flux bidirectionnels tout en garantissant une latence réduite, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée aux réseaux mobiles haut débit comme la 4G LTE.

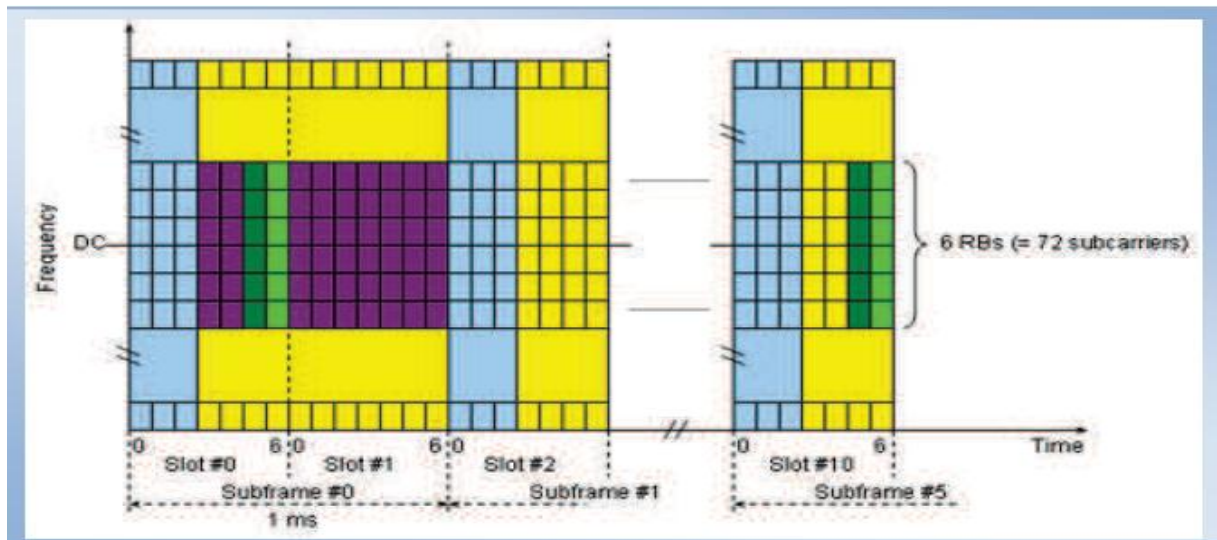


Figure I. 4 Structure de la trame radio [6]

Le signal LTE peut être représenté dans un plan bidimensionnel où l'axe horizontal correspond au domaine temporel (en symboles) et l'axe vertical au domaine fréquentiel (en sous-porteuses). Ces deux dimensions présentent une structure hiérarchique où des unités élémentaires (symbole pour le temps, sous-porteuse pour la fréquence) se combinent pour former des unités plus grandes, comme illustré dans la figure I.4.

B. Structure de type 2 : TDD

Le duplexage par répartition dans le temps (TDD) est une méthode de transmission qui permet d'utiliser une même ressource radio pour l'émission et la réception en les alternant dans le temps. Cette approche offre plusieurs avantages, notamment une allocation dynamique de la bande passante qui s'adapte aux variations asymétriques du débit montant et descendant. Elle est particulièrement efficace pour les terminaux mobiles à faible vitesse ou fixes, car elle permet une mise en œuvre optimale des techniques de formation de faisceau (beamforming) dans un système TDD.

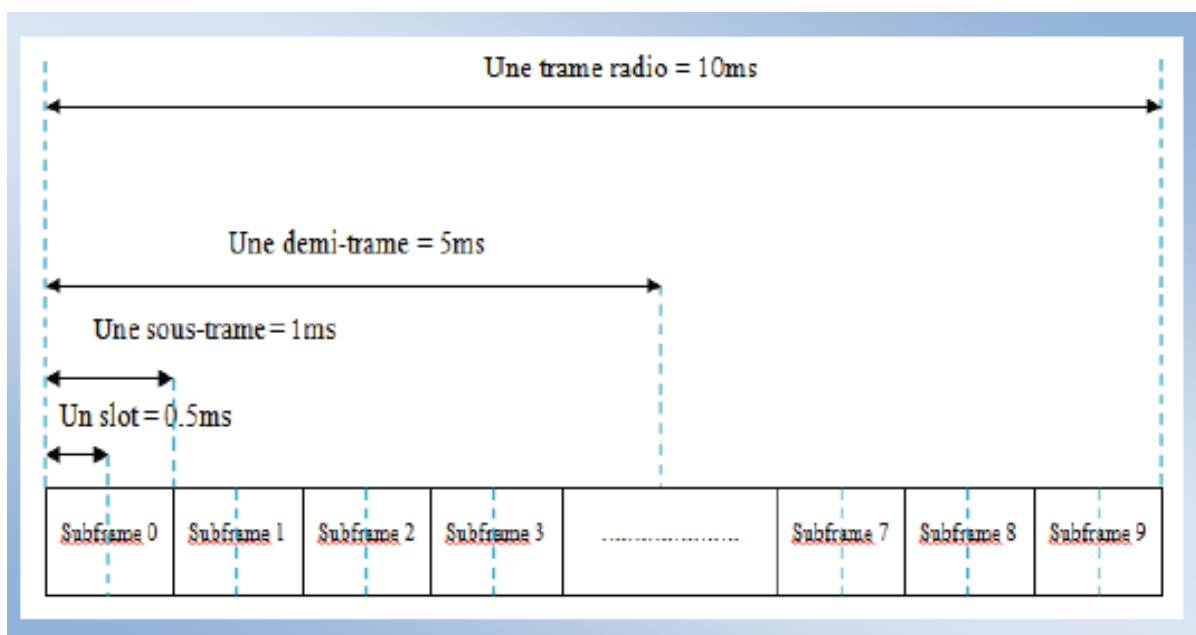


Figure I. 5 Les slots d'une trame radio [6]

La LTE présente l'avantage d'être rétro compatible avec les technologies précédentes, permettant une transition progressive depuis les réseaux UMTS FDD (W-CDMA), UMTS TDD et GSM/EDGE.

I.4.6 Modulation adaptative et codage :

La modulation adaptative repose principalement sur la 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation à 16 états), offrant un débit double par rapport à la QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) utilisée en UMTS. Alors que la QPSK encode 4 états (2^2) en utilisant deux porteuses déphasées de 90° , la 16 QAM combine deux niveaux d'amplitude avec deux porteuses en quadrature, permettant 16 états (2^4).

Les modulations employées varient selon le sens de transmission :

- Downlink (DL) : QPSK, 16QAM, 64QAM
- Uplink (UL) : QPSK, 16QAM

I.5 Buts de la 4G :

La 4G génération a pour but d'optimiser l'efficacité spectrale et d'accroître la capacité de gestion des appareils mobiles au sein d'une même cellule. Elle cherche également à fournir des

débits élevés en situation de mobilité tout en garantissant une connectivité fluide grâce à l'interopérabilité entre les différentes technologies existantes. Parmi ses principaux objectifs figurent :

- ❖ Transparence des réseaux : Permettre une transition sans interruption entre les différentes infrastructures.
- ❖ Continuité des services : Éviter toute coupure lors des transferts intercellulaires et généraliser l'utilisation du tout-IP.
- ❖ Amélioration des performances : Réduire les délais (relève, bout-en-bout), la gigue et les pertes de paquets.
- ❖ Optimisation des ressources : Minimiser la signalisation et le trafic superflu pour une meilleure qualité de service (QoS).
- ❖ Réduction des coûts : Limiter les dépenses liées à la signalisation tout en maintenant une session stable. [6]

I.6. La technologie MIMO :

La technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), largement utilisée dans les communications numériques, permet à la fois de compenser les interférences dues au multi trajets et d'augmenter la capacité du système sans nécessiter d'augmentation de puissance d'émission ou de bande passante. Dans un système MIMO comprenant N_t antennes d'émission et N_r antennes de réception (comme illustré dans la figure I.6), chaque antenne émettrice agit comme une source d'information indépendante, optimisant ainsi la transmission des données [13]

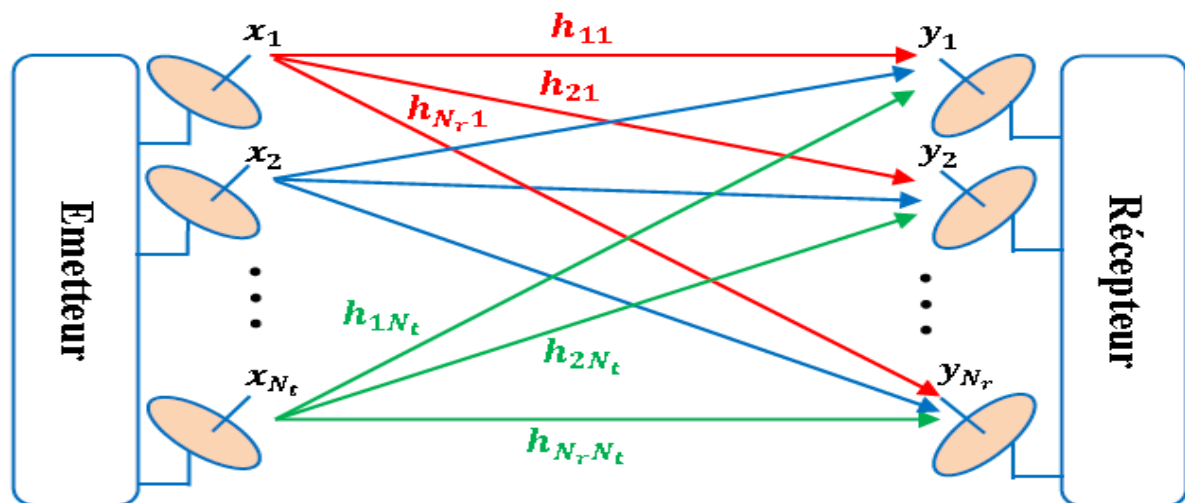


Figure I. 6 : Système MIMO à N_t antennes d'émission et N_r antennes de réception [13]

D'après la figure I.6, les évanouissements des différents trajets sont représentés par les éléments h_{ji} de la matrice H suivante :

$$H = \begin{bmatrix} h_{11}(t) & \cdots & h_{1N_t}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1}(t) & \cdots & h_{N_rN_t}(t) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

A la réception, le signal reçu par la j ème antenne de réception est exprimé par :

$$r_j(t) = \sum_{i=1}^{N_t} h_{j,i} s_i(t) + \eta_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, N_r \quad (1.2)$$

Où $\eta_j(t)$ un bruit additif. Si on prend tous les trajets, on peut écrire sous une forme matricielle :

$$r(t) = Hs(t) + \eta(t) \quad (1.3)$$

Avec :

$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_{N_t}(t)]^T$ Les signaux émis par les N_t antennes d'émission.

$r(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_{N_r}(t)]^T$ Les signaux reçus par les N_r antennes de réception.

H est la matrice canal dont les éléments sont les coefficients complexes du canal.

$\eta(t)$ est le vecteur bruit blanc additif gaussien de dimension $(N_r \times 1)$.

Comme le montre l'équation (1.3), plusieurs répliques du signal de données codées dans l'espace et dans le temps peuvent être envoyées simultanément à travers les différentes antennes. Ces signaux subissent différents effets de canal, permettant ainsi une récupération plus fiable que dans le cas d'un seul signal reçu SISO (Single Input Single Output). Cette caractéristique clé est connue sous le nom de diversité spatiale. De plus, si différents signaux sont transmis à travers chaque antenne, la capacité de canal et l'efficacité spectrale de bande passante peuvent être grandement améliorées par le biais du multiplexage spatial. En effet, pour un système SISO avec une seule antenne au niveau de l'émetteur et du récepteur, la capacité de canal C_{11} est donnée par :

$$C_{11} = W \cdot \log_2(1 + \gamma |h^2|) \left[\text{bit/s} \right] \quad (1.4)$$

Où : W est la bande passante du canal SISO, γ est le RSB au niveau de l'antenne de réception et h le gain de canal.

Tandis que pour un système MIMO avec N_t antennes en émission et N_r antennes en réception, la capacité du canal est calculée comme dans [6] par :

$$C_{N_r N_t} = W \cdot \log_2 \left(\det \left(I + \frac{\gamma}{N_t} H H^H \right) \right) \left[\text{bit/s} \right] \quad (1.5)$$

Où : I est la matrice d'identité de dimension $N_t \times N_r$, γ est le rapport signal à bruit, H est la matrice des coefficients du canal, H^H désigne la matrice transposée conjuguée et $\det(\cdot)$ déterminant d'une matrice. [13]

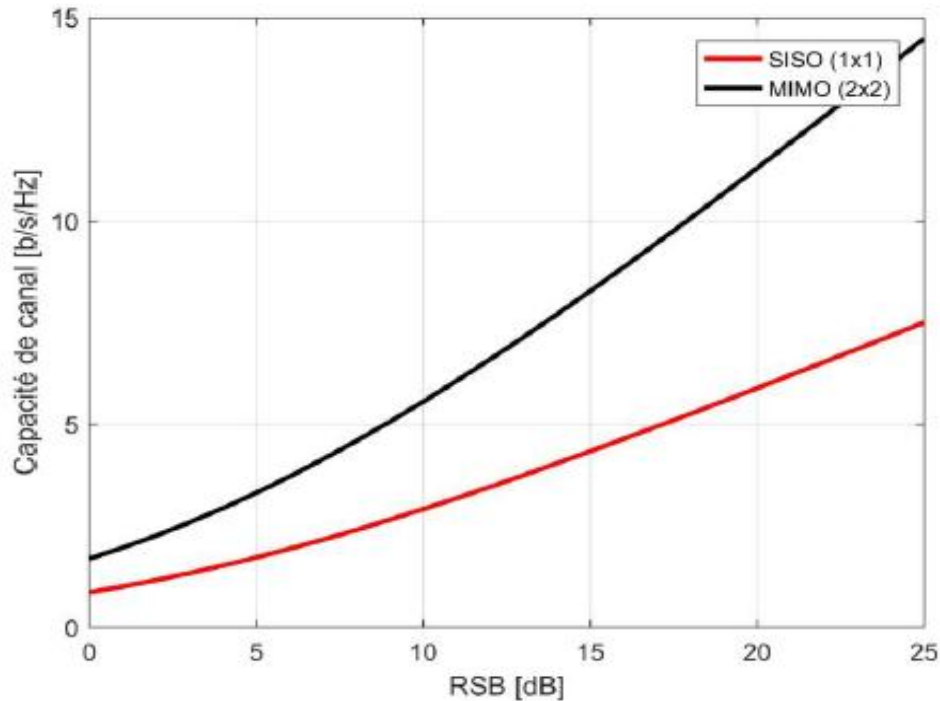


Figure I.7 Capacité des systèmes MIMO (2 x 2) et SISO (1 x 1) [13]

La figure I.7 montre le gain en capacité assuré par un système MIMO (avec $N_t = 2$, $N_r = 2$) par rapport au système conventionnel SISO ($N_t = 1$, $N_r = 1$). On n'y constate que la capacité du canal SISO a été presque doublée dans le système MIMO 2x2. Une meilleure capacité de canal est alors obtenue grâce aux canaux créés par le système multi-antennaire offrant la possibilité de transmettre sur plusieurs modes spatiaux, et augmentant ainsi le débit sans utiliser de fréquence supplémentaire. [13]

I.7. Conclusion :

Ce chapitre a présenté une analyse approfondie de l'évolution des réseaux mobiles, depuis les systèmes analogiques de 1G jusqu'aux technologies avancées de la 5G, en mettant l'accent sur la 4G LTE et ses innovations majeures. Nous avons examiné son architecture réseau, ses performances en termes de bande passante, de capacité et de sécurité, ainsi que les techniques clés comme le multiplexage (FDD/TDD) et la modulation adaptative. L'étude de la

technologie MIMO a également démontré son rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité spectrale et la réduction des interférences.

Ces fondements techniques préparent naturellement la transition vers le 2ème chapitre, qui portera sur la modulation multi porteuse OFDM et son extension OFDMA, des technologies centrales dans les communications haut débit modernes. L'OFDM, avec sa robustesse face aux interférences et son efficacité spectrale, constitue la pierre angulaire de la 4G LTE et de la 5G. Son évolution vers l'OFDMA, permettant une allocation dynamique des ressources, sera analysée en détail, établissant ainsi le lien entre les concepts présentés dans ce chapitre et leur application concrète dans les systèmes de transmission avancés.

Chapitre 2

Modulation multi porteuses OFDM/OFDMA

II.1.Introduction :

Les systèmes de communication modernes reposent sur des techniques de transmission sophistiquées pour optimiser l'utilisation du spectre et améliorer la robustesse face aux perturbations du canal. Dans ce chapitre, nous étudierons les principaux canaux de transmission, notamment le canal à bruit additif blanc gaussien (AWGN) et le canal à trajets multiples, qui influencent directement la qualité de la transmission.

Ensuite, nous aborderons la technique d'accès FDMA (Frequency Division Multiple Access), avant de nous focaliser sur la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), une méthode clé dans les communications hautes débit. Nous détaillerons son principe de fonctionnement, sa chaîne de transmission, ainsi que ses avantages et inconvénients.

Enfin, nous explorerons l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), une extension de l'OFDM permettant un accès multiple plus efficace. Ce chapitre servira de base pour aborder, dans le chapitre suivant, la modulation SC-FDMA, une alternative optimisée pour réduire le PAPR (Peak-to-Average Power Ratio).

II.2. Canaux de transmission :

Un canal de communication désigne un support physique permettant de transmettre un signal entre un émetteur et un récepteur.

II.2.1. Canal à bruit additif blanc gaussien :

Le signal traversant le canal est affecté par un bruit additif (figure II.1), une perturbation aléatoire engendrée soit par le milieu de propagation (bruit externe, comme les rayonnements), soit par les composants électroniques du système (bruit interne) [7]

La figure (II.1) représente le canal à bruit additif

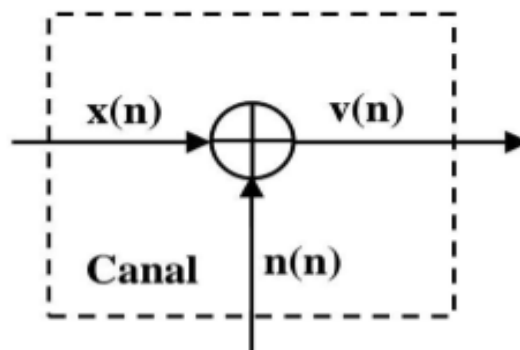


Figure II. 1 Canal à bruit additif [22].

Le signal à la sortie du canal est donné par :

$$V(n) = x(n) + n(n) \quad (2.1)$$

Avec $x(n)$ est signal émis et $n(n)$ représente le bruit aditif.

La capacité du canal C pour le canal AWGN est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (2.2)$$

Où P Représente la puissance maximale du canal et N la puissance du bruit.

II.2.2. Canal à trajet multiples :

Avant d'aborder le principe des modulations multi-porteuses, il est nécessaire de présenter les particularités du canal radio mobile, pour lequel cette technique de modulation présente un intérêt majeur.

Dans les systèmes de communications sans fil, les signaux transmis interfèrent entre eux en raison de divers mécanismes de propagation. Le récepteur peut ainsi capter plusieurs versions du même signal, provenant de trajets multiples - un phénomène appelé effet multi-trajet. Celui-ci résulte principalement de cinq mécanismes physiques :

- ✓ Réflexion
- ✓ Réfraction
- ✓ Diffraction
- ✓ Diffusion
- ✓ Guidage d'onde

En pratique, les ondes radio subissent simultanément plusieurs de ces phénomènes. Le signal reçu correspond alors à la superposition vectorielle de tout le composant multi-trajet, pouvant donner lieu à des interférences constructives (renforcement du signal) ou destructives (atténuation). Paradoxalement, les obstacles présents dans l'environnement de propagation peuvent ainsi représenter à la fois un atout et une limitation pour la transmission [5]

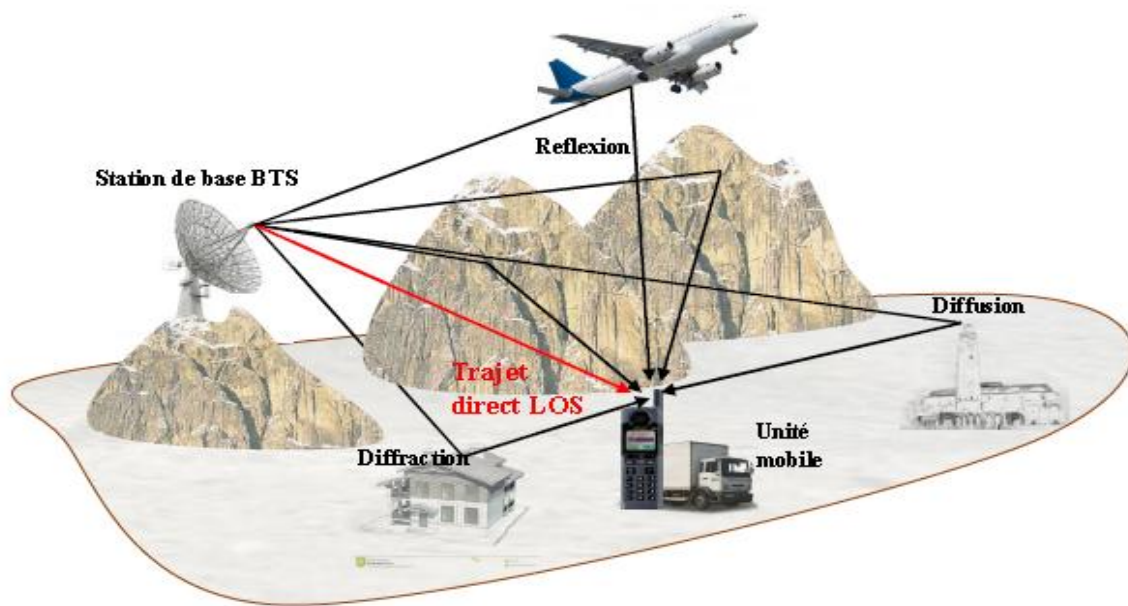


Figure II. 2 Schéma de principe des trajets multiple [13]

Considérons un modèle simple de canal à l'issue duquel le récepteur reçoit la somme des Signaux émis ayant subi des échos donc retardés de τ_i et d'amplitudes h_i [13].

La réponse impulsionnelle du canal s'écrit alors

$$h(t) = \sum_{i=1}^N h_i \delta(t - \tau_i) \quad (2.3)$$

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

$$H(f) = \sum_{i=1}^N h_i e^{-2j\pi f \tau_i} \quad (2.4)$$

II.3. La technique d'accès FDMA :

La technique d'accès multiple à division de fréquence aussi connu sous le diminutif de FDMA, représente la technique la plus utilisée dans les réseaux mobiles de première génération. Elle consiste à diviser le spectre en plusieurs canaux radio (aussi appelés voies ou bandes incidentes, sous-bandes de fréquences) de largeur fixe, voir figure (II.3).

Lorsque l'utilisateur veut passer un appel, il se voit alors allouer exclusivement un des canaux pendant toute la durée de la communication. Entre chacun de ces canaux, se trouve un canal de garde pour éviter l'intermodulation. Cette technique est surtout destinée à des signaux analogiques [2].

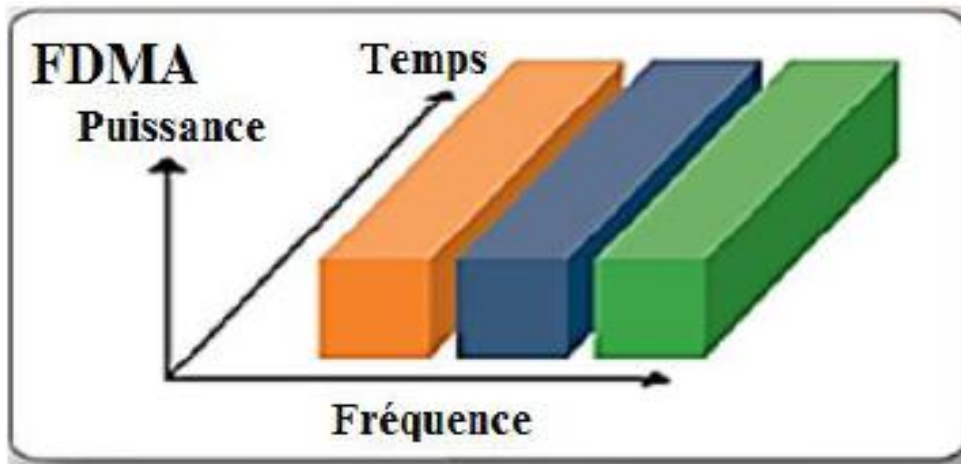


Figure II. 3 Méthodes d'accès multiples FDMA [2]

II.4. Modulation OFDM :

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de transmission numérique particulièrement efficace pour atténuer les interférences dues aux trajets multiples et aux canaux sélectifs en fréquence. Son principe repose sur la division de la bande passante en un grand nombre de sous-porteuses étroites. Ces sous-porteuses sont dites orthogonales, car, dans des conditions idéales, un symbole transmis sur l'une d'elles peut être démodulé sans subir d'interférence de la part des sous-porteuses adjacentes [1].

Bien que similaire au multiplexage fréquentiel classique (FDM), l'OFDM se distingue par l'utilisation de sous-porteuses orthogonales et densément espacées. Cette caractéristique lui confère une efficacité spectrale bien supérieure, avec un gain pouvant dépasser 50 % par rapport au FDM traditionnel, comme illustré sur la figure II.4 [13]

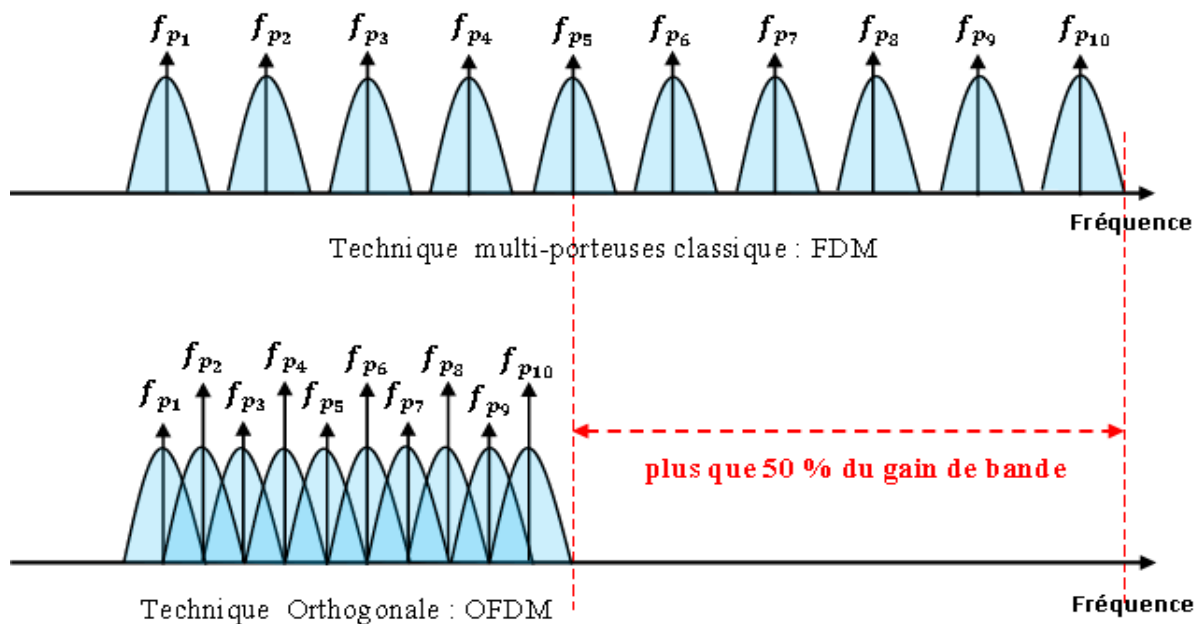


Figure II. 4 Gain en efficacité spectrale de l'OFDM par rapport à FDM [13]

Aujourd'hui, la technologie OFDM est largement déployée dans de nombreuses applications haut débit, aussi bien en transmission filaire que sans fil. Dans le domaine câblé, elle constitue la base des systèmes ADSL exploitant la paire torsadée. Pour les communications sans fil, elle est au cœur de plusieurs standards majeurs : la télévision numérique terrestre (DVB-T), la radio numérique (DAB), les réseaux Wifi (norme IEEE 802.11) et WiMAX (norme IEEE 802.16) [3]

II.4.1 Chaîne de transmission OFDM :

La Figure II.5 présente un schéma fonctionnel simplifié d'un émetteur OFDM. Dans ce système, les symboles modulés (en QAM ou PSK) sont répartis sur N sous-porteuses orthogonales via une transformée de Fourier discrète inverse (IDFT). En pratique, cette opération est implémentée à l'aide d'une transformée de Fourier rapide inverse (IFFT), optimisée pour réduire la complexité calculatoire. Avant transmission sur le canal radio, un préfixe cyclique (CP) est ajouté, puis une conversion parallèle-série est appliquée pour adapter le signal à l'interface air.

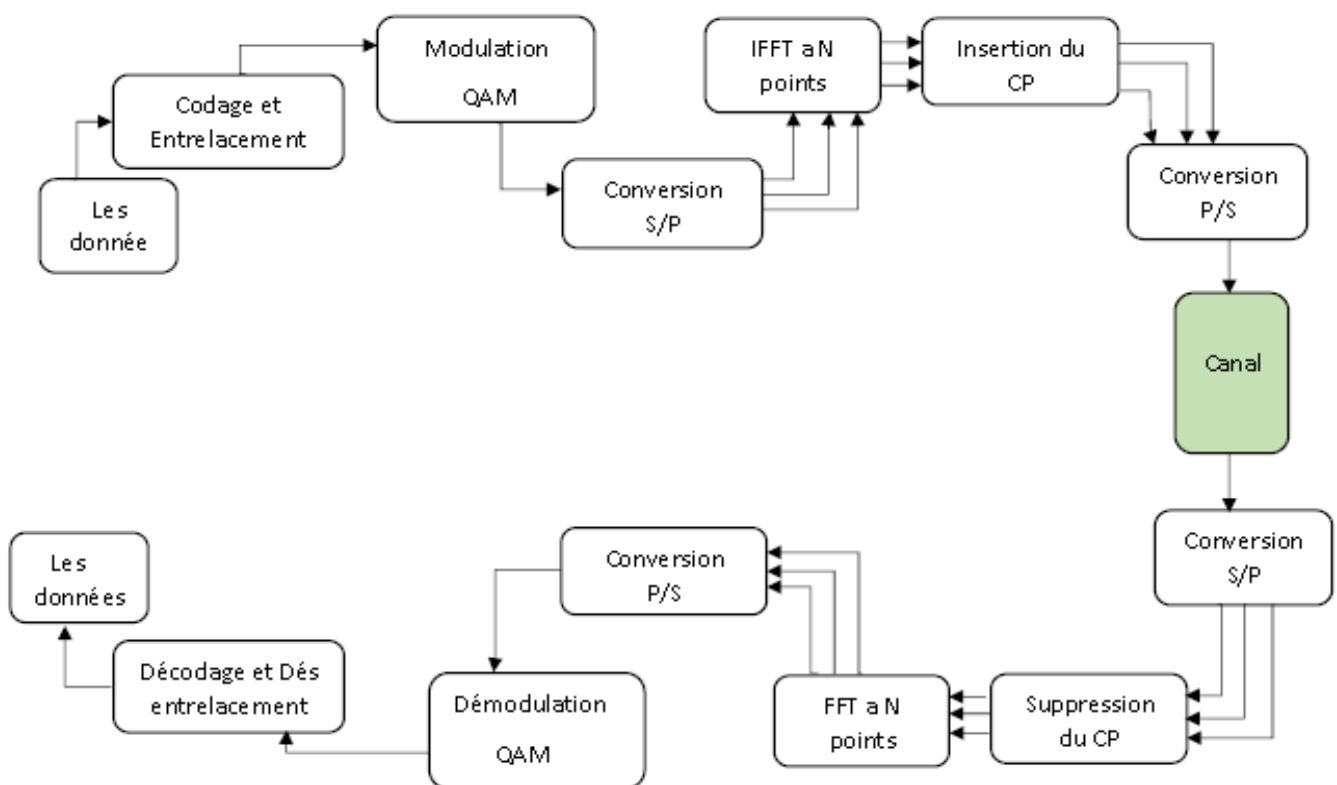


Figure II. 5 Chaîne de transmission du system OFDM [12].

Du côté récepteur, le processus inverse est appliqué. Lorsque le signal OFDM est reçu, le préfixe cyclique (CP) - potentiellement altéré par les interférences entre symboles - est d'abord éliminé. Une transformée de Fourier rapide (FFT) est ensuite effectuée pour convertir le signal dans le domaine fréquentiel. Cette approche facilite considérablement les opérations d'estimation et d'égalisation du canal [12].

II.4.2 Principe et fonctionnement de l'OFDM :

La technique OFDM repose sur la transmission simultanée de données via plusieurs porteuses orthogonales, optimisant ainsi l'occupation spectrale. Comme l'illustre la Figure II.4, le système organise le canal de transmission selon une grille temps-fréquence, où chaque cellule élémentaire est associée à une porteuse spécifique. Les données sont réparties sur l'ensemble de ces porteuses, chacune étant modulée individuellement à faible débit (en PSK ou QAM). À un instant t donné, l'ensemble des informations portées par toutes les porteuses constitue ce qu'on appelle un symbole OFDM [12]. La Figure II.6 montre clairement cette double représentation temporelle et fréquentielle caractéristique des signaux OFDM.

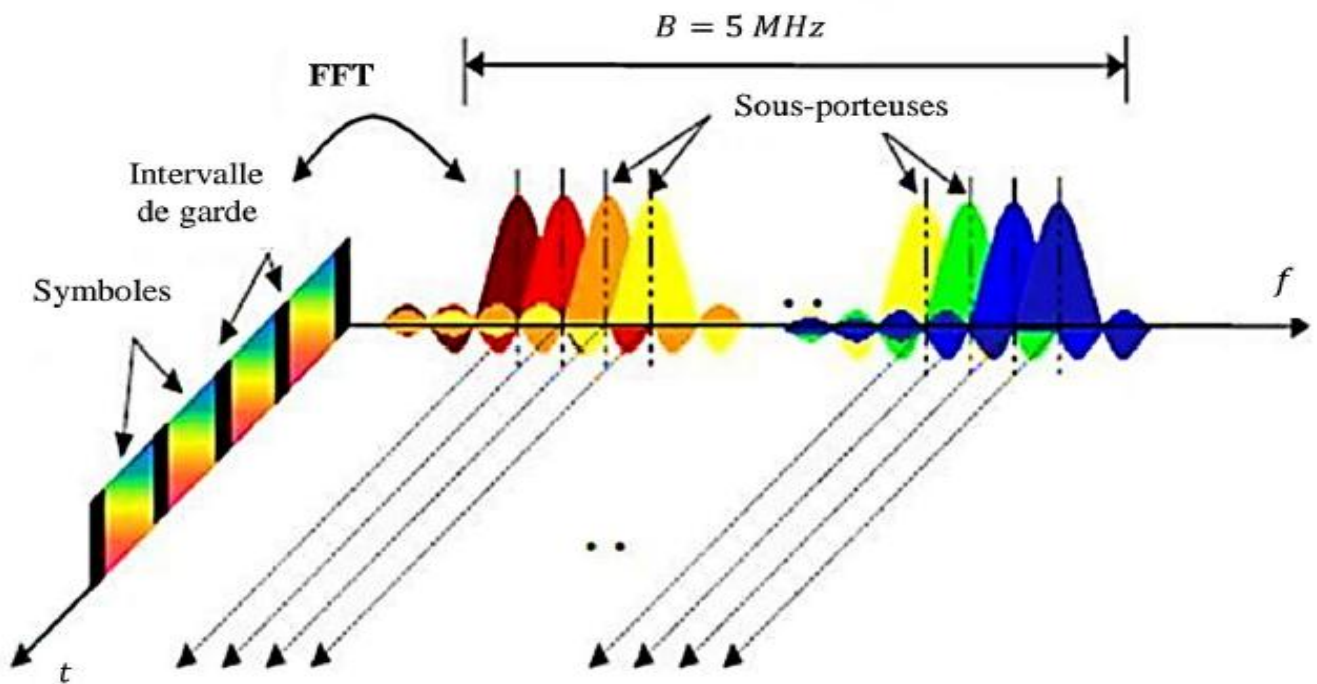


Figure II. 6 Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM. [12]

Soit $\{f_k\}$ l'ensemble des fréquences porteuses considérées avec :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} = f_0 + k \cdot \Delta f, 0 \leq k \leq N - 1 \quad (2.5)$$

f_0 : est la fréquence porteuse origine.

T_s : représente la durée allouée à un symbole.

Δf : Représente l'écart entre deux sous-porteuses consécutives.

N : Le nombre des sous-porteuses.

Le principe du multiplexage en fréquence est Après un codage bit/symboles des données à transmettre, on groupe les symboles C_k par paquets de N (conversion série/parallèle), Les C_k sont des nombres complexes définis à partir des éléments binaires par une constellation souvent de modulation QAM.

La fonction de mise en forme dont l'orthogonalité est vérifiée si. $\Delta f = \frac{1}{T_s}$ Le signal modulé du train k s'écrit sous forme complexe :

$$C_k e^{j2\pi k t} \quad (2.6)$$

II.4.3 La modulation :

Le signal résultant (t) correspondant à l'ensemble des N sous porteuses réassemblés en un symbole OFDM :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi f_k t}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.7)$$

Le schéma de principe de modulation OFDM est donné par :

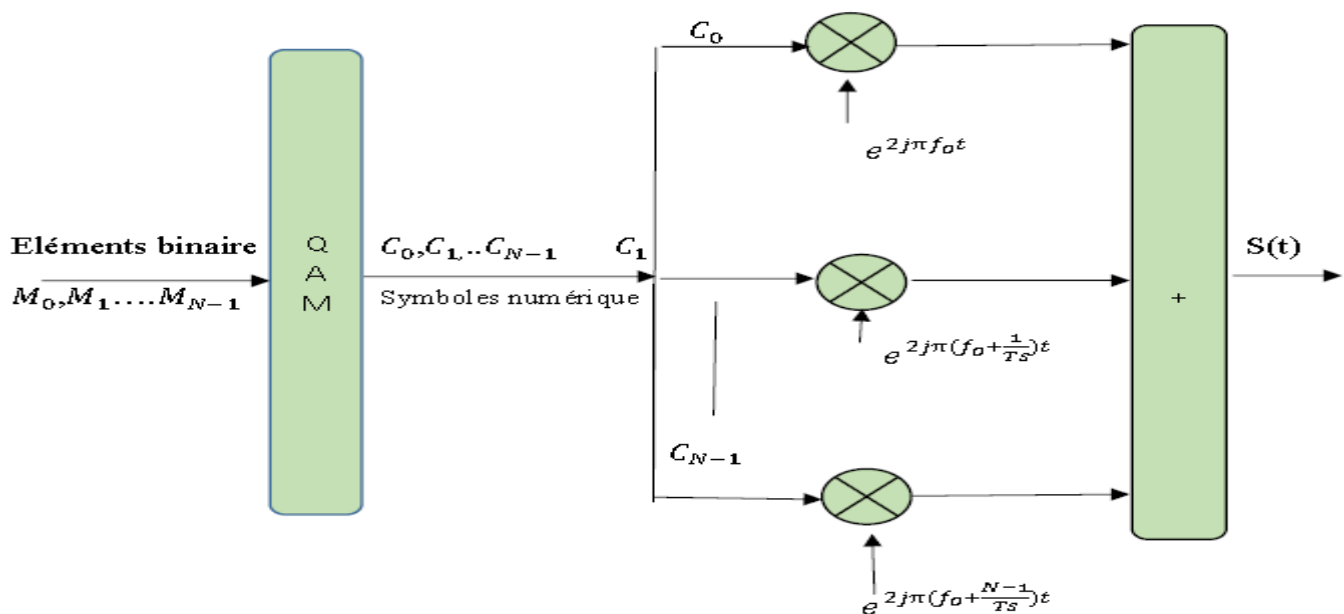


Figure II. 7 Schéma du principe de la modulation OFDM [11].

Plus précisément, les données numériques C_k sont des nombres complexes générés à partir de bits binaires via une constellation de modulation d'amplitude en quadrature (QAM) à plusieurs états (4, 16, 64, ou généralement 2^q états). Ces données représentent des symboles numériques, distincts des symboles OFDM. En effet, un symbole OFDM correspond au regroupement de N symboles numériques modulés sur N sous-porteuses, comme décrit dans l'équation [11]

$$S(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}} \quad (2.8)$$

On peut déduire l'expression réelle du signal si : $C_k = a_k + jb_k$

$$s(t) = \operatorname{Re} \left(s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} (a_k + jb_k) e^{2j\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t} \right) \quad (2.9)$$

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos \left(2\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t \right) - b_k \sin \left(2\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t \right) \quad (2.10)$$

II.4.4 La démodulation :

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

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k H_k(t) e^{2j\pi \left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right) t} \quad (2.11)$$

La fonction $H_k(t)$ modélise la réponse en fréquence du canal autour de la porteuse f_k à l'instant t . Sa variation lente permet de l'approximer comme constante sur la durée d'un symbole OFDM T_s . La démodulation traditionnelle s'effectue en traitant indépendamment chaque sous-porteuse, conformément au principe représenté dans la figure II.8 [18]

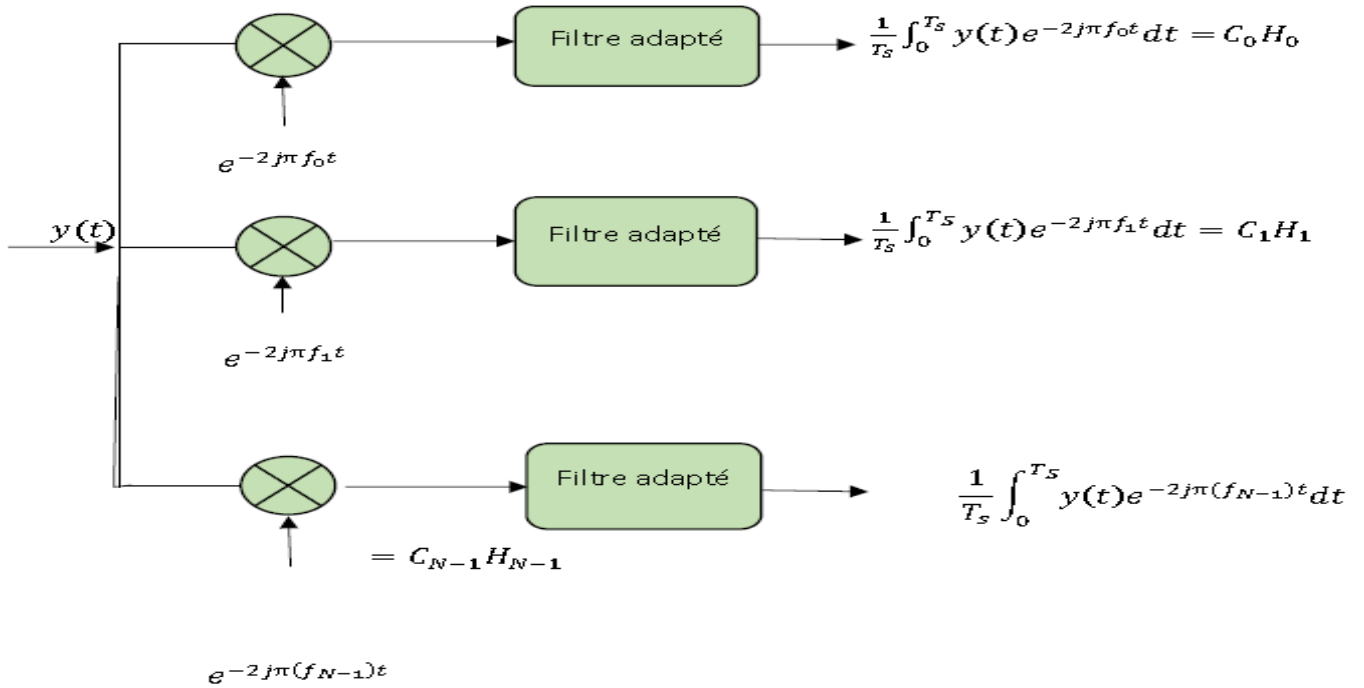


Figure II. 8 Schéma du principe de la démodulation [11].

II.4.5 L'orthogonalité :

Dans un système OFDM, l'orthogonalité garantit que le spectre de chaque sous-porteuse atteint son maximum précisément aux fréquences où les spectres des autres sous-porteuses s'annulent [1]. Bien que leurs spectres se chevauchent partiellement, les sous-porteuses conservent ainsi une orthogonalité parfaite entre elles, éliminant les interférences inter-porteuses. L'orthogonalité des sous porteuses est représentée par la figure II.9.

L'interférence entre porteuses (IEP) est causée par la perte de l'orthogonalité et donc par la présence des symboles de données d'une sous-porteuse sur les sous-porteuses adjacentes.

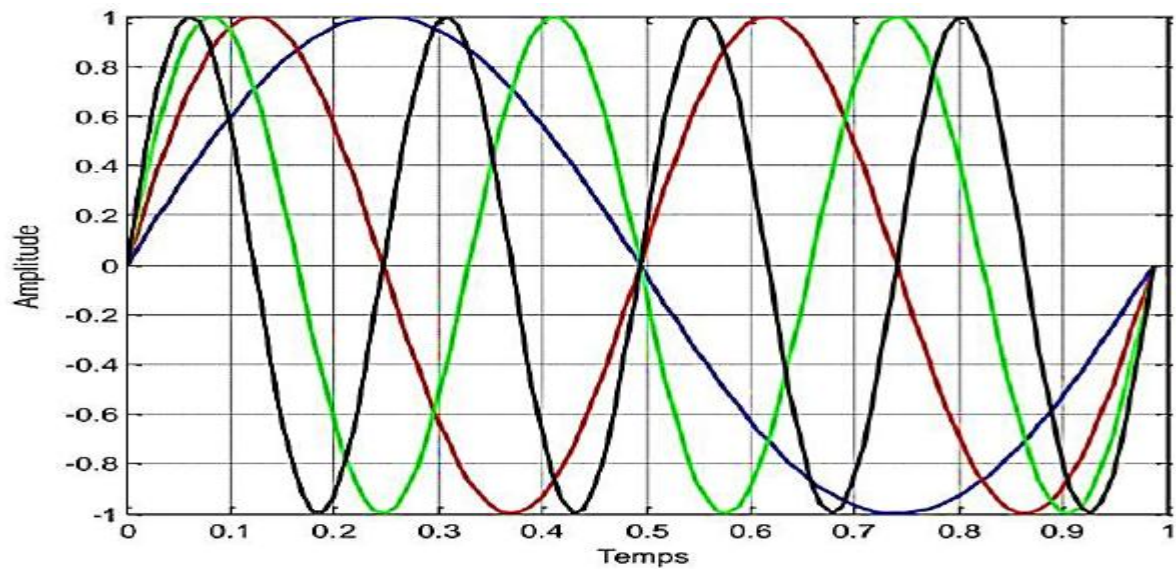


Figure II. 9 Sinusoïdes orthogonales [7].

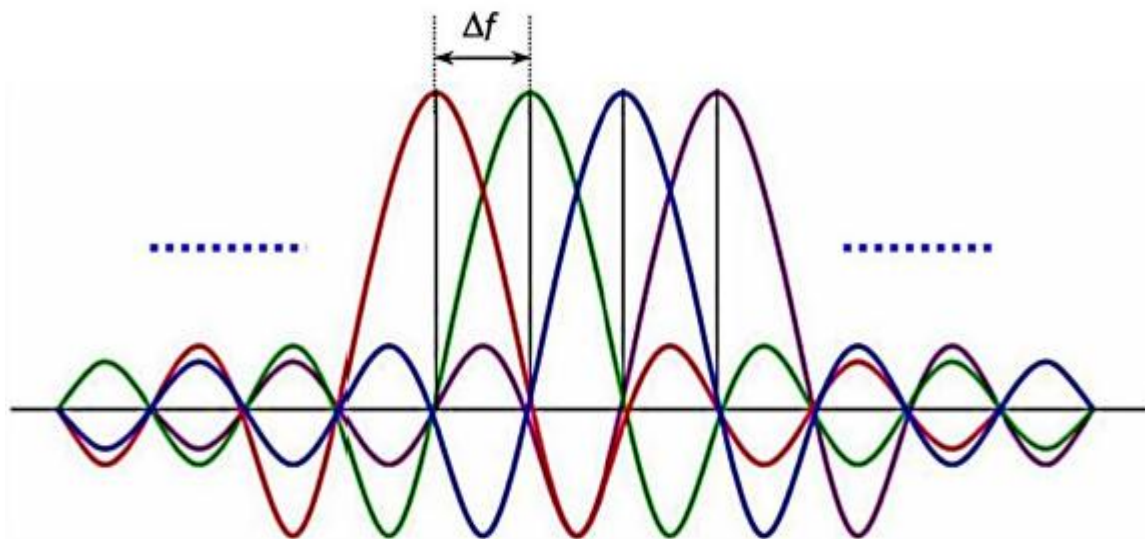


Figure II. 10 Orthogonalité fréquentielle de l'OFDM [7]

II.4.6 L'intervalle de garde :

Les intervalles de garde sont essentiels pour assurer l'orthogonalité en créant une zone « tampon » destinée à absorber les versions retardées des signaux, qui pourraient causer des interférences. Plusieurs techniques permettent d'introduire ces intervalles dans les systèmes OFDM.

L'une des méthodes consiste à remplir l'espace de garde entre des symboles consécutifs par des zéros. Une autre approche repose sur l'extension cyclique, qui peut être implémentée de deux manières : le préfixe cyclique (ajouté en début de symbole) ou le suffixe cyclique (ajouté en fin de symbole)

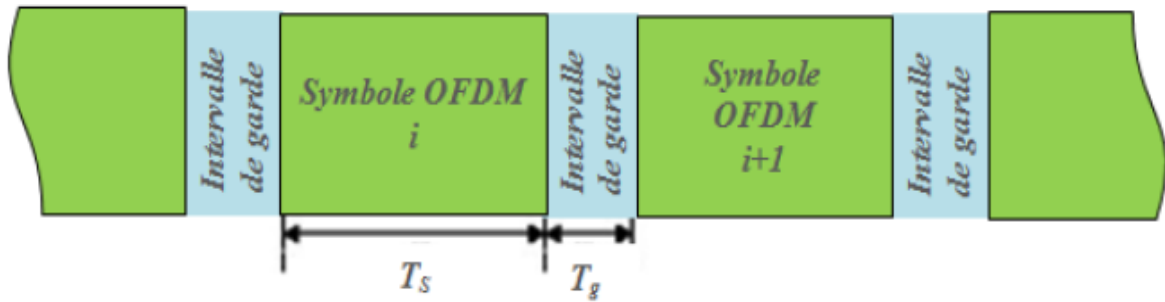


Figure II. 11 Intervalle de garde

II.4.6.1 Préfixe cyclique :

Le préfixe cyclique (CP) est une technique utilisée en OFDM consistant à copier la fin d'un symbole et à l'insérer en début de trame. Cette duplication permet :

- ✓ D'assurer la continuité temporelle entre les symboles, évitant ainsi les interférences inter-symboles (ISI).
- ✓ De transformer la convolution linéaire du canal en une convolution circulaire, ce qui simplifie l'égalisation en domaine fréquentiel grâce à la FFT (transformée de Fourier rapide).

Cette approche tire parti des propriétés de la transformée de Fourier inverse, garantissant une transmission plus robuste dans des canaux à multi traies.

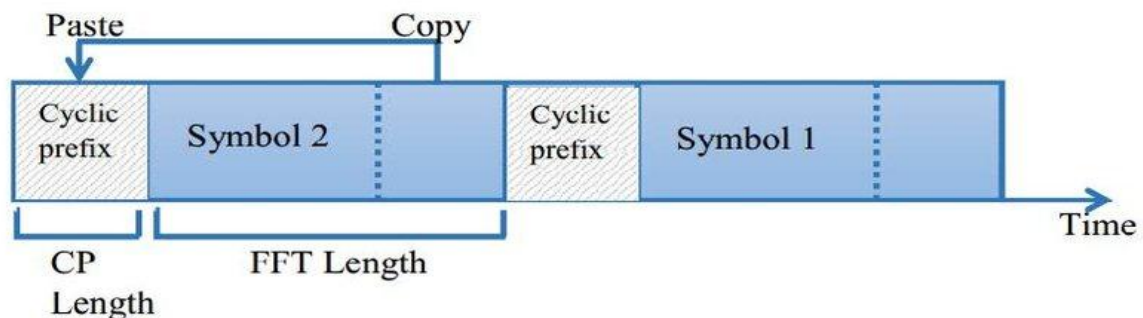


Figure II. 12 Préfixe cyclique. [7]

Après l'ajout du préfixe cyclique, les propriétés suivantes sont observées :

- L'espacement entre sous-porteuses reste inchangé : $\Delta f = 1/T_u$ (où T_u est la durée utile du symbole).
- La durée totale du symbole OFDM devient $T = T_{cp} + T_u$ où T_{cp} est la durée du préfixe cyclique.

Le CP joue un rôle clé dans la réduction :

- Des interférences inter-symboles (ISI) grâce à l'absorption des retards multi trajets.
- Des interférences entre porteuses (ICI) en préservant l'orthogonalité des sous-porteuses.

Bien que le CP allonge la durée du symbole, il n'altère pas le spectre fréquentiel du signal. L'orthogonalité est maintenue tant que le récepteur capte le nombre correct d'échantillons sur une période de symbole étalée, garantissant ainsi l'élimination des interférences .

II.4.7 Avantages et inconvénients de l'OFDM :

II.4.7.1 Avantages :

- ✓ Comparativement aux autres schémas de modulation à double bande latérale, spectre étalé, etc., il dispose d'une efficacité spectrale élevée.
- ✓ Adaptabilité à des conditions de canal difficiles sans égalisation dans le domaine temporel.
- ✓ Robuste aux interférences de canaux communs à bande étroite.
- ✓ Robuste aux interférences inter symboles (ISI) et à l'évanouissement causé par la propagation à trajets multiples.
- ✓ Mise en œuvre efficace à l'aide de la transformation de Fourier rapide.
- ✓ Très peu dégradé par les erreurs.
- ✓ Pas de filtre de récepteur de sous-canal accordé (contrairement au FDM conventionnel).
- ✓ Facilite réseaux à fréquence unique (SFN).

II.4.7.2 Inconvénients :

- ✓ Sensibilité au décalage doppler
- ✓ Sensibilité aux problèmes de synchronisation de fréquence
- ✓ Haut de crête à puissance moyenne rapport (PAPR) nécessitant un circuit d'émetteur linéaire, donc à faible efficacité puissance
- ✓ Efficacité compromise par le préfixe cyclique / intervalle de garde [21].

II.5. Modulation OFDMA :

L'OFDMA est une technologie de codage radio de type « Accès multiple par répartition en fréquence » qui s'est notamment répandue dans les réseaux de téléphonie mobile de 4^{ème} génération LTE mais aussi dans les évolutions des normes réseaux locaux sans fil WIFI, IEEE 802.11 versions, IEEE 802.22, WiBro) ou certaines normes de télévision numérique. Comme dans le cas d'autres techniques de codage permettant l'accès multiples (TDMA, FDMA, CDMA), il s'agit de partager une ressource radio commune (bande de fréquence) dont des parties sont attribuées dynamiquement à plusieurs utilisateurs. [6]

II.5.1 Origine et avantages :

L'OFDMA et sa variante SC-FDMA sont issus du codage OFDM (déjà utilisé sur les liaisons ADSL, dans les réseaux Wifi), contrairement à l'OFDM, l'OFDMA est une technique optimisée pour l'accès multiple, et elle est également compatible avec la technique des antennes MIMO. L'OFDMA a suscité l'intérêt comme une alternative séduisante au codage CDMA qui est utilisé dans les réseaux 3G UMTS notamment dans le sens de transmission Downlink des réseaux mobiles, car à qualité de signal identique (a priori en termes de rapport signal sur bruit disponible pour les deux technologies) à la même largeur spectrale, un meilleur débit binaire peut être obtenu grâce à la forte efficacité spectrale (nombre de bits transmis par Hertz) et la capacité de maintenir un bon débit avec des environnements défavorables avec échos et trajets multiples des ondes radio. Ce codage (tout comme le CDMA utilisé dans les réseaux mobiles 3G) permet une réutilisation des fréquences avec un facteur de réutilisation « 1 » ce qui signifie que des cellules radio voisines peuvent réutiliser les mêmes fréquences hertziennes. [6]

II.5.2 Principes :

Le codage OFDMA repose sur le codage puis la modulation numérique d'un ou plusieurs signaux binaires pour obtenir des échantillons numériques à émettre sur une (ou plusieurs) antennes radio ; réciproquement le signal radio est traité de façon inverse en réception.

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

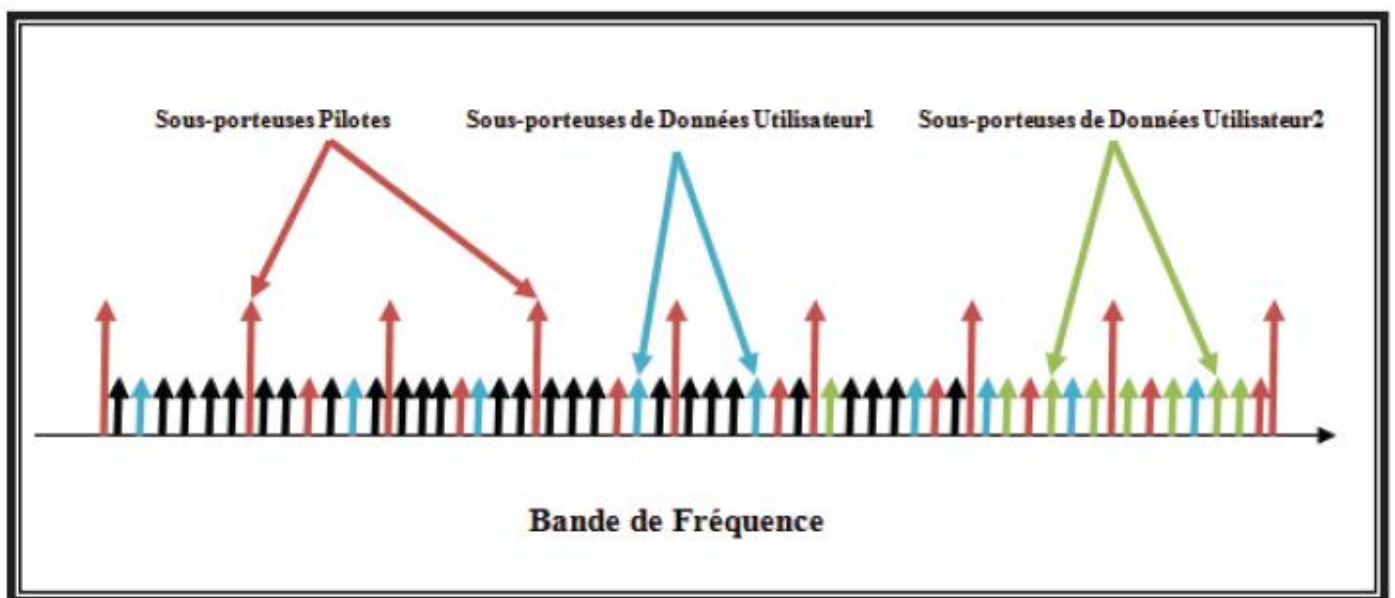


Figure II. 13 Les porteuses de L'OFDMA. [6]

La répartition des sous-porteuses filtrées séparément n'est pas nécessaire pour le décodage du terminal récepteur, une FFT (Transformée de Fourier) étant suffisante pour séparer les sous-porteuses les unes des autres ; il y a en effet jusqu'à 1 200 sous-porteuses indépendantes dans le cas du LTE.

L'orthogonalité (le « O » de l'OFDMA) réside dans le fait qu'on utilise des signaux orthogonaux entre les sous-porteuses adjacentes pour éviter qu'ils interfèrent entre eux ; ce fait est le résultat d'un écart de fréquence entre les sous-porteuses des symboles qui est égal à la fréquence des symboles sur chaque porteuse, c'est-à-dire que lors du démoulage des signaux,

ceux-ci comportent un nombre entier de cycles sur la durée du symbole, de sorte qu'ils n'interfèrent pas entre eux, en d'autres termes, le produit scalaire de chacune des sous-porteuses est nul sur la durée des symboles (67 μ s en LTE soit une fréquence de 15 kHz, qui correspond au décalage en fréquence entre deux sous-porteuses adjacentes).

Un préfixe cyclique (CP) est utilisé dans les transmissions OFDMA, pour permettre de conserver en particulier l'orthogonalité et la sinusoïdale du signal ligne de transmission avec des canaux à trajets multiples. Ce préfixe cyclique est ajouté au début des symboles émis. Dans LTE, il existe deux longueurs de préfixe cyclique, par rapport à des temps différents de propagation du canal de transmission en fonction de la taille de la cellule radio et de l'environnement, le préfixe cyclique normal de 4,7 μ s d'un côté, et le préfixe cyclique étendu de 16,6 μ s (ce préfixe représentant de 7 à 25 % de la durée d'un symbole) pour les très grandes cellules radio. Ce codage est associé dans les réseaux LTE à des modulations de type QPSK ou QAM, été utilisées sur chacun des canaux, reliées aux conditions radio locales et à la distance séparant l'antenne de chaque terminal .

II.6. Conclusion :

Les techniques de transmission étudiées dans ce chapitre, notamment l'OFDM et l'OFDMA, représentent des solutions clés pour répondre aux défis des communications modernes. Leur capacité à exploiter efficacement le spectre et à résister aux perturbations des canaux complexes en fait des piliers des réseaux haut débit.

Cependant, la sensibilité de l'OFDM aux variations d'amplitude, illustrée par son PAPR élevé, motive la recherche d'alternatives plus adaptées aux équipements à faible puissance. Ce constat ouvre la voie à l'étude du SC-FDMA, dont l'approche innovante sera analysée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Modulation multi porteuses SC-FDMA

III.1.Introduction :

Les systèmes de communication sans fil modernes, en particulier les réseaux cellulaires LTE et LTE-A, ont adopté des techniques de modulation avancées pour répondre aux exigences croissantes en termes de débit, d'efficacité spectrale et de robustesse aux interférences. Parmi ces techniques, le Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) se distingue comme une solution optimale pour la liaison montante (*uplink*), combinant les avantages d'une modulation mono-porteuse avec ceux d'un accès multiple à répartition fréquentielle.

Dans ce chapitre, nous étudierons en détail les fondements de la modulation mono-porteuse SC-FDMA, en commençant par ses principes de modulation et de démodulation. Nous examinerons ensuite l'architecture des émetteurs et récepteurs SC-FDMA, ainsi que les différentes stratégies d'allocation des ressources, notamment les modes I-FDMA et L-FDMA. Une analyse approfondie du Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) sera présentée, incluant des méthodes probabilistes pour son estimation et des techniques pour sa réduction. Enfin, nous comparerons le SC-FDMA avec l'OFDMA, mettant en évidence leurs différences fondamentales et leurs domaines d'application respectifs.

III.2Single Carrier-FDMA :

Au sein des techniques de transmission à accès multiple, le SC-FDMA constitue un cas particulier qui s'appuie sur une modulation à porteuse unique. Bien qu'il fasse partie de la famille OFDM, il a été choisi par la norme 3GPP [14] « Long Term Evolution » pour la transmission montante du fait de son faible rapport de puissance crête à puissance moyenne (PAPR), ce faible PAPR le rendant plus approprié que l'OFDMA (utilisé pour la transmission descendante) pour une transmission montante où l'énergie est une contrainte significative. De plus, le SC-FDMA permet d'accéder plusieurs utilisateurs en affectant à chacun un sous-ensemble de sous-porteuses non chevauchantes. Nous montrerons dans un premier temps l'évolution des systèmes à porteuse unique vers les systèmes multi-porteuses à bande passante étendue, en commençant par introduire les systèmes OFDM avec un accent particulier sur le SC-FDMA ; nous ferons ressortir les différences principales entre l'OFDMA et le SC-FDMA en montrant notamment que la transmission par SC-FDMA qui utilise à la fois des sous-porteuses porteuses uniques et non-

chevauchantes permet d'éviter les coûts d'un crête à moyenne produit en sortie de l'égaliseur. Cela nous amènera à traiter la question du PAPR avant de conclure sur les types d'égaliseurs associés à ces systèmes d'accès. [1]

III.3 Principe de la modulation :

Le SC-FDMA, acronyme anglais pour Single Carrier Frequency Division Multiple Access, est une modulation à porteuse unique très proche de la modulation OFDM, dans laquelle les symboles sources sont répartis directement sur plusieurs porteuses. Dans le SC-FDMA, la représentation fréquentielle des symboles source, après transformation, est répartie sur l'ensemble de la bande du système selon un schéma spécifique, qui sera précisé ultérieurement lors de la description d'un émetteur SC-FDMA.[5]

III.4 Principe de la démodulation :

Le signal d'un utilisateur k parvenu au récepteur sur une durée symbole T_s s'écrit comme suit :

$$y^k(t) = \sum_{n \in \Omega_Q^k} u_n^k \int_{T_s} [h_n^k(t - \tau) p(\tau - nT_s) e^{2j\pi f_n \tau}] d\tau \quad (3.1)$$

Où $h_n^k(t)$ représente la fonction de transfert du canal de l'utilisateur ' k ' autour de la porteuse f_n à l'instant ' t '. $(\tau - nT_s) e^{2j\pi f_n \tau}$ représente le filtre de mise en forme, le principe de la

Démodulation du système SC-FDMA consiste à démoduler le signal sur chacune des sous-

Porteuse f_n du système. En effet, le signal reçu (t) est d'abord ramené en bande de base, avant d'être échantillonné pour le traitement numérique du signal. Après suppression de l'intervalle de garde, un démodulateur DFT permet d'obtenir les symboles modulant chaque porteuse f_n . Un égaliseur est ensuite mis en œuvre, dans le but de supprimer la contribution du canal sur chaque sous-porteuse du signal, et de récupérer ainsi les symboles fréquentiels $\{u_q\}_{0 \leq q \leq Q-1}$. Un démodulateur IDFT permet ensuite de récupérer les symboles sources $\{d_q\}_{0 \leq q \leq Q-1}$ du système [5].

III.5 Schéma bloc d'un système SC-OFDM :

III.5.1 Émetteur SC-FDMA

Concernant l'émetteur, un étage de transformation de Fourier discrète (DFT) de Q points a été rajouté en amont. Au niveau du récepteur, un étage de transformation de Fourier discrète inverse (IDFT) de N points a été inséré à la suite du bloc démodulation. La modulation effectuée sur les symboles d'entrée à ce niveau sera observée.[25]

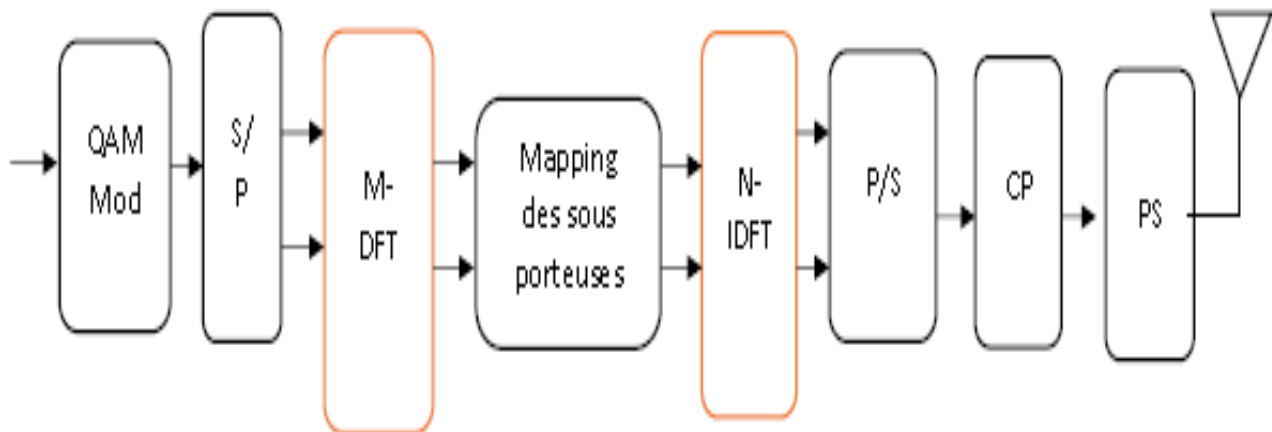


Figure III. 1 Émetteur SC-FDMA [14]

Où :

S à P : série à parallèle

P à S : parallèle à série

CP : préfix cyclique

Au cœur du SC-FDMA, l'agencement des données dans les différentes constellations modales est à envisager selon les différentes modulations possibles, type QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

L'attribution des données aux canaux suit des principes semblables à ceux de l'OFDM.

Toutefois, au lieu d'envoyer directement les symboles modulés, QPSK ou QAM, vers les sous porteuses, les symboles passent d'abord à travers un convertisseur série-parallèle, puis, dans le domaine fréquentiel, à travers un bloc DFT.

À la sortie de ce bloc, une association entre les symboles et les sous-porteuses a lieu via un module de « mappage des sous-porteuses ». Ce module d'association terminé, les signaux, encore sous la forme fréquentielle, sont transformés dans le domaine temporel par l'IDFT, réalisant ainsi les symboles de sortie.

À cela s'ajoutent deux autres blocs essentiels à la chaîne de transmission. Le bloc d'insertion de l'intervalle de garde (CP), d'une part, va permettre de diminuer l'interférence entre blocs due aux multi-trajets du canal et de rendre la convolution du canal circulaire et, par conséquent, de faciliter l'utilisation de techniques d'égalisation fréquentielle plus simples à implémenter.

Ces deux blocs effectuent des opérations similaires à celles mises en œuvre dans l'OFDM. Dans le SC-FDMA, les signaux transmis sont représentés par des sous-porteuses discrètes, d'où la « sc. » de Single Carrier. En SC-FDMA, la modulation se fait globalement alors qu'en OFDM, chaque sous-porteuse est modulée indépendamment. L'allocation des ressources (sous-porteuses) est donc un élément fondamental du mode de fonctionnement du SC-FDMA.

III.5.2 Récepteur SC-FDMA :

La démodulation SC-FDMA repose sur l'extraction du signal sur chaque sous-porteuse. Bien que similaire à l'OFDMA, elle intègre une étape supplémentaire critique : le demapping des sous-porteuses. Après la transformation IDFT, le signal reconstitué contient les données utiles, mais ces dernières ne résultent pas directement de la modulation SC-FDMA. Le démodulateur DFT joue un rôle clé en récupérant les symboles transmis sur chaque porteuse f_n . La Figure II illustre ce mécanisme de démodulation.[25]

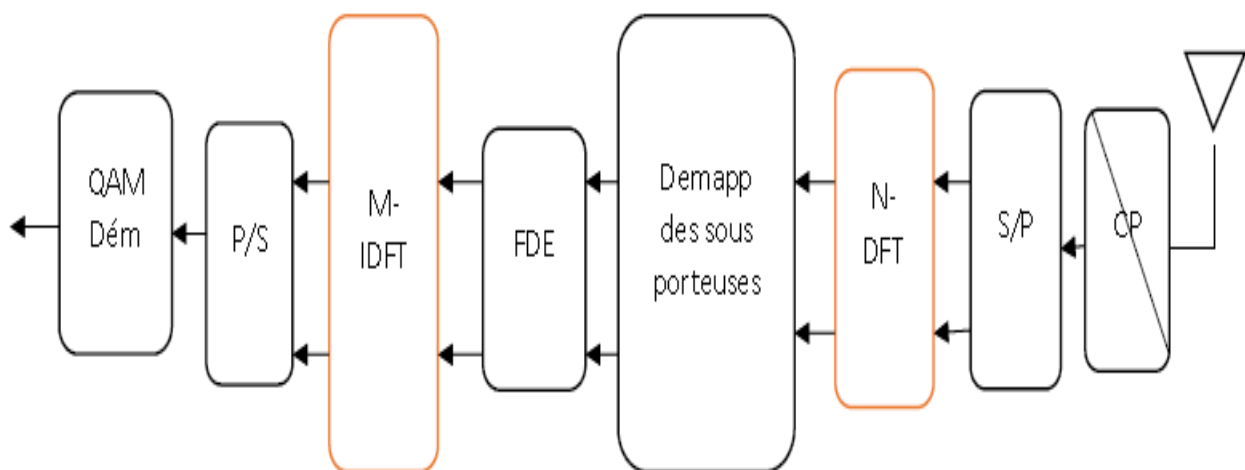


Figure III. 2 Schéma bloc du récepteur SC-FDMA [25]

III.6 Allocation des ressources du système SC-FDMA :

Dans le but de pouvoir gérer un volume élevé d'utilisateurs à un moment donné, le système utilise la technique de l'étalement spectral permettant d'augmenter la ressource spectrale à partager. Ainsi chaque utilisateur se voit allouer une portion de la largeur de bande totale du système de manière à n'interférer avec aucun autre utilisateur. En effet, dans la modulation SC-FDMA, le multiplexage des utilisateurs du système est effectué dans le domaine fréquentiel [31]. En effet, N symboles de domaine fréquentiel, correspondant à un utilisateur, sont mappés sur M

> N sous-porteuses, où M est le nombre total de sous-porteuses attribuées au système SC-FDMA pour l'ensemble des utilisateurs. Deux modes d'allocations de ressources existent pour cette modulation (mode distribué et mode localisé).

III.6.1 Allocation de ressource en mode distribué :

Dans le mode dit distribuer, les symboles de fréquence qui constituent la sortie du modulateur DFT de l'émetteur, sont modulés sur un multiplex de sous-porteuses régulièrement réparties sur toute la largeur de la bande passante du système (figure III.3). Les sous porteuses non modulées sont affectées aux signaux nuls qui permettent cette modularité et le SC-FDMA qui utilise ce mode d'allocation est fréquemment désigné par les initiales I-FDMA pour interleaved-FDMA [24]. L'I-FDMA possède plusieurs avantages. Il permet d'une part, l'orthogonalité des utilisateurs du système et d'autre part, une grande diversité en fréquence grâce à la manière dont sont distribuées les porteuses modulées sur toute la bande passante [16]. Du point de vue mise en œuvre, la technique a aussi beaucoup d'atouts. Le signal en question peut être construit directement dans le domaine temporel sans nécessiter des modulateurs DFT/IDFT, mais simplement par une opération de compression et de répétition du signal source à transmettre avec un déphasage spécifique à chaque utilisateur. Par contre, le système I-FDMA est très sensible aux offsets des fréquences souvent à l'origine d'une mauvaise synchronisation et de la mobilité si bien qu'elle peut dégrader l'orthogonalité des fréquences des utilisateurs considérés.

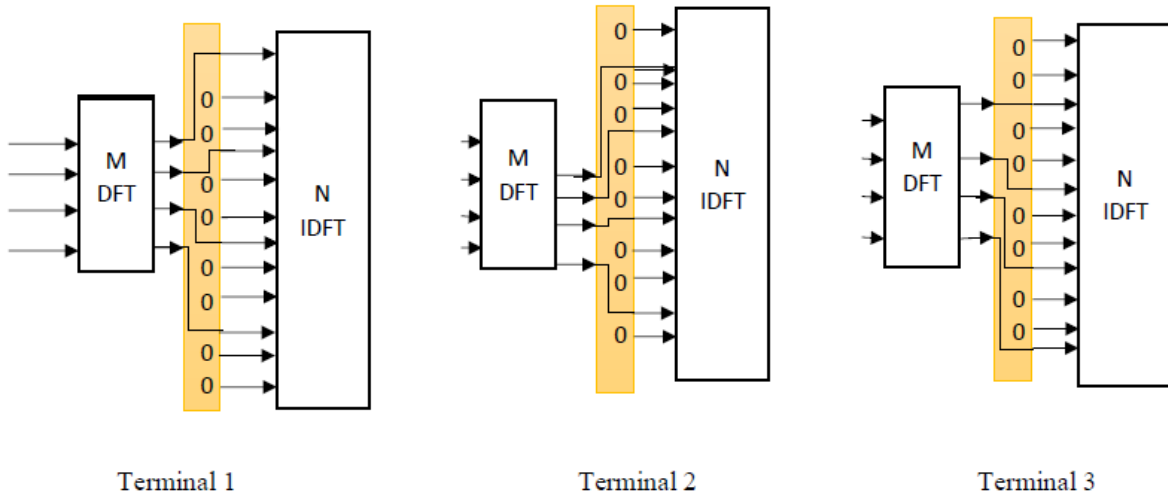


Figure III. 3 Le Mapping I-FDM [1]

III.6.2 Allocation de ressources en mode localisé :

L'autre mode d'allocation de ressources utilisé dans la modulation SC-FDMA est beaucoup plus robuste et a été adopté pour la voix montante de la norme LTE. Il s'agit du mode localisé qui donne son nom au système L-FDMA ou (Localized FDMA). Cette fois-ci les symboles fréquentiels correspondant à la sortie du modulateur DFT viennent moduler un multiplexe de sous porteuses contigües ; les autres sous porteuses non modulées étant affectées à des signaux nuls comme l'illustre la figure III.4. Les sous porteuses n'étant plus réparties sur toute la bande du système, on perd en diversité fréquentielle. Par contre le système est plus robuste à l'offset de fréquence en garantissant dans ce cas l'orthogonalité fréquentielle.

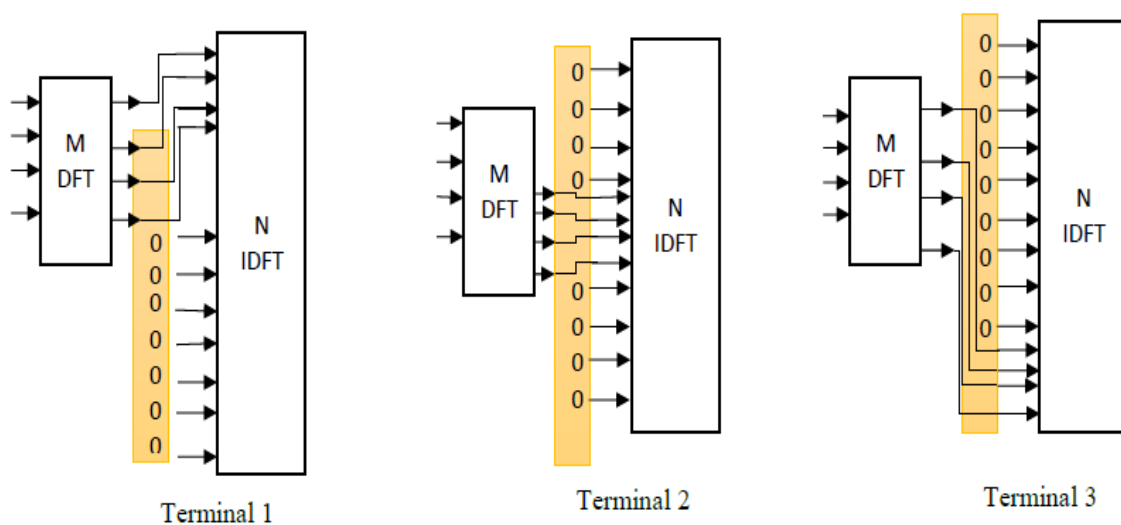


Figure III. 4 Le Mapping L-FDMA. [1]

Le spectre du signal ISC-FDMA est donné par la figure III.5

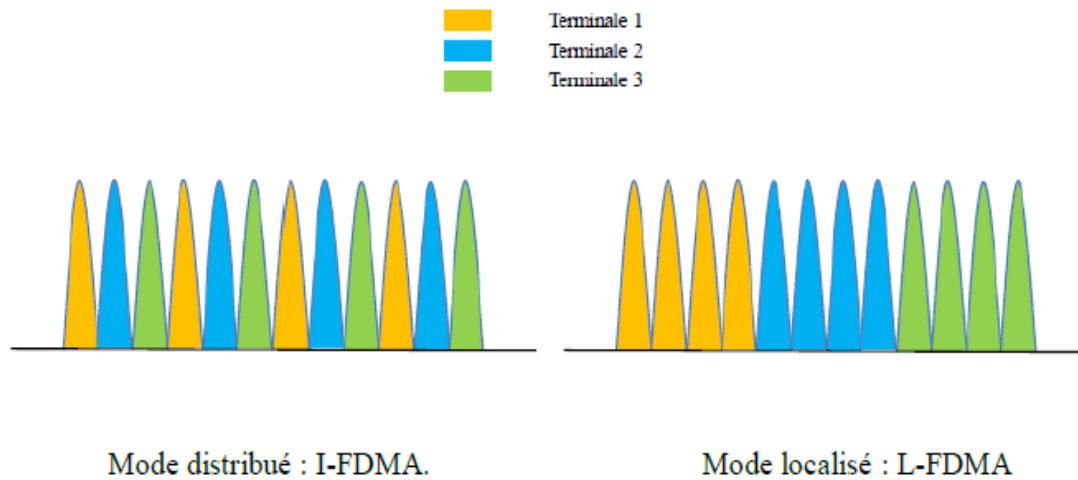


Figure III. 5 Spectre du signal LSC-FDMA au récepteur [1]

III.7 Comparaison des modes I-FDMA et L-FDMA :

Dans le mode I-FDMA, le positionnement des valeurs du DFT est fait sur des sous-porteuses équiprobables sur toute la bande passante, les lieux inoccupés étant précisés à zéro ce qui fait qu'I-FDMA semble offrir plus de diversité de fréquence que la LFDMA avec des sous-porteuses réparties sur l'ensemble de la bande passante. C'est de cette manière que le PAPR est bien amélioré pour I-FDMA, alors que le BER s'avère un peu moins bon que pour L-FDMA, au profit enfin d'une allocation de sous-porteuses plus flexible qu'en L-FDM

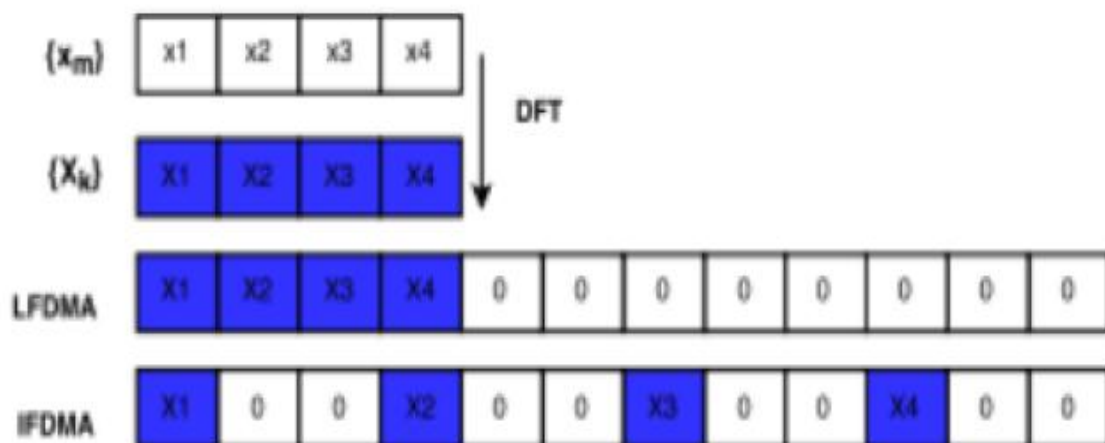


Figure III. 6 Schéma de mappage des sous-porteuses dans le domaine fréquentiel [5].

Le choix du multiplex de fréquences allouées à chaque utilisateur peut se faire de manière statique c'est à dire sur toute la durée de la communication, ou par un algorithme d'ordonnancement de canaux CDS (Channel Dépendent Scheduling) qui accorde à chaque utilisateur, le multiplex de sous-porteuses en fonction de la qualité de son canal de transmission. De cette façon, un utilisateur peut être attribué différents multiplex de sous porteuses durant la même communication ou même être évincé du système lorsque son canal de transmission est très dégradé.

En outre, le CDS accroît très sensiblement la diversité multiutilisateur et le débit total du système dans le cas du mapping L-FDMA comparé à celui de l'I-FDMA [3]. Cela s'explique par le fait que le mapping I-FDMA, pour lequel les sous-porteuses sont étalées sur toute l'étendue de la bande disponibles aura un meilleur débit que dans la sous bande définie par le CDS, pour l'une ou l'autre des deux techniques d'allocation.

III.8 Le facteur PAPR :

III.8.1 Problème de PAPR :

La notion de PAPR est fondamentale dans les systèmes de communications. Il est directement corrélé à la consommation d'énergie des amplificateurs de puissance dans les émetteurs radio mobile et est aussi l'indicateur du risque de distorsion du signal par amplification. Le PAPR ou Peak to Average Power Ratio, également connu sous l'abréviation PAPR, désigne le rapport entre l'intensité max d'un signal et sa valeur moyenne. Devant la nécessité d'émettre sur de larges bandes passantes, cette contrainte est d'autant plus pénalisante pour des systèmes tels que la 5G qui déploie le MIMO pour effectuer des transmissions massives avec plusieurs antennes. Dans le cas des modulations type OFDM, elle pourrait être ramenée à la contrainte de modulation du schéma de transmission ou de l'instrumentation des signaux (c'est-à-dire l'insertion du signal sur la chaîne de transmission) [29]

III.8.2 Définition de PAPR :

La notion de PAPR d'un signal $x(t)$ ou « Peak to Average Power Ratio » correspond, par définition au rapport de la puissance maximale de $x(t)$ sur sa puissance moyenne (Fig. III.7). Sur un temps donné [9].

Cette quantification permet d'indiquer le niveau d'amplitude des excursions à la valeur du signal d'entrée. Elle sert donc à calculer le bon recul d'entrée (IBO) pour s'assurer que les plus larges excursions du signal soient loin de la zone de saturation.

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq t \leq T}([x(t)]^2)}{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} \quad (3.2)$$

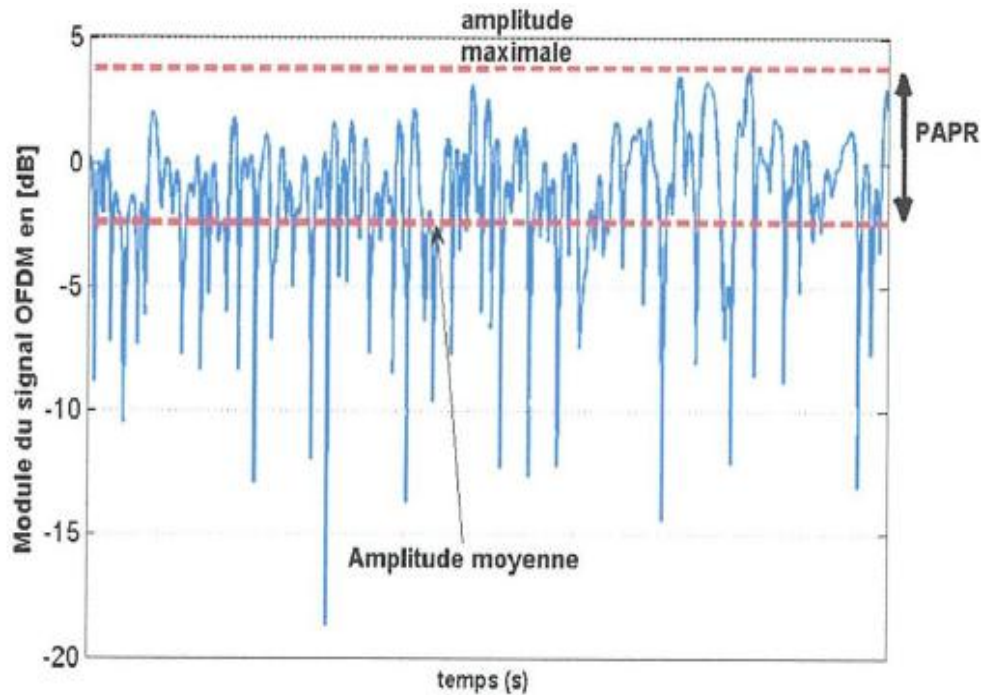


Figure III. 7 Présentation du PAPR à partir d'un signal Multi-porteuse [29]

Un signal à faible PAPR présente des excursions faibles autour de sa valeur moyenne, il est donc possible de choisir un point de fonctionnement proche du point de compression sans risquer d'engendrer des distorsions et avec un rendement garanti plus élevé. En revanche, un signal à fort PAPR présente des excursions de grande amplitude autour de sa moyenne. Pour ces signaux un point de fonctionnement très éloigné de la zone de saturation de l'amplificateur s'impose. Ce choix est très pénalisant car le rendement sera très médiocre. [29]

III.8.3 Le CCDF de PAPR :

Le CCDF du PAPR SC-FDMA et OFDMA sera évalué pour différents facteurs de coupure sur les filtres de mise en forme ainsi que pour les différents formats de modulation qui nous intéressent. Pour évaluer le PAPR, il est d'usage de considérer la probabilité du dépassement du

seuil X_0 du PAPR, c'est ainsi qu'il est désigné dans la fonction de répartition cumulative complémentaire (CCDF) [1], la variable aléatoire ainsi :

$$CCDF(X) = prob(X^l \leq X_0) = 1 - (1 - e^{-x_0})^N \quad (3.3)$$

III.8.4 Le PAPR élevé de l'OFDM :

D'un côté, le problème majeur de l'OFDMA est son PAPR élevé. Pour un symbole OFDMA donné, la puissance instantanée peut varier de façon très importante. En effet, puisqu'un symbole OFDMA est composé des toutes les sous-porteuses, la valeur des tensions des sous-porteurs d'un symbole peuvent être additionnées dans le symbole et ainsi donner une valeur de puissance instantanée est très élevée par rapport à la puissance moyenne. Ce PAPR élevé impose des exigences de plages dynamiques sur les convertisseurs analogiques-numériques N/A et provoque également un PAPR élevé réduisant alors le rendement de l'amplificateur de puissance de l'émetteur. Ainsi, la norme LTE-A a privilégié pour sa Liaison descendante une autre technologie, dérivée de la famille OFDMA ayant un PAPR plus faible, la technologie SC-FDMA. [25]

III.9.La réduction de PAPR :

Les méthodes utilisées pour réduire le PAPR font appel à des techniques variées, on peut ainsi distinguer des techniques par ajout de signal correcteur, des techniques par codage, des techniques probabilistes, des techniques par pré-distorsion, et des techniques par étalement par DFT.

III.9.1 Étude du PAPR du signal SC-FDMA :

L'SC-FDMA est une technique d'accès multiple qui a été adoptée par la norme 3GPP LTE principalement pour son faible PAPR, qui est significativement plus bas que der autres techniques existantes. La notion de PAPR [19] est fondamentale dans les systèmes de communications car elle est directement corrélée à la consommation énergétique des amplificateurs de puissance dans les émetteurs radio mobile et au risque de distorsion du signal par l'amplification non linéaire. C'est ce PAPR du signal SC-FDMA que nous étudierons dans cette partie du chapitre avant de le comparer à celui de l'OFDM. [5].

Tout d'abord, nous allons extraire l'expression du PAPR du signal SC-FDMA. Le signal échantillonné (avec N échantillons donc : $0 \leq m \leq N - 1$) de la sortie du modulateur SCFDMA de l'utilisateur k sur une période symbole T est donné par l'expression :

$$S_m^k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{u}_n^k e^{j2\pi \frac{m}{N} n}, \quad m \in [0, \dots, N - 1] \quad (3.4)$$

Cette équation est valable quel que soit le mapping utilisé I-FDMA ou L-FDMA. En prenant en compte le filtre de mise en forme en cosinus surélevé $\rho(t)$ donné par l'équation

$$\rho(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \cdot \frac{\cos(\pi a t/T)}{1 - 4a^2 t^2/T^2} \quad (3.5)$$

On obtient le signal émis qui peut s'écrire comme suit

$$S^k(t) = \sum_{n \in \Omega_Q^k} u_n^k p(t - nT_s) e^{2j\pi f_n t} \quad (3.6)$$

Où f_n représente la fréquence RF du système.

La relation suivante permet de définir le PAPR du signal SC-FDMA de l'utilisateur ' k ' comme suit :

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq t \leq T} (|S^k(t)|^2)}{\frac{1}{T} \int_0^T |S^k(t)|^2 dt} \quad (3.7)$$

Le filtrage remonte le PAPR du signal [22]. Mais lorsqu'aucun filtre de mise en forme n'est utilisé, le PAPR du signal SC-FDMA de l'utilisateur ' k ' se calcule simplement à partir de ses symboles S_m^k émis :

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq m \leq N-1} (|S_m^k|^2)}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |S_m^k|^2} \quad (3.8)$$

La séquence de symboles S_m , où $0 \leq m \leq N - 1$, suit une distribution aléatoire, car elle est générée à partir de symboles sources tirés uniformément dans un alphabet de Q éléments. Par conséquent, le PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) du signal devient une variable aléatoire. Il est alors nécessaire de recourir à la distribution statistique du signal pour déterminer à la fois la valeur maximale des échantillons et leur valeur moyenne. Contrairement à un signal multi porteuse, l'amplitude d'un signal mono porteuse ne suit pas une loi gaussienne, ce qui rend complexe

l'établissement d'une expression exacte du PAPR pour le signal SC-FDMA, celui-ci étant de type mono porteuse comme mentionné précédemment.

Pour contourner le problème, on utilise en général des méthodes numériques pour estimer le PAPR. La technique la plus répandue est celle de la CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) du PAPR qui correspond à la probabilité pour que le $PAPR$ soit supérieur à une certaine valeur $PAPR_0$, soit donc :

$$CCDF = P_r(PAPR \leq PAPR_0) \quad (3.9)$$

III.10.Capacité du SC-FDMA :

La capacité d'un canal de communication radio avec une puissance de transmission constante P est exprimée par la relation suivante [23]

$$C = W \cdot \log_2 \left(\frac{1+SNR_{1.0MHz}}{W} \right) Mb/s \quad (3.10)$$

Avec :

W : est la bande passante en MHz

$SNR_{1.0}$: est le SNR à l'intérieur de la largeur de bande de 1.0 MHz avec la puissance d'émission constante P .

La capacité de la SC-FDMA est donnée par la relation :

$$C_{SC-FDMA} = \left(\frac{T_s}{T_s + \Delta} \right) \times \log_2 \left(1 + \frac{KP}{fKP + N_0} \times \frac{1}{10^{\left(\frac{L_{SC-FDMA}}{10} \right)}} \right) [b/s/Hz] \quad (3.11)$$

Avec :

- $\frac{T_s}{T_s + \Delta}$: représente les pertes de liaison relative à l'OFDM.
- K : le nombre d'utilisateurs transmettant simultanément.
- P : puissance reçue par un utilisateur.
- f : coefficient d'interférence Co-canal.
- N_0 : le bruit de fond.

- α : fraction du signal de l'utilisateur considéré comme une interférence.

La capacité est le débit maximal admissible, soit sans erreur (théorique) soit pour un taux d'erreur donnée (pratique), est exprimée en bits par seconde

III.11 La différence entre les deux accès SC-FDMA et OFDMA :

Dans les normes 3GPP [14] LTE et LTE-A, deux techniques d'accès multiples, appartenant à la famille OFDM, ont été retenues : l'OFDMA pour la liaison descendante et le SC-FDMA pour la liaison montante.

Comme évoqué précédemment, le SC-FDMA se distingue de l'OFDMA par l'ajout d'un seul élément : un bloc de recodage DFT. La principale différence entre ces deux techniques réside dans leur mode de transmission : le SC-FDMA utilise une modulation mono-porteuse, tandis que l'OFDMA repose sur une approche multi-porteuse.

Cependant, elles partagent plusieurs caractéristiques communes :

- L'envoi des données par blocs
- L'utilisation de porteuses orthogonales, permettant un multiplexage fréquentiel
- L'insertion d'un intervalle de garde pour limiter les interférences entre symboles
- Une égalisation fréquentielle. [25]

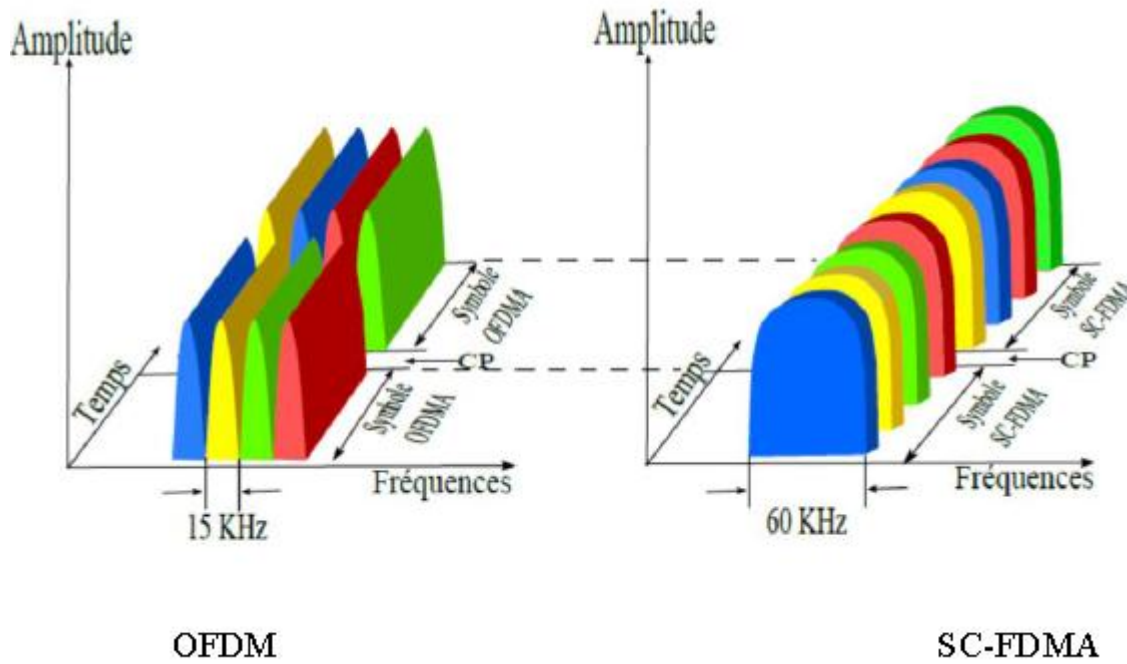


Figure III. 8 Modulation SC-FDMA comparé à L'OFDMA [27]

III.12 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur la technique SC-FDMA, une modulation multi-porteuse spécialement conçue pour répondre aux contraintes de la liaison montante dans les réseaux LTE et LTE-A. Nous avons analysé ses mécanismes de modulation et de démodulation, ainsi que l'architecture des émetteurs et récepteurs, mettant en évidence l'importance du bloc DFT dans sa structure. Les modes d'allocation des ressources I-FDMA et L-FDMA ont été comparés, révélant leurs avantages respectifs en termes de flexibilité et d'efficacité.

L'étude du PAPR a montré que le SC-FDMA, bien qu'offrant une réduction significative de ce paramètre par rapport à l'OFDMA, nécessite des techniques supplémentaires pour optimiser les performances des émetteurs mobiles. Les méthodes de réduction du PAPR discutées ouvrent des pistes pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes. Enfin, la comparaison avec l'OFDMA a souligné les compromis entre complexité, efficacité spectrale et consommation d'énergie, justifiant le choix du SC-FDMA pour les applications up Link.

En conclusion, le SC-FDMA représente un équilibre judicieux entre performance et contraintes pratiques, faisant de lui une technologie clé pour les communications mobiles. Les perspectives

futures pourraient inclure l'intégration de techniques avancées de réduction du PAPR ou l'adaptation du SC-FDMA pour les réseaux 5G et au-delà, afin de répondre aux exigences toujours plus strictes des systèmes de communication sans fil.

Chapitre 4

Simulation MATLAB OFDM & SC-FDMA

IV.1 Introduction :

Les systèmes de communication sans fil modernes reposent sur des techniques avancées de modulation et d'accès multiple pour améliorer l'efficacité spectrale et les performances globales. Parmi ces techniques, l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) et le SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) occupent une place prépondérante, notamment dans les standards comme la 4G LTE (où SC-FDMA est utilisé en uplink) et la 5G.

Ce chapitre a pour objectif d'étudier et de comparer les performances de ces deux schémas d'accès à travers des simulations sous MATLAB. Nous aborderons d'abord une analyse comparative entre OFDM et SC-FDMA. Ensuite, nous définirons les paramètres de simulation, notamment le taux d'erreur binaire (BER), le rapport signal à bruit (SNR), et la probabilité d'erreur, avant de présenter et d'interpréter les résultats obtenus. Enfin, une étude du PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) permettra de comparer l'efficacité énergétique des deux techniques sous différentes modulations (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

IV.2. Étude comparative des deux accès SC-FDMA et OFDM :

L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est une technique d'accès multiple fondée sur l'OFDM, utilisée dans la liaison descendante (Downlink) de la norme 3GPP LTE. Comme évoqué précédemment, le SC-FDMA partage de nombreuses similitudes avec l'OFDM. En effet, comme l'illustre la Figure IV.1, le SC-FDMA peut être vu comme une variante de l'OFDM, intégrant un pré-codage DFT (Transformée de Fourier Discrète) suivi d'un multiplexage spécifique dans le domaine fréquentiel [27]

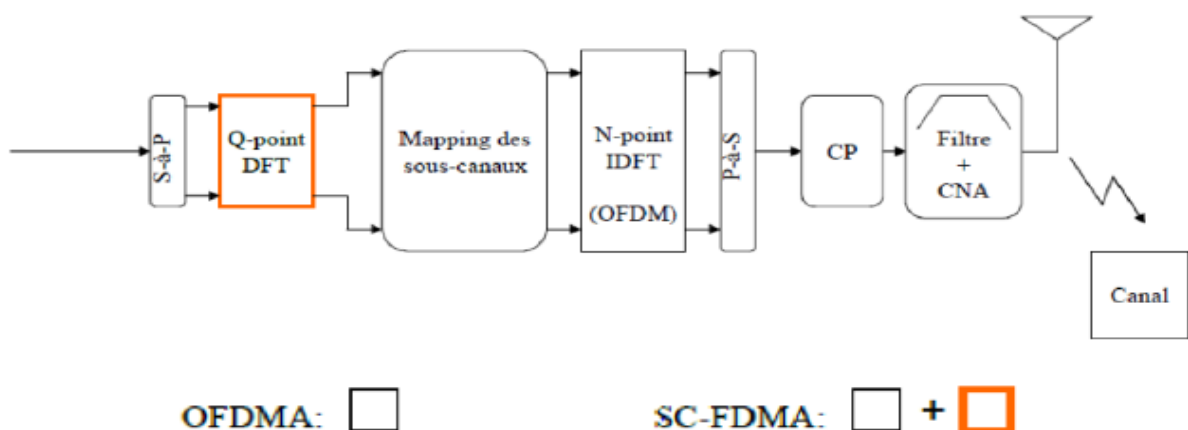


Figure IV. 1 Similitude entre une chaîne OFDM et SC-FDMA [27]

IV.3.Modélisation du canal et définition des paramètres de simulation et de performance pour les systèmes OFDM et SC-FDMA:

En pratique, les performances réelles du système présentent des écarts par rapport aux valeurs théoriques. Pour modéliser ces imperfections, nous avons recours au canal à bruit blanc gaussien additif (AWGN), largement utilisé pour simuler le bruit de fond dans les communications. Cette modélisation est implémentée via la fonction MATLAB AWGN, où le niveau de bruit est défini par le rapport signal sur bruit (SNR) par échantillon, paramètre clé de cette fonction.

Par ailleurs, pour prendre en compte les effets de propagation multi trajets, nous intégrons un évanouissement sélectif en fréquence en adoptant le modèle de Rayleigh. Ce choix est justifié par son adéquation aux scénarios sans composante directe (LOS), où les trajets multiples dominant. La simulation de cet évanouissement est réalisée à l'aide de la fonction MATLAB rayleighchan, avec des paramètres détaillés dans le Tableau IV.1.

Afin d'évaluer les performances comparées des systèmes OFDM et SC-FDMA, plusieurs schémas de modulation adaptative sont testés :

-  Modulation par déplacement de phase binaire (BPSK)
-  Modulation par déplacement de phase en quadrature (QPSK)
-  Modulation d'amplitude en quadrature (16-QAM)
-  Modulation d'amplitude en quadrature (64-QAM)

Les métriques analysées incluent :

- Le **PAPR** (Peak-to-Average Power Ratio)
- Le **TEB** (Taux d'Erreur Binaire, BER)
- Le **SNR** (Signal-to-Noise Ratio)
- La **Pe** (Probabilité d'erreur)

Les paramètres complets de simulation sont fournis dans le **Tableau IV.1**

Paramètre	Valeur
Nombre de sous-porteuses	1024(Longueur FFT)
Longueur du CP (préfixe cyclique)	64
Plage de SNR en dB	0 à 30 dB
Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Taille du bloc de données	50
Bruit de bande du système	AWGN (SNR=100db)
Largeur de bande du système	15MHz
Evanouissement	(sélectif en fréquence)
Paramètre d'évanouissement de Rayleigh	Période d'échantillonnage d'entrée=1,00e-3s Bande Doppler maximale=100Hz Retards de trajet du vecteur= [0 2,00e-6] s

Tableau IV. 1 Paramètres utilisés pour la simulation

IV.3.1. Taux d'erreurs binaires :

Le taux d'erreur binaire (BER - Bit Error Rate) est un indicateur clé pour évaluer la performance d'une transmission optique. Ce paramètre se calcule en comparant le flux de données émis avec le signal reçu, en établissant le rapport entre le nombre de bits reçus incorrectement et le nombre total de bits transmis. Il représente ainsi une mesure quantitative de la fiabilité du système de transmission.

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (4.1)$$

IV.3.2. Le rapport signal à bruit (SNR) :

Le SNR (Signal-to-Noise Ratio) représente le rapport, exprimé en décibels (dB), entre l'énergie par bit (E_b) et la densité spectrale de puissance du bruit (N_0).

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \quad (4.2)$$

IV.3.3.Processus BER vs SNR :

La performance d'un système de modulation peut être évaluée grâce à la courbe BER (Taux d'Erreur Binaire) en fonction du SNR (Rapport Signal/Bruit). Un système présentant un BER élevé pour un SNR donné est considéré comme peu performant. Par ailleurs, si un SNR trop important est nécessaire pour atteindre un BER acceptable, le système sera jugé énergétiquement inefficace et donc peu économique en termes de consommation énergétique.

IV.3.4.Probabilité d'erreur :

La probabilité d'erreur (Pe) représente la fréquence des erreurs dans le signal reçu. Dans le cas d'une détection cohérente, les expressions mathématiques suivantes déterminent cette probabilité pour les modulations M-PSK et M-QAM dans un canal à bruit blanc gaussien additif (AWGN) :

Pour la modulation PSK :

$$Pe \cong 2Q \left[\sqrt{\frac{2E_b \log_2 M}{N_0}} \right] \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \quad (4.3)$$

Où :

- $E_b \log_2 M = E$ (énergie du signal transmis par symbole)
- N_0 = Densité de bruit en AWGN
- Q = Fonction Q

Par conséquent :

$$Pe \cong 2Q \left[\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right] \quad (4.4)$$

Dans notre simulation, la probabilité d'erreur symbolique a été évaluée à 1,5 % en utilisant la fonction d'erreur complémentaire (erfc) plutôt que la fonction Q :

$$Pe \cong \text{erfc} \left[\sqrt{\frac{E}{N_0}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right] \quad (4.5)$$

La relation entre Q et erfc est donnée par :

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{\sqrt{2}} \right] \quad (4.6)$$

Pour QAM

$$P_e \cong 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left[\sqrt{\frac{3E_{av}}{(M-1)N_0}} \right] \quad (4.7)$$

De même en termes d'erfc, la P_e du QAM est donné par :

$$P_e \cong 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{3E_{av}}{2(M-1)N_0}} \right] \quad (4.8)$$

Où : E_{av} = Valeur moyenne de l'énergie des symboles transmis en M-ary QAM.

IV.4.Résultats de simulation :

IV.4.1.BER en fonction de SNR pour L'OFDM et SC-FDMA :

Le BER en fonction du SNR est représenté pour l'OFDM et le SC-FDMA dans les figures suivantes :

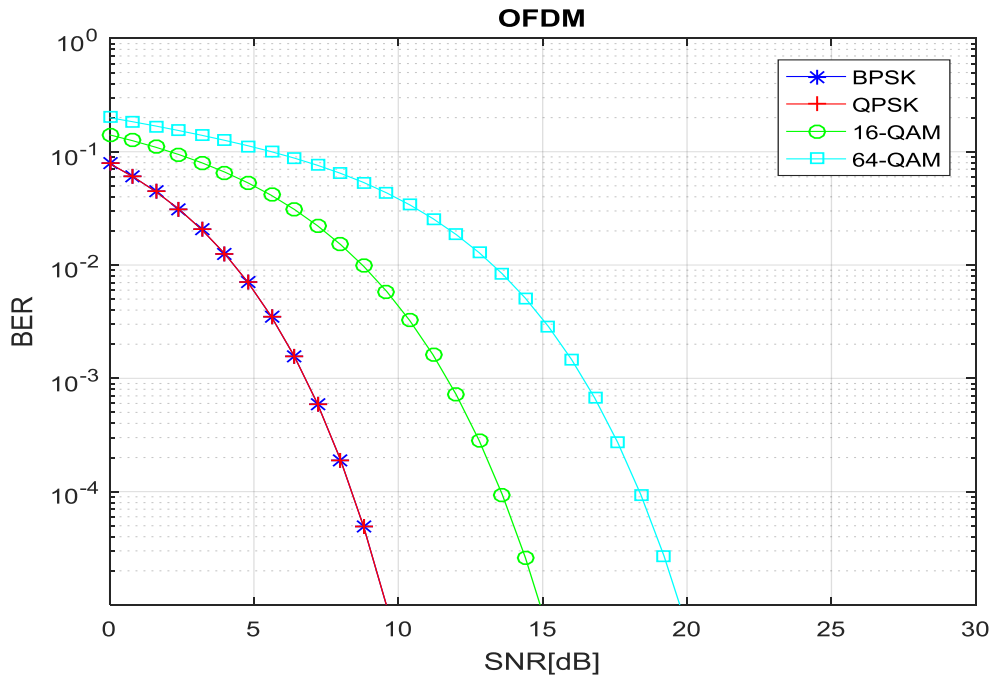


Figure IV. 2 BER en fonction du SNR pour l'OFDM avec différentes modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)

BER= 10^{-5}

Type de modulation	BPSK-OFDM	QPSK-OFDM	16QAM-OFDM	64-QAM OFDM
Bits par symbole	1	2	4	6
Rapport SNR (db)	9.58	9.58	14.9	19.74

Tableau IV. 2 Les valeurs du rapport SNR pour un taux d'erreur binaire (BER) de 10^{-5} pour le différent type de modulation pour l'OFDM

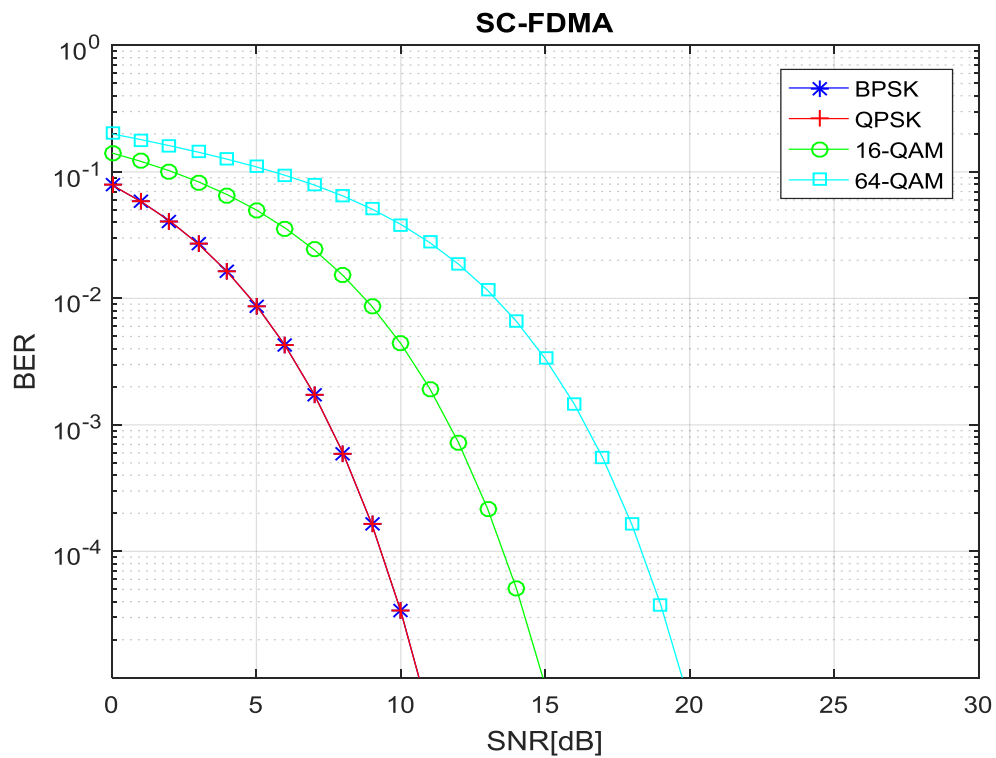


Figure IV. 3 BER en fonction du SNR pour l'SC-FDMA avec différentes modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)

BER= 10^{-5}

Type de modulation	BPSK-SC-OFDM	QPSK-SC-OFDM	16QAM-SC-OFDM	64QAM-SC-OFDM
Bits par symbole	1	2	4	6
Rapport SNR (db)	10.6	10.6	14.91	19.72

Tableau IV. 3 Les valeurs du rapport SNR pour un taux d'erreur binaire (BER) de 10^{-5} pour le différent type de modulation pour SC-FDMA

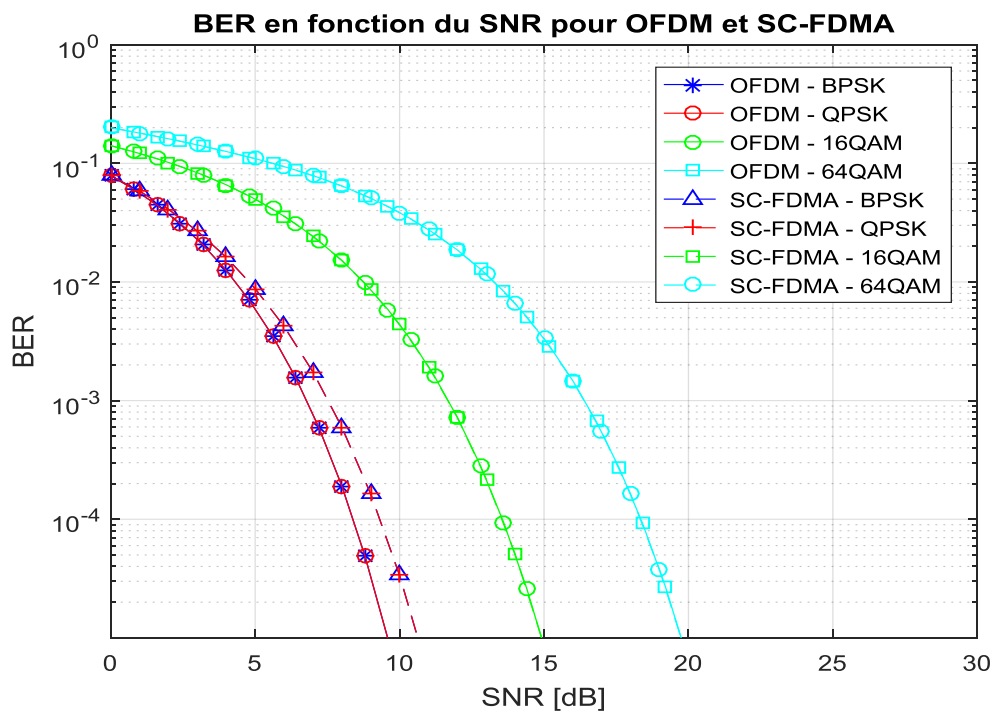


Figure IV. 4BER en fonction du SNR pour l'OFDM et le SC-FDMA avec différentes modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)

Le BER en fonction du rapport SNR de l'OFDM et du SC-FDMA est présenté dans les figures IV.2 ; IV.3 et IV.4 et les valeurs correspondantes dans les tableaux IV.2 et IV.3 respectivement. Les observations sont prises pour une valeur spécifique de BER= 10^{-5} . Dans les systèmes OFDM et SC- FDMA, la BPSK et la QPSK ont les mêmes valeurs SNR de 9.58 et 10.60 respectivement, mais un changement important se produit en 16-QAM et en 64-QAM. Le 64-QAM a la valeur la plus élevée de SNR (19.73), ce qui montre que le 16-QAM est plus efficace en termes de BER. D'autre part, la BPSK et la QPSK sont plus performantes que la 16-QAM et la 64-QAM.

IV.5.2. Probabilité d'erreur de l'OFDM et du SC-FDMA pour les différentes modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM)

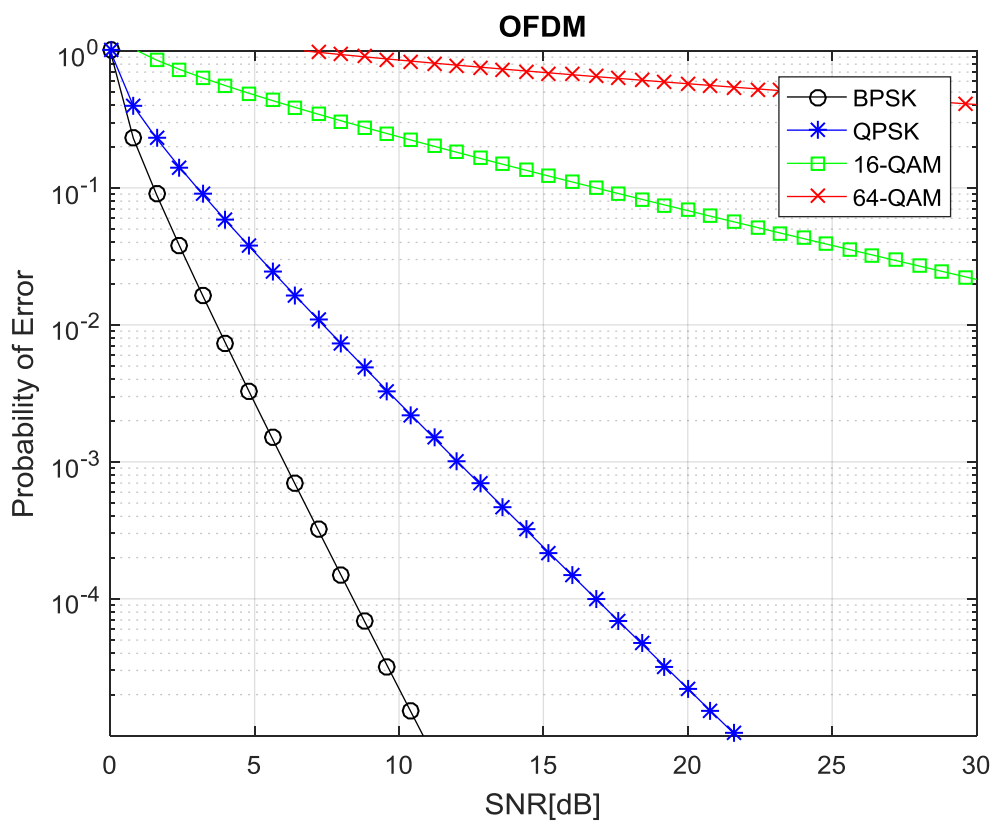


Figure IV. 5 Probabilité d'erreur en fonction du SNR pour l'OFDM

Pe=0.8

Type de modulation	BPSK-OFDM	QPSK-OFDM	16QAM-OFDM	64-QAM OFDM
Bits par symbole	1	1	4	6
Rapport SNR (db)	0.12	0.19	1.94	11.6

Tableau IV. 4 Probabilité d'erreur en fonction du SNR pour l'OFDM

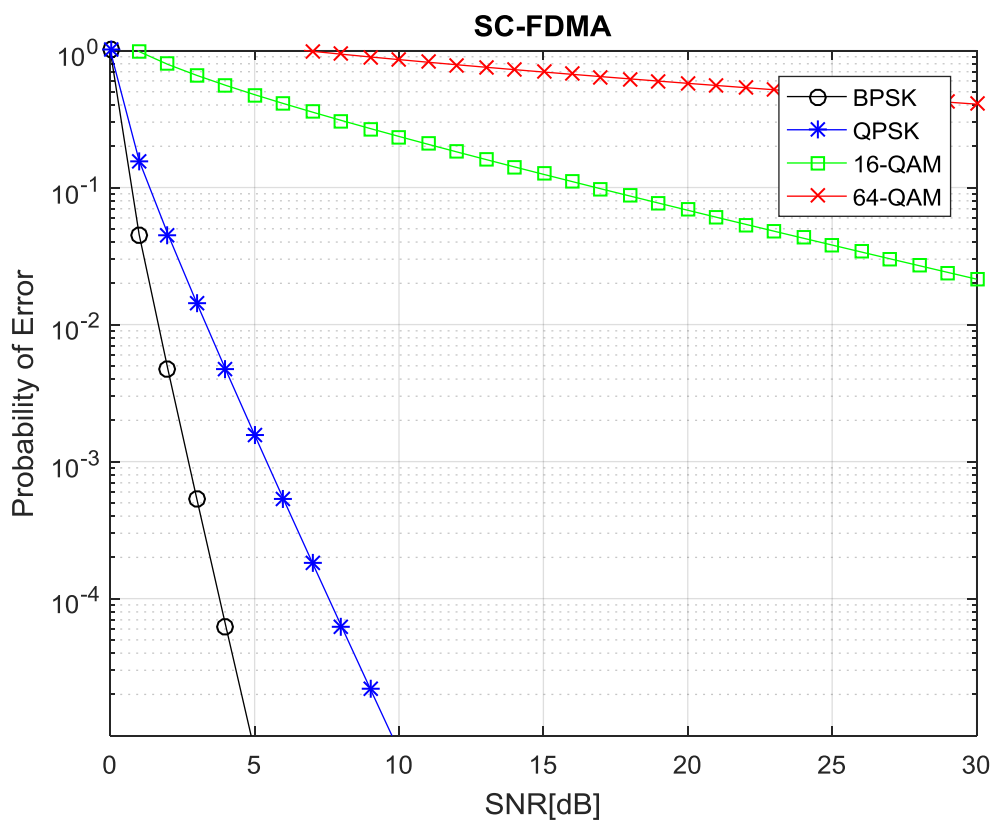


Figure IV. 6 Probabilité d'erreur en fonction du SNR pour l'SC-FDMA

Type de modulation	BPSK-SC-OFDM	QPSK-SC-OFDM	16QAM-SC-OFDM	64-QAM SC-OFDM
Bits par symbole	1	1	4	6
Rapport SNR (db)	0.07	0.12	1.94	11.57

Tableau IV. 5 Probabilité d'erreur en fonction du SNR pour SC-FDMA

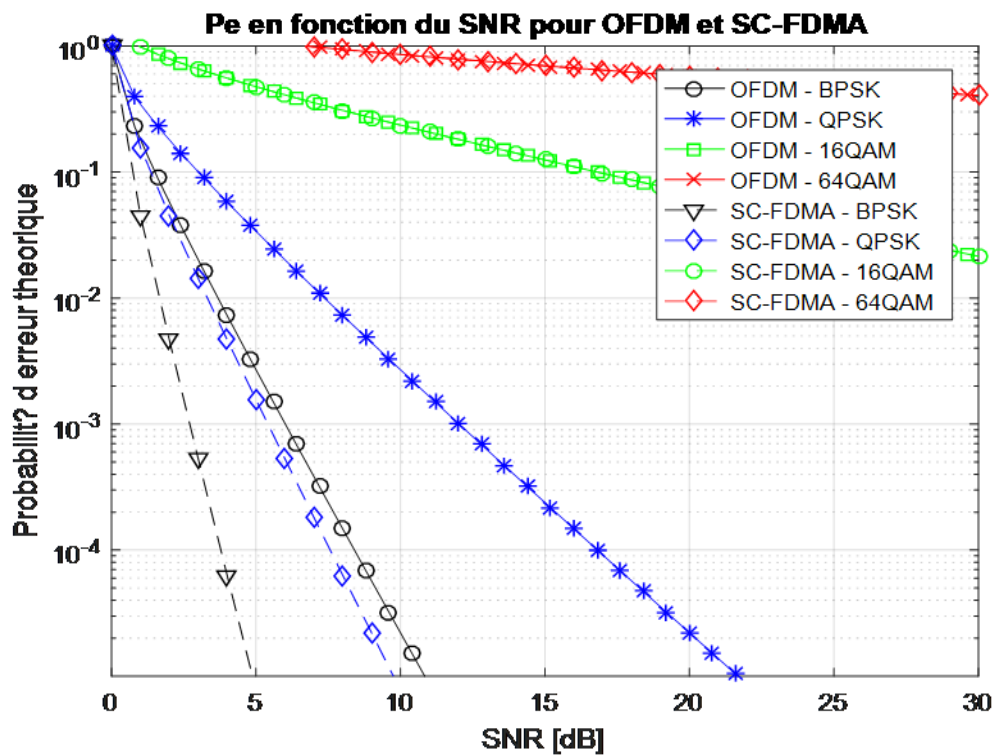


Figure IV. 7 Probabilité d'erreur pour l'OFDM et l'SC-FDMA

D'après les tableaux IV.4 et IV.5, et les figures IV.5, IV.6 et IV.7 présentés ci-dessus nous pouvons observer que pour une valeur spécifique de $P_e = 0.8$ la modulation BPSK a une valeur de SNR inférieure comparé à celle des autres modulations. La modulation 16-QAM et 64-QAM présente des valeurs de SNR plus élevées à la fois dans les systèmes OFDM et SC-FDMA.

IV.5.3. PAPR de l'OFDM et du SC-FDMA pour les modulations (BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM) :

IV.5.3.1. BPSK et QPSK :

Le PAPR de l'OFDM et du SC-FDMA pour les modulations BPSK et QPSK est présenté dans les figures IV.8 et IV.9 respectivement.

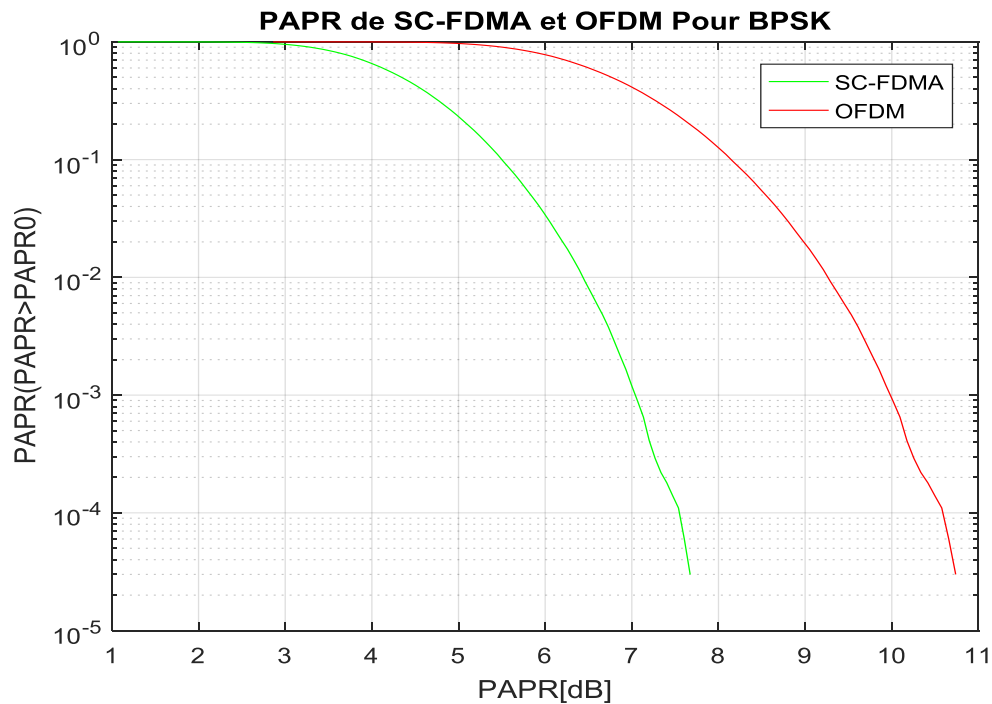


Figure IV. 8 PAPR pour OFDM et SC-FDMA pour BPSK

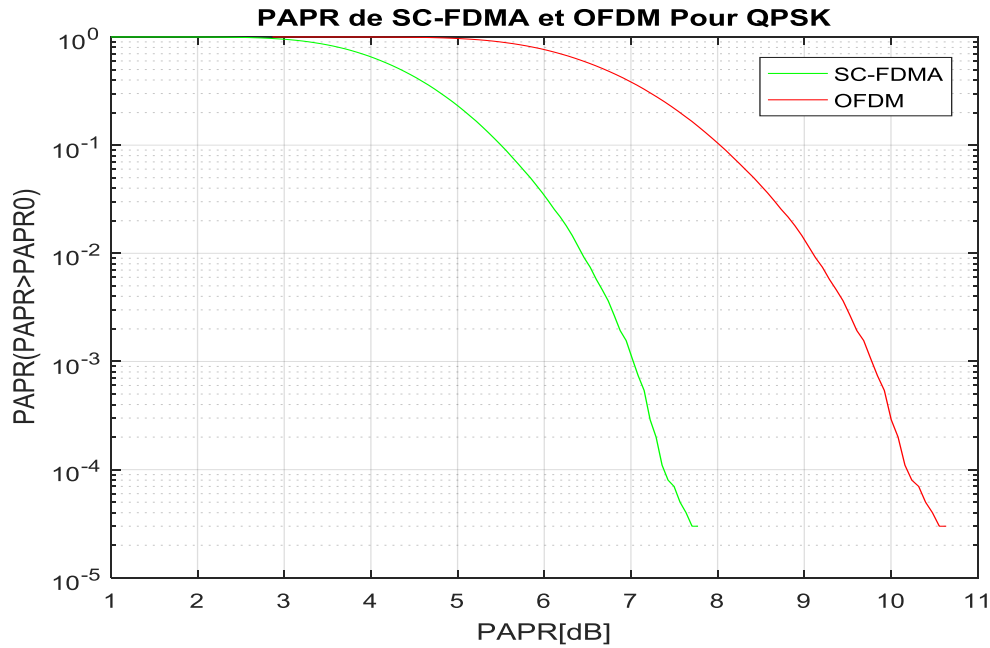


Figure IV. 9 PAPR pour OFDM et SC-FDMA pour QPSK

Les figures IV.8 et IV.9 montrent que le PAPR du SC-FDMA reste presque similaire pour les deux systèmes de modulation, avec une valeur de 7,3 dB. En revanche, celui de l'OFDM connaît une légère baisse dans le cas de la modulation QPSK.

IV.4.3.2. Cas de 16-QAM et 64-QAM:

Le PAPR de l'OFDM et du SC-FDMA pour le cas de 16-QAM et le 64-QAM est représenté dans les figures IV.10 et IV.11 respectivement.

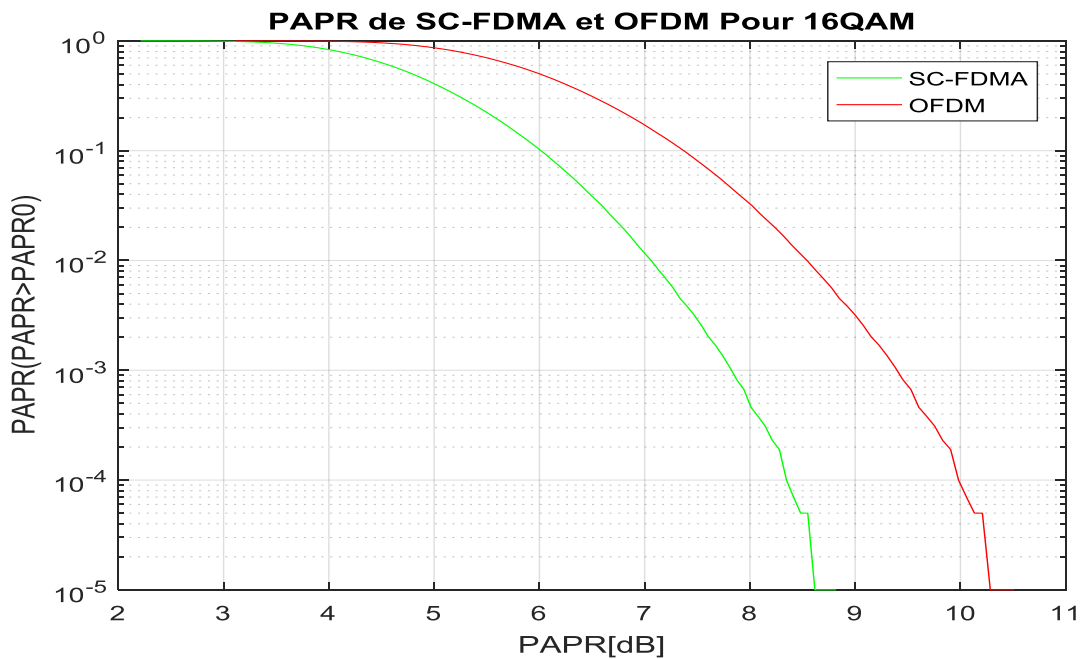


Figure IV. 10 PAPR pour OFDM et SC-FDMA pour 16-QAM

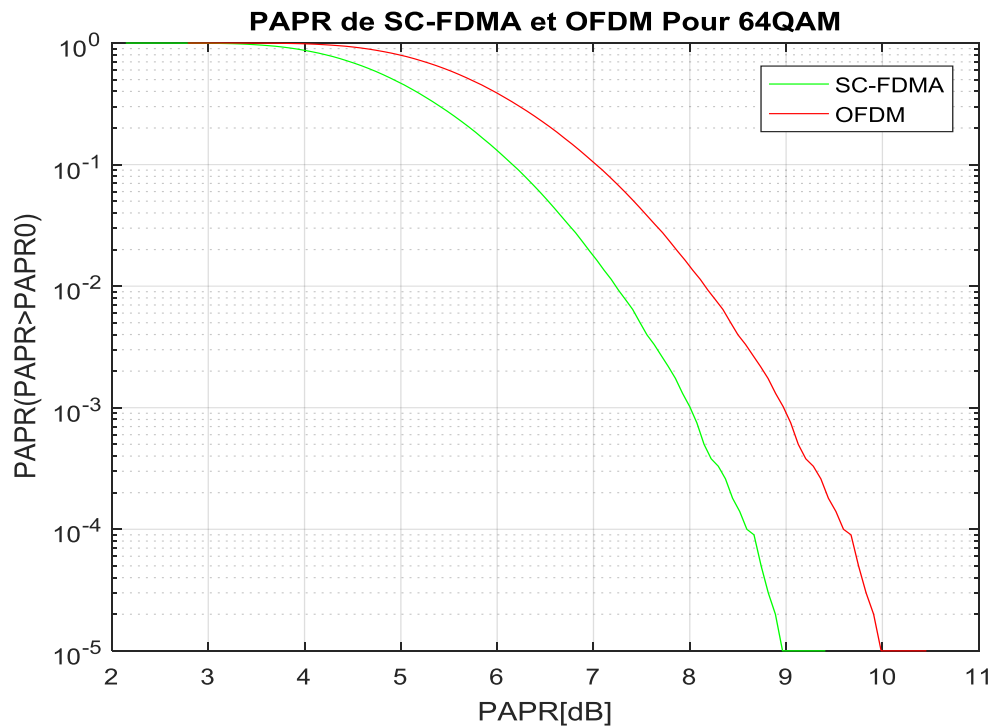


Figure IV. 11 PAPR pour OFDM et SC-FDMA pour 64-QAM

D'après les figures IV.10 et IV.11 nous pouvons observer qu'en augmentant l'ordre de la modulation, le PAPR du SC-FDMA passe de 7.3 dB à 8.35 dB (dans le cas de la 16-QAM) et devient 8,9 dB (dans le cas de la 64-QAM). Ainsi, pour SC-FDMA, le PAPR augmente pour une modulation d'ordre supérieur, alors que pour OFDM le PAPR diminue pour une modulation d'ordre supérieur (64-QAM).

IV.5.Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons mené une étude approfondie des performances des systèmes OFDM et SC-FDMA en utilisant des simulations MATLAB. Les résultats ont montré que l'OFDM offre de meilleures performances en termes de BER à haut SNR, mais souffre d'un PAPR élevé, ce qui le rend moins adapté aux transmissions uplink où l'efficacité énergétique est cruciale. En revanche, le SC-FDMA, grâce à sa structure à porteuse unique, présente un PAPR réduit, ce qui en fait un choix optimal pour les communications mobiles en uplink, malgré une légère dégradation du BER dans certains cas.

Les différentes modulations (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) ont également été évaluées, confirmant que les modulations d'ordre supérieur améliorent le débit mais au détriment de la

robustesse aux erreurs. En conclusion, le choix entre OFDM et SC-FDMA dépend des contraintes du système : l'OFDM est privilégié en downlink pour son efficacité spectrale, tandis que le SC-FDMA est mieux adapté à l'uplink en raison de son PAPR réduit. Ces résultats ouvrent des perspectives pour des optimisations futures, notamment dans le cadre des réseaux 5G et au-delà.

Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré l'évolution des systèmes de télécommunications sans fil, en mettant l'accent sur les modulations multi-porteuses, notamment l'OFDM et son alternative prometteuse, l'SC-FDMA. L'OFDM, largement adopté dans les standards 4G (LTE, Wifi, etc.), a démontré des performances remarquables grâce à son efficacité spectrale, sa robustesse aux interférences et sa facilité d'implémentation. Cependant, ses limitations, notamment son PAPR élevé, sa perte d'efficacité spectrale due au préfixe cyclique, et sa sensibilité aux décalages fréquentiels, en font une solution moins adaptée aux exigences de la 5G, où l'économie d'énergie et l'optimisation des ressources sont cruciales.

L'SC-FDMA, avec sa structure mono-porteuse, s'est révélé une alternative efficace pour réduire le PAPR, particulièrement adaptée aux liaisons montantes des terminaux mobiles. Notre étude comparative entre ces deux techniques a confirmé que l'SC-FDMA offre un meilleur compromis entre performance et consommation énergétique, tout en maintenant une bonne résistance aux interférences. Les simulations sous MATLAB ont permis de valider ces avantages, montrant une réduction significative du PAPR et une amélioration des performances dans des scénarios réalistes.

En conclusion, si l'OFDM reste une référence dans les communications sans fil actuelles, l'SC-FDMA émerge comme une solution optimale pour les futures applications 5G et au-delà, notamment dans les contextes où l'efficacité énergétique et la robustesse sont prioritaires. Les perspectives de recherche pourraient inclure l'optimisation conjointe de ces deux techniques, ou l'intégration de nouvelles méthodes de réduction du PAPR pour des systèmes encore plus performants et économes.

Références Bibliographique

- [1] [Marwa, A., &Marwa, Y. (2021). Architecture et transmission de l'information dans les réseaux radio-mobiles 5G [Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma] =[31]
- [2] [Alwis, P. M. D. (2005). Call admission control and resource utilization in W-CDMA networks Thèse de doctorat, University of Canterbury]
- [3] [Baare Dari Habibou, H., & Traore, K. (2017). Nouvelle approche alternative de l'OFDM pour la 5G (FBMC/OQAM) Etude comparative et application]
- [4] [Bachatene, A. (2014). Filtrage par réseaux de neurones des non linéarités dans une transmission OFDM Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri]
- [5] [bilal doudi & souheila serouti(2018) «transmission sans fil d'image par le système SC-FDMA » mémoire de master , universite Echahid Hamma Lakhdar El-Oued]
- [6] [Bouchentouf, H., &Stambouli, R. B. (2013). Etude des performances des réseaux 4G (LTE) Mémoire de master, Université Abou BekrBelkaid]
- [7] [Boufekenhoua, M. (2021). « Etude et implémentation des formes d'onde Multi-porteuse candidates pour la 5G Mémoire de master », Université 8 Mai 1945 Guelma]
- [8] [Deygout, J. (1966). Multiple knife-edge diffraction of microwaves. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 14(4), 480-489]
- [9] [Djamai, M. (2008). « Contribution à la modélisation et à la linéarisation par pré distorsion numérique adaptative en bande de base des amplificateurs de radiocommunication » ,Thèse de doctorat, École nationale supérieure d'ingénieurs, Poitiers]
- [10] [Hachemi, M. H. (2017). « Etudes et modélisation des performances des réseaux LTE/LTE-A : vers le Handover », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid]
- [11] [HadjMakhnache, K., &Reguibi, R. (2019). Etude et implémentation des modulations multi-porteuses, pour la 5G ,Mémoire de master, Université 08 mai 1945-Guelma]
- [12] [Hnia, H. B., Kachouri, A., Belghith, O. B., et al. (2004). Etude des performances de la modulation OFDM pour l'utilisation dans les systèmes de communication sans fils de la 4G]
- [13] [IKNI Samir, THESE, 'Contribution à l'Etude et au Développement de Techniques Avancées de Modulations Multi porteuses pour les futurs Systèmes de communication sans fil', Université 08 Mai 1945-Guelma, 2018-2019]
- [14] [Isli, D., &Lachouri, S. (2020). Réduction du PAPR par PTS lors d'une transmission OFDM Mémoire de master, Université A. Mira de Bejaia]

- [15] [Khelifi, S., & Haddad, A. (2018). Planification et dimensionnement d'un réseau mobile 4G/LTE Mémoire de master, Université Akli Mohand OulhadjBouira]
- [16] [Khelil, M. A. (s.d.). Etude et performance d'un système de communication sans fil à base d'OFDMA MIMO ,Thèse de doctorat]
- [17] [Khobzaoui, A., &Chaibi, B. (2016). Planification d'un réseau 4G en zone urbaine « Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira Bejaia »]
- [18] [Larbi, N. (2015). Détection multi-utilisateurs dans le contexte de communication mobile : Exploitation de la combinaison OFDM/CDMA , Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran]
- [19] [Louet, J. P., &Louet, Y. (2005). Power ratio definition and analysis in single carrier modulation. European Signal ProcessingConference (EUSIPCO)]
- [20] [Rakotondraina, T. E. (2019). ETUDE DES FORMES D'ONDES UTILISEES EN 5G NR ,Thèse de doctorat, Université El Oued]
- [21] [Rezgui, B. (2019). Conception d'un système de communication sans fils multi-porteuses à base de Bancs de filtres FBMC , Thèse de doctorat]
- [22] [Roche, E. M., Townes, W., et al. (2018). La prochaine génération de téléphonie mobile (5G) et ses implications (Infrastructure, Réglementation). Netcom. Réseaux, communication et territoires, 32(1/2), 139-162.]
- [23] [Saunders, S. R., & Aragon, A. (2007). Antennas and Propagation for Wireless communication Systems (2nd ed.). Wiley & Sons.]
- [24] [Sorger, U., De Broeck, I., & Schnell, M. (1998). Interleaved FDMA - A New Spread Spectrum Multiple-Access Scheme. Proceeding of the IEEE International Conference on Communications, 2, 1013-1017.]
- [25] [Yameogo, Y. S. (2011). Etudes de nouvelles techniques d'estimation et d'égalisation de canal adaptées au système SC-FDMA Thèse de doctorat, Université de Rennes 1].
- [26] [Yusof, S. K., Foo, N. K., Ugak, K., & Wang, Y. H. (2003). A block coded amplitude clipping and filtering for peak-to-average power ratio in orthogonal frequency division multiplexing system. In Proc. Student Conf. on Research and Development (SCORED), 105-108.]
- [27][Sabrine,A&Djihane,CH.(2021) . « Etude et simulation des performances d'un système SC-FDMA » , Mémoire de master , Université 8 mai 1945-Guelma]
- [28] [Lagrange, X.(2015).Architecture et principes generaux.Institut mines-Telecom]
- [29][Soumia,Y&Nabila,K (2016) . « Etude du problème de PAPR dans un système e communication SC-FDMA» Mémoire de master. Université 8mai 1945-Guelma]