



0République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'hamedBougara–Boumerdes

Faculté des Sciences de l'Ingénieur



Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Télécommunication

Spécialité : Réseaux et Télécommunication

Présenté par :

HALOUANE CHAIMA

Thème :

L'IMPLEMENTATION DE LA TECHNOLOGIE OFDMDANS LE RESEAU LTE

Soutenu le : 11/07/2019

Devant le jury, composé de :

RIAHLA MOHAMED AMINE MCA

Président

MIRAYHI YACINE MCA

Examineur

M. BAICHE Karim MCA

Encadreur

M. BLOUTI RABAH <Algérie Télécom>

Co-Encadreur

Année Universitaire : 2018-2019



Dédicace

*A Mes très **chers parents** pour tous leurs sacrifices,
leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long
de mes études.*

*A mon **mari Mohamed** pour son appui et son encouragement.*

*A ma chère sœur **HOUDA** pour ses encouragements
permanents, et son soutien moral.*

*A **toute ma famille** pour leur soutien tout au long de mon
parcours universitaire.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le
fruit de votre soutien infailible.*

Merci d'être toujours là pour moi.



Remerciement

*Je tenais particulièrement à remercier **Allah** le tout Puissant, que ce mémoire n'aurait jamais été réalisé Sans sa bénédiction.*

*J'adresse mon remerciement à mon encadreur Monsieur **BAICHE KARIM**, le chef de notre département pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives, et à mon encadreur de stage Monsieur **BLOUTI RABAH**, de m'avoir acceptée dans son équipe et pour son aide précieuse.*

*Je remercie mes très chers parents, **IBRAHIM et NAIMA**, qui ont toujours été là pour moi, et mon mari **MOHAMED** pour sa patience et son aide.*

*Je remercie les **membres du jury** de l'université de Boumerdes d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Enfin, Je remercie ma famille pour son soutien ma sœur **HOUDA** et mes frères **YACINE** et **YOUCEF** sans oublier ma tante **AMINA** et **ASMA**.*



Résumé

Le réseau LTE représente un passage vers une structure IP pour l'envoi d'informations, utilise une technologie plus adaptée dans la modulation des signaux numérique par rapport aux autres réseaux (2G,3G, ...), s'appelle la technologie OFDM. Qui est une modulation qui utilise plusieurs sous porteurs pour l'envoi d'information dans une trame qui s'appelle la trame LTE.

Alors, Nous allons réaliser une chaîne de transmission et réception dans un réseau LTE pour bien comprendre le rôle de déploiement de la technologie OFDM.

Mot clé : LTE, OFDM, OFDMA, SC-OFDM, Trame, Modulation, Porteuse.

Abstract

The LTE network represents a transition to an IP structure for sending information, uses a technology more adapted in the modulation of digital signals compared to other networks (2G, 3G, ...), called OFDM technology, which is a modulation that uses several sub-carriers for sending information in a tram called the LTE frame.

So, we'll build a transmission and reception chain in an LTE network to understand the deployment role of the OFDM technology.

Key words: LTE, OFDM, OFDMA, SC-OFDM, Tame, Modulation, sub-carriers.

Listes des figures

Figure 1.1: Architecture globale du système UMTS	4
Figure 1.2: Architecture du réseau UMTS	7
Figure 1.3: Principe du soft/softer handover et hard handover.....	11
Figure 1.4: Interfaces radio et fréquences.....	12
Figure 1.5: Présentation générale sur le système LTE.....	13
Figure 1.6: Architecture générale du LTE.....	14
Figure 1.7: Architecture du réseau cœur EPC	15
Figure 1.8: Le fonctionnement d'une trame radio.	20
Figure 1.9: Un signal LTE dans une carte à deux dimension.....	21
Figure 1.10: Un signal LTE dans une carte à deux dimensionnelle avec le TDD	22
Figure 2.1: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.	28
Figure 2.2: Schéma de principe d'un modulateur	29
Figure 2.3: Spectres des différentes porteuses.....	30
Figure 2.4: Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses.	30
Figure 2.5: Schéma de principe du démodulateur OFDM	31
Figure 2.6: Principe de la fréquence d'échantillonnage.....	32
Figure 2.7: Principe de la démodulation de la fréquence d'échantillonnage	32
Figure 2.8: Chaîne de transmission	32
Figure 2.9: Schéma de principe du démodulateur OFDM	33
Figure 2.10: Schéma de principe du modulateur	33
Figure 2.11: Spectre du signal OFDM.....	34
Figure 2.12: Spectre après échantillonnage	34
Figure 2.13: Différence entre la technique FDM et OFDM.....	35
Figure 2.14: Modulation QPSK	36
Figure 2.15: Principe de la modulation QAM	37
Figure 2.16: Insertion du préfixe cyclique.	37
Figure 2.17: Démodulation OFDM.....	41
Figure 2.18: Démodulation OFDM avec désalignement.....	42
Figure 2.19: Différence entre OFDM et OFDMA.	46
Figure 3.1: Les éléments fonctionnels d'un system de transmission numérique	50
Figure 3.2: Schéma synoptique d'une chaine de transmission LTE.....	50
Figure 3.3: La chaine d'émission et réception LTE sous Simulink	51
Figure 3.4: chaine d'émission d'un réseau LTE.....	52
Figure 3.5: Paramètres du bloc Bernoulli Generator	53
Figure 3.6: Paramètres du block CRC Generator	54
Figure 3.7: Les Blocks de turbo-encoder.....	55
Figure 3.8: Paramètres de Block rectangulaire 16 QAM	55
Figure 3.9: Blocks de la chaine d'émission OFDM.	56
Figure 3.10: paramètres du block Mutiport Selecto	57
Figure 3.11: Paramètres du Block Matrix concatenation.....	57
Figure 3.12: Paramètres du bloc IFFT	58
Figure 3.13: Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix.....	59
Figure 3.14: Paramètres du bloc AWGN	60
Figure 3.15: Paramètres du bloc Multipath Rayleigh Fading.....	61
Figure 3.16: la chaine de réception LTE.	61
Figure 3.17: la chaine de réception du système OFDM	62

Figure 3.18: Paramètres du bloc Remove Cyclic Prefix	62
Figure 3.19: paramètres du Bloc FFT	63
Figure 3.20: paramètres du Bloc selector.....	64
Figure 3.21: paramètres du Bloc Frame Status conversion	64
Figure 3.22: paramètres du Bloc Multi port selector	65
Figure 3.23: Représentation spectral du signal émis avant le turbo-encoder.....	67
Figure 3.24: Représentation spectral du signal reçu passé par le turbo-encoder.....	68
Figure 3.25: Représentation spectral du signal input et output du bloc OFDM	68
Figure 3.26: Représentation spectral du signal LTE émis passé par la modulation QAM et le bloc OFDM.	70
Figure 3.27: Représentation spectrale du signal à la sortie du canal Rayleigh Fading.	71
Figure 3.28: Représentation spectral du signal LTE reçu passé par la modulation QAM et le bloc OFDM a la sortie du AWGN.....	72
Figure 3.29: Représentation spectral du signal après la démodulation OFDM avant d'utiliser la démodulation QAM.	73

Liste des tableaux

Tableau 1.1: La latence pour chaque multiplexage.....	18
Tableau 1.2: L'UMTS vs la LTE.	24
Tableau 3.1: les fréquences des pics de signal input de bloc OFDM.	69
Tableau 3.2: les fréquences des pics de signal output de bloc OFDM.	70
Tableau 3.3: les fréquences des pics de signal émis par le bloc OFDM et QAM.....	70
Tableau 3.4: les fréquences des pics à la sortie du canal Rayleigh.	71
Tableau 3.5: les fréquences des pics à la sortie du canal AWG.	72
Tableau 3.6: les fréquences des pics après la démodulation OFDM et QAM.....	73

Liste des abréviations

A

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line.
ATM	Air Traffic Management

C

CN	Commande Numérique
CDMA	Code Division Multiple Access
CU	Communauté Urbaine

D

DCH	DelayedCutaneousHypersensitivity
-----	----------------------------------

E

ENodeB	Evolved NodeB
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved PacketCore
E-UTRA	Evolved-Universal Terrestrial Radio Access
eUTRAN	evolved UTRAN

F

FFT	Fast Fourier Transform
FDD	Frequency Division Duplexing

G

GSM	Global System for Mobile Communication
GMSG	Gateway MSC

H

HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSOPA	High Speed OFDM Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access I

I

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol

L

LTE	Long Term Evolution
-----	---------------------

M

MIMO	Multi Input Multi Output
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Centre

N

NMC	Network and Management Centre
NMT	Nordic Mobile Telephone

O

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

P

PDN GW	Packet Data Network Gate-Way
PDP	Packet Data Protocol
PGW	Packet Switch-GetWay

Q

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Qualité de Service
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

R

RNC	Radio Network Controller
RF	Radio Fréquence

S

S-GW	Serving-Get Way
SC-FDMA	Single Carrier-Frequency Division Multiplexing Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service

T

TDD	Time-Division Duplex
-----	----------------------

U

UE	Terminal Mobile
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

V

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

W

WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wide Coding Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : L'UMTS VS LA LTE	3
1.1- Introduction.....	3
1.2- L'UMTS	4
1.2.1- Présentation.....	4
1.2.2- Architecteur de l'UMTS	4
Station Mobile (UE, User Equipment)	5
Réseau d'Accès UTRAN	5
Le réseau cœur (CN, Core Network)	6
1.2.3- Les Interfaces radio de l'UMTS	8
Les modes d'accès duplex.....	8
La technique d'accès multiple WCDMA	8
1.2.4- Les modes de transmission dans le réseau UMTS	9
Le mode circuit	9
Le mode paquet.....	9
Le Handover.....	9
Les causes du Handover.....	9
1.2.5- Les caractéristiques fondamentales de la 3G	11
Débits du réseau 3G	11
La Latence.....	11
Le Spectre de fréquence.....	12
1.3- LA LTE	13
1.3.1- Introduction.....	13
1.3.2- But de la 4G	13
1.3.3- Architectures.....	14
EPC (Evolved paquet core).....	15
Le réseau d'accès	16
La partie IMS (IP Multimedia Sub-system)	16
1.3.3.Les caractéristiques fondamentales de la 4G	17
Le débit	17
La latence	17
L'agilité en fréquence	18
Codage et sécurité	18
Multiplexage	19
Structure d'une trame LTE.....	19
1.4- L'UMTS vs la LTE.....	22
1.5-Conclusion.....	24
CHAPITRE 2 : LA TECHNOLOGIE OFDM	26
2.1-Introduction.....	26
2.2- Définition.....	26
2.3- Historique	26
2.4- Principe et fonctionnement de l'OFDM.....	27
2.4.1- Principe de la modulation	28
2.4.2- Principe de la démodulation	31
2.4.3- Principes du modulateur et du démodulateur utilisant les transformées de Fourier discrètes	32
2.5- FDM ou OFDM multi-porteuses.....	35
Principales caractéristiques de l'OFDM	35

2.6- Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM.....	36
2.6.1- Modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)	36
2.6.2- Modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation)	36
2.7- Intervalle de garde (préfixe cyclique).....	37
➤ Préfixes cycliques avantages et inconvénients :.....	38
2.8- Les différents types de technique OFDM.....	39
2.9- Les Systèmes utilisent OFDM	39
2.10- Synchronisation OFDM & synchronisation de fréquence	40
Principes de base de la synchronisation OFDM.....	40
Offset de fréquence Synchronisation OFDM.....	41
Synchronisation OFDM avec décalage d'horloge	42
2.11- LTE OFDMA SC-FDMA et modulation.....	43
2.11.1- LTE OFDMA dans la liaison descendante	43
2.11.2- LTE SC-FDMA sur la liaison montante	44
2.12- OFDM vs OFDMA.....	45
2.13- OFDM avantages et inconvénients	46
2.14- Conclusion.....	47
 CHAPITRE 3 : SIMULATION ET RESULTATS.....	 49
3.1-Introduction.....	49
3.2-Définition du programme	49
3.2.1-MATLAB	49
3.2.2- Simulink	49
3.4- Réalisation de la chaine de transmission LTE a l'aide de la modulation OFDM sous le Simulink	50
3.4.1-La chaine d'émission d'un réseau LTE avec la Modulation OFDM	52
3.4.2.1- Block Bernoulli Generator.....	52
3.4.2.2- Block General CRC Generator	53
3.4.2.3- Block turbo-encoder	54
3.4.2.4- Block rectangulair 16 QAM	55
3.4.2.5- Block OFDM modulation	56
3.4.3-Canaux de transmissions.....	59
3.4.4- La chaine de réception du réseau LTE et du système OFDM.....	61
La FFT	63
Select Rows.....	63
To frame.....	64
Multi port selector.....	65
3.4.4.2- Channel estimator et Channel compensation	65
3.4.4.3-Remove zéro-padding	66
3.4.4.4- Discrete-time scotter plot.....	66
3.4.4.5- QAM Démodulateur Baseband.....	66
3.4.4.6- Embedded MATLAB Function.....	66
3.4.4.7- Error Rate Calculation	67
3.5- Résultats de la simulation d'une chaine LTE	67
3.5.1-signal avec modulation OFDM et QAM.....	67
3.5.2- Les spectres de signal après l'utilisation du Multipath channel et AWGN.....	71
3.5.3- Les spectres de signal avat et après la démodulation OFDM et QAM	72
3.17- Conclusion.....	75
 CONCLUSION GENERALE	 76
 BIBLIOGRAPHIE.....	 77

INTRODUCTION GENERALE

La 4G/LTE (*Long Term Evolution*) désigne la quatrième génération du réseau de téléphonie mobile qui introduit du très haut débit pouvant aller jusqu'à 200 Mbit/s. La spécificité de la 4G par rapport aux réseaux cellulaires précédents est le passage à une structure IP (Internet Protocol) pour le transport des communications vocales et des SMS sous forme de paquets de données.

La technologie OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) constitue le format de signal de base utilisé dans la 4G LTE. L'utilisation d'OFDM est un choix naturel pour le LTE. Bien que les concepts de base d'OFDM soient utilisés, il a été, naturellement, conçu pour répondre aux exigences exactes du LTE. Cependant, son utilisation de plusieurs porteuses, chacune transportant un faible débit de données, reste la même. L'implémentation réelle de la technologie sera différente entre la liaison descendante (de la station de base au mobile) et la liaison montante (du mobile à la station de base) en raison des différentes exigences entre les deux directions et l'équipement à chaque extrémité. Cependant, l'OFDM a été choisi comme format de support de signal, car il est très résistant aux interférences. De plus, ces dernières années, les différentes formes de radiodiffusion qui l'utilisent, ainsi que le Wi-Fi et le WiMAX, ont acquis une expérience considérable dans son utilisation. L'OFDM est également un format de modulation très adapté au transport de débits de données élevés, une des exigences clés du LTE.

Le but de ce mémoire est d'optimiser une transmission et réception à sous porteuses multiples pour un réseau de la 4^e génération et de l'implémenter dans un outil de simulation sous Matlab, les simulations réalisées dans ce mémoire travaillent avec la technologie OFDM.

Le manuscrit est structuré en trois chapitres : Le chapitre 1 présente l'UMTS ainsi que la LTE et ses différentes architectures et caractéristiques avec une comparaison entre ses deux générations.

Le chapitre 2 concerne l'historique de l'OFDM, ainsi que sa description générale avec ses avantages et ses inconvénients. L'OFDM est une modulation qui permet de transmettre des données numériques, au moyen d'un grand nombre de sous-porteuses. Nous parlons dans ce chapitre des différents types de modulation de chaque sous-porteuses, les techniques de

l'OFDM, la synchronisation OFDM et l'utilisation de l'OFDM dans un réseau LTE comme format de signal de base avec ses types de liaison.

Le chapitre 3 décrit généralement le système LTE avec l'utilisation de la technique OFDM modélisé sous Simulink du Matlab. Nous présentons un modèle de système LTE avec deux différents canaux de transmission multi-trajets. Nous comparons les résultats de la simulation obtenus avec l'utilisation de cette technique. Enfin, nous finalisons notre mémoire avec une conclusion générale et perspective.



Chapitre1 :
L'UMTS vs LaLTE



Chapitre 1 : L'UMTS vs LALTE

1.1- Introduction

Tout a commencé avec le NMT (**N**ordic **M**obile **T**elephone), un réseau analogique qui permettait à un très petit nombre d'abonnés et uniquement dans les grandes villes de téléphoner en mobilité. Puis, elle est venue la deuxième génération (2G), plus connue sous le nom de GSM (**G**lobal **S**ystem for **M**obile), qui a constitué le premier système mobile numérique. Avec le GSM sont apparues les 'puces' (cartes SIM) et les téléphones mobiles sont devenus vraiment portables. Tout d'abord avec des écrans noir et blanc, ils permettaient d'appeler partout et d'échanger des SMS ; les écrans couleur sont ensuite apparus ainsi que les premiers services dits multimédia : MMS, Wap, et la consultation des boîtes mail (essentiellement pour les entreprises et les professionnels). Mais pour ces derniers services, les débits offerts par les réseaux 2G (280Kb/s) restaient faibles pour répondre à la demande. Alors une nouvelle technologie a été créée au niveau international : l'UMTS (**U**niversal **M**obile **T**élécommunications **S**ystem) encore appelée 3^e génération de technologie mobile, d'où son diminutif, 3G.

La troisième génération est constituée de systèmes mobiles voix et données supportant des services de données haut-débit. Elle s'est améliorée dans le temps : La première évolution de la 3G est la 3G+, basée sur la norme HSPA (**H**igh **S**peed **P**acket **A**ccess), la 3G+ permet de passer à des débits d'échanges supérieurs à ceux de la 3G. La dernière évolution des réseaux 3G, parfois appelé HSPA+, 3G++ ou THDM (**T**rès **H**aut **D**ébit **M**obile), permet de tripler la vitesse des réseaux 3G+ avec un débit allant de 21 à 42 Mbit/s. Après cette génération on trouve la technologie LTE (**L**ong **T**erm **E**volution) qui permet d'aboutir à un réseau mobile de très haut débit, qui marque une grande différence avec la 3G. En effet, il permet de bénéficier d'un débit théorique de 100 Mbit/s, soit 10 fois plus rapide qu'en 3G+. Enfin, on parle aujourd'hui de la cinquième génération (5G) et la sixième génération basée sur une technologie mondiale, qui commence à être commercialisée. Une technologie très coûteuse à installer (et donc coûteuse pour l'utilisateur).

1.2- L'UMTS

1.2.1- Présentation

L'UMTS (**U**niversal **M**obile **T**elecommunication **S**ystems) désigne une technologie retenue dans la famille dite IMT 2000 (**I**nternational **M**obile **T**élécommunications) comme norme pour les systèmes de télécommunication mobile dits de troisième génération, 3G, cette technologie :

- Elle rend possible un accès plus rapide à Internet depuis les téléphones portables, par un accroissement significatif des débits des réseaux de téléphonie mobile.
- Elle améliore la qualité des communications en tendant vers une qualité d'audition proche de celle de la téléphonie fixe.
- Elle répond au problème croissant de saturation des réseaux GSM, notamment en grandes villes.

1.2.2- Architecture de l'UMTS

L'architecture globale du système UMTS L'architecture d'un réseau d'UMTS est répartie en deux groupes (voir figure I.1). Le premier groupe correspond au réseau d'accès radio (RAN, Radio Access Network ou UTRAN, UMTS Terrestrial RAN) qui supporte toutes les fonctionnalités radio. Le deuxième groupe, il correspond au réseau cœur (CN, Core Network) qui est responsable de la commutation et du routage des communications (voix et données) vers les réseaux externes. Pour compléter le système, on définit également le terminal utilisateur (UE, User Equipment) qui se trouve entre l'utilisateur proprement dit et le réseau d'accès radio [1].

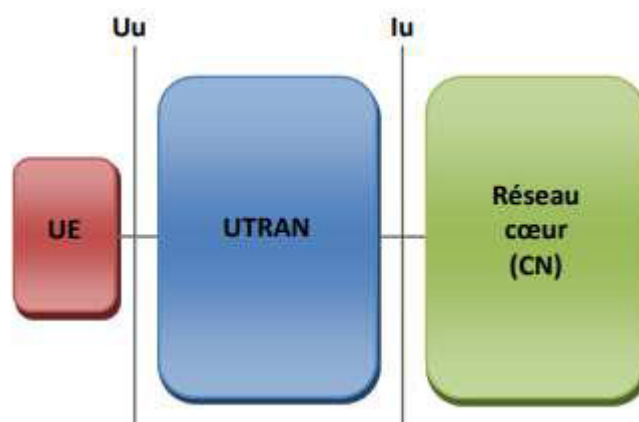


Figure 1.1: Architecture globale du système UMTS

❖ Station Mobile (UE, User Equipment)

L'utilisateur UMTS est équipé d'une UE (User Equipment) qui est composé du Mobile Equipment (ME) correspondant au combiné téléphonique (terminal mobile) et la carte USIM (UMTS Subscriber Identity Module). Le rôle de l'USIM est semblable à celui de la carte SIM En GSM. Elle enregistre les identités de l'abonné telles que IMSI, TMSI, P-TMSI, les données de souscription, la clé de sécurité (Ki) et les algorithmes d'authentification et dégénération de clé de chiffrement [1].

❖ Réseau d'Accès UTRAN

Le réseau d'accès UTRAN est doté de plusieurs fonctionnalités. Sa fonction principale est de transférer les données générées par l'utilisateur. Il est une passerelle entre l'équipement usager et le réseau cœur via les interfaces Uu et Iu. Cependant, il est chargé d'autres fonctions:

- Sécurité : Il permet la confidentialité et la protection des informations échangées par l'interface radio en utilisant des algorithmes de chiffrement et d'intégrité.
- Mobilité : Une estimation de la position géographique est possible à l'aide du réseau d'accès UTRAN.
- Gestion des ressources radio : Le réseau d'accès est chargé d'allouer et de maintenir des ressources radio nécessaires à la communication.
- Synchronisation : Il est aussi en charge du maintien de la base temps de référence des mobiles pour transmettre et recevoir des informations.

Le réseau d'accès UTRAN est composé de plusieurs éléments : une ou plusieurs stations de base (appelées NodeB), des contrôleurs radio RNC (Radio Network Controller) et des interfaces de communication entre les différents éléments du réseau UMTS [1].

a) Node B

Le Node B est l'élément chargé de gérer la couche physique de l'interface air entre l'UTRAN et tous les UEs localisés dans la cellule ou les secteurs qu'il dessert. Il assure principalement des fonctions telles, le contrôle de puissance des mobiles, le codage et le décodage de canal, de l'adaptation du débit et de l'étalement, la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)[2].

b) RNC

Le RNC (Radio Network Controller) est l'élément de réseau en charge de la gestion et du contrôle des canaux radio (établissement / maintien / libération des connexions radio). Pour un mobile donné, le RNC effectue l'établissement de la connexion RRC (Radio Ressource Contrôle) qui est responsable d'échanger la signalisation avec le réseau, il contrôle la puissance d'émission/réception et il gère la configuration ou la reconfiguration de l'interface radio et la mobilité du mobile (handover) ainsi que le contrôle de la qualité du lien radio [1].

❖ Le réseau cœur (CN, Core Network)

Le réseau cœur a pour rôle la commutation des appels et le routage des paquets à l'intérieur du réseau et l'interconnexion avec les autres réseaux en vue de gérer les services souscrits par un abonné, ces principaux éléments sont [3] :

a) Le HLR (Home Location Register) est la base de données de référence qui gère l'ensemble des abonnés et leurs profils. Le profil d'un abonné regroupe de nombreuses informations telles que son numéro de téléphone, les services qu'il a le droit d'utiliser, les informations relatives aux services supplémentaires tels que les renvois d'appel, les restrictions d'appels, etc.

b) Le MSC/VLR (Mobile Switching Centre/Visitor Location Register) correspond au commutateur (MSC) et à la base de données (VLR). Le MSC permet la commutation des connexions circuit alors que le VLR contient une copie de profil de l'abonné et certaines informations plus précises relatives à la localisation de l'abonné.

c) Le GMSC (Gateway MSC) est un commutateur connecté directement aux réseaux externes en mode circuit. Toutes les communications entrantes et sortantes, en mode circuit, passent nécessairement par un GMSC.

d) Le SGSN (Serving GPRS Support Node) possède des fonctionnalités similaires au MSC/VLR mais est utilisé pour les communications paquet. La partie du réseau gérée par le SGSN est couramment appelée « domaine paquet ».

e) Le GGSN (Gateway GPRS Support Node) les fonctionnalités du GGSN sont très proches de celles du GMSC, mais le GGSN fait partie du domaine paquet et non circuit. Il ne traite donc que des connexions en mode paquet.

Quant aux réseaux externes, ils se partagent en deux catégories :

- Les réseaux circuit tels que le Réseaux Téléphonique Commuté Public ou le Réseau Numérique à Intégration de services.
- Les réseaux paquet tels que le réseau Internet et d'autres réseaux publics ou privés de transmission de données.

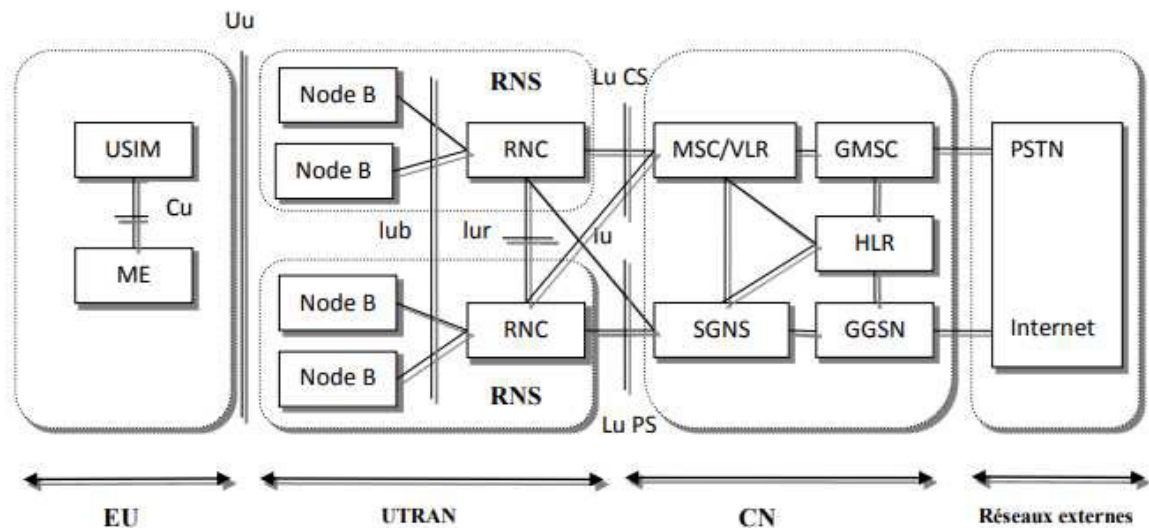


Figure 1.2: Architecture du réseau UMTS

• Les interfaces

Les interfaces du réseau UMTS sont les suivantes (voir figure 1.2) [2]:

- a) L'interface Cu : elle correspond à l'interface électrique entre la carte USIM et le terminal.
- b) L'interface Uu : il s'agit de l'interface air WCDMA grâce à laquelle le terminal utilisateur à accès à la partie fixe du système.
- c) L'interface Iu : elle relie l'UTRAN au réseau cœur.
- d) L'interface Iur : qui permet le soft handover entre des RNC.

e) L'interface Iub : qui relie les Node B au RNC.

1.2.3- Les Interfaces radio de l'UMTS

❖ Les modes d'accès duplex

La norme UMTS présente deux techniques de multiplexage sur l'interface radio : le TDD (Time Division Duplex) et le FDD (Frequency Division Duplex).

a) Le mode TDD

Dans le mode TDD le transfert de données depuis le mobile vers la station de base (Uplink) s'effectue à la même fréquence qu'en sens inverse (Downlink) avec une largeur de canal de 5 MHz. Les séquences Uplink et Downlink sont séparées dans le temps. Ce mode est conseillé dans les micros et pico cellules utilisant la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) à 3.84 Mchips ou la modulation 8PSK (Eight level Phase Shift Keying) à 1.28 Mchips où le facteur d'étalement varie de 1 à 16 [4].

b) Le mode FDD

Dans le mode FDD : les liaisons montantes UL (uplink) et descendantes DL (downlink) s'effectuent en même temps, mais sur des fréquences différentes. Il est utilisé dans les micros et les macros cellules. La séparation entre porteuses est également de 5 MHz utilisant la modulation QPSK à 3.84 Mchips et un facteur d'étalement qui varie de 4 à 256 en UL et de 4 à 512 en DL [2].

❖ La technique d'accès multiple WCDMA

La technique d'accès multiple adoptée par l'UMTS est appelée le WCDMA (Wide band Code Division Multiple Access). Dans cette technique les bits correspondants aux données d'utilisateurs sont étalés, en les multipliant par une séquence de bits (appelé chips) ayant des caractéristiques bien particulières, sur une large bande passante. Par ailleurs et afin de pouvoir offrir différents débits, le WCDMA met en œuvre des transmissions à facteur d'étalement variable et à multiples codes.

➤ Avantage du W-CDMA

Par rapport aux systèmes de la deuxième génération, l'UMTS vient d'apporter quelques avantages, le plus important est d'offrir une plus grande bande passante pour l'utilisateur, ainsi qu'une grande souplesse dans l'allocation des ressources nécessaires déployées dans le réseau. L'orientation du WCDMA vers la transmission de données en mode paquet a

permis à l'utilisateur d'établir des communications de bande passante variable, même en cours d'appel, ce qui économise la bande passante. Une autre contrainte qui est grandement simplifiée est la planification cellulaire, c'est-à-dire le choix des fréquences à mettre en œuvre dans une cellule en tenant compte des cellules voisines est remplacé par les séquences de codage qui différencient les communications, et non pas les fréquences porteuses comme dans les générations précédentes [5].

1.2.4- Les modes de transmission dans le réseau UMTS

Ce réseau repose sur deux modes :

❖ Le mode circuit

Le domaine circuit permettra de gérer les services temps réels dédiés aux conversations téléphoniques (vidéo-téléphonie, jeux vidéo, applications multimédia). Ces applications nécessitent un temps de transfert rapide. Lors de l'introduction de l'UMTS le débit du mode domaine circuit sera de 384 Kbits/s.

❖ Le mode paquet

Le domaine paquet permettra de gérer les services non temps réels. Il s'agit principalement de la navigation sur Internet, de la gestion de jeux en réseaux ainsi que l'accès et l'utilisation des e-mails. Ces applications sont moins sensibles au temps de transfert, c'est la raison pour laquelle les données transiteront en mode paquet. Le débit du domaine paquet sera sept fois plus rapide que le mode circuit, environ 2Mbits/s [6].

❖ Le Handover

Le handover (HO) est un mécanisme de transfert automatique intercellulaire qui assure la continuité de service aux mobiles. Il permet d'éviter les coupures de communication en bordure de cellule et réduit significativement l'interférence créée dans le réseau.

✚ Les causes du Handover

Le déclenchement du HO s'appuie essentiellement sur :

- a) La qualité du signal : Le mobile utilise le rapport entre énergie d'un chip et densité spectrale de bruit (E_c/I_0) pour décider lesquelles des cellules qui l'entourent offrent une meilleure qualité du signal.
- b) La mobilité de l'utilisateur : lorsque le mobile déplaçant d'une cellule à l'autre.

c) Changement de service : lorsque la cellule rejette la demande d'un mobile pour un service donné, elle lui fait balancer vers une cellule voisine disposant le service demandé.

Les types de Handover

Dans le contexte du WCDMA trois types de handover sont définies : le softerhandover, le soft handover et le hard handover.

A. Le softer/soft handover

Le softerhandover se passe quand un mobile se trouve dans une zone de couverture commune à deux secteurs adjacents d'un même Node B. Quant au soft handover, c'est une transition entre deux cellules de deux stations de bases différentes. Le mécanisme de soft/softerhandover consiste à établir un lien avec la cellule cible et en suite de couper le lien de la cellule d'origine, ce qui permet de réduire d'une manière considérable le taux de coupure de communication lors des transitions entre les cellules [5].

➤ **Les problèmes de softer/soft handover**

Dans une phase de softer/soft handover (voir figure 1.3), le réseau doit allouer des ressources radio en plus, produisant une dégradation de la capacité du réseau. Cette dégradation oblige les opérateurs à optimiser les paramètres de softer/soft handover ainsi que leurs structures de réseau et ça en :

- Ajustant le chevauchement entre les cellules afin d'éviter la dégradation considérable de la capacité de système d'une part et en réduisant le taux de coupure de communication d'autre part.
- Choissant judicieusement l'ouverture horizontale des antennes ainsi que le nombre de secteurs pour chaque Node B [5].

B. Le hard handover

Il existe deux types de hard handover :

- ✓ Le Hard Handover inter-fréquences qui permet à un terminal mobile de passer d'un spectre de fréquence à un autre au sein de même réseau.
- ✓ Le Hard Handover inter-systèmes qui permet au terminal mobile de passer d'un système à un autre comme d'un mode FDD à un mode TDD ou pour passer à un système 2G [5].

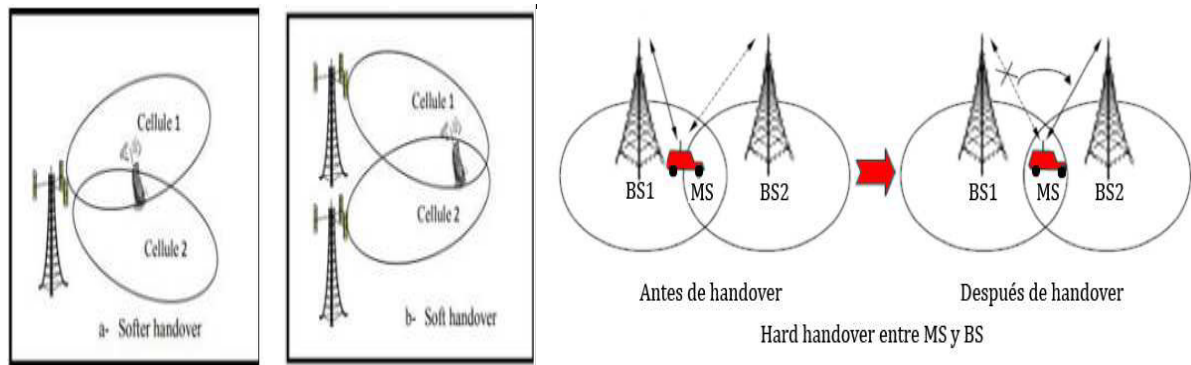


Figure 1.3: Principe du soft/softerhandover et hard handover

1.2.5- Les caractéristiques fondamentales de la 3G

❖ Débits du réseau 3G

C'est la quantité d'informations transmise via un canal de communication selon un intervalle de temps donné. Le débit d'une connexion internet s'exprime généralement en kbps (kilobit par seconde).

Le débit est différent suivant le lieu d'utilisation et la vitesse de déplacement de L'utilisateur :

- En zone rurale : 144 kbit/s pour une utilisation mobile (voiture, train, etc.) ;
- En zone urbaine : 384 kbit/s pour une utilisation piétonne.
- En zone bâtiment : 2000 kbit/s depuis un point fixe.

Grâce à son débit, l'UMTS ouvre la porte à des applications et services nouveaux.

L'UMTS permet en particulier de transférer dans des temps relativement courts des contenus multimédias tels que les images, les sons et la vidéo [6].

❖ La Latence

Le temps de latence sur le réseau UMTS (3G/3G+) -temps aller-retour de type ping- est nettement inférieur (de 2 à 3 fois) au temps de latence du réseau GPRS. A titre d'exemple (*), actuellement les temps de latence sont en moyenne de :

- 300 ms pour des paquets de 32 octets (entre 220 ms et 380 ms).
- 450 ms pour des paquets de 512 octets (entre 350 ms et 550 ms).
- 620 ms pour des paquets de 1500 octets (entre 500 ms et 750ms).

Ces faibles temps de latence (ainsi que le débit accru offert par l'UMTS (3G/3G+) permettent par exemple :

- D'améliorer le chargement d'une page web (riche en ressource de type image).
- Augmenter les usages sur les applications de déport d'écran ou d'administration telles que TSE (protocole RDP), CITRIX (protocole ICA), VNC, TELNET, SSH ... [7].

➤ La **latence** (ou délai de transit, ou retard) est le délai de transmission dans les communications informatiques. Il désigne le temps nécessaire à un paquet de données pour passer de la source à la destination à travers un réseau.

❖ Le Spectre de fréquence

Deux plages ont été réservées au TDD, soit 35 MHz chacune. Le FDD occupe quant à lui 120 MHz de spectre apparié, soit 60 MHz pour la voie montante (FDD-UL) et 60 MHz pour la voie descendante (FDD-DL). En Europe par exemple, les fréquences retenues sont 1900- 2025 MHz et 2110 à 2200 MHz. En 1997, la CEPT (Conférence européenne des postes et télécommunications) a précisé la répartition des deux modes d'accès retenus dans ces bandes (voir figure 1.4) [8] :

- 1 900 à 1 920 MHz : TDD.
- 1 920 à 1 980 MHz : FDD-UL, sens mobile vers Node B.
- 2010 à 2 025 MHz : TDD.
- 2110 à 2 170 MHz : FDD-DL, sens Node B vers mobile.

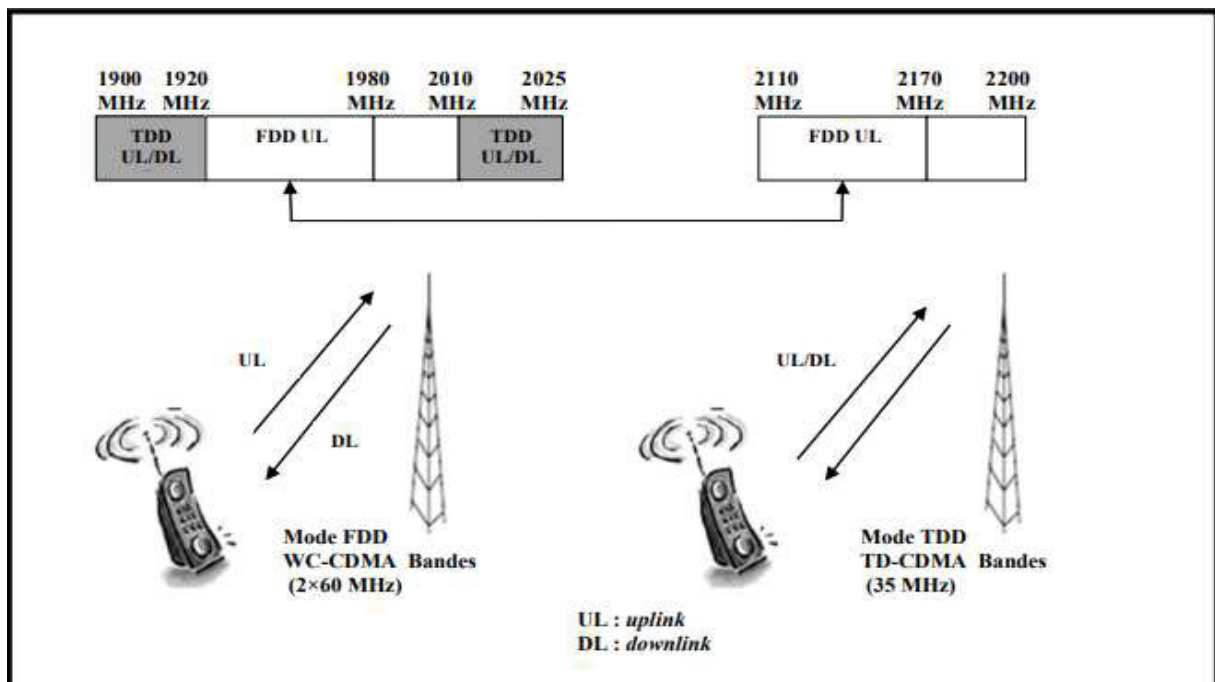


Figure 1.4: Interfaces radio et fréquences.

1.3- L'LTE

1.3.1- Introduction

Les services de communications mobiles sont en train de suivre la même évolution que celle des services fixes, c'est-à-dire une transition accélérée vers l'accès à très haut débit. Ce sont les réseaux 4G qui permettent de répondre aux demandes croissantes des usages mobiles, tant en termes de qualité des services offerts que de capacité d'écoulement du trafic par les réseaux.

Ces fréquences sont destinées au déploiement de réseaux mobiles à très haut débit, pour apporter au consommateur une capacité et une qualité de services supérieures aux offres actuelles l'internet mobile. La technologie LTE « Long Term Evolution » offre aux utilisateurs des débits de plusieurs dizaines de Mbit/s, largement supérieurs aux performances des technologies 3G et 3G+ actuellement déployées, ainsi que des latences plus faibles favorisant une meilleure interactivité.

Avec la 4G, on se dirige vers la transmission de toutes les informations, voix et données par IP, c'est plus facile et moins cher à gérer. Ça facilite aussi le développement d'applications multimédias.

Cette génération permet des vitesses de téléchargement plus rapides et des temps de latence plus courts [9].

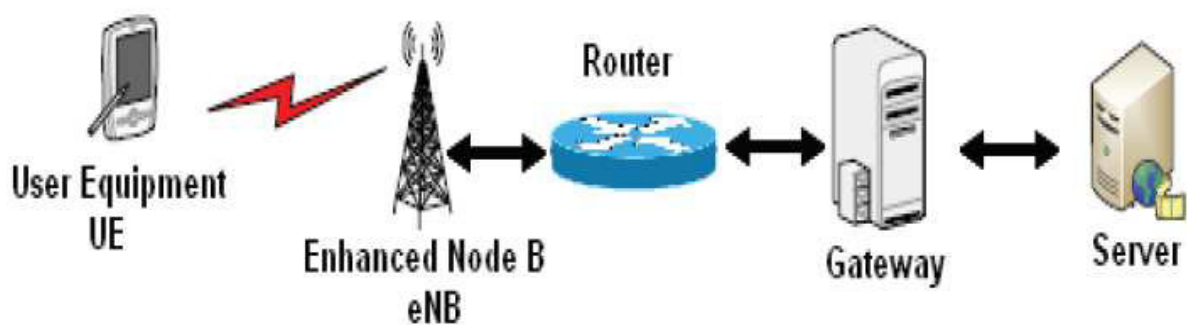


Figure 1.5: Présentation générale sur le système LTE.

1.3.2- But de la 4G

La 4^{ème} génération vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et à offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant

l'interopérabilité entre différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparents pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire, et à basculer l'utilisation vers le tout-IP.

Les principaux objectifs visés par les réseaux de 4^{ème} génération sont les suivants :

- Assurer la continuité de la session en cours.
- Réduire les délais et le trafic de signalisation.
- Fournir une meilleure qualité de service.
- Optimiser l'utilisation des ressources.
- Réduire le délai de relèvement, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets.
- Minimiser le coût de signalisation [9].

1.3.3- Architectures

Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences hertziennes, y compris dans les cellules radio mitoyennes, grâce aux codages radio OFDMA et SC-FDMA. La figure 1.6 présente l'architecture du réseau LTE.

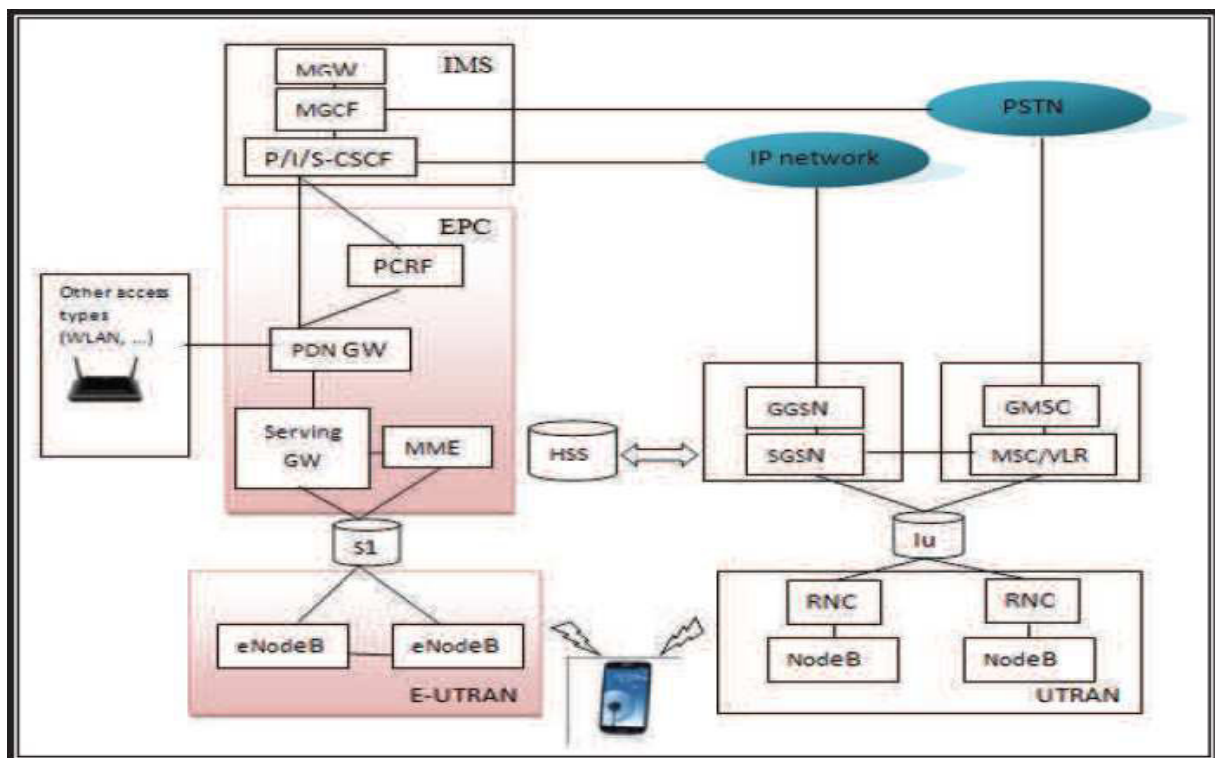


Figure 1.6: Architecture générale du LTE

❖ **EPC (Evolved paquet core)**

Le réseau central CN (appelé aussi EPC) est responsable du contrôle général de l'UE et de l'établissement des porteurs. Les principaux nœuds logiques de l'EPC sont :

▪ **Passerelle PDN (P-GW)**

Le P-GW est responsable de l'attribution d'adresses IP pour l'UE, ainsi que de la Qualité de service application et tarification basée sur les flux conformément aux règles de la PCRF. Le P-GW est responsable du filtrage des paquets IP des utilisateurs des liaisons descendantes dans les différents systèmes basés sur la qualité de service [10].

▪ **Desservant GateWay (S-GW)**

Tous les paquets IP d'utilisateur sont transférés via le S-GW, qui sert d'ancre de mobilité locale pour les supports de données lorsque l'UE se déplace entre les nœuds eNodeB. Il conserve également les informations sur les supports lorsque l'UE est à l'état de repos et met temporairement en mémoire tampon les données de liaison descendante pendant que la MME lance la pagination de l'UE pour rétablir les supports [10].

▪ **Entité de gestion de la mobilité (MME)**

La MME est le nœud de contrôle qui traite la signalisation entre l'UE et le CN. Les protocoles fonctionnant entre l'UE et le CN sont connus sous le nom de Protocoles de strate non d'accès (NAS). Les principales fonctions supportées par le MME sont classées comme suit :

- Fonctions liées à la gestion des supports. Ceci inclut l'établissement, la maintenance et la libération des supports, et est géré par la couche de gestion de session dans le protocole NAS.

- Fonctions liées à la gestion des connexions. Cela comprend la mise en place de la connexion et la sécurité entre le réseau et l'UE [10].

▪ **PCRF**

Le PCRF est responsable de la prise de décision en matière de contrôle des politiques, ainsi que du contrôle des fonctionnalités de taxation basées sur le flux dans la fonction d'application du contrôle des politiques (PCEF), qui fait partie du P-GW. La fonction PCRF fournit l'autorisation de qualité de service (identificateur de classe de qualité de service et débits binaires) qui détermine la manière dont un certain flux de données sera traité dans le PCEF et veille à ce que cela soit conforme au profil d'abonnement de l'utilisateur [10].

❖ Le réseau d'accès

Le réseau E-UTRAN est responsable de toutes les fonctions liées à la radio, qui peuvent être résumées brièvement comme suit :

- Gestion des ressources radio. Cela couvre toutes les fonctions liées aux supports radioélectriques, telles que le contrôle du support radioélectrique, le contrôle de l'admission radioélectrique, le contrôle de la mobilité radioélectrique, la planification et l'allocation dynamique de ressources aux équipements d'utilisateur, à la fois en liaison montante et en liaison descendante.
- Compression d'en-tête. Cela permet de garantir une utilisation efficace de l'interface radio en compressant les en-têtes de paquets IP, ce qui pourrait autrement représenter une surcharge importante, en particulier pour les petits paquets tels que la VoIP.
- Sécurité. Toutes les données envoyées sur l'interface radio sont cryptées.
- Positionnement. L'E-UTRAN fournit les mesures et autres données nécessaires à l'E-SMLC et assiste celui-ci dans la recherche de la position de l'équipement d'utilisateur.
- Connectivité à l'EPC. Cela consiste en la signalisation vers la MME et le chemin support vers le S-GW [10].

❖ La partie IMS (IP Multimedia Sub-system)

L'IP MultiMedia Sub-system (IMS) est une architecture standardisée NGN (Next Generation Network) pour les opérateurs de téléphonie, qui permet de fournir des services multimédias fixes et mobiles. Cette architecture utilise la technologie VoIP ainsi qu'une implémentation 3GPP standardisée.

Les systèmes téléphoniques existants (commutation de paquets et commutation de circuits) sont pris en charge. L'objectif d'IMS n'est pas seulement de permettre de nouveaux services, existants ou futurs, proposés sur Internet, les utilisateurs doivent aussi être capables d'utiliser ces services aussi bien en déplacement (situation de roaming) que depuis chez eux.

Pour cela, l'IMS utilise les protocoles standards IP. Ainsi, une session multimédia, qu'elle s'effectue entre deux utilisateurs IMS, entre un utilisateur IMS et un internaute, ou bien encore entre deux internautes, est établie en utilisant exactement le même protocole. De plus, les interfaces de développement de services sont également basées sur les protocoles IP. C'est pour cela que l'IMS fait véritablement converger l'Internet et le monde de la téléphonie cellulaire ; Il utilise les technologies cellulaires pour fournir un accès en tout lieu, et les technologies Internet pour fournir les services [11].

1.3.3. Les caractéristiques fondamentales de la 4G

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

❖ Le débit

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

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

Ces chiffres supposent une UE de référence comprenant :

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

❖ La latence

Nous avons vu que la latence du système se traduit concrètement par sa capacité à réagir des demandes d'utilisateurs ou de services. Elle se décline en latence du plan de contrôle et latence du plan usager.

✓ Latence du plan de contrôle

L'objectif fixé pour la LTE est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, via un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager.

✓ Latence du plan usager

La latence du plan usager est défini par le temps de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE et la couche IP d'un nœud du réseau d'accès ou inversement. En d'autres termes, la latence du plan usager correspond au délai de transmission d'un paquet IP au sein du réseau d'accès. La LTE vise une latence du plan usager inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille.

La LTE vise une latence du plan usager inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille.

Le tableau 1.1 présente les deux types de latence existante dans la LTE, ainsi que leurs différences dans les domaines de duplexage (FDD et TDD) [10].

<i>Latence du plan usager (ms)</i>		<i>Latence du plan de contrôle pour la transition de l'état de veille à actif (ms)</i>	
<i>FDD</i>	<i>TDD</i>	<i>FDD</i>	<i>TDD</i>
<i><5</i>	<i><= 6.2 EN DL</i> <i><= 9.5 EN UL</i>	<i>80</i>	<i>85</i>

Tableau 1.1: La latence pour chaque multiplexage.

❖ L'agilité en fréquence

La LTE doit pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande initialement requises ont par la suite été modifiées pour devenir les suivantes : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant. Notons que le débit crête est proportionnel à la largeur de bande. Les modes de duplexage FDD et TDD doivent être pris en charge pour toutes ces largeurs de bande.

❖ Codage et sécurité

L'utilisation du codage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est une technologie de codage radio de type « Accès multiple par répartition en fréquence » (AMRF ou en anglais FDMA) pour la liaison descendante et du SC-FDMA (Le single-carrier FDMA est une technologie de codage radio de type accès multiple par répartition en fréquence pour la liaison montante au lieu du W-CDMA en UMTS).

L'OFDMA et sa variante SC-FDMA sont dérivés du codage OFDM (utilisé par exemple sur les liens ADSL et dans les réseaux WiFi), mais contrairement à l'OFDM, l'OFDMA est

optimisé pour l'accès multiple, c'est-à-dire le partage simultané de la ressource spectrale (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs distants les uns des autres. L'OFDMA est compatible avec la technique des antennes MIMO [11].

❖ Multiplexage

Il existe deux modes de multiplexage de fréquences : Les spécifications LTE prévoient le fonctionnement en mode dual : multiplexage de fréquences (FDD) et multiplexage temporel (TDD). En mode FDD (Frequency Division Duplexing), l'émission et la réception se font à des fréquences différentes. En mode TDD, l'émission et la réception transitent à une même fréquence, mais à des instants différents.

C'est le premier mode (FDD) qui fait l'objet de l'appel à candidatures en France. C'est aussi celui qui est actuellement mis en œuvre dans les équipements télécoms et déployé dans la plupart des premiers réseaux 4G LTE autorisés. Le deuxième mode (TDD) fonctionne sur des bandes de fréquences distinctes qui feront l'objet d'attributions ultérieures [11].

❖ Structure d'une trame LTE

Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms mais Chaque Sous trame est divisée en deux slots de 0,5ms. Un slot dure donc 0,5 ms, durée pendant laquelle est transmis 7 symboles par bande OFDM. Or, nous avons vu qu'il y avait 12 bandes.

Par conséquent, $7 \text{ symboles} * 12 \text{ bandes} = 84 \text{ symboles}$ sont transmis en 0,5 ms. La figure 1.8 présente la trame radio dans le réseau LTE.

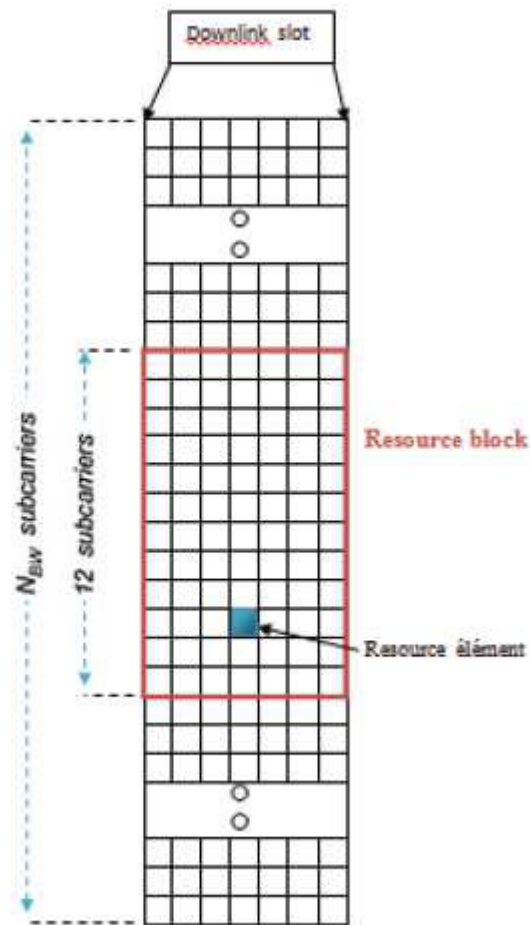


Figure 1.7: Le fonctionnement d'une trame radio.

1 symbole peut transmettre 1 bit à 6 bits selon la modulation choisie (QPSK à 64 QAM). Par exemple, 1 symbole représente un carton, et dans un carton nous pouvons avoir une boîte ou 6 boîtes. Si nous souhaitons transporter le plus de boîte, nous avons intérêt à mettre 6 boîtes par carton, ce qui fragilise encore plus le transport, nous favoriserons donc le 128 QAM (6 bits à transmettre) si le mobile et la station de base sont proches (transport peu éloigné entre le point A et le point B).

Les transmissions downlink et uplink sont organisés en deux types de structures qui sont :

- Structure de type 1 : duplex de fréquence division FDD.
- Structure de type 2 : duplex par séparation temporelle TDD [11].

A. Structure de type 1 : FDD

FDD (Frequency Division Duplexing) désigne une méthode de duplexage dans le domaine des télécommunications sans fil. L'émission et la réception des données se font à des fréquences différentes ; autrement dit, la fréquence de la porteuse du signal est différente suivant que le sens de la liaison est montant ou descendant.

Cette technique permet d'émettre et de recevoir simultanément, c'est son principal avantage face à l'autre technique majeure de duplexage, le Time Division Duplexing (TDD).

La figure 1.9 présente la trame FDD :

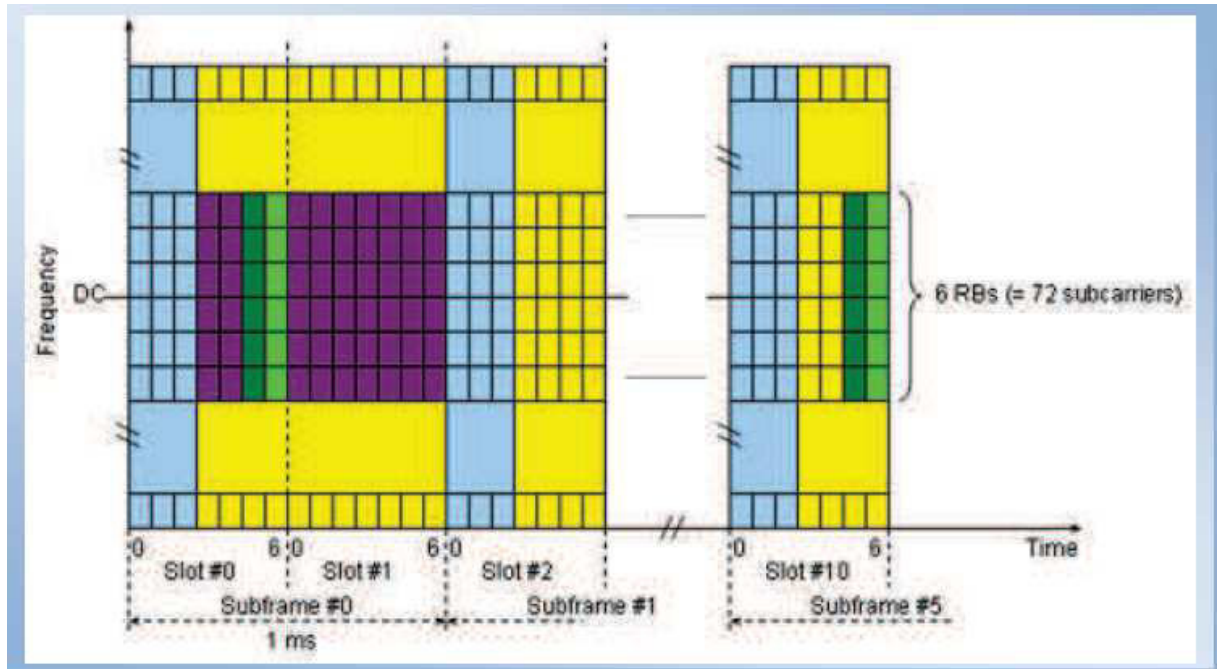


Figure 1.7: Un signal LTE dans une carte à deux dimensions.

Nous pouvons représenter un signal LTE dans une carte à deux dimensionnelle comme indiqué dans la figure 1.8 L'axe horizontal est le domaine de temps et l'axe vertical est le domaine de fréquence. L'unité minimale sur l'axe vertical est un transporteur sous et l'unité minimale sur l'axe horizontal est le symbole. Tant Pour le domaine de temps que le domaine de fréquence, il y a hiérarchies multiples des unités, signifiant une combinaison multiple d'une unité plus petite devient de plus grandes unités [11].

B. Structure de type 2 : TDD

Le Duplex par séparation temporelle TDD (Time-Division Duplex) est une technique permettant à un canal de télécommunication utilisant une même ressource de transmission (un canal radio par exemple) de séparer dans le temps l'émission et la réception.

Cette technique présente un avantage certain dans le cas où les débits d'émission et de réception sont variables et asymétriques. Lorsque le débit d'émission augmente ou diminue, davantage ou moins de bande passante peut être allouée. Un autre avantage de cette technique

concerne les terminaux mobiles se déplaçant à très faible vitesse ou en position fixe. Dans ce cas, la technique de "beamforming" est très efficace avec un système TDD [11].

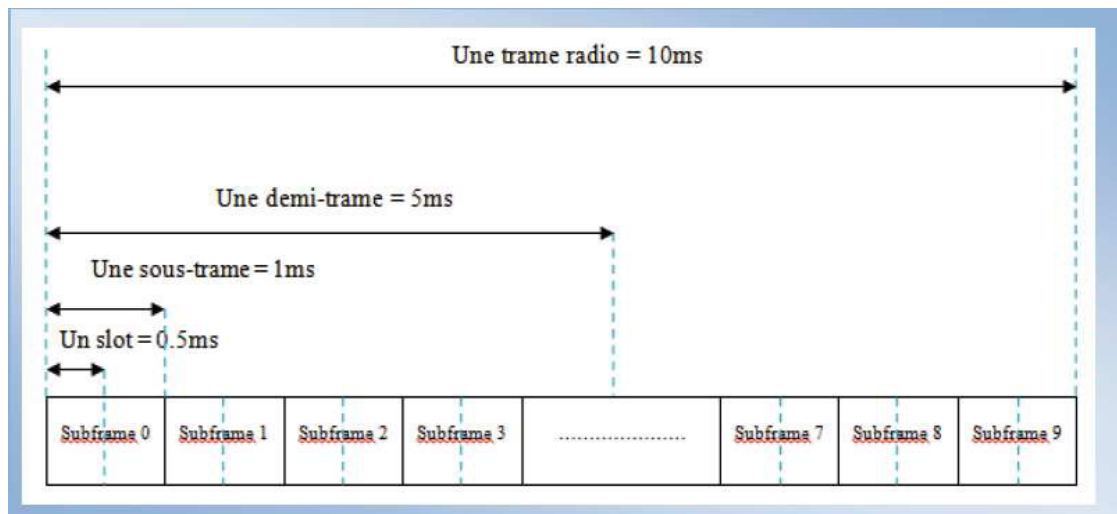


Figure 1.8: Un signal LTE dans une carte à deux dimensionnelle avec le TDD

1.4- L'UMTS vs la LTE

Caractéristiques	UMTS	LTE
Formulaire complet	Système de télécommunications mobiles universelles	Evolution à long terme
Bande passante du canal	5 MHz, 10 MHz avec 2 porteuses (HSDPA), 10 MHz avec 2 porteuses (HSUPA), 20 MHz avec 4 porteuses HSDPA	Prend en charge 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz
Schéma d'accès	Il supporte WCDMA	Prend en charge OFDMA dans la liaison descendante SC-FDMA (dans la liaison montante)
Architecture plate	Non, comprend RNC	Oui

Fréquence réutilisation	Réutilisation de 1	Réutilisation de 1
Prise en charge souple	Oui pour DCH et HSUPA non pour HSDPA	Non
Prise en charge rapide du contrôle de l'alimentation	Oui pour DCH et HSUPA Non pour HSDPA	Non, contrôle de puissance plus lente utilisé pour la liaison montante.
Modulation de liaison montante	QPSK, 16QAM pour HSUPA en 3GPP R7	QPSK, 16QAM, 64QAM
Modulation sur la liaison descendante	QPSK, 16QAM pour HSDPA dans 3GPP R5 64QAM pour HSDPA dans 3GPP R7	QPSK, 16QAM, 64QAM
Le numéro de canal	Le numéro de canal UMTS est appelé UARFCN.	Le numéro de canal LTE est appelé EARFCN
Types de canaux	Divisé en canaux logiques, canaux de transport et canaux physiques.	Divisé en canaux logiques, canaux physiques et canaux de transport.
Modulation adaptative	Oui pour HSDPA et HSUPA	Oui
Support ARQ hybride	Non pour DCH Oui pour HSDPA et HSUPA	Oui
Programmation BTS	Non pour DCH, oui pour HSDPA et HSUPA	Oui
Planification du voisinage	Oui	Oui

Planification de l'identité des cellules de la couche physique	Non	Oui
Assistance MIMO	Non pris en charge sur la liaison montante, MIMO sur la liaison descendante : 2x2 pour HSDPA dans 3GPP R7	Non pris en charge sur les liaisons MIMO de liaison montante et de liaison descendante: 2x2,4x4, LTE Advanced prend en charge la technologie MIMO 8x8, multi-utilisateurs et coopérative
Débit maximum en liaison montante	23 Mbps (10 MHz, 16 QAM, taux de codage-1)	85 Mbps (20 MHz, 64 QAM, taux de codage-1, CP normal, 2 RB PUCCH / emplacement)
Débit maximal en liaison descendante	86 Mbps (10 MHz, 64 QAM, 2X2 MIMO, vitesse de codage-1, 15 codes HS-PDSCH / porteuse)	325 Mbps (canal de 20 MHz, 64QAM, 4x4MIMO, taux de codage-1, CP normal, symbole / sous-trame 1PDCCH)

Tableau 1.2: L'UMTS vs la LTE.

1.5-Conclusion

LTE (Long Term Evolution) est la désignation technique de la 4G. Ce réseau permet de surfer jusqu'à 112,5 Mbits par seconde sur le réseau SFR. Elle permet donc une navigation bien plus rapide que la 3G, avec des temps de charge très courts et des temps de réaction rapides. Il s'agit de la meilleure expérience de surf sur le réseau mobile. Avec la 4G, le téléchargement d'un fichier est quasi instantané. Il est donc bien plus facile pour les collaborateurs de travailler à distance, et de s'envoyer mutuellement des documents de travail via le Cloud. Grâce à la 4G, vous téléchargez une pièce jointe de 2Mo d'un email en une seule seconde (il faut compter 6 secondes avec une connexion 3G). La rapidité de la lecture vidéo est une différence significative de la 4G, en comparaison avec la 3G. La 4G offre la possibilité de visionner une séquence HD avec un temps de téléchargement minime et un confort de lecture accru. Alors pour se la en vas-vous présenter la technique OFDM et son rôle dans un réseau LTE dans le chapitre suivant.



Chapitre 2 :

La Technologie OFDM



Chapitre 2 : La Technologie OFDM

2.1-Introduction

Un des problèmes majeurs en télécommunications est d'adapter l'information à transmettre au canal de propagation. Pour des canaux sélectifs en fréquence, une technique est l'utilisation de modulations multi-porteuses dans laquelle un bloc d'information est modulé par une transformée de Fourier. Cette technique connue sous le nom d'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a connu un vif succès ces dernières années et dans tous les futurs standards (Wi-MAX, LTE, IEEE802.11a). La technique OFDM a le grand mérite de transformer un canal multi-trajet large bande en un ensemble de sous-canaux mono-trajet très simples à égaliser. De plus, l'utilisation ingénieuse de redondance cyclique à l'émission permet de réduire la complexité des terminaux grâce à l'utilisation d'algorithmes à base de FFT rapides.

Le but de ce chapitre est d'introduire la technologie OFDM. Ainsi que ces caractéristiques (simplicité de l'égalisation, utilisation d'algorithmes FFT rapides...) et ses avantages et inconvénients et l'utilisation de cette technologie dans le réseau LTE.

2.2- Définition

L'Orthogonal Frequency Division Multiplexing est une technique de transmission de données analogique apparue dans les années 60. Pour émettre un signal, l'OFDM divise une plage de fréquence en plusieurs sous-canaux espacés par des zones libres de tailles fixes. Par la suite, un algorithme, le Fast Fourier Transform (FFT), véhicule le signal par le biais des différents sous-canaux. C'est également cet algorithme qui se charge de la recomposition du message chez le récepteur. L'objectif est ainsi d'exploiter au maximum la plage de fréquence allouée tout en minimisant l'impact du bruit grâce aux espaces libres séparant chaque canal.

2.3- Historique

Depuis leur apparition, les communications OFDM et plus largement les systèmes multi porteuses, connaissent un développement rapide dû au vif intérêt qui leur est porté, aussi bien par la communauté scientifique que par les industriels.

L'idée d'utiliser des porteuses fréquentielles avec recouvrement **FDM** (**F**requency **D**ivision **M**ultiplexing) robustes aux canaux sélectifs et permettant une égalisation peu complexe a vu le jour dans les années 1960. La difficulté majeure d'implantation de la modulation réside alors dans la nécessité de disposer d'une banque d'oscillateurs sinusoïdaux en émission pour générer les sous-porteuses et autant de démodulateurs cohérents en réception. Cette difficulté rend alors impossible l'exploitation des communications multi-porteuses et les transmissions OFDM ne suscitent alors qu'un intérêt académique. En 1971, Weinstein et Ebert proposent l'utilisation de la transformée de Fourier discrète afin de générer la modulation et la démodulation des signaux multi-porteuses. Cette avancée est alors déterminante pour les communications OFDM puisque les avancées dans le domaine du traitement des signaux numériques éliminent peu à peu les contraintes matérielles liées à la modulation.

L'implantation totalement numérique de la transformée de Fourier voit alors la démocratisation des communications OFDM.

A partir des années 90, les transmissions OFDM s'imposent graduellement dans un grand nombre de normes de communication [13].

2.4- Principe et fonctionnement de l'OFDM

Le principe de l'OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes. Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux [12]. Comme la montre la Figure 2.1 :

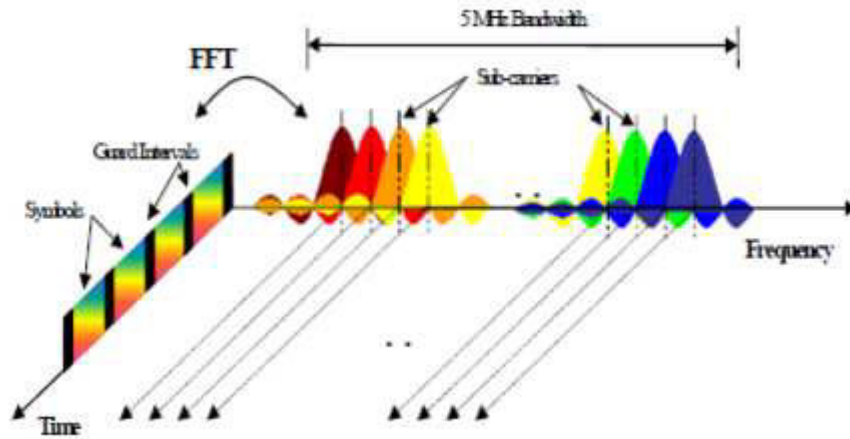


Figure 2.1: Représentation fréquentielle et temporelle d'un signal OFDM.

2.4.1- Principe de la modulation

Le principe du multiplexage en fréquence est de grouper des données numériques par paquets de N , qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par chaque donnée une porteuse différente en même temps.

Considérons une séquence de N données $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$

Appelons T_s la durée symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de N données.

Chaque donnée c_k module un signal à la fréquence f_k .

Le signal $s(t)$ total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t} \quad \text{Équation 2.1}$$

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est $1/T_s$.

Alors

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad \text{Équation 2.2}$$

et

$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{k}{T_s} t} \quad \text{Équation 2.3}$$

Voici le schéma de principe de la modulation [12].

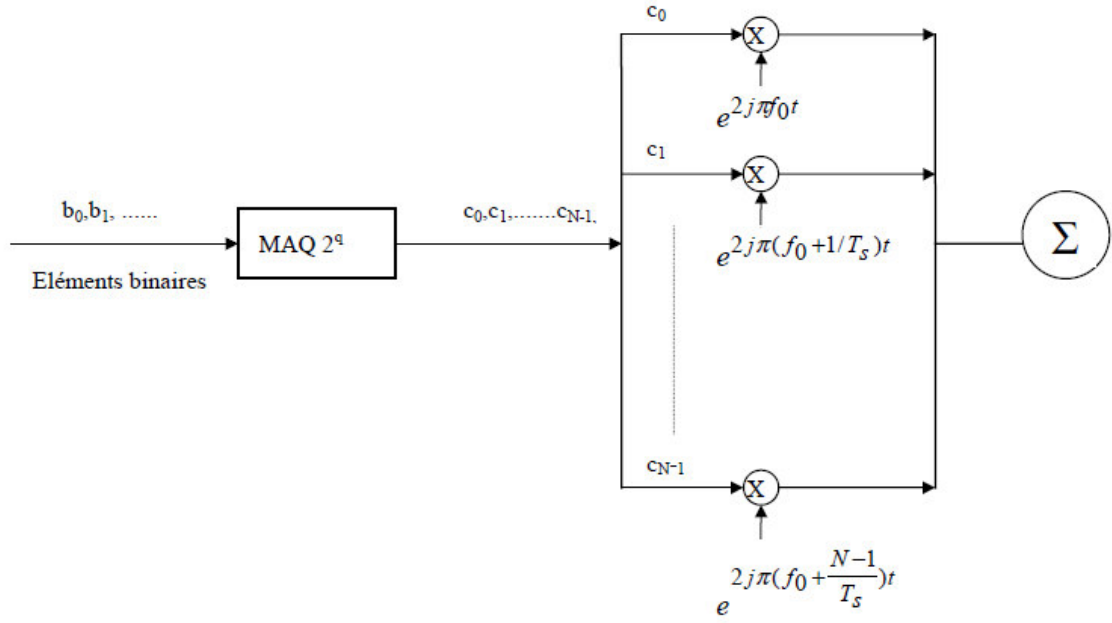


Figure 2.2: Schéma de principe d'un modulateur

Plus précisément les données numériques C_k sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation (mapping) de modulation d'amplitude en quadrature MAQ à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à 2^q états). Ces données sont des symboles q -aires formés par groupement de q bits. On les appelle symboles numériques. Il ne faut pas les confondre avec le symbole OFDM qui est un regroupement de N symboles numériques sur N porteuses. Alors, l'expression réelle du signal est :

Si :

$$C_k = a_k + jb_k \quad \text{Équation 2.4}$$

$$S(t) = \text{Re}(S(t)) = \sum_{k=0}^{N-1} (a_k + jb_k) e^{2j\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})t} \quad \text{Équation 2.5}$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t\right) - b_k \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t\right) \quad \text{Équation 2.6}$$

D'après l'expression du signal et la figure 2.2, le modulateur ainsi que le démodulateur devra comporter N modulateurs individuels. Pourquoi « orthogonal » ? Nous allons déterminer le spectre du signal OFDM.

Chaque porteuse modulant une donnée pendant une fenêtre de durée T_s , son spectre est la transformée de Fourier de la fenêtre. Et le spectre total est la somme des spectres individuels. La figure 2.3 montre que l'espace entre chaque sous-porteuse $1/T_s$, permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres : c'est la condition d'orthogonalité. (Orthogonal de OFDM). Cette condition d'orthogonalité permet

d'avoir un recouvrement entre les spectres des différentes sous-porteuses, et malgré ceci d'éviter les interférences entre sous-porteuse si l'échantillonnage est fait précisément à la fréquence d'une sous-porteuse. La figure 2.3 montre qu'alors, la bande en fréquence est occupée de façon optimum, puisque le spectre est presque plat dans cette bande. La bande occupée est à peu près $B=N/t_s$, (en excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande), chaque sous-porteuse occupant à peu près $1/T_s$.

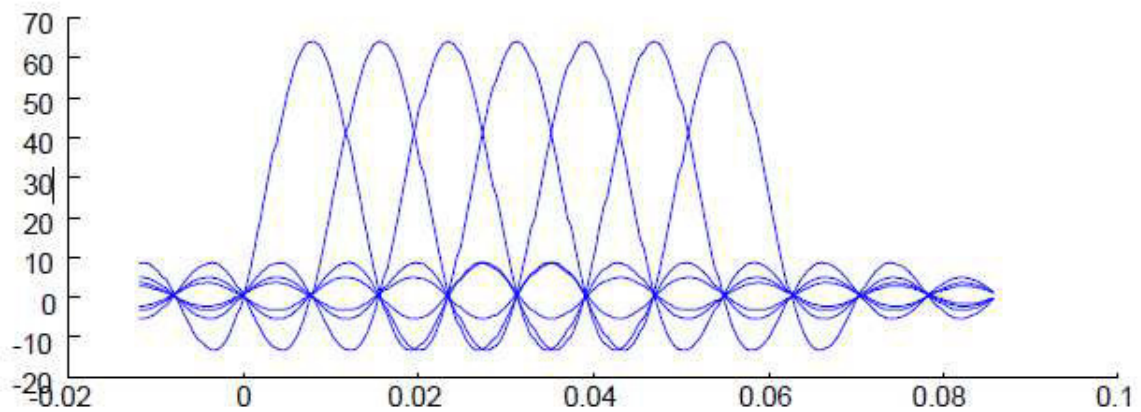


Figure 2.3: Spectres des différentes porteuses.

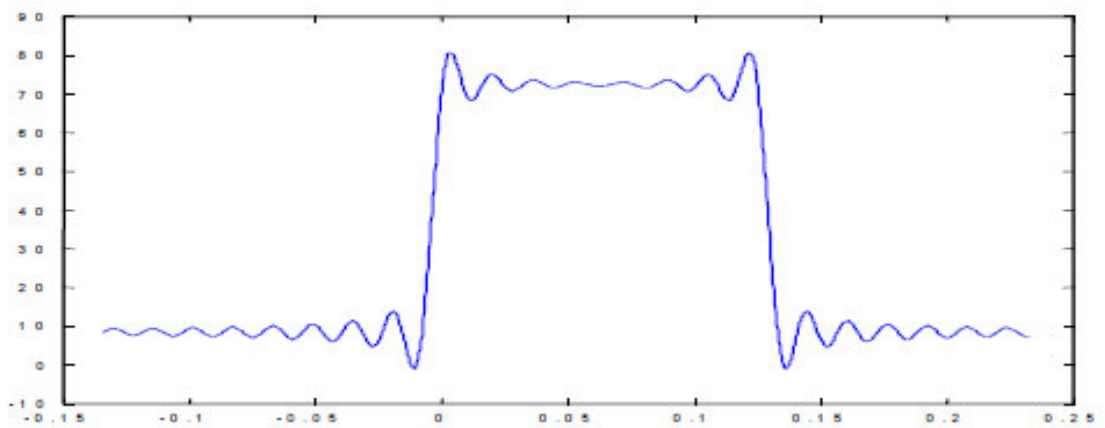


Figure 2.4: Spectre du signal OFDM pour 8 porteuses.

Remarque :

Si le symbole C_k transporte q bits, le débit total est (nombre de bits par seconde) $qN/t_s = qB$. Pour une largeur de bande utilisée, le débit ne dépend pas de la durée des symboles ni du nombre de porteuses. Si on augmente la durée des symboles t_s , le spectre de chaque porteuse $1/t_s$, devient plus étroit et on peut augmenter le nombre de porteuses.

La réalisation suivant le schéma de principe nécessiterait N modulateurs. Mais l'expression mathématique du signal 1, montre qu'on peut le considérer comme la transformée de Fourier inverse des symboles numériques C_k .

Le principe de la démodulation dépend des perturbations subies par le signal après son passage dans le canal. Les modulations multi-porteuses sont particulièrement utiles pour des canaux comportant des échos multiples.

En effet, pour l'OFDM, la bande de fréquence totale B est divisée en N sous-bandes $B_k \ll B_c$, mais la bande totale utilisée $B = N B_k$ peut être $\gg B_c$, donc chaque sous-porteuse voit un canal constant mais parmi toutes les sous-porteuses, certaines sont affaiblies d'autres amplifiées.

De même chaque signal d'une sous-porteuse donnée est émis idéalement pendant la période symbole OFDM T_s doit être $\ll 1/B_d$ pour que sur chaque sous-porteuse le canal soit considéré comme invariant dans le temps. Par contre, il peut varier sur plusieurs symboles [15].

2.4.2- Principe de la démodulation

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

$$Y(t) = \sum_{k=0}^{n-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi\left(f_0 + \frac{k}{T_s}\right)t} \quad \text{Équation 2.7}$$

$H_k(t)$ est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence f_k et au temps t . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période T_S ($T_s \ll 1/B_d$). La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les N sous-porteuses suivant le schéma classique [12].

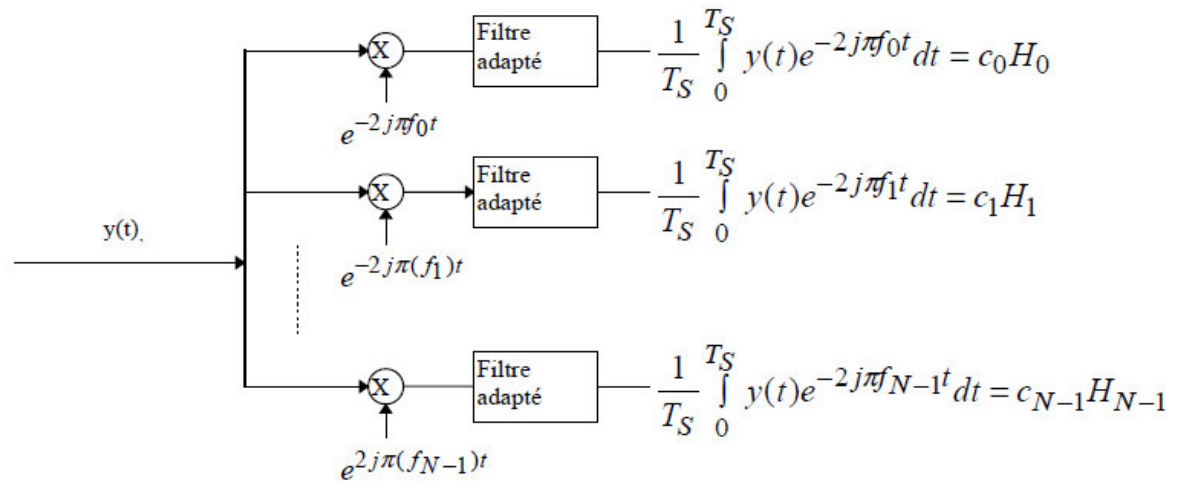


Figure 2.5: Schéma de principe du démodulateur OFDM

2.4.3- Principes du modulateur et du démodulateur utilisant les transformées de Fourier discrètes

Pour discrétiser, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage. Voyons comment la démodulation impose cette fréquence : Le signal occupe la bande passante B autour de la fréquence d'échantillonnage f_0 comme le montre le schéma suivant :

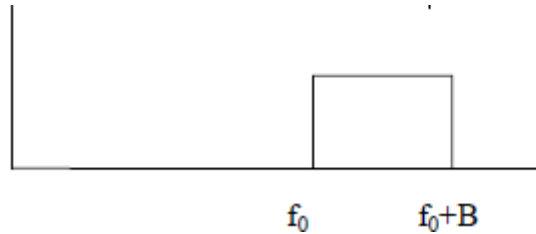


Figure 2.6: Principe de la fréquence d'échantillonnage

Pour démoduler, on va d'abord transposer le signal en bande de base, donc effectuer une translation de $f_0+B/2$, fréquence médiane de la bande.

Le spectre occupera la bande $[-B/2, B/2]$, comme on le voit sur le schéma suivant :

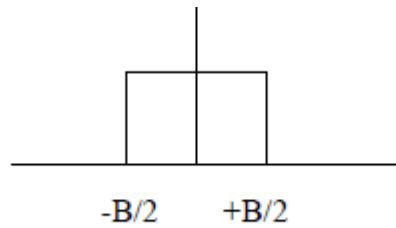


Figure 2.7: Principe de la démodulation de la fréquence d'échantillonnage

La bande passante du signal étant $B/2 = N/2 T_s$, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à $2B/2$ soit N/T_s . L'échantillonnage se fera aux temps $t_n = nT_s / N$. La chaîne de transmission est schématiquement la suivante :

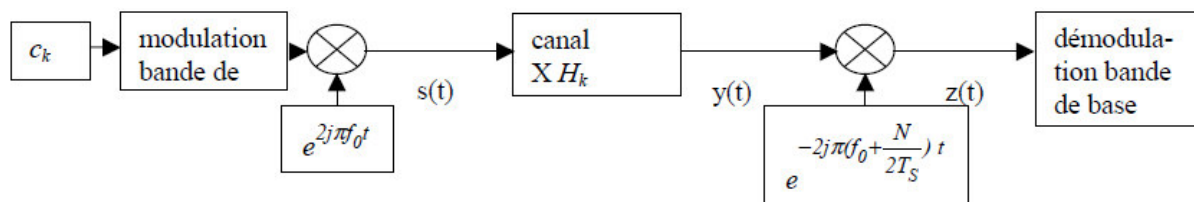


Figure 2.8: Chaîne de transmission

Le signal reçu en bande de base après le décalage en fréquence de $f_0 + B/2$ s'écrit alors :

$$Z(t) = y(t) e^{-2j\pi(f_0 + \frac{N}{T_s})t} = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi(k-n/T_s)t} \quad \text{Équation 2.8}$$

Puis après l'échantillonnage :

$$Z(t_n) = Z(nt_s/N) = Z_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad \text{Équation 2.9}$$

On voit que Z_n est la Transformée de Fourier discrète inverse de C_k et H_k , la démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier directe discrète. L'intérêt de cette discrétisation est qu'on peut réaliser ces transformées de Fourier à l'aide d'algorithmes de FFT (direct) et IFFT (inverse) [15].

Les schémas de principes du démodulateur se simplifie :

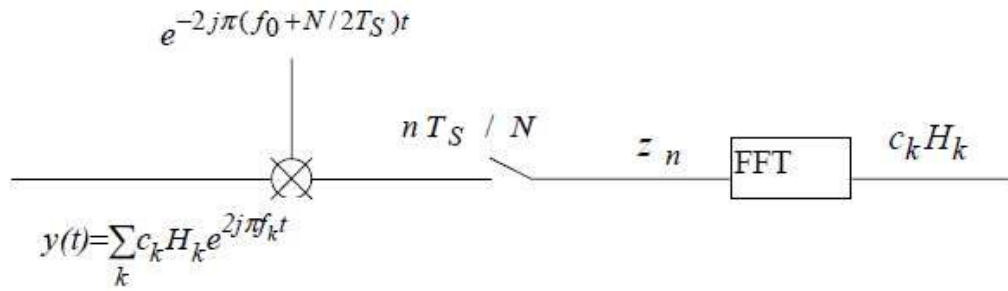


Figure 2.9: Schéma de principe du démodulateur OFDM

Si on pose que le signal modulé en bande de base $s(t)$ est lui aussi discrétisé, les échantillons S_n s'écrivent :

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad \text{Équation 2.10}$$

Le schéma de principe du modulateur est le suivant :

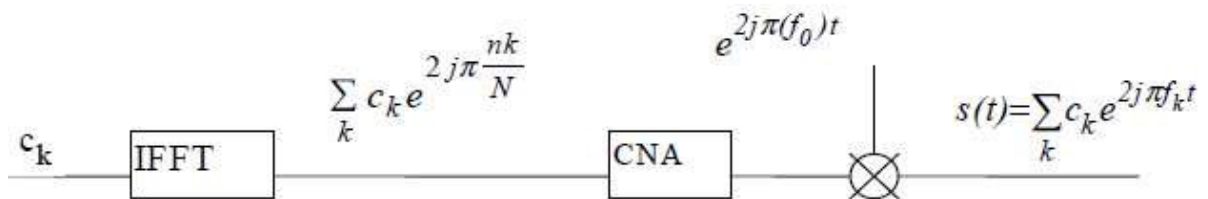


Figure 2.10: Schéma de principe du modulateur

Physiquement, les symboles numériques c_k sont les données dans l'espace fréquentiel, les échantillons du signal S_n sont les données dans l'espace temporel puisqu'on passe des premières aux secondes par une transformée de Fourier inverse. Les spectres du signal OFDM est formé des c_k placés aux fréquences f_k , autour de ces données le spectre s'élargit suivant un sinus cardinal à cause du spectre de la fenêtre temporelle TS [14].

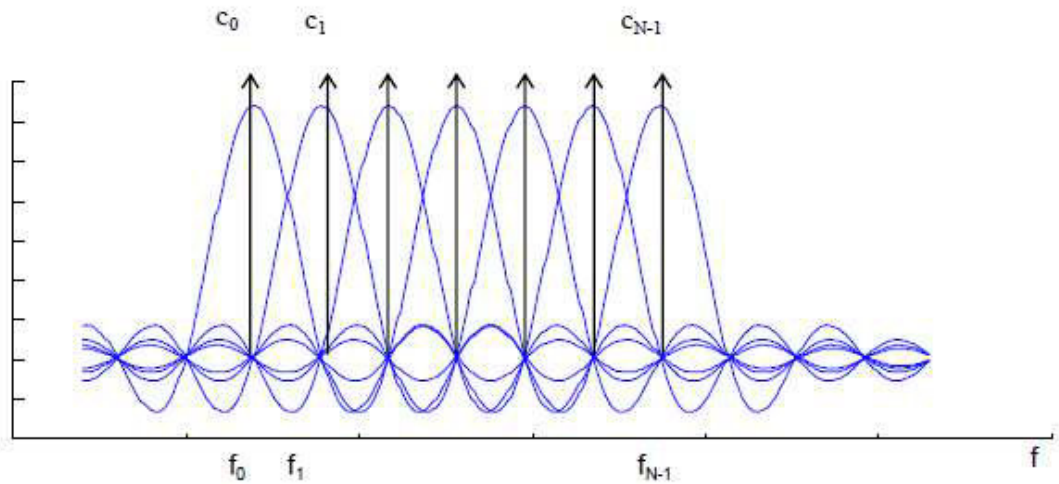


Figure 2.11: Spectre du signal OFDM

Remarque :

- La période d'échantillonnage est la durée des symboles numériques issus de la constellation.
- Revenons sur l'échantillonnage à la démodulation : Le spectre après échantillonnage est le suivant (la fréquence d'échantillonnage est B bande occupée par le signal OFDM) :

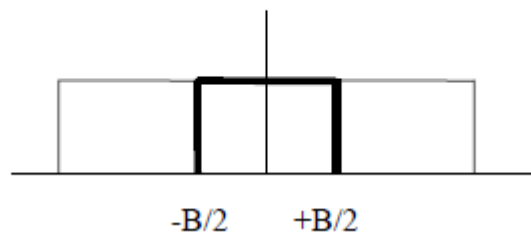


Figure 2.12: Spectre après échantillonnage

2.5- FDM ou OFDM multi-porteuses

Le multiplexage par répartition en fréquence (**FDM**) est une technologie qui transmet plusieurs signaux simultanément sur un seul chemin de transmission, tel qu'un câble ou un système sans fil. Chaque signal se déplace dans sa propre gamme de fréquences (porteuse), qui est modulée par les données, par contre la technique de multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (**OFDM**) répartit les données sur un grand nombre de porteuses espacées à des fréquences précises. Cet espacement fournit « **l'orthogonalité** » dans cette technique qui empêche les démodulateurs de voir des fréquences autres que les leurs. Les avantages de **l'OFDM** sont une efficacité spectrale élevée, une résilience aux interférences RF et une distorsion multi-trajet plus faible [16].

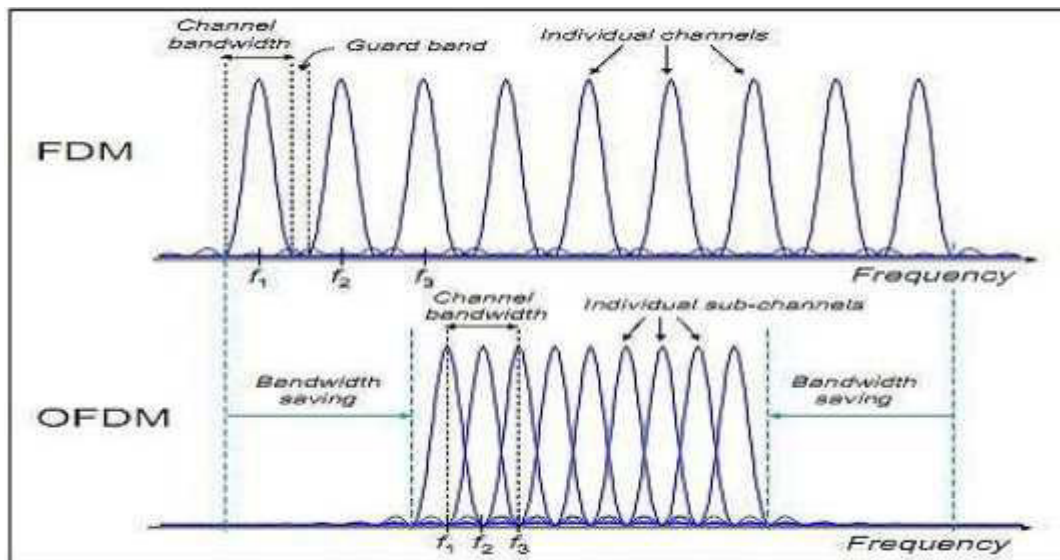


Figure 2.13: Différence entre la technique FDM et OFDM.

OFDM est en fait un cas particulier de la FDM. Pour FDM, il n'y a aucune relation spéciale entre fréquences porteuses, f_1 , f_2 et f_3 .

- **Channel bandwidth** : C'est la bande du canal.
- **Guard-band** : Une guard-band est une partie inutilisée du spectre électromagnétique entre deux bandes de fréquences qui permet d'éviter des interférences.

➤ Principales caractéristiques de l'OFDM

Le schéma OFDM diffère du modèle FDM traditionnel de la manière suivante :

- Plusieurs porteuses (appelées sous-porteuses) acheminent le flux d'informations
- Les sous-porteuses sont orthogonales les unes aux autres.
- Un intervalle de garde est ajouté à chaque symbole pour minimiser l'étalement du retard du canal et les interférences inter-symboles.

2.6- Modulation de chaque sous-porteuse du signal OFDM

Dans un système OFDM, les bits d'informations pour chaque sous-porteuse sont modulés par la modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying), ou QAM. On peut augmenter le débit binaire en augmentant le nombre d'états dans une constellation, entraînant une diminution de distance entre les points de la constellation, ce qui accroît la sensibilité du système au bruit. En général, la constellation de chaque sous-porteuse montre un changement aléatoire d'amplitude et de phase provoqué par l'environnement par trajets multiples. Parmi les modulations utilisées dans un système OFDM, la plus robuste est la modulation QPSK qui code 2 bits par symbole [15].

2.6.1- Modulation QPSK (Quaternary Phase Shift Keying)

La modulation QPSK code deux bits par symbole. Cette modulation permet d'augmenter l'efficacité spectrale sans modifier la bande passante allouée.

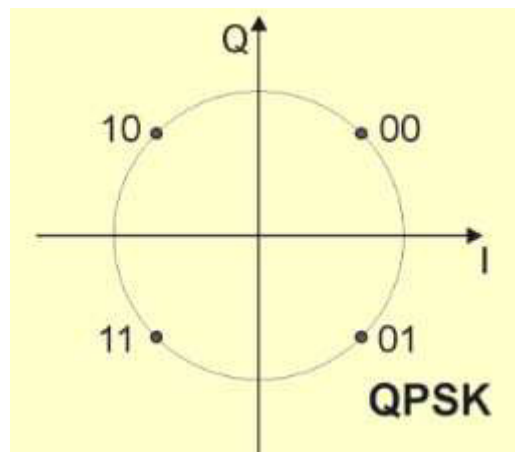


Figure 2.14: Modulation QPSK

2.6.2- Modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

La QAM ou Modulation d'amplitude en quadrature résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l'une de l'autre de 90° (d'où le nom de

quadrature). Elle peut aussi être vue comme une modulation de phase et d'amplitude. Elle permet des débits élevés avec une rapidité de modulation relativement faible. La QAM16 utilise 4 bits par symbole [15].

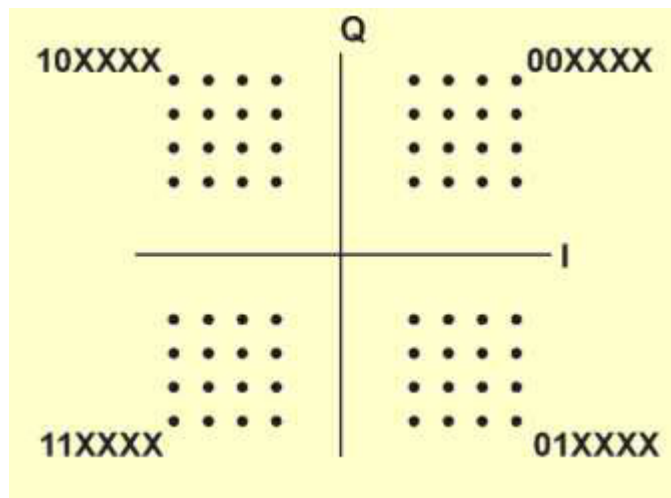


Figure 2.15: Principe de la modulation QAM

2.7- Intervalle de garde (préfixe cyclique)

Une des raisons importantes pour lesquelles on utilise la modulation OFDM est sa robustesse face aux problèmes de transmission dans un environnement à trajets multiples. Pour éliminer les interférences inter symboles (ISI), un intervalle de garde est rajouté pour chaque symbole OFDM. On choisit la durée de l'intervalle de garde de telle sorte qu'elle soit supérieure par rapport à une durée de retard maximal causé par les phénomènes de propagation à trajets multiples et qu'un symbole ne puisse pas interférer avec le prochain symbole [15].

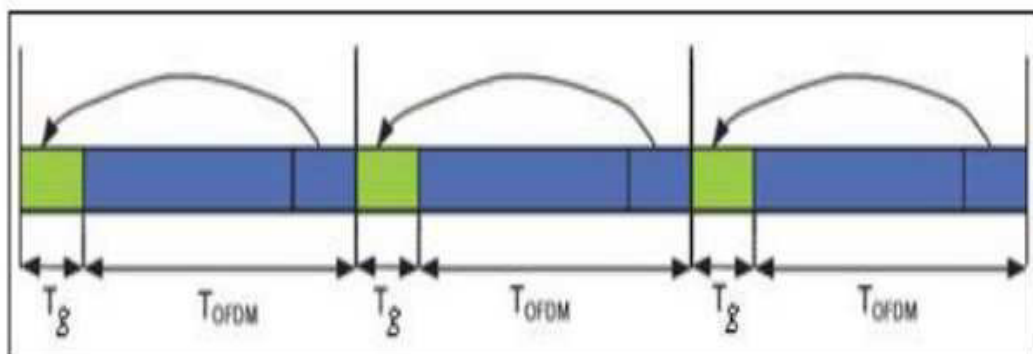


Figure 2.16: Insertion du préfixe cyclique.

La Figure 2.16, illustre l'insertion d'un intervalle de garde dans un symbole OFDM. Les échantillons ajoutés au début du symbole pour former un intervalle de garde est la copie exacte des derniers échantillons du symbole OFDM. L'avantage de cette recopie est que chaque signal, issu d'un trajet multiple, possédera toujours un nombre entier de sinusoïdes sur la durée d'une trame OFDM sans son préfixe. Si le préfixe inséré au début d'une trame OFDM est muet (sans aucun signal), des interférences entre sous canaux (ICI) vont se produire. Afin d'éviter ces interférences, le préfixe ne doit pas être muet, mais être la recopie des derniers symboles de la trame OFDM. Dans le domaine fréquentiel, la sommation des signaux de la sous-porteuse issus des divers trajets ne détruira pas l'orthogonalité des sous-porteuses, elle introduira seulement un léger déphasage. Les interférences ISI se produisent lorsque le retard relatif est plus long que l'intervalle de garde. La durée du symbole OFDM transmis peut-être représentée comme suit :

$$T_s = T_g + T_u \quad \text{Équation 2.11}$$

Où T_g : Durée de l'intervalle de garde T_u : Durée du symbole OFDM après l'IFFT
Malheureusement, l'insertion d'un intervalle de garde diminue le taux de symbole, mais si le nombre de sous-porteuses est assez grand, la durée de symbole T_s devient assez importante par rapport à l'intervalle de garde. Par conséquent, le débit binaire sera réduit de peu.

➤ Préfixes cycliques avantages et inconvénients :

L'utilisation du préfixe cyclique au sein de l'OFDM présente plusieurs avantages et inconvénients.

Avantages

- **Fournit la robustesse :** l'ajout du préfixe cyclique ajoute de la robustesse au signal OFDM. Les données retransmises peuvent être utilisées si nécessaire.
- **Réduit les interférences entre symboles :** L'intervalle de garde introduit par le préfixe cyclique permet de réduire les effets d'interférences entre symboles.

Désavantages

- **Réduction de la capacité de données :** lorsque le préfixe cyclique retransmet des données déjà en cours de transmission, il utilise la capacité du système et réduit le débit de données global.

L'utilisation d'un préfixe cyclique est standard dans OFDM et permet de maintenir les performances même dans les conditions où les niveaux de réflexion et de propagation par trajets multiples sont élevés [17].

2.8- Les différents types de technique OFDM

✓ C-OFDM (Coded-OFDM)

- C-OFDM offre un réel avantage en la présence de signaux d'interférence à bande étroite isolées.

✓ MIMO-OFDM (Multiple Inputs, Multiple Outputs-OFDM)

- Utilise plusieurs antennes pour transmettre et recevoir des signaux radio.
- Multiplexage spatial.

✓ V-OFDM (Vector -OFDM)

Développé par CISCO.

- Augmente la couverture de l'abonné.
- Réduit le coût de provisionnement et le déploiement des infrastructures.
- Emploie la fréquence et la diversité spatiale.
- Crée une technique de traitement robuste pour trajets multiples et les interférences à bande étroite.

✓ W-OFDM (Wideband OFDM)

- Inventé par Wi-LAN.
- Grand écart entre les transporteurs.

✓ Flash-OFDM

- La technologie à étalement de spectre large bande.
- Évite les compromis inhérents à d'autres systèmes de données mobiles.
- Capacité de contourner les signaux parasites [17].

2.9- Les Systèmes utilisent OFDM

- DAB.
- HDTV.
- Les réseaux LAN sans fil.
- IEEE 802.11g.
- IEEE 802.16 Système d'accès sans fil à large bande.
- Système de transmission ATM sans fil.

- IEEE 802.11a.
- ADSL: Asymmetric Digital subscriber line.
- PLC : Power line communication [17].

2.10- Synchronisation OFDM & synchronisation de fréquence

Une synchronisation précise du rythme et de la fréquence est nécessaire pour une démodulation OFDM optimale, sinon les niveaux de brouillage augmentent et d'autres problèmes de démodulation se posent [18].

Une des conditions clés pour une démodulation optimale des signaux OFDM est la précision de la synchronisation de fréquence et de synchronisation.

Heureusement, il est relativement facile d'obtenir une synchronisation OFDM et une synchronisation de fréquence satisfaisantes, car des signaux précis sont faciles à obtenir.

Une synchronisation de fréquence médiocres entraîne des niveaux importants de dégradation du signal, de sorte que cet aspect de la chaîne de signal est essentiel pour des performances optimales.

❖ Principes de base de la synchronisation OFDM

L'OFDM offre de nombreux avantages en termes de résistance aux évanouissements, réflexions, etc. OFDM offre également un haut niveau d'efficacité spectrale. Cependant, pour en récolter les fruits, il est nécessaire que le système OFDM fonctionne correctement. Pour ce faire, il est nécessaire que la synchronisation OFDM soit efficace [18].

La synchronisation OFDM est essentielle au bon fonctionnement du système dans un certain nombre de domaines :

- **Synchronisation OFDM en termes de décalage de fréquence** : Il est nécessaire que les fréquences soient suivies avec précision pour garantir le maintien de l'orthogonalité.
- **Synchronisation OFDM en termes de précision d'horloge** : il est nécessaire que l'échantillonnage ait lieu à un intervalle de temps correct pour garantir que les échantillons sont synchronisés et que les erreurs de données sont minimisées.

Pour que le système OFDM fonctionne au mieux, il est nécessaire de s'assurer que des mécanismes sont en place pour garantir que la synchronisation OFDM se situe dans les limites requises.

❖ Offset de fréquence Synchronisation OFDM

Il est particulièrement important que le démodulateur d'un récepteur OFDM soit capable de se synchroniser avec précision avec les porteuses contenues dans le signal OFDM. Des décalages peuvent survenir pour un certain nombre de raisons, notamment des erreurs de fréquence entre l'émetteur et le récepteur et des effets Doppler en cas de mouvement entre l'émetteur et le récepteur.

Si la synchronisation de fréquence est altérée, l'orthogonalité des porteuses est réduite dans le processus de démodulation et les taux d'erreur augmentent. En conséquence, il est essentiel de maintenir l'orthogonalité pour réduire les erreurs et maintenir les performances du lien.

Tout d'abord, regardez comment cet échantillonnage devrait avoir lieu. Avec le démodulateur en synchronisation, toutes les contributions des autres opérateurs sont égales à zéro, comme indiqué. De cette manière, toutes les porteuses sont orthogonales et le taux d'erreur est minimal.

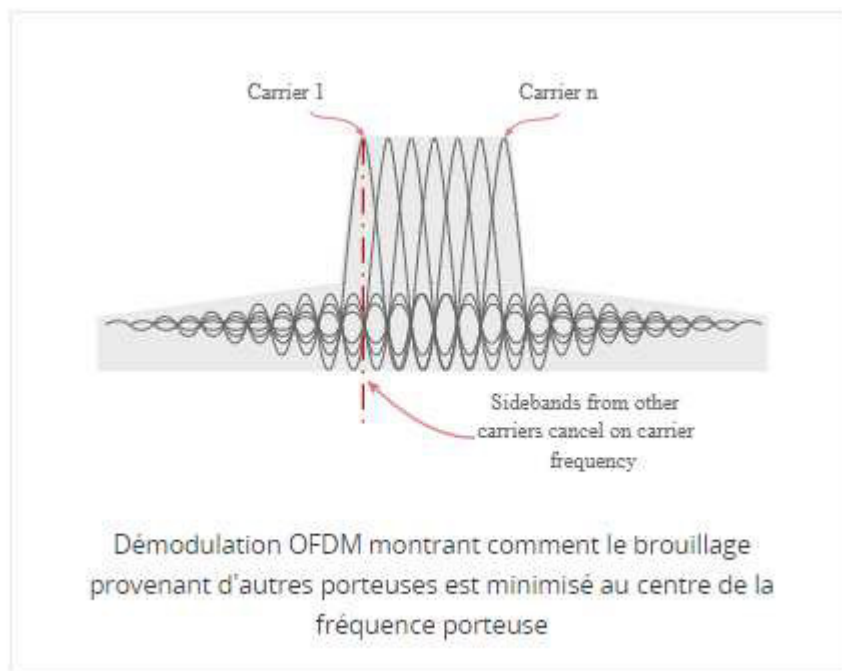


Figure 2.17: Démodulation OFDM.

Si une situation est rencontrée dans laquelle la synchronisation OFDM pour les aspects fréquence est faible, le démodulateur centre alors ses échantillons loin du pic du signal et également à un point où les contributions des autres signaux ne totalisent pas zéro. Cela conduira à une dégradation du signal qui pourrait à son tour entraîner une augmentation du nombre d'erreurs sur les bits.

❖ Synchronisation OFDM avec décalage d'horloge

Il est également nécessaire de maintenir la synchronisation OFDM en termes d'horloge. Si la synchronisation d'horloge n'est pas précise, le gain sera compensé, l'orthogonalité sera réduite et les erreurs de données augmenteront.

Lorsque l'on examine la synchronisation OFDM en ce qui concerne le décalage d'horloge, l'espacement de porteuse utilisé dans le récepteur pour échantillonner le signal reçu sera basé sur la fréquence d'horloge interne. Si cela diffère de celui utilisé dans l'émetteur, il sera constaté que même si la première porteuse dans le multiplex est correcte, il y aura une différence grandissante par rapport à la première. Même de petits écarts peuvent entraîner une augmentation du taux d'erreur [18].

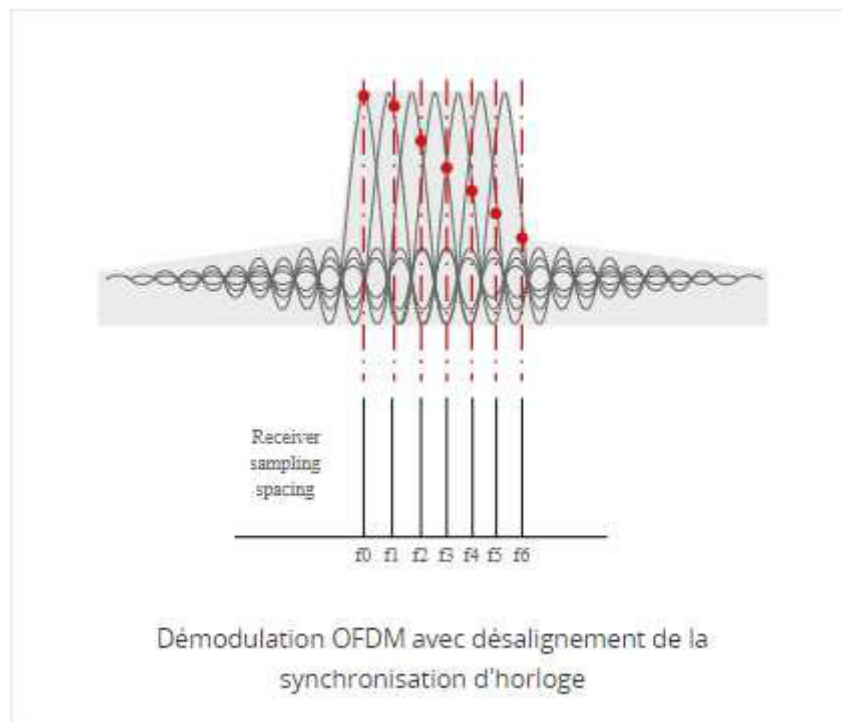


Figure 2.18: Démodulation OFDM avec désalignement.

Lors de l'utilisation d'OFDM, il est nécessaire de s'assurer que la synchronisation pour la synchronisation et la fréquence est précise. En assurant une synchronisation précise, il est possible d'effectuer la démodulation optimale du signal. Tout désalignement entraîne le récepteur à capter les signaux d'interférence indésirables. Heureusement, il est relativement facile d'obtenir des signaux de synchronisation précis car ils sont disponibles sur le réseau, et une synchronisation à court terme peut être générée en interne.

2.11- LTE OFDMA SC-FDMA et modulation

LTE utilise l'OFDM comme format de signal de base, OFDMA dans la liaison descendante et SC-FDMA dans la liaison montante avec divers formats de modulation.

L'OFDM constitue le format de signal de base utilisé dans la 4G LTE. L'OFDM, Multiplexage de la division de fréquence orthogonale est le format de base utilisé, modifié pour fournir le schéma d'accès multiple : OFDMA, accès multiple par division orthogonale dans la liaison descendante et SC-FDMA, accès multiple par division orthogonale par fréquence à canal unique dans la liaison montante.

En utilisant plusieurs porteuses, chacune transportant un faible débit de données, l'OFDM est idéal pour la transmission de données à haute vitesse, car il offre une résistance contre les évanouissements à bande étroite résultant des réflexions et des propriétés de propagation générales à ces fréquences.

Dans le format de signal OFDM LTE de base, divers formats de modulation sont utilisés, notamment PSK et QAM. La modulation d'ordre supérieur est utilisée pour obtenir les débits de données les plus élevés : l'ordre de modulation étant déterminé par la qualité du signal.

L'implémentation réelle de la technologie sera différente entre la liaison descendante (de la station de base au mobile) et la liaison montante (du mobile à la station de base) en raison des exigences différentes entre les deux directions et les équipements situés à chaque extrémité. Cependant, OFDM a été choisi comme format de support de signal car il est très résistant aux interférences. De plus, ces dernières années, les différentes formes de radiodiffusion qui l'utilisent, ainsi que le Wi-Fi et le WiMAX, ont acquis une expérience considérable dans son utilisation. OFDM est également un format de modulation très adapté au transport de débits de données élevés, une des exigences clés du LTE [18].

2.11.1- LTE OFDMA dans la liaison descendante

Le signal OFDM utilisé en LTE comprend au maximum 2 048 sous-porteuses différentes espacées de 15 kHz. Bien qu'il soit impératif que les mobiles soient capables de recevoir toutes les 2048 sous-porteuses, ils ne doivent pas tous être transmis par la station de base, qui doit seulement pouvoir prendre en charge la transmission de 72 sous-porteuses. De cette manière, tous les mobiles pourront communiquer avec n'importe quelle station de base.

Dans le signal OFDM, il est possible de choisir entre trois types de modulation pour le signal LTE :

1. **QPSK (4 QAM)** 2 bits par symbole
2. **16QAM** 4 bits par symbole
3. **64QAM** 6 bits par symbole

Le format de modulation LTE exact est choisi en fonction des conditions prédominantes. Les formes de modulation inférieures (QPSK) n'exigent pas un rapport signal sur bruit aussi élevé, mais ne permettent pas d'envoyer les données aussi rapidement. Le format de modulation d'ordre supérieur ne peut être utilisé que lorsque le rapport signal / bruit est suffisant [16].

2.11.2- LTE SC-FDMA sur la liaison montante

Pour la liaison montante LTE, un concept différent est utilisé pour la technique d'accès. Bien que l'utilisation d'une technologie OFDMA soit encore utilisée, cette implémentation est appelée accès multiple par division de fréquence porteuse unique (SC-FDMA).

L'un des paramètres clés qui affecte tous les mobiles est celui de la vie de la batterie. Même si les performances de la batterie s'améliorent constamment, il reste nécessaire de veiller à ce que les mobiles utilisent le moins possible de la batterie.

L'amplificateur de puissance RF qui transmet le signal radiofréquence via l'antenne à la station de base étant l'élément de puissance le plus élevé du mobile, il est nécessaire qu'il fonctionne dans le mode le plus efficace possible. Cela peut être considérablement affecté par la forme de modulation de fréquence radio et le format du signal.

Les signaux dont le rapport crête / moyenne est élevé et qui nécessitent une amplification linéaire ne se prêtent pas à l'utilisation d'amplificateurs de puissance RF efficaces. En conséquence, il est nécessaire d'utiliser un mode de transmission qui a une puissance presque constante lorsqu'il fonctionne. Malheureusement, l'OFDM présente un rapport pointe / moyenne élevé.

Bien que ce ne soit pas un problème pour la station de base où l'alimentation n'est pas un problème particulier, c'est inacceptable pour le mobile. En conséquence, LTE utilise un schéma de modulation connu sous le nom de SC-FDMA - Multiplex de division de fréquence

à porteuse unique, qui est un format hybride. Ceci combine le faible rapport crête / moyenne offert par les systèmes à porteuse unique avec la résilience aux interférences par trajets multiples et l'allocation de fréquence sous-porteuse flexible fournie par OFDM.

Le format du signal LTE, la modulation et l'utilisation de l'OFDM ont permis à LTE de fournir des communications de données haute vitesse fiable.

L'utilisation de la technologie OFDM a permis à LTE de fournir une qualité de liaison fiable même en présence de réflexions et la modulation adaptative permettait de modifier la liaison en fonction de la qualité du signal en vigueur [18].

2.12- OFDM vs OFDMA

L'OFDM et l'OFDMA sont tous deux utilisés pour obtenir une transmission à haut débit de données par voie hertzienne. Avec OFDMA, le système peut prendre en charge plus d'abonnés avec un concept de sous-canalisation comparé à OFDM.

OFDM et OFDMA sont mis en œuvre à l'aide des opérations IFFT et FFT au niveau de l'émetteur et du récepteur, respectivement. Pour OFDM, l'entrée entière de l'IFFT est entièrement occupée par la station d'abonné ou la station de base. Pour OFDMA, une partie des valeurs d'entrée (consécutivement) est occupée par la station d'abonné et des positions nulles ou vides sont insérées au repos des positions d'entrée. La même chose est faite avec d'autres abonnés et ainsi de suite [17].

La différence entre l'OFDM et l'OFDMA c'est que la première sert à un usager dans un intervalle de temps, par contre OFDMA elle peut servir plusieurs usagers dans un même intervalle de temps, comme montrer dans la figure ci-dessus.

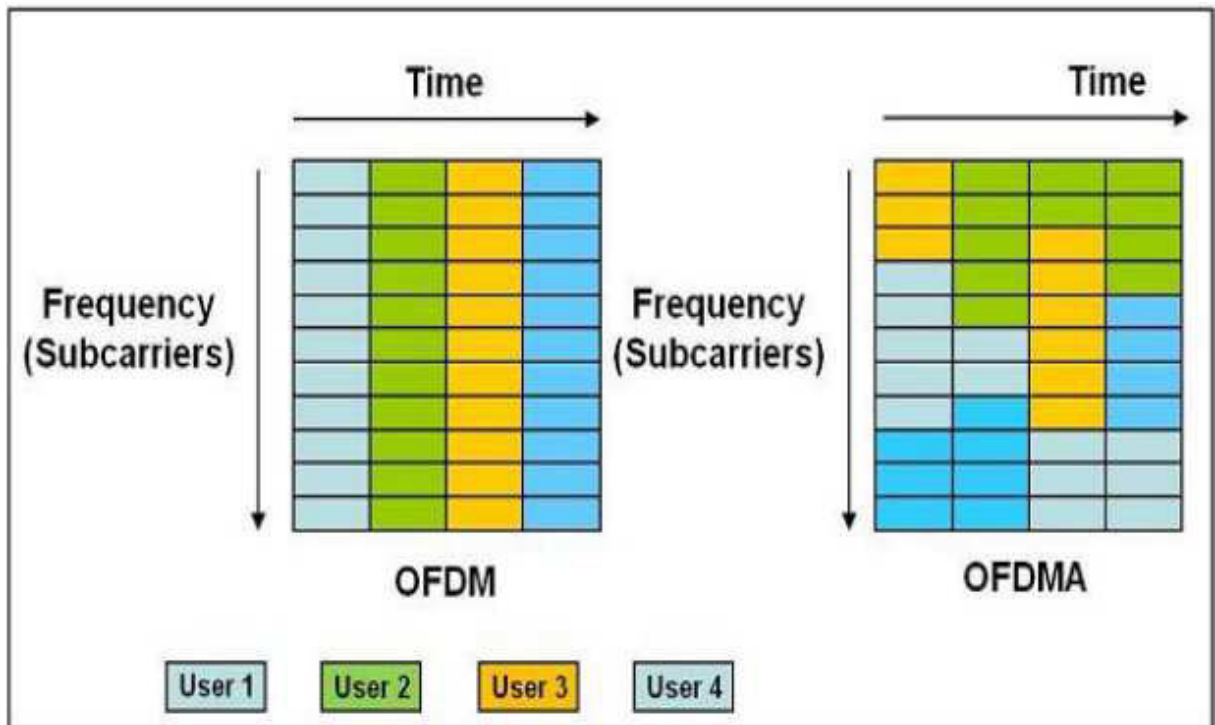


Figure 2.19: Différence entre OFDM et OFDMA.

2.13- OFDM avantages et inconvénients

➤ Avantages OFDM

OFDM a été utilisé dans de nombreux systèmes sans fil à haut débit de données en raison des nombreux avantages qu'il procure.

- **Immunité aux évanouissements sélectifs :** L'un des principaux avantages de l'OFDM est qu'il résiste mieux aux évanouissements sélectifs en fréquence que les systèmes à une seule porteuse, car il divise le canal global en plusieurs signaux à bande étroite affectés individuellement en tant que sous-canaux à évanouissements plats.
- **Résistance aux interférences :** Les interférences apparaissant sur un canal peuvent être limitées en bande passante et n'affecteront donc pas tous les sous-canaux. Cela signifie que toutes les données ne sont pas perdues.
- **Efficacité du spectre :** L'utilisation de sous-porteuses superposées se chevauchant confère un avantage important à l'OFDM : elle permet d'utiliser efficacement le spectre disponible.

- **Résistance à l'ISI:** Un autre avantage de l'OFDM est qu'il est très résistant aux interférences inter-symboles et inter-trames. Cela résulte du faible débit de données sur chacun des sous-canaux.
- **Effets de résilience à bande étroite:** En utilisant un codage de canal et un entrelacement approprié, il est possible de récupérer les symboles perdus en raison de la sélectivité en fréquence du canal et des interférences de bande étroite. Toutes les données ne sont pas perdues.
- **Égalisation de canal plus simple:** L'un des problèmes des systèmes CDMA était la complexité de l'égalisation de canal qui devait être appliquée à l'ensemble du canal. OFDM présente l'avantage de pouvoir utiliser plusieurs sous-canaux pour simplifier l'égalisation des canaux.

➤ **Désavantages OFDM**

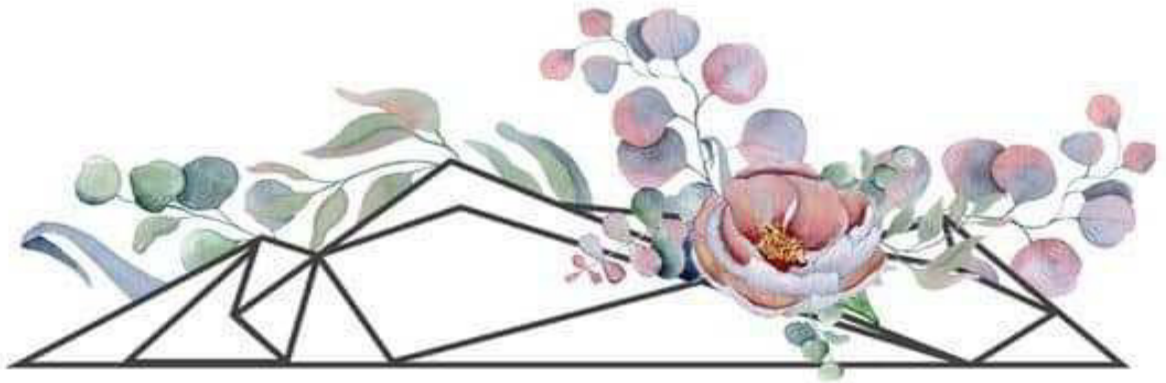
Bien que l'OFDM ait été largement utilisé, son utilisation présente encore quelques inconvénients qu'il convient de prendre en compte lors de l'examen de son utilisation.

- **Rapport de puissance crête à moyenne élevé:** un signal OFDM présente une variation d'amplitude semblable au bruit et une plage dynamique relativement élevée ou un rapport de puissance crête à moyenne. Cela a un impact sur l'efficacité de l'amplificateur RF, car les amplificateurs doivent être linéaires et s'adapter aux fortes variations d'amplitude. Ces facteurs empêchent l'amplificateur de fonctionner avec un niveau de rendement élevé.
- **Sensible au décalage de porteuse et à la dérive:** Un autre inconvénient de la modulation OFDM est sa sensibilité au décalage et à la dérive de fréquence de la porteuse. Les systèmes à une seule porteuse sont moins sensibles.

L'OFDM, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence a acquis une présence significative sur le marché des services sans fil. La combinaison d'une capacité de données élevée, d'une efficacité spectrale élevée et de sa résilience aux interférences résultant d'effets à trajets multiples en fait l'idéal pour les applications à données élevées qui sont devenues un facteur majeur dans le monde des communications.

2.14- Conclusion

Dans ce chapitre notre concentration s'est focalisée sur la technique OFDM en parcourant toutes les étapes nécessaires soit pour la génération du signal OFDM dans un réseau LTE.



Chapitre3 :

Simulation et Résultats



Chapitre 3 : Simulation et Résultats

3.1-Introduction

La conception matérielle d'un système de communication complexe, tel un système OFDM nécessite d'établir les valeurs et le choix des paramètres du système. Dans notre exercice en vas présenter une chaine de transmission et réception dans un réseau LTE avec la modulation OFDM en utilisant le programme Matlab avec un code qui peut gérer notre chaine et l'outil Simulink ou en va présenter notre schéma d'émission et réception. La validation et par la suite les résultats obtenus. Nous établirons une comparaison des signaux d'émission et réception de type OFDM en utilisant la modulation numérique (16QAM).

3.2-Définition du programme

3.2.1-MATLAB

MATLAB est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques. Matlab est utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul.

3.2.2- Simulink

SIMULINK est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes dynamiques sous forme de schémas en blocs.

3.3-System de transmission numérique

La fonction principale du system de communication numérique est la transmission des messages (ou séquences de symboles) délivrés par une source vers un destinataire qui se trouve dans un autre point avec un débit aussi élevé.

La transmission numérique consiste à faire transiter les informations sur le support physique de communication sous forme de signaux numériques. Ainsi, des données analogiques devront préalablement être numérisées avant d'être transmises.

La présence de bruit corrompt l'information transmise et limite le débit auquel l'information doit être transmise. La fonction principale des modules de la chaine de

transmission (codeur, du modulateur, du démodulateur, et du décodeur), est de lutter contre les effets de dégradation du canal sur le signal et d'améliorer le rapport signal à bruit.

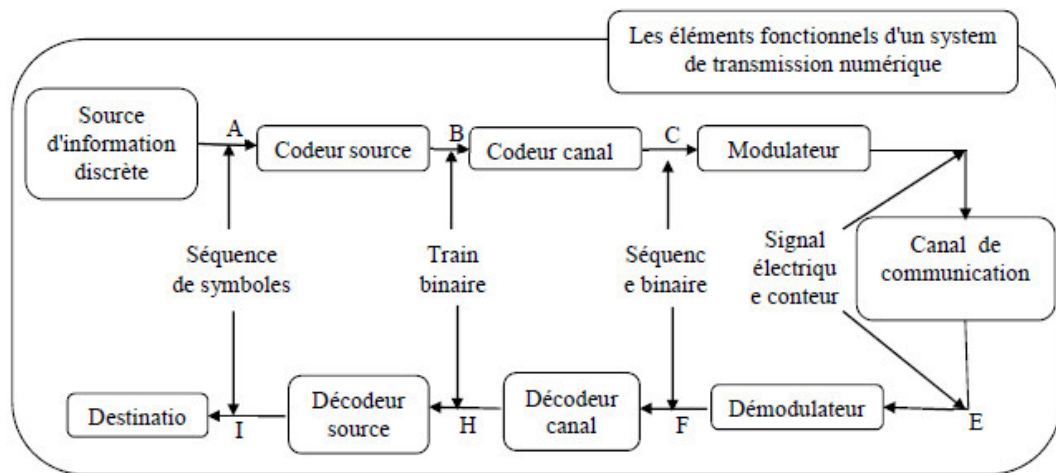


Figure 3.1: Les éléments fonctionnels d'un system de transmission numérique

3.4- Réalisation de la chaine de transmission LTE a l'aide de la modulation OFDM sous le Simulink

Réaliser un système à l'aide des blocs est relativement aisé, toutefois le choix de blocs réels et leurs paramétrages peuvent être assez complexes. La figure ci dessus illustre une chaine de transmission d'un réseau OFDM dans le réseau LTE utilisant des blocs réels.

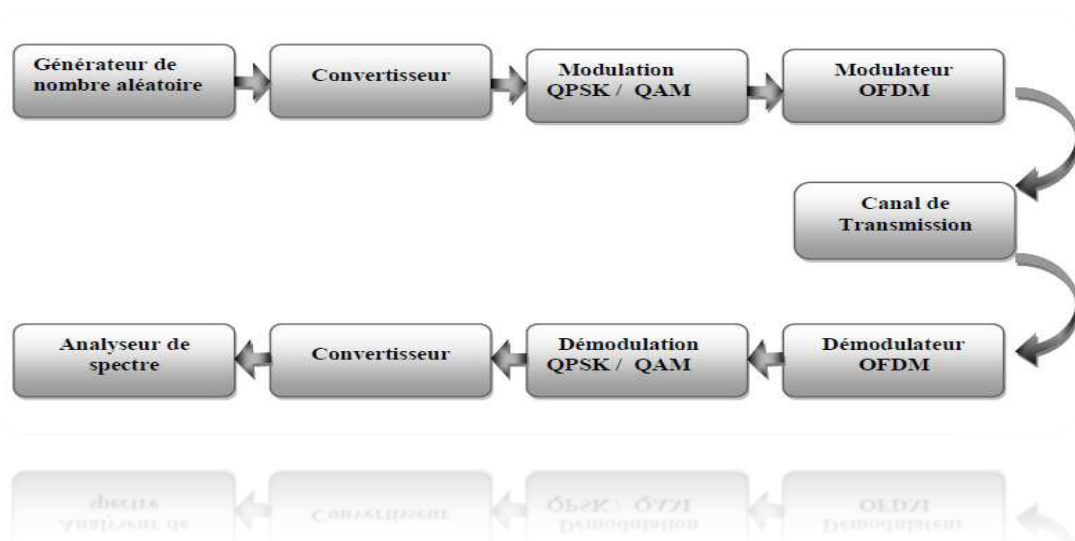


Figure 3.2: Schéma synoptique d'une chaine de transmission LTE.

La chaîne de transmission d'un réseau LTE équivalente sous Simulink représentée dans la figure suivante vas transmettre 20 symboles pendant une durée de 3ms chaque symbole transmette 4 bits selon la modulation QAM :

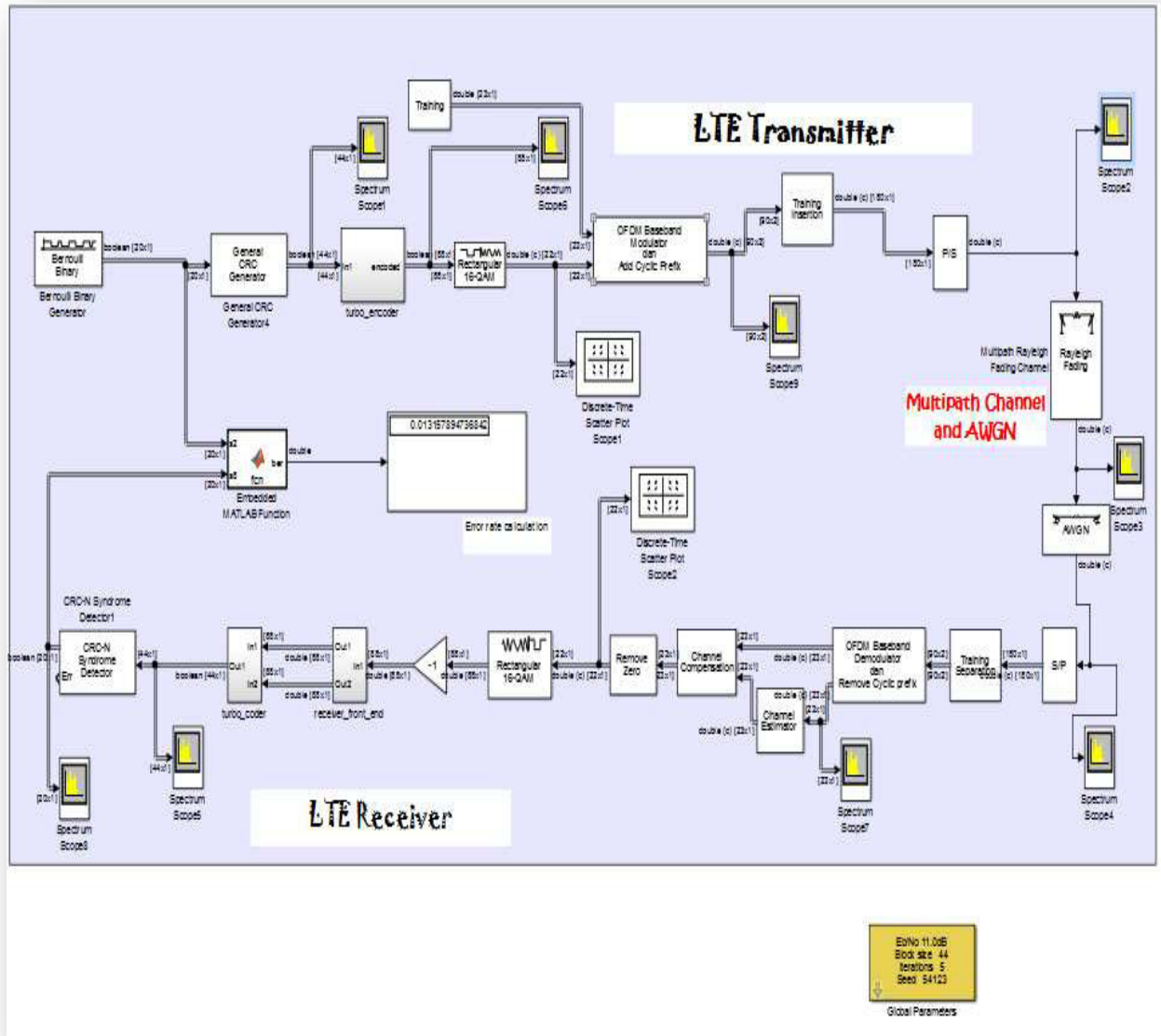


Figure 3.3: La chaîne d'émission et réception LTE sous Simulink

3.4.1-La chaîne d'émission d'un réseau LTE avec la Modulation OFDM

Dans la chaîne d'émission, nous générons une série binaire représentant une voix, des données, une image ou encore une information analogique qui résulte d'une conversion analogique numérique. Les données binaires sont ensuite distribuées sur les différentes sous porteuses, puis modulées à l'aide d'un modulateur. À la sortie de ce modulateur, l'information a une constellation bien spécifique.

La figure ci-dessous illustre un émetteur de réseau LTE :

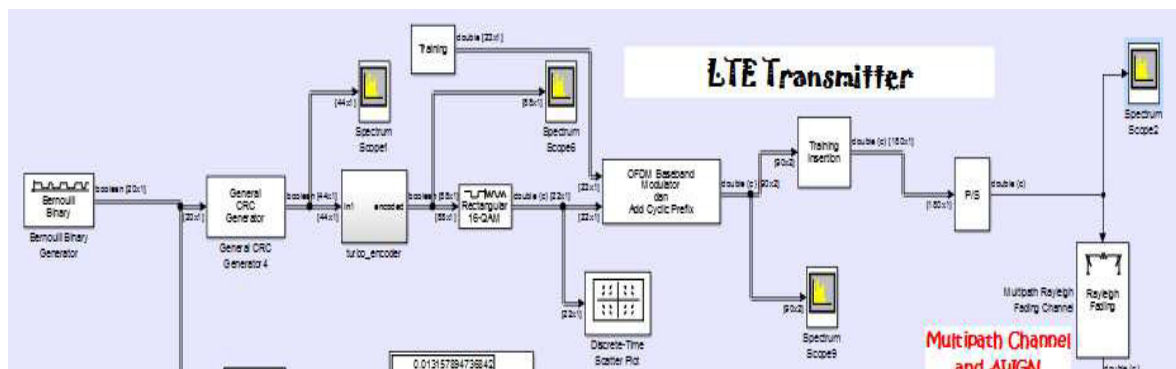


Figure 3.4: chaîne d'émission d'un réseau LTE

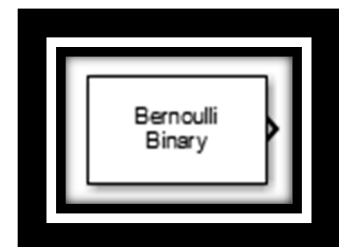
3.4.2-Les Blocks d'une chaîne d'émission

3.4.2.1- Block Bernoulli Generator

Le bloc Bernoulli BinaryGenerator génère des nombres Binaires aléatoires à l'aide d'une distribution de Bernoulli.

La distribution de Bernoulli avec le paramètre p produit Zéro avec une probabilité p et une avec une probabilité $1-p$. La distribution de Bernoulli a la valeur moyenne $1-p$ et la variance $p(1-p)$. Avec les paramètres suivants :

- Probability of a zero** : La probabilité avec laquelle une sortie nulle se produit.
- Initial seed** : La valeur de départ initiale pour le générateur de nombres aléatoires.
- Sample time** : Le temps entre chaque échantillon d'une colonne du signal de sortie.
- Samples per frame** : Le nombre d'échantillons par image dans un canal du signal de sortie.



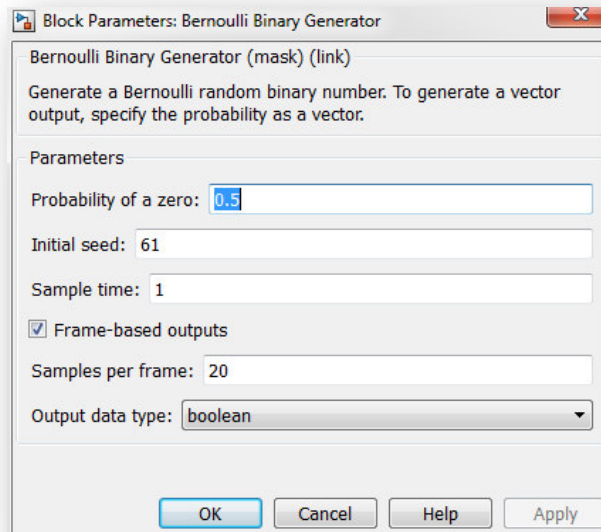
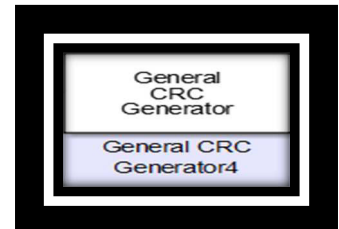


Figure 3.5: Paramètres du bloc Bernoulli Generator

3.4.2.2- Block General CRC Generator

Le bloc générateur de CRC général génère des bits de code de redondance cyclique(CRC) pour chaque trame de données d'entrée et les ajoute à la trame. Ce bloc accepte un signal D'entrée de vecteur de colonne binaire. Avec des paramètres concernent Un vecteur de caractère polynomial , un vecteur de ligne binaire dans l'ordre décroissant des puissances ou un vecteur de ligne entière dans l'ordre décroissant des puissances. Et la condition initiale avec le paramètre de XOR final qui spécifie la valeur avec laquelle la somme de contrôle CRC doit être XOR en tant que scalaire ou vecteur binaire.



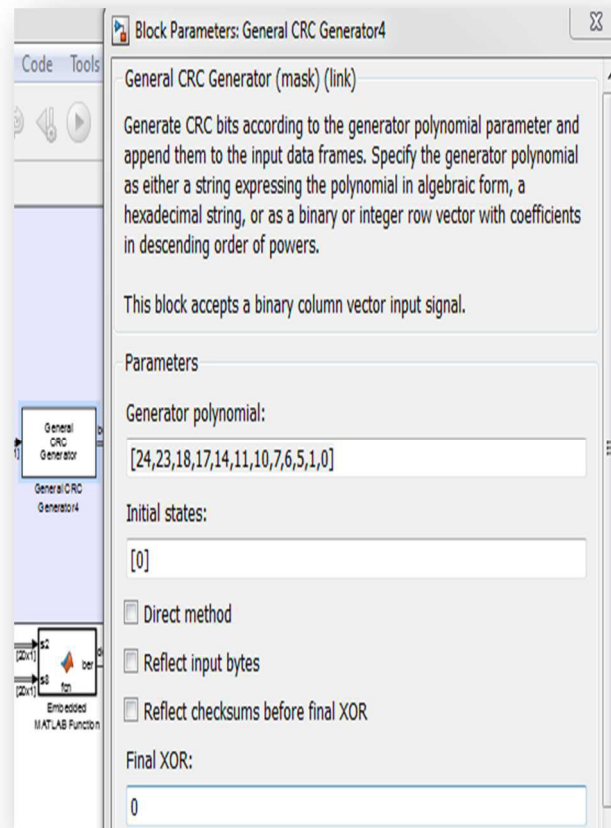
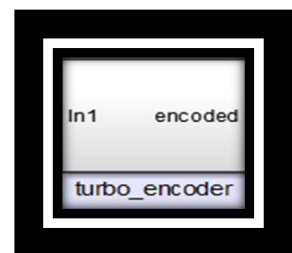


Figure 3.6: Paramètres du block CRC Generator

3.4.2.3- Block turbo-encoder

Le bloc Turbo Encoder code un signal d'entrée binaire en utilisant un schéma de codage concaténé en parallèle. Le schéma ci-dessus de codage utilise deux codeurs convolutés identiques et un entre-laceur interne. Chaque codeur constituant se termine indépendamment par des bits de queue.



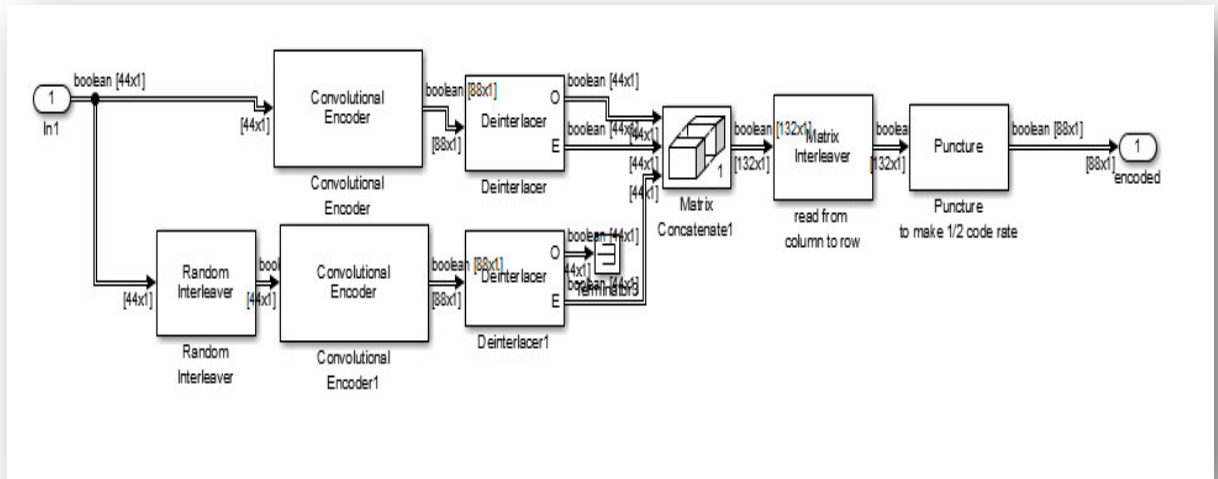


Figure 3.7: Les Blocks de turbo-encoder.

3.4.2.4- Block rectongular 16 QAM

Le bloc de la bande de base du modulateur QAM rectangulaire se module à l'aide d'une modulation d'amplitude en quadrature M-aire avec une constellation sur un réseau rectangulaire. Code 4 bits par symboles.



Figure 3.8: Paramètres du Block rectangulaire 16 QAM

3.4.2.5- Block OFDM modulation

À chaque entrée, on applique par la suite une Transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) pour moduler les sous-porteuses. Puis, une conversion parallèle/série est effectuée, et nous ajoutons ensuite l'intervalle de garde sous forme de préfixe cyclique et l'ensemble sera prêt pour l'émission. Voici les blocks d'une chaîne d'émission OFDM :

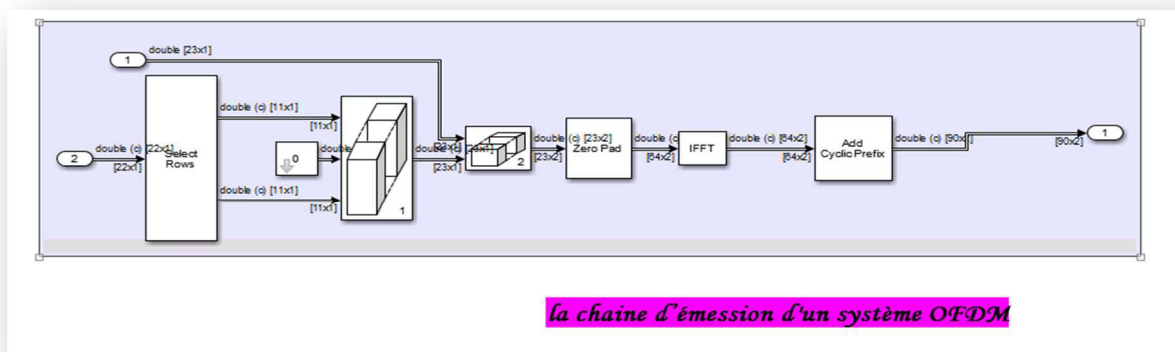
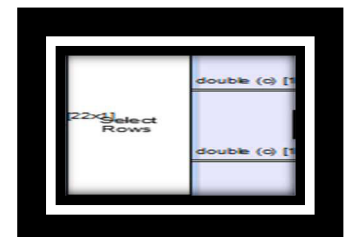


Figure 3.9: Blocks de la chaîne d'émission OFDM.

- **Block Multiport Selector**

Ce bloc distribue des sous-ensembles arbitraires de lignes d'entrée ou de colonnes à plusieurs ports de sortie. Le bloc Multiport sélecteur extrait plusieurs sous-ensembles de lignes ou les colonnes de M par N de la matrice d'entrée u. Pour découper les symboles reçus à son entrée par 3, en rangeant chaque ensemble dans une sortie.



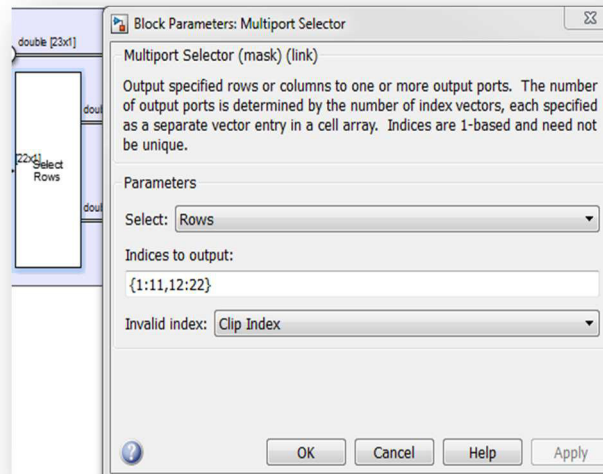


Figure 3.10: paramètres du block MutiportSelecto

- **Block Matrix concatenation**

Concaténez deux vecteurs de ligne pour créer un vecteur de ligne encore plus long. Dans notre système en vas utiliser 2 Matrix pour concaténer les signales de sortie l'une avec 3 sorties et l'autre avec 2 sorties.

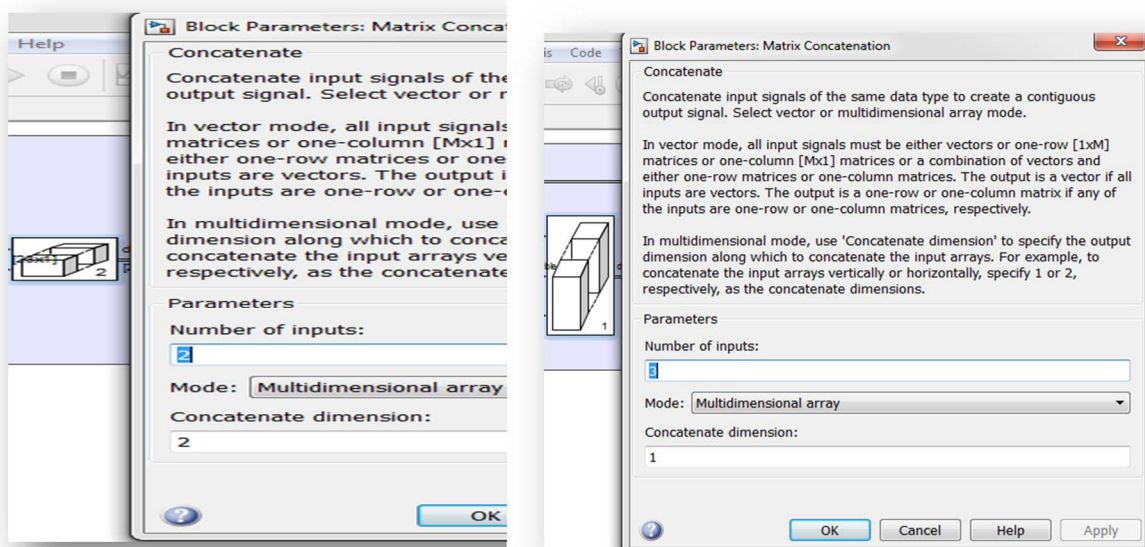
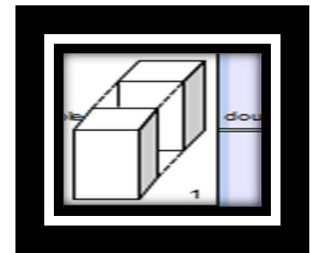


Figure 3.11: Paramètres du Block Matrix concatenation

- **IFFT**

L'IFFT est des méthodes qui transforment les données de domaine fréquentiel Au domaine temporel, et fournit un moyen simple pour moduler des données sur N sous-porteuses orthogonales. La sortie IFFT est essentiellement le résumé de tous les sinusôides orthogonales N entrée à elle, Ainsi IFFT est le bloc le plus important dans la chaine de modulation OFDM, la taille de l'IFFT choisi est une taille aléatoire.

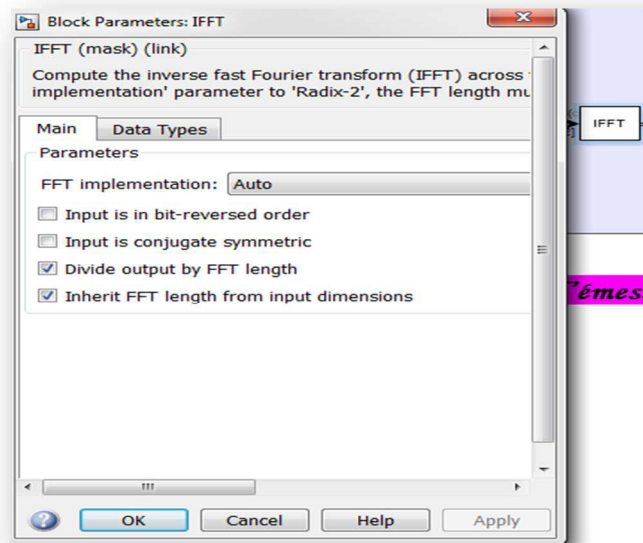
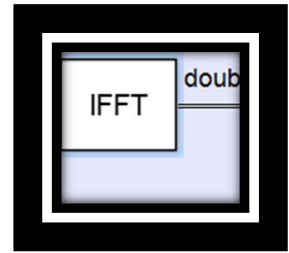


Figure 3.12: Paramètres du bloc IFFT

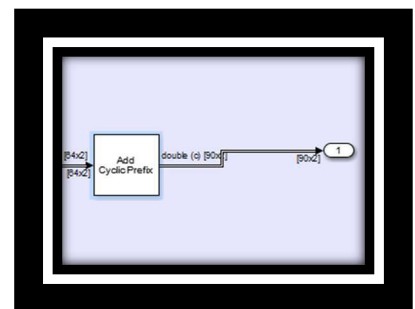
- **AddingCyclicPrefix**

Le préfixe cyclique utilisé dans Orthogonal Frequency Division Multiplexing fournit un élément essentiel du signal global agissant comme une bande de garde entre chaque symbole OFDM.

- l'ajout de préfixe cyclique ajoute la robustesse du signal OFDM.

-Les données qui sont retransmises peuvent être utilisées si nécessaire. Et L'intervalle de garde introduit par le préfixe cyclique permet les effets de l'interférence entre symboles soient réduites.

- le Cyclic prefix qui peut présenter de l'interférence avec des symboles adjacents est enlevé et le symbole OFDM est remis.



Ceci est ajouté pour garantir la propriété d'orthogonalité sur la durée de la partie utile du Signal.

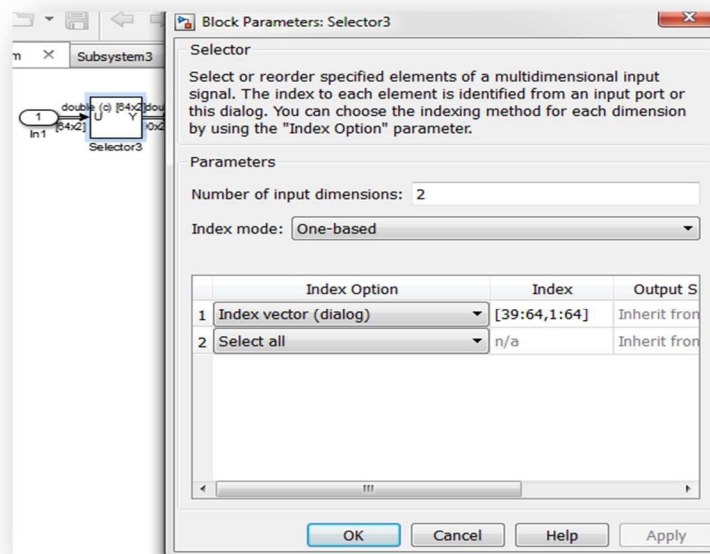
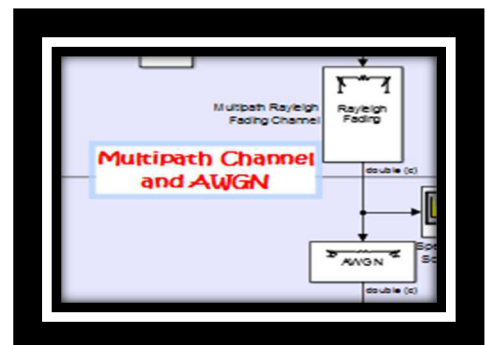


Figure 3.13: Paramètres du bloc AddCyclicPrefix

3.4.3-Canaux de transmissions

Le réseau LTE utilise un multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) comme schéma de modulation numérique à plusieurs porteuses. L'estimation du canal joue un rôle important dans un système OFDM. Il est utilisé pour augmenter la capacité des systèmes d'accès multiple par division de fréquence orthogonale (OFDMA) en améliorant les performances du système en termes de taux d'erreur sur les bits.



- **Canal de gaussien (AWGN Channel)**

Le bloc Channel AWGN ajoute le bruit blanc gaussien à un signal d'entrée réel ou complexe.

Lorsque le signal d'entrée est réel, ce bloc ajoute du bruit gaussien réel et produit un véritable signal de sortie. Lorsque le signal d'entrée est complexe, ce bloc ajoute bruit gaussien



complexe et génère un signal de sortie complexe. Ce bloc accepte un scalaire à valeur, vecteur, ou signal d'entrée de la matrice avec un type de données simple ou double.

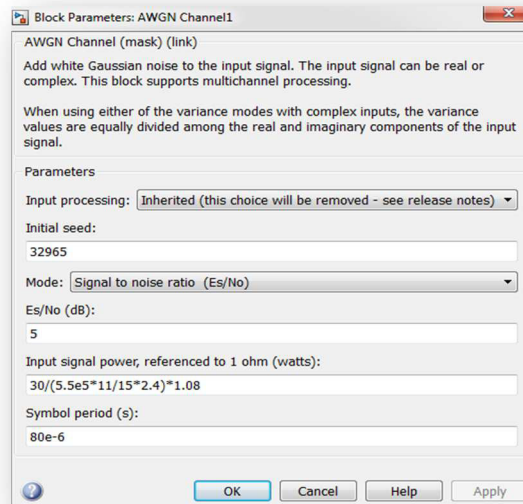


Figure 3.14: Paramètres du bloc AWGN

- **Canal de Multipath Rayleigh Fading**

Le bloc de canal met en œuvre une simulation de bande de base d'un canal de propagation de Rayleigh Fading. Ce bloc accepte uniquement les signaux complexes à base de trame à son entrée.

Le bloc hérite échantillon de temps à partir du signal d'entrée l'entrée doit avoir un temps d'échantillonnage discret supérieur à 0.



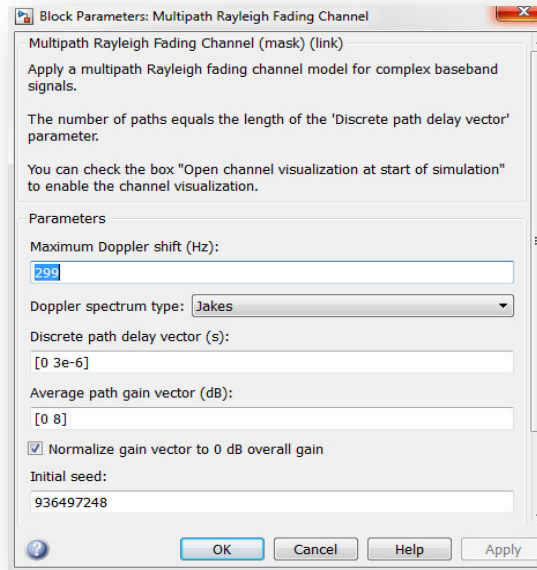


Figure 3.15: Paramètres du bloc Multipath Rayleigh Fading

3.4.4-La chaine de réception du réseau LTE et du système OFDM

A l'aide des canaux de transmission Le récepteur effectue l'opération inverse de l'émetteur et avec la démodulation OFDM en va constituer le signal reçu de réseau LTE.

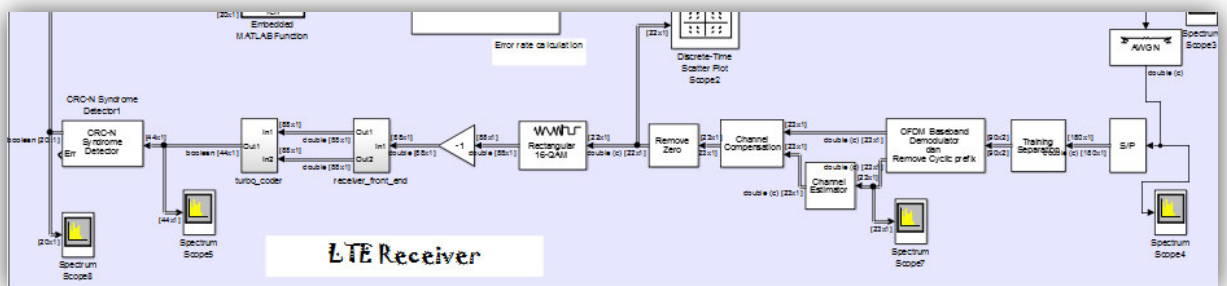


Figure 3.16: la chaine de réception LTE.

Le signal OFDM est converti en signal numérique à l'aide de la grande vitesse d'un convertisseur analogique-numérique.

Une Transformée de Fourier rapide est prélevé pour analyser le signal dans le domaine fréquentiel.

Les données sont par la suite démodulées. On obtient à la sortie de la chaine de réception un train d'informations dont la vraisemblance avec le signal original transmis dépend des perturbations introduites par le canal et les erreurs de traitement.

3.4.4.1-Les blocks du la démodulation OFDM

La figure 3.17 représente les Blocks du la démodulation OFDM dans un réseau LTE :

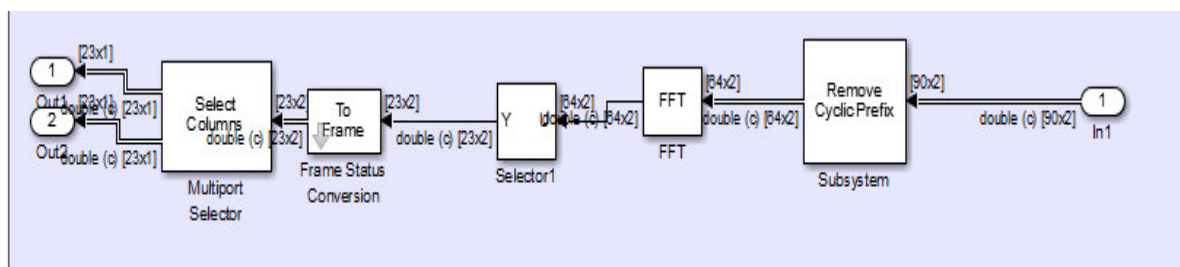


Figure 3.17: la chaine de réception du système OFDM

- **Remove Cyclic Prefix**

Ce bloc est ajouté pour enlever le préfixe qui a été introduit dans l'émission OFDM. Comme on peut le voir à partir de la boîte de dialogue ci-dessus, les échantillons de préfixe cyclique sont retirés de 27 à 90. Tous les paramètres de la boîte de dialogue sont similaires à celles de la boîte 'Ajouter préfixe cyclique'.

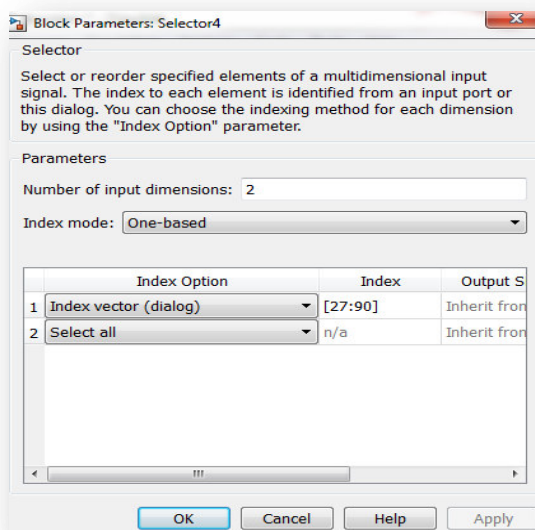


Figure 3.18: Paramètres du bloc RemoveCyclicPrefix

- **La FFT**

A la sortie du préfixe cyclique la taille du vecteur est 64, qui seront directement traités par le bloc FFT. Au niveau du récepteur, un bloc FFT est utilisé pour traiter le signal reçu et l'amener dans le domaine fréquentiel. Idéalement, la sortie de la FFT sera des symboles d'origine qui ont été envoyés à l'IFFT à l'émetteur.

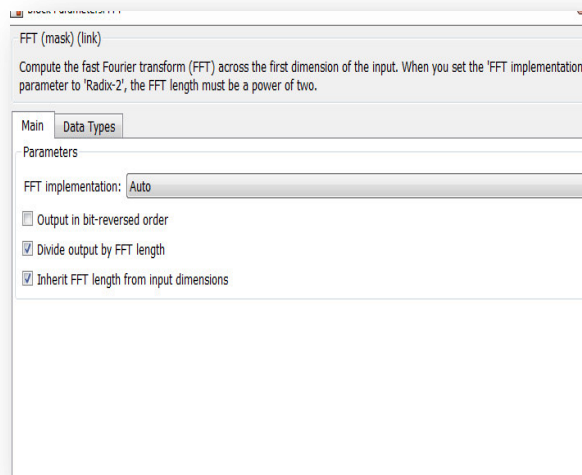
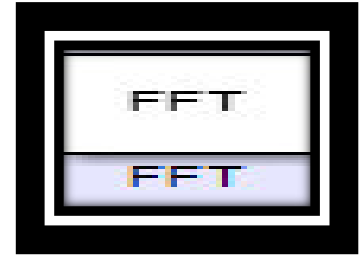


Figure 3.19: paramètres du Bloc FFT

- **Select Rows**

Ce bloc a été utilisé ici pour éliminer la séquence pilote à partir de la matrice de données, avec 2 signaux d'entrée et une valeur d'index de 1 fait référence à la première ligne ou colonne de l'entrée, un vecteur d'index de 54 à 64 et de 1 à 12.



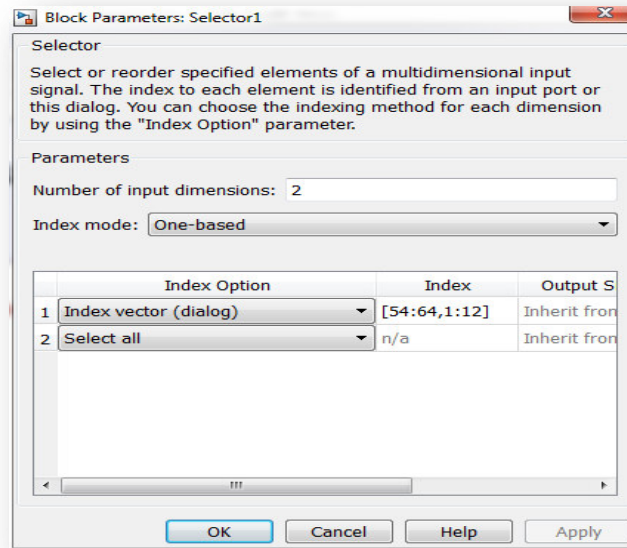


Figure 3.20: paramètres du Bloc selector

- **To frame**

Bloc pour passe l'entrée vers la sortie et regrouper les données en trame. Qui peut être soit basée sur l'image ou à base d'échantillons.

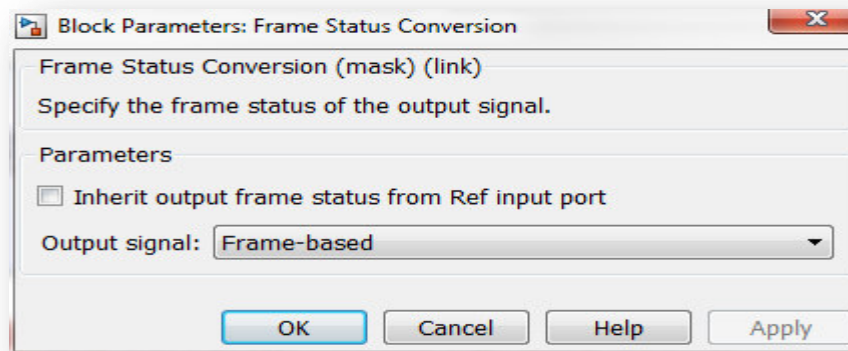
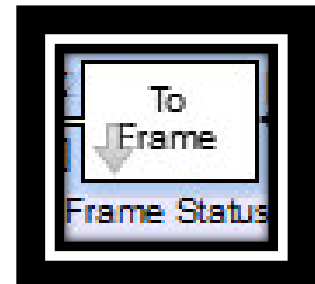


Figure 3.21: paramètres du Bloc Frame Status conversion

- **Multi port selector**

Le bloc sélecteur multiport extrait plusieurs sous-ensembles de lignes ou de colonnes de la matrice d'entrée, et propage chaque nouvelle sous-matrice vers un port de sortie distinct.

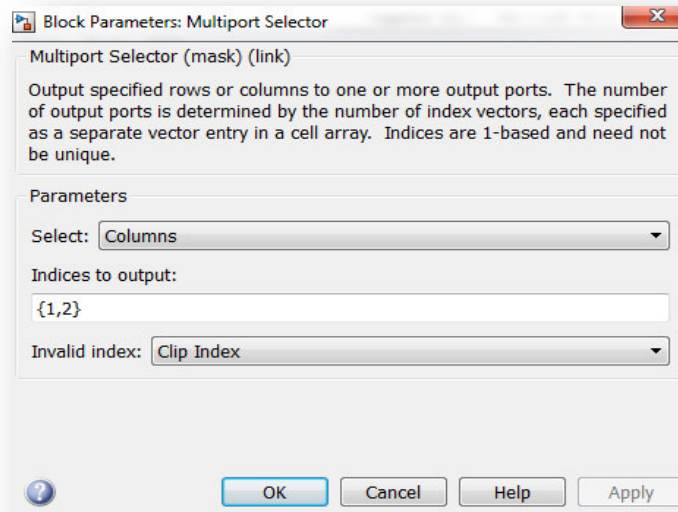
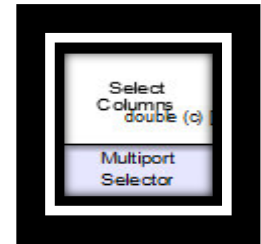
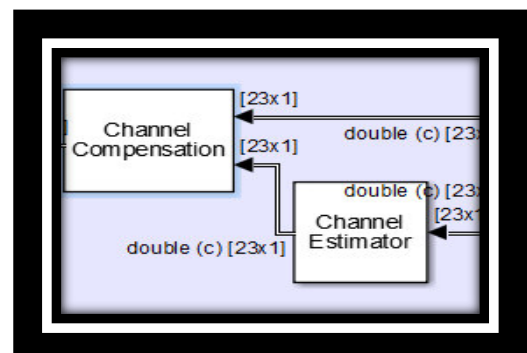


Figure 3.22: paramètres du Bloc Multi port selector

3.4.4.2- Channel estimator et Channel compensation

Channel estimator est utilisé pour créer une estimation du canal sur la durée de la grille de ressources transmise et l'autre pour compenser les 2 signaux à l'entrer.



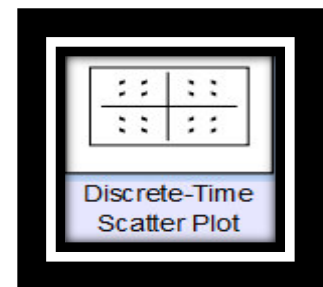
3.4.4.3-Remove zéro-padding

Pour éliminer les zéros de bourrage qui a été introduit dans la transmission OFDM.



3.4.4.4- Discrete-time scotter plot

Le bloc Scope Scotter à temps discret affiche les diagrammes de dispersion d'un signal modulé, afin de révéler les caractéristiques de modulation, telles que la mise en forme des impulsions ou les distorsions de canal du signal.



Le bloc Scope Scatter Plot à temps discret a un port d'entrée. Le signal d'entrée doit être complexe. Le signal d'entrée doit être un scalaire basé sur l'échantillon en mode basé sur l'échantillon. L'entrée doit être un vecteur de colonne basé sur une image ou un scalaire en mode basé sur une image.

3.4.4.5- QAM Démodulateur Baseband

Le bloc de Base-band démodulateur QAM transforme un signal qui a été modulé L'entrée est une représentation en bande de base du signal modulé doit être un signal complexe.

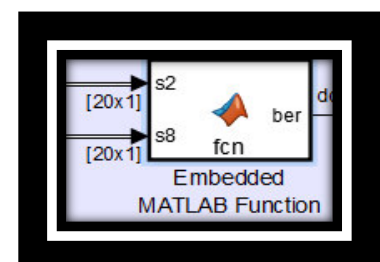
Ce bloc accepte un signal d'entrée de vecteur scalaire ou colonne. Même paramètres que le bloc de modulation QAM.

Pour les blocs restants, ils ont le même rôle et paramètres que ceux utilisés au niveau de la modulation.



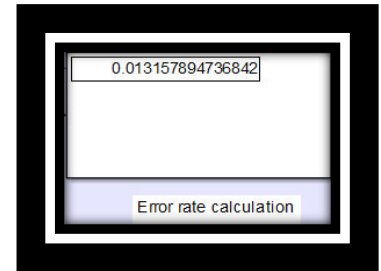
3.4.4.6- Embedded MATLAB Function

Ce bloc utilise une fonction pour comparer le signal de transmission de 20 symboles durant 3ms avec le signal de réception.



3.4.4.7- Error Rate Calculation

Le bloc de calcul du taux d'erreur compare des données d'entrée de l'émetteur avec les données d'entrée d'un récepteur. Il calcule le taux d'erreur comme une statistique en cours d'exécution, en divisant le nombre total de couples inégaux des éléments de données par le nombre total d'éléments de données d'entrée d'une seule source.



3.5- Résultats de la simulation d'une chaîne LTE

3.5.1-signal avec modulation OFDM et QAM

- a) Les figures ci-dessous représente le signal d'entrée et signal de la sortie passé par le bloc turbo-encoder :

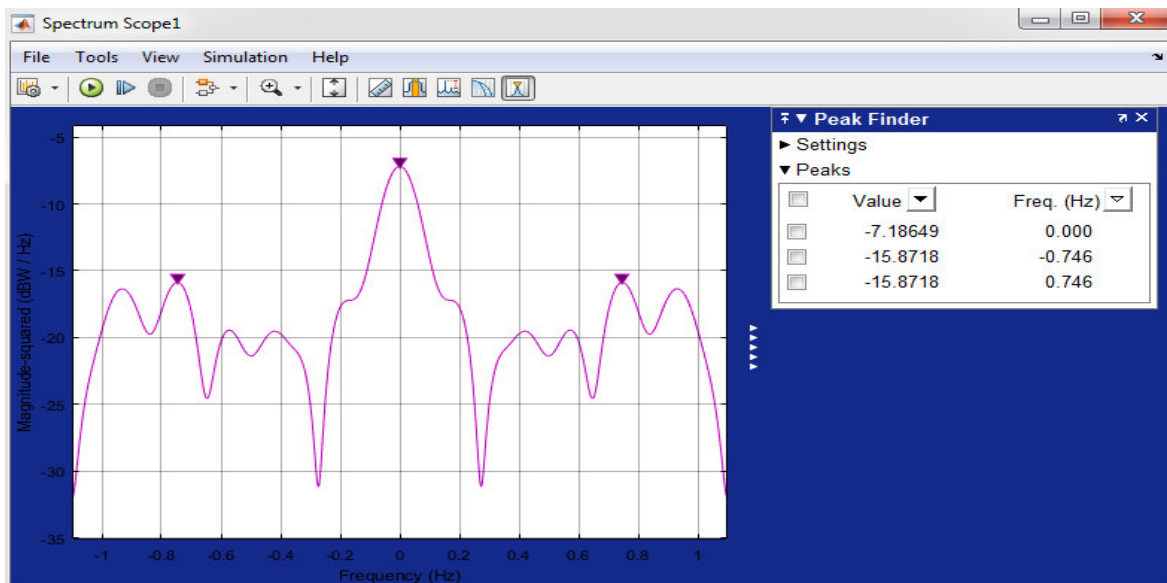


Figure 3.23: Représentation spectral du signal émis avant le turbo-encoder.

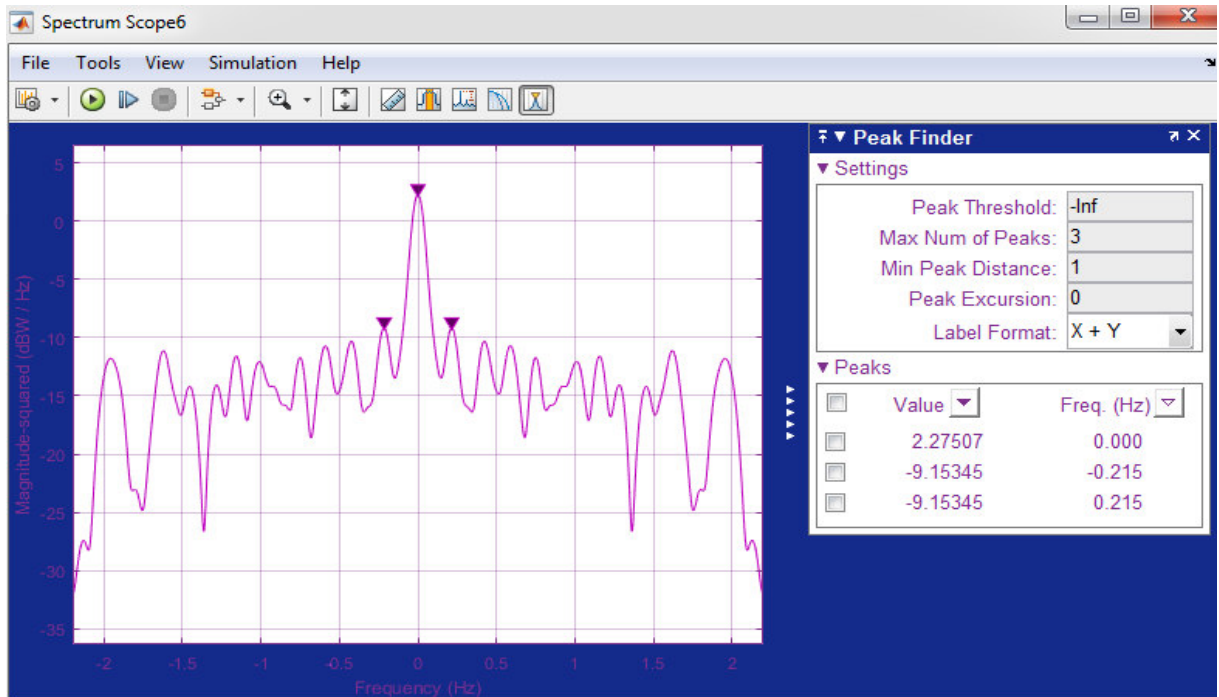


Figure 3.24: Représentation spectral du signal reçu passé par le turbo-encodeur.

- On note que le signal produit en sortie de l'émetteur est bien réel (figure 3.23). La figure 3.24 représente le signal reçu passé par le bloc turbo-encodeur qui a codé le signal de l'entrée.
- b) La figure 3.25 représente le signal d'entrée et signal de la sortie du bloc modulateur OFDM :

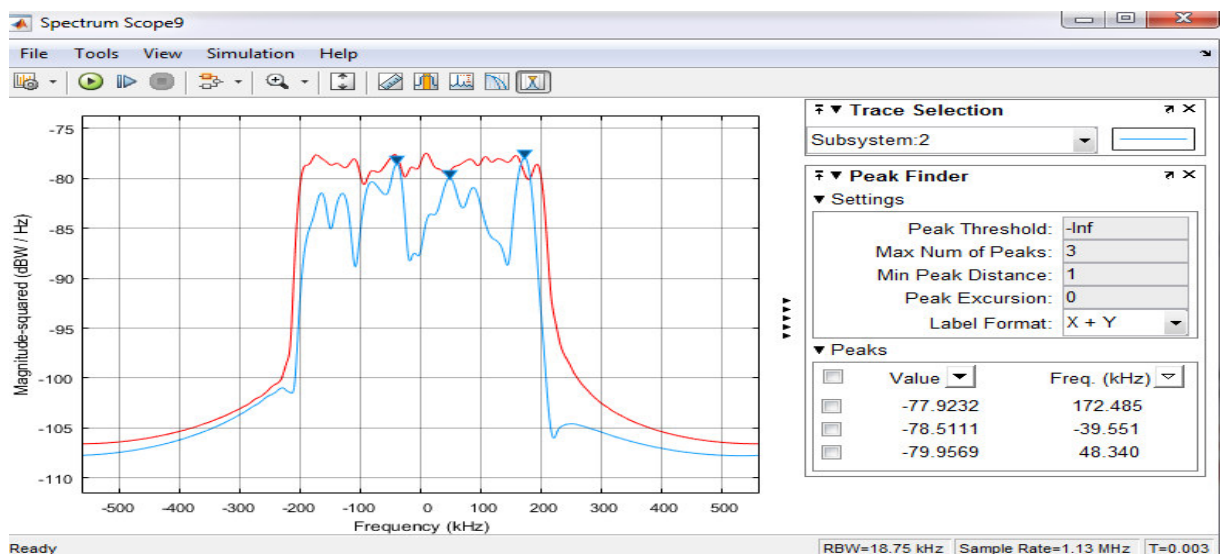


Figure 3.25: Représentation spectral du signal input et output du bloc OFDM

- Le signal input : est le signal d'entrée de la modulation OFDM représenté par la couleur bleu. En note que les sous porteuses pilots ne sont pas proches et la fréquence augment.

Remarque

Chaque pics represente une sous-porteuse.

- ✓ Le tableau suivant represente les fréquences des sous porteuses a l'entrée du bloc OFDM :

Pics(dbw/Hz)	Fréquences(kHZ)
-77.923	172.485
-78.511	-39.551
-79.957	48.340

Tableau 3.1: les fréquences des pics de signal input du bloc OFDM.

- Le signal output : est le signal a la sortié du bloc OFDM représenté avec la couleur rouge.
- ✓ Le tableau suivant represente les fréquences des pics a la sortie du bloc OFDM :

Pics(dbw/Hz)	Fréquences(kHZ)
-77.482	8.789
-78.609	-42.847
-79.649	-172.485

Tableau 3.2: les fréquences des pics de signal output de bloc OFDM.

- Les sous porteuses pilots a la sortie sont presque identique avec les sous porteuses dans le signal à l'entrée et le nombre des sous porteuses a été augmenté avec la fréquence.(dans la plage de fréquence de la technique OFDM le – n'est pas considéré).

c) La figure 3.26 représente le signal LTE émis :

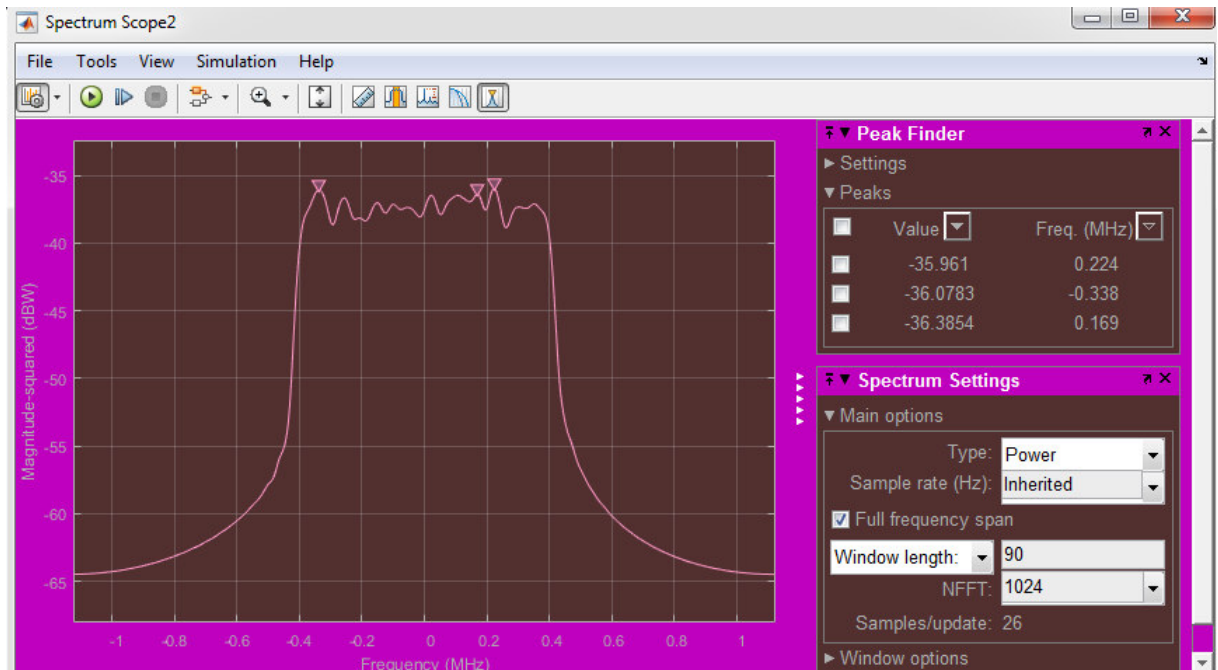


Figure 3.26: Représentation spectral du signal LTE émis passé par la modulation QAM et le bloc OFDM.

✓ Le tableau suivant représente les fréquences des pics de signal LTE émis :

Pics(dbw)	Fréquences(MHZ)
-35.961	0.224
-36.078	-0.338
-36.385	0.169

Tableau 3.3: les fréquences des pics de signal émis par le bloc OFDM et QAM.

- On note que les pis (sous porteuses pilot) sont plus proches entre eux et la fréquence aété augmenté.
- La modulation OFDM utilise un grand nombre des sous porteuses pour transporter le débit.
- La modulation OFDM augmente la fréquence des sous porteuses. Chaque sous porteuse transporte un faible débit et modulant une donnée pendant une durée T_s qui ne change pas.
- La modulation OFDM convertie la séquence binaire à l'aide de modulation QAM et IFFT en un signal électrique et le transmet sur des canaux de transmission.

- La modulation OFDM permet aux plusieurs sous porteuses de démarrer ensemble au même temps.

3.5.2- Les spectres de signal après l'utilisation du Multipath channel et AWGN

La figure suivante représente le signale LTE passé par le canal Rayleigh Fading :

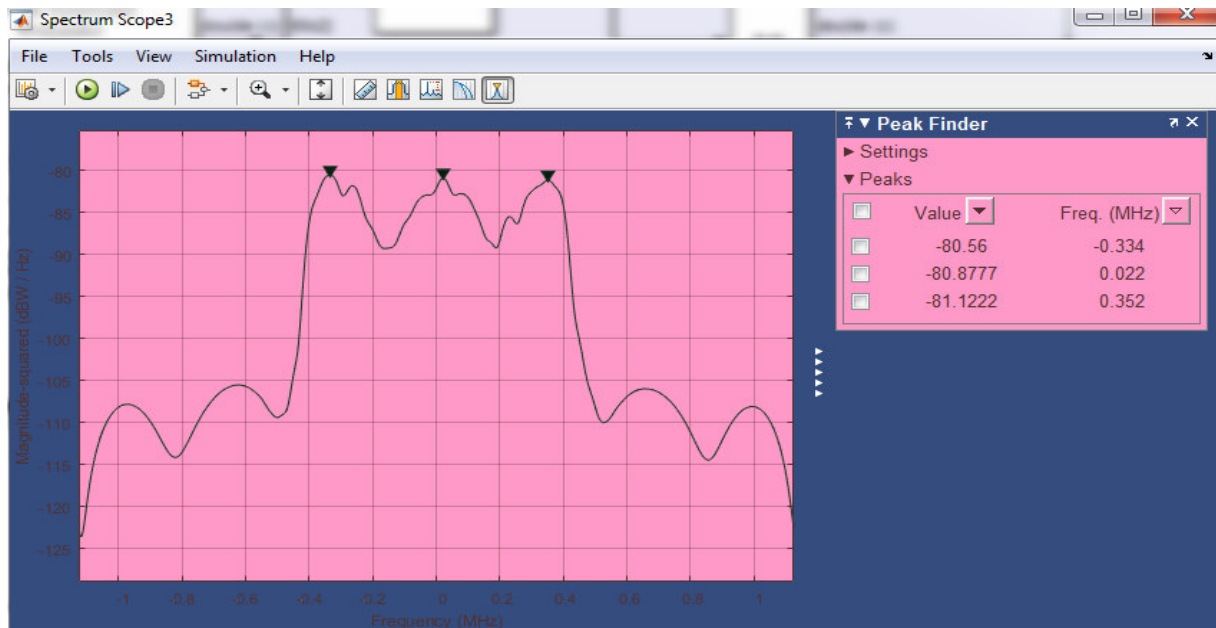


Figure 3.27: Représentation spectrale du signal à la sortie du canal Rayleigh Fading.

Pics(dbw/Hz)	Fréquences(MHZ)
-80.56	-0.334
-80.877	0.022
-81.122	0.352

Tableau 3.4: les fréquences des pics à la sortie du canal Rayleigh.

- A partir du tabelau 3.4 et figure 3.27, On note que les valeurs des sous porteuses ont été diminuée (ne sont pas proches) à cause des perturbations causées par ce canal.

3.5.3- Les spectres de signal avant et après la démodulation OFDM et QAM

Les figures si dessous représente le signale LTE avant la démodulation OFDM et QAM :

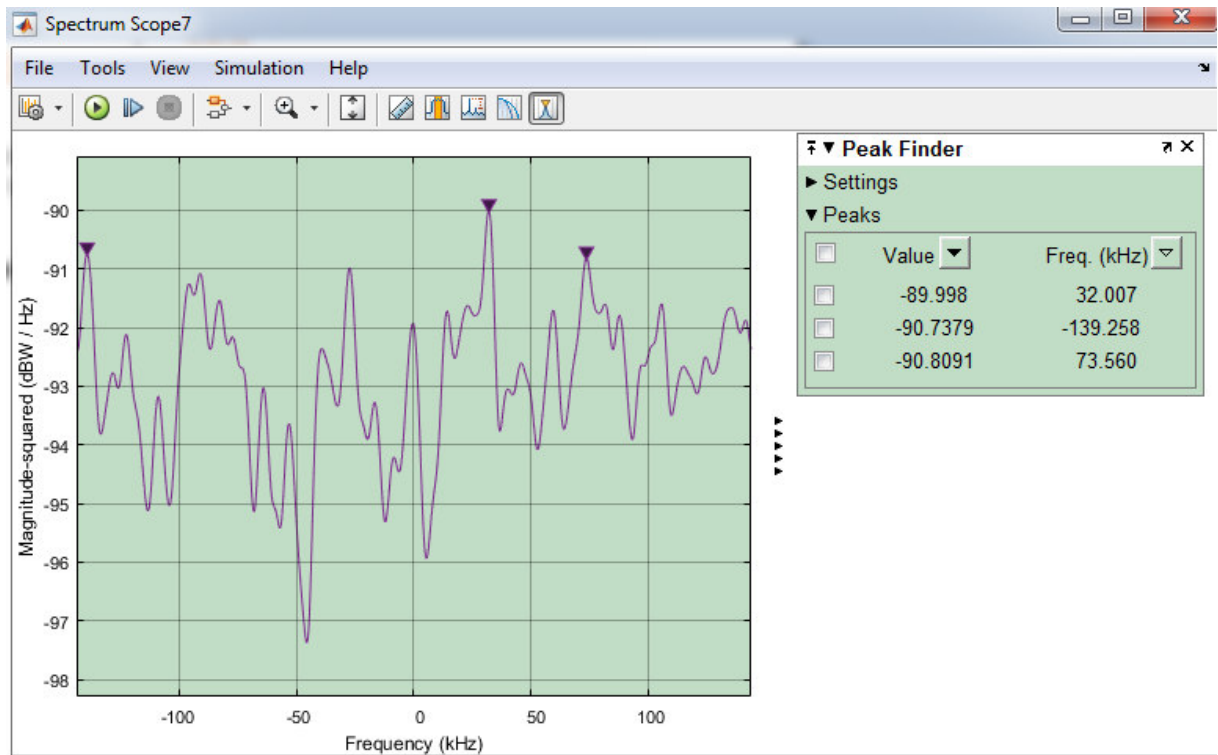


Figure 3.28: Représentation spectral du signal avant la démodulation OFDM.

Pics(dbw/Hz)	Fréquences(KHZ)
-89.998	32.007
-90.7379	-139.258
-80.0119	73.560

Tableau 3.5: les fréquences des pics avant la démodulation OFDM.

- Les pics sont plus proches mais la fréquence diminue.

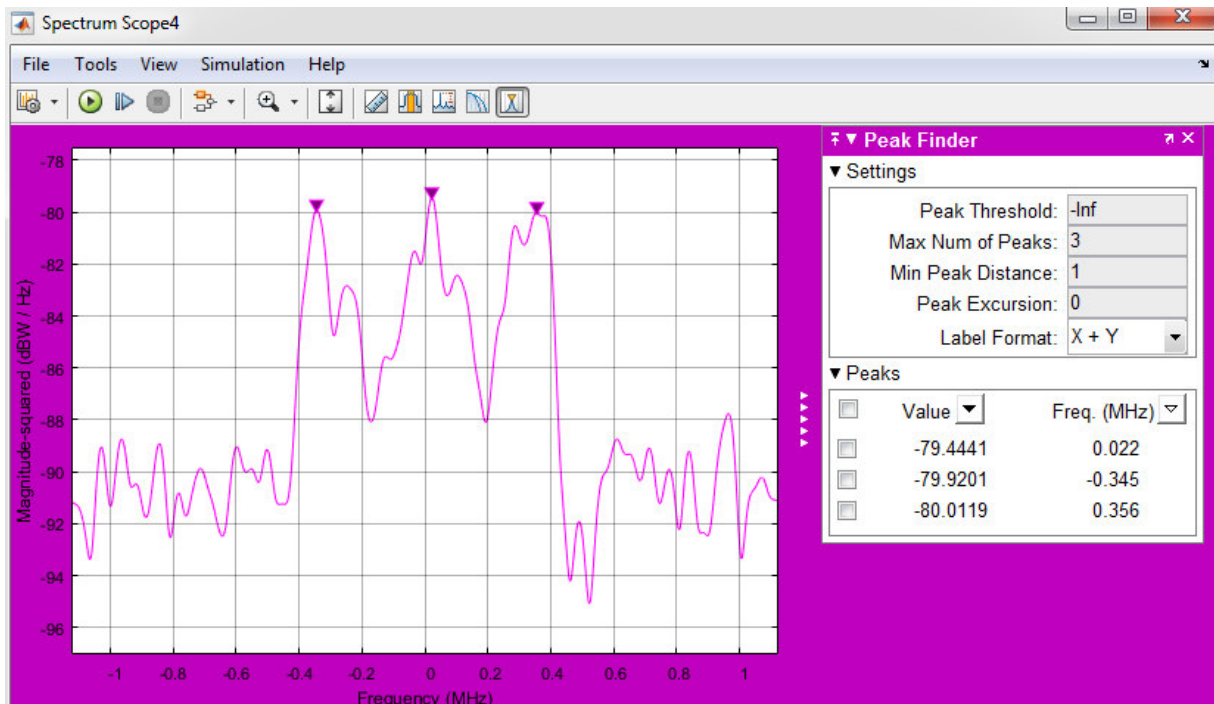


Figure 3.29: Représentation spectrale du signal après la démodulation OFDM et la démodulation QAM.

Pics(dbw/Hz)	Fréquences(MHZ)
-79.444	0.022
-79.920	-0.345
-80.0119	0.356

Tableau 3.6 : les fréquences des pics après la démodulation OFDM et QAM.

- Le signal représenté dans la figure 3.29 est passé par la démodulation OFDM et QAM et le bloc de décodage en remarque que la fréquence a été augmentée par rapport aux nombres des sous porteuses.
- La démodulation OFDM rend le signal reçu à son état initial avec des dégradations et des erreurs causées par les canaux de transmission.
- Les valeurs de la fréquence des pics de signal émis et du signal reçu sont presque les mêmes avec un décalage des sous porteuses (voir figure 3.26 et figure 3.29).
- La FFT a fait le travail inverse de la IFFT.

Remarque

La fréquence 0 d'un pic représente un DC (direct current sub-carrier), dans un signal LTE on considère pas ce pic car cette sous porteuse consomme beaucoup d'énergie.

Discussion

A partir des résultats de notre simulation, la modulation d'un signal numérique d'une trame de donnée est une chose importante dans le domaine de la communication, c'est la 1^{re} des choses passées dans la partie radio du réseau LTE, une technique de la division de la bande passante en plusieurs sous-porteuses chacune transporte un faible débit pour que tous les utilisateurs du réseau puissent connecter. Le critère est de comparer les fréquences et les valeurs des sous porteuses à chaque modulation et codage et à chaque démodulation et décodage avec la technique OFDM et bien comprendre le rôle de cette technique.

- La technique OFDM consiste à répartir le signal que l'on veut transmettre sur un grand nombre de sous porteuses.
- Les fréquences des sous porteuses avec un modulation OFDM soient les plus proches possible et ainsi transmettre le maximum d'informations sur une portion de fréquence.
- Avec La modulation QAM avec 16 états, l'erreur de transmission sera lente et va être stable dans certaines valeurs.
- Chaque sous porteuse modulant une donnée pendant une durée T_s qui ne change pas.
- L'intervalle de garde dans la technique OFDM est ajouté à chaque symbole pour minimiser l'étalement du retard du canal et les interférences inter-symboles.
- La modulation 16 QAM est utilisée pour obtenir un débit de données plus élevé qui code 4 bits par symboles.
- La modulation OFDM s'effectue à l'aide des circuits performants basé sur la transformée de Fourier rapide inverse IFFT.
- Les canaux de transmissions sont obligatoires pour faire passer le signal vers la démodulation.
- A la sortie d'un canal de transmission le signal reçu sera dégradé par le bruit introduit par ce canal.
- L'utilisation de la démodulation OFDM et QAM rend le signal en état initial avec l'utilisation du FFT et la démodulation QAM.
- La démodulation OFDM c'est le décalage des sous porteuses.
- La démodulation OFDM cause des erreurs de fréquence entre émetteur et récepteur et augmente le nombre d'erreurs sur les bits.

3.17- Conclusion

La simulation MATLAB que nous avons réalisée a permis de mettre en relief les intérêts d'une modulation et démodulation OFDM du point de vue signaux LTE émis et reçu avec cette technique, ainsi que les paramètres de la chaîne de transmission primordiaux (nombre de porteuses) à ajuster en fonction du canal et des données à transmettre. Dans cette partie de la simulation, nous avons réalisé une chaîne basic LTE avec la technique OFDM pour bien comprendre le rôle de la technique OFDM.

CONCLUSION GENERALE

Les générations successives de téléphonie mobile ont été développées pour garantir des performances de plus en plus élevées et donc offrir une meilleure qualité de service pour les utilisateurs. De nouvelles technologies ne cessent donc de se développer. Pour les communications mobiles, l'OFDM a suscité des intérêts croissants en raison de sa robustesse aux évanouissements par trajets multiples et sa capacité à réaliser une efficacité élevée de transmission. Les excellentes performances de l'OFDM ont justifié son adoption dans les systèmes LTE.

Le principal objectif de ce projet est bien de comprendre le rôle de la technologie OFDM dans le réseau LTE.

La simulation de programme Matlab que j'ai réalisée a permis de mettre en relief les intérêts d'une modulation OFDM dans le réseau LTE du point de vue des paramètres de la chaîne de transmission et réception à ajuster en fonction du canal et des données à transmettre.

Les résultats de simulation montrent que l'OFDM donne une amélioration de fréquence et de porteuses. On note que la modulation OFDM nous permet de transmettre un grand nombre d'informations en utilisant plusieurs sous porteuses, la technique OFDM divise la bande passante en plusieurs sous porteuses chacune transmet un faible débit pour que tous les utilisateurs du réseau LTE puissent se connecter. C'est un format de support du signal du réseau LTE très adapté au transport de données très élevées. Cette technique crée une nouvelle fenêtre sur le développement du réseau LTE.

Dans le futur cette technique reste le moyen utilisé pour le multiplexage des signaux dans le réseau 5G, en augmentant le nombre des sous porteuses et les modulations utilisées 256QAM.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] XAVIER LAGRANGE, LIVRE, Principe et évolution de l'UMTS, Lavoisier, 2005.
- [2] JAVIER SANCHEZ et MAMADOU THIOUNE, LIVRE, L'UMTS, Lavoisier, 2004.
- [3] HARRI HOLMA et ANTTI TOSKALA, LIVRE, UMTS les réseaux mobiles de troisième génération, Osman Eyrolles Multimédia, 2001.
- [4] Document, ERICSSON, WCDMA RAN operation, Ericsson, 2007.
- [5] SAMI TABBANE et MOHAMED.T, Pratique de l'ingénierie des réseaux cellulaires, LIVRE, Lavoisier, 2006.
- [6] TONYE.E et EWOUSSAOUA.L, Planification et ingénierie des réseaux de télécoms, mémoire pro de télécommunication, UNIVERSITY OF YAOUNDE I, 2016.
- [7] Documentation technique Orange Développer, Le réseau UMTS (3g).
- [8] JEAM CELLMER, Mémoire, Technique d'ingénieur, 2002.
- [9] URDAREANU.A, Réseau de la 4^e génération, rapport bibliographique, Université de Rennes, 2007.
- [10] STEFANIAS. et ISSAMT. MATTHEWB., LTE the UMTS long term evolution 2nd Evolution, Mémoire, 2011.
- [11] YANNIEK et HARDOUIN, Les réseaux 4G, LIVRE, Eyrolles, 2012.
- [12] S.B.WEINSTEIN et P.M.ERBERT, LIVRE, Data Transmission by Frequency Division Multiplexing using the Discrete Fourier Transform, 2001.
- [13] PIERRE GRUYER, SIMON PAILLARD, Mémoire, Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM, 12 décembre 2005
- [14] ERIK DAHLMAN et STEFAN PAKVALL, JOHAN SKOLD, Advanced for mobile Broadband, Modulation, Demodulation OFDM, LIVRE, 2011.
- [15] YVON MORI, Technique de Modulation, LIVRE, Lavoisier, 2006.
- [16] ABDUL AZIZ, M.AL YAMI, Chapter 4 of Hiroshi Harada BOOK (OFDM transmission), 2010.
- [17] Journal of signal and information processing, Frequency synchronisation in OFDM system, 2013.
- [18] D.Konkoh, Mémoire, Etude et simulation de l'interface radio LTE-advanced dans un environnement monocellulaire et multicellulaire, 2013.