

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D' ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Télécommunication et réseaux**

Présenté par

HADDADI BRAHIM

FACI SARAH

Thème

Etude et simulation sous MATLAB de la 4G LTE

Mémoire soutenu publiquement le 13/07/2015

Encadré par

M AIT BACHIR Youcef

Remerciements

AU TERME DE CE MÉMOIRE, NOUS TENONS À REMERCIER TOUT NATURELLEMENT EN PREMIER LIEU DIEU LE TOUT PUISSANT QUI M'A DONNÉ LA FORCE, LE COURAGE ET LA PATIENCE DE BIEN MENER CE TRAVAIL.

NOUS REMERCIONS MON PROMOTEUR, MONSIEUR AITBACHIR YUCEF POUR SON AIDE, SES CONSEILS ET SES REMARQUES PERTINENTES.

NOS REMERCIEMENTS S'ADRESSENT ÉGALEMENT À MONSIEUR LE PRÉSIDENT DE JURÝ ET LES MEMBRES DE JURÝ D'AVOIR ACCEPTER D'ASSISTER À NOTRE SOUTENANCE ET DE JUGER CE MODESTE TRAVAIL.

NOUS TENONS À REMERCIER, ÉGALEMENT, TOUS LES ENSEIGNANTS QUI ONT CONTRIBUÉS À NOTRE FORMATION.

NOS SENTIMENTS VONT ÉGALEMENT À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL.

Dédicace

SARAH,

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de ma mère que j'ai jamais connu que dieu l'accueil dans son vaste paradis,

Ma chère grande sœur Lilia qui ma toujours soutenu,

Mes parents,

Mon mari qui grâce a lui j'ai terminé mes étude,

Mon unique frère que dieu le garde,

Et a mes petites Thanina et Dihia,

Ma belle famille,

Tous mes amis.

BRAHIM,

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents,

A mes frères et sœurs,

A tous mes amis.

La table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I : évolution de la téléphonie mobile	
Introduction	2
1-1 -les limites de la 1 ^{ère} génération	2
1-2 -La 2eme génération de la téléphonie (2G)	2
1-2-1- le concept cellulaire	3
1-2-2-Architecture et principales caractéristique du GSM	4
1-2-3 Architecture de GSM.....	5
1-2-4- le GPRS (<i>General Packet Radio Service</i>) 2.5G.....	6
1-2-4-1-l'architecture du réseau GPRS.....	7
1-3 - La 3ème génération de la téléphonie mobile UMTS.....	10
1-3-1 - Architecture du réseau UMTS	10
1-3-1-1- Domaine de l'équipement de l'utilisateur (UE)	12
1-3-1-2- Domaine du réseau d'accès UTRAN	16
1-3-1-3- Domaine du réseau cœur	19
1-3-1-4- Domaine à commutation de circuits : domaine CS	19
1-3-1-5- Domaine à commutation de paquets : domaine PS	21
1-3-2- Fonctionnement du CDMA.....	22
1-4 La quatrième génération des téléphones mobiles 4G (LTE)	23
1-4-1 Définition des réseaux LTE.....	24
Conclusion	24
Chapitre II : Etude détaillé sur la 4G LTE	
Introduction	25
2-1 Définition	25
2-2 Buts de la 4G LTE	26
2-3 Architecture du LTE	26
2-3-1 EPC : Evolved Packet Core	28
2-3-1-1 La partie Signalisation	28
2-3-2 La partie radio eUTRAN.....	30

2-3-3 La partie IMS (IP Multimedia Sub-system).....	30
2-4-Principales différences entre les normes LTE et 3G UMTS	31
2-5-Les caractéristiques de la 4G	32
2-5-1-Les fréquences utilisées	32
2-5-2-Débits théoriques et débits réels	33
2-5-3- Débits et fréquences du réseau 4G	34
2-5-4 Latence	35
2-5-5-Codage et sécurité	36
2-5-6 Multiplexage.....	37
2-5-6-1 Structure d'une trame LTE	37
2-5-7 La mobilité	41
2-5-8- Modulation adaptative et codage	42
2-5-8-1 La modulation 16QAM.....	42
2-5-8-2- La modulation QPSK.....	43
2-5-9- Les types de transmission utilisée dans la 4 G	44
2-5-9-1-OFDMA	44
2-5-9-2- SC-FDMA	46
2-5-9-3 Comparaison entre l'OFDMA et le SC-FDMA.....	47
2-6- La qualité of service (QOS)	48
2-6-1 Définition	48
2-6-2 But de la QoS	48
2-6-3 Paramètres de la QoS	48
2-6-4 Qualité de service dans le réseau 4G	50
2-6-5 Exemple de Qualité de Service	50
Conclusion	51

Chapitre III : Le système MIMO-OFDM

Introduction	52
3-1 Système OFDM	52
3-1-1 Présentation de l'OFDM	52
3-1-2 Principe de la modulation OFDM	52
3-1-2-1 Notion d'orthogonalité	54
3-1-3- Modulation et démodulation OFDM	56
3-1-4- Implémentation numérique	58

3-1-5- Problème d'interférences	62
3-1-6 diagramme en bloc d'un émetteur/ récepteur OFDM	63
3-2 Système MIMO	65
3-2-1 Principe de la technique MIMO	65
3-2-2- Les différents types de codage MIMO	66
3-2-2-1- Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale.....	66
3-2-2-2- Le multiplexage par division spatiale	66
3-2-2-3- Le codage spatio-temporel par bloc	66
3-2-3- Capacité de canal	67
3-2-3-1 Capacité d'un système SISO	67
3-2-3-2- Canal SIMO	67
3-2-3-3- Canal MIMO.....	69
3-3 Système MIMO-OFDM	70
3-3-1 Transmetteur MIMO-OFDM	70
3-3-2 Récepteur MIMO-OFDM	71
3-4 Quelques Techniques de réception MIMO-OFDM	72
3-4-1 Zero-forcing (ZF)	72
3-4-2-Recursive least-squares (RLS).....	73

Chapitre III: simulation d'une transmission LTE- OFDM sous-matlab

Introduction.....	75
4-1 structure globale	75
4-1-1 les principaux éléments	77
4-1-2 description des différents blocs	77
4-2 implémentation sous-matlab.....	80
4-3 paramètres de simulation	82
4-3-1 transmission LTE (OFDM MIMO 2*2).....	82
4-3-1-1 la 1 ^{er} sous-partie	83
1-un seul symbole par sous-tram	83
1-1 la 1 ^{er} simulation.....	83
1-2 2eme simulation	86
1-3 3eme simulation	91
4-3-1-2 la 2eme sous-partie	93

2- deux symboles par sous-trame	93
2-1 la 1 ^{er} simulation	94
2-2 la 2eme simulation	96
2-3 la 3eme simulation	100
4-3-2 transmission LTE (OFDM MIMO 4*4)	102
4-3-2-1 la 1 ^{er} sous-partie	103
1- Un seule symbole par sous-trame	103
1-1 la 1 ^{er} simulation	103
1-2 la 2eme simulation	105
1-3 la 3eme simulation	110
4-3-2-2 la 2eme sous-partie.....	113
2- Deux symboles par sous-trame	113
2-1 la 1 ^{er} simulation	113
2-2 la 2eme simulation.....	115
2-3 la 3eme simulation	119
Conclusion générale.....	122

Liste des figures

Figure 1-1 : Figure représentant un motif élémentaire (à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite).....	3
Figure 1-2 : Architecture du réseau GSM.....	5
Figure 1-3: Architecture du réseau GPRS.....	7
Figure 1-4 : Les interfaces dans le réseau GPRS	9
Figure 1-5 : Les trois grandes composantes de l'architecture d'un réseau UMTS	11
Figure 1-6 : Architecture générale du l'UMTS.....	11
Figure 1-7 : l'équipement de l'utilisateur (UE)	13
Figure 1-8 : Protocoles d'interface radio : Uu	14
Figure 1-9 : Architecture du réseau d'accès UTRAN.....	17
Figure 1-10 : technique de multiplexage pour la norme UMTS	18
Figure 1-11 : méthodes d'accès CDMA.....	23
Figure 2-1 : Présentation générale sur le système LTE.....	26
Figure 2-2 : Architecture générale du LTE.....	27
Figure 2-3: Architecture d'EPS (Evolved Packet System)	27
Figure 2-4 : Architecture du réseau cœur EPC	28
Figure 2-5 : le plan usager et le plan de contrôle	35
Figure 2-6 : Le fonctionnement d'une trame radio.....	38
Figure 2-7 : Structure de la trame radio	39
Figure 2-8 : Les slots d'une trame radio.....	40
Figure 2-9 : Constellation QAM à 16 états	42
Figure 2-10 : Schéma du principe du modulateur QPSK	43
Figure 2-11 : Les porteuses de l'OFDMA.....	45
Figure 2-12 : Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA	47
Figure 2-13 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA	47
Figure 3-1 : Modulation OFDM avec $N_c=4$ sous-porteuse	53
Figure 3-2 : Le spectre d'une sous-porteuse	55
Figure 3-3 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM.....	55
Figure 3-4 : Exemple d'une constellation E-QAM	56
Figure 3-5 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM	57
Figure 3-6 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM	58
Figure 3-7 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM numérique	60
Figure 3-8 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM numérique	61.

Figure 3-9 : Passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM..	62
Figure 3-10 : Principe du préfixe cyclique.....	63
Figure 3-11 : Description dans le domaine temps/fréquence d'un symbole OFDM avec un préfixe cyclique (CP)	63
Figure 3-12 : Diagramme en bloc d'un émetteur/récepteur OFDM	64
Figure 3-13 : Principe du MIMO	65
Figure 3-14 : Système SISO.....	67
Figure 3-15 : Système SIMO	68
Figure 3-16 : Système MIMO.....	69
Figure 3-17 : Transmetteur MIMO-OFDM	70
Figure 3-18 : Récepteur MIMO-OFDM.....	71

Liste des abréviations

1G	1ère Génération
2G	2ème Génération
3G	3ème Génération
4G	4ème Génération
5G	5ème Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project

A

AUC:	Authentication Center
------	-----------------------

B

BPSK	Binary Phase Shift Keying
BTS	Base Transceiver Station
BSIC	Base Station Identity Code
BG	Border Gateway

C

CSI	Channel State Information
CS	Circuit Switched
CS	Circuit-Switched
CDMA	Code Division Multiple Access
C-RNC	Controlling - RNC

D

DFT	Discrete Fourier Transform
DCS	Digital Communication System
DNS	Domain Name System :

E

EIR :	Equipment Identity Register
E-UTRA	Evolved-Universal Terrestrial Radio Access
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
eNodeB	evolved NodeB
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution

F

FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
FDD	Frequency Division Duplex

G

GTP	Gate Tunnelling Protocol
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service

H

HLR :	Home Location Register
HSPA	High Speed Packet Access

I

IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IES	Interférence Entre Symboles
IEP	Interférence Entre Porteuses
IP	Internet Protocol

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS IP Multimedia Sub-system

L

LTE Long Term Evolution
LAN Local Area Network
LLC Logical Link Control
LIG Legal Interception Gateway

M

MIMO Multiple Input Multiple Output

MISO Multiple Input Single Output

MSC : Mobile Switching Center

ME : Mobile Equipement

MME Mobility Management Entity

MME Mobility Management Entity

MT : Mobile Termination

N

NGN Next Generation Network

NTT Nippon Telegraph & Telephone

O

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

P

PCU Packet Control Unit

PS Packet Switched

PDN GW Packet Data Network Gate-Way

PGW	Packet Switch-GetWay
PDN	GW Packet Data Network Gate-Way
PDP	Packet Data Protocol
PDSN	Packet Data Serving Node
PCRF	Policy and Charging Rules Function

Q

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QOS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

R

RNC	Radio Network control
-----	-----------------------

S

STBC	Space-Time Block Code
SNR	Signal to Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SGSN	Serving GPRS Support Node
SNDCP	Sub-Network Dependent Convergence Protocol
SIM	Sucriber Identity Module
S-RNC	Serving - Radio Network Controler)
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
SAE	System Architecture Evolution
S-GW	Serving-GetWay

T

TDMA	time division multi acces
TE :	Terminal Equipement
TDD	Time Division Duplex

Introduction :

Depuis quelques années, les réseaux mobiles sans fils ont connu une évolution qui n'a cessé de croître, d'abord la 1ère génération, la 2ème génération (GSM), la 3ème génération (UMTS) puis la 4ème génération (LTE), et ne compte pas s'arrêter là, car il y aura d'autres qui vont suivre : la 4ème génération LTE-Advanced et la sortie de la 5ème génération en 2016.

Les communications sans fils font l'objet d'étude d'un grand nombre de chercheurs, ceci dans l'objectif d'obtenir une bonne qualité de communication sans fil avec des débits de transmission élevés et de libérer les usagers des câbles afin de leur permettre de se déplacer tout en restant connectés. Dans cette optique le LTE qui est un projet mené par l'organisme 3GPP (3rd Generation Partner Ship Project) qui vise à standardiser le réseau mobile sans fil (4G) mondial qui offre à l'utilisateur des services où il peut être connecté au reste du monde partout et à n'importe quel moment tel que : voix, transport de données, vidéo ...etc.

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz dans une plage de fréquences théorique de 450 MHz à 3,8 GHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz ou 10 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « liaison descendante » (downlink, vers le mobile).

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la technologie LTE nous voulions faire un stage pratique au sein d'une société concernée mais hélas nous n'avons pas eu cette chance, alors nous avons utilisé nos propres moyens.

Le problème des différents systèmes de transmission aérien c'est les trajets multiples donc il faut bien faire un test avant de les implémenter sur le terrain et parmi ses tests on a choisi de simuler la liaison descendante de la 4G LTE sous matlab pour bien définir les bons paramètres à exploiter pour remédier à ce problème.

Notre mémoire est organisée comme suite :

Introduction générale.

Le 1^{er} chapitre présente l'évolution de la téléphonie mobile.

Le deuxième chapitre l'étude détaillée de la 4G LTE.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des systèmes MIMO-OFDM.

Le quatrième chapitre présente les résultats des simulations.

Conclusion générale.

Introduction:

Depuis plusieurs années le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé d'accroître, plusieurs générations ont vues le jour (1G, 2G, 3G, 4G et prochainement la 5G pas encore mis en œuvre) et connues une évolution remarquable, en apportant un débit exceptionnel et qui ne cesse d'augmenter, une bande passante de plus en plus large et un des avantages d'une telle bande passante est le nombre d'utilisateur pouvant être supportés. Les réseaux de la 1^{ère} génération (appelée aussi 1G) ont été intégrés au réseau de télécommunication dans les années 80. Ces systèmes ont cependant été abandonnés il y a quelques années laissant la place à la seconde génération, appelée 2G lancée en 1991. Elle est encore active de nos jours. Nous pouvons distinguer deux autres types de générations au sein même de la seconde : la 2.5 Le principal standard utilisant la 2G est GSM. A la différence de la 1G, la seconde génération de normes permet d'accéder à divers services, comme l'utilisation du WAP permettant d'accéder à Internet, tant dit que pour la 3^{ème} génération connue sous le nom de 3G permet un haut débit pour l'accès à l'internet et le transfert de données. En ce qui concerne la nouvelle génération 4G(LTE), déployer jusque-là que par quelque pays, elle permet le très haut débit, une moindre latence et beaucoup d'autres services qu'on verra par la suite dans le prochain chapitre.

1-1les limites de la 1^{ère} génération :

La 1G avait beaucoup de défauts, comme les normes incompatibles d'une région à une autre, une transmission analogique non sécurisée (écouter les appels), pas de roaming vers l'international (roaming est la possibilité de conserver son numéro sur un réseau d'un autre opérateur).

1-2-La 2eme génération de la téléphonie (2G):

La deuxième génération (2G) des systèmes cellulaires reposant sur une technologie numérique a été développée à la fin des années 1980. Ces systèmes cellulaires utilisent une technologie numérique pour la liaison ainsi que pour le signal vocal. Ce système apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur, il a connu un succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des mini messages (SMS, limités à 160 caractères). Ainsi qu'il autorise le roaming entre pays exploitant le réseau GSM.

1-2-1- le concept cellulaire : [1]

Le concept cellulaire constitue le principe de base des réseaux radio mobiles. La zone desservie par un opérateur est divisée en cellules alimentées à partir d'une station de base. Une cellule représente l'ensemble des points du territoire couvert par une même BTS (Base Transceiver Station) et le signal transmis par cette BTS est le plus fort. Chaque cellule est identifiée par un BSIC (Base Station Identity Code). Le mobile est toujours connecté à la BTS la plus proche de point de vue radio. La figure 1-1 montre un exemple de ce concept.

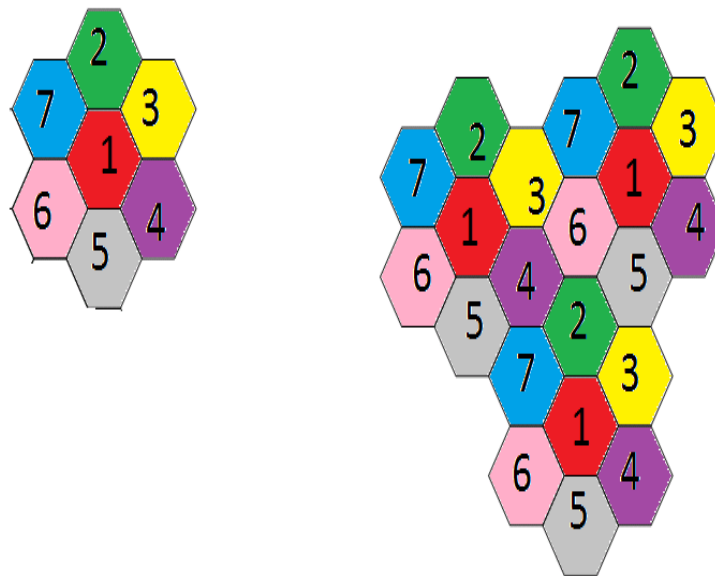


Figure 1-1 : Figure représentant un motif élémentaire (à gauche) et un ensemble de motifs dans un réseau (à droite).

L'utilisation du concept cellulaire permet d'ajuster les ressources radio à la demande en trafic. Le principe se traduit par des zones à forte concentration de BTS couvrant de petites cellules et des zones rurales à faible concentration de BTS couvrant des cellules.

Il faut noter que la taille des cellules n'est pas la même sur tout le territoire.

En effet, celle-ci dépend :

- du nombre d'utilisateurs potentiels dans la zone,
- de la configuration du terrain (relief géographique, présence d'immeubles, ...).
- de la nature des constructions (maisons, buildings, immeubles en béton, ...).
- de la localisation (rurale, suburbaine ou urbaine) et donc de la densité des constructions.

On distingue quatre types de cellules : Macro, micro, pico, 'umbrella' cellules.

Macro cellule : cellule à grande couverture, avec antenne au dessus des obstacles,

Microcellule : cellule a couverture moyenne, avec antenne sous le niveau moyen des toits, elle est utilisée souvent en zone urbaine,

Pico cellule : petite cellule de quelque dizaine de mètres, souvent en intérieur

Cellule umbrella (parapluie) : cellule destinée à couvrir des lieux masqués par des obstacles (hauts bâtiments), ou a réaliser la couverture entre deux cellules.

1-2-2-Architecture et principales caractéristique du GSM : [2]

La norme GSM prévoit que la téléphonie mobile par GSM occupe deux sous bandes de fréquences autour de 900 MHz :

1. la bande de fréquence 890 – 915 [M H z] pour les communications montantes (du mobile vers la station de base)

2. la bande de fréquence 935 – 960 [M H z] pour les communications descendantes (de la station de base vers le mobile). Comme chaque canal fréquentiel utilisé pour une communication a une largeur de bande de 200 [kH z], cela laisse la place pour 124 canaux fréquentiels à répartir entre les différents opérateurs, mais le nombre d'utilisateur augmentant il s'est avéré nécessaire d'attribuer une bande supplémentaire aux alentours des 1800 [M H z]. On a donc porté la technologie GSM 900 [M H z] vers une bande ouverte à plus haute fréquence. C'est le système DCS-1800 (*Digital Communication System*) dont les caractéristiques sont quasi identiques au GSM en termes de protocoles et de service. Les communications montantes se faisant alors entre 1710 et 1785 [M H z] et les communications descendantes entre 1805 et 1880 [MH z].

Connaissant les différents canaux disponibles, il est alors possible d'effectuer un multiplexage fréquentiel, Plusieurs techniques de multiplexages sont utilisées dans les différents systèmes :

FDMA : (*Frequency Division Multiple Access*), en attribuant un certain nombre de fréquences porteuses par station de base. Un opérateur ne dédie pas pour autant une bande de fréquences par utilisateur, car cela conduirait à un gaspillage de ressources radio étant donné qu'un utilisateur émet par intermittence.

TDMA : (*Time Division Multiple Access*) consistant à diviser chaque canal de communication en trames de 8 intervalles de temps (dans le cas du GSM).

Ainsi, avec le TDMA, il est par exemple possible de faire parler huit utilisateurs l'un après l'autre dans le même canal.

On multiplie donc le nombre de canaux disponibles par unité de temps par huit.

1-2-3 Architecture de GSM : [3]

L'architecture d'un réseau GSM peut être divisée en *trois* sous-systèmes :

A- Le sous-système radio contenant la station mobile, la station de base et son contrôleur. (BSS)

B- Le sous-système réseau ou d'acheminement.(OSS)

C- Le sous-système opérationnel ou d'exploitation et de maintenance.(NSS)

Les éléments de l'architecture d'un réseau GSM sont repris sur le schéma de la

Figure 1-2

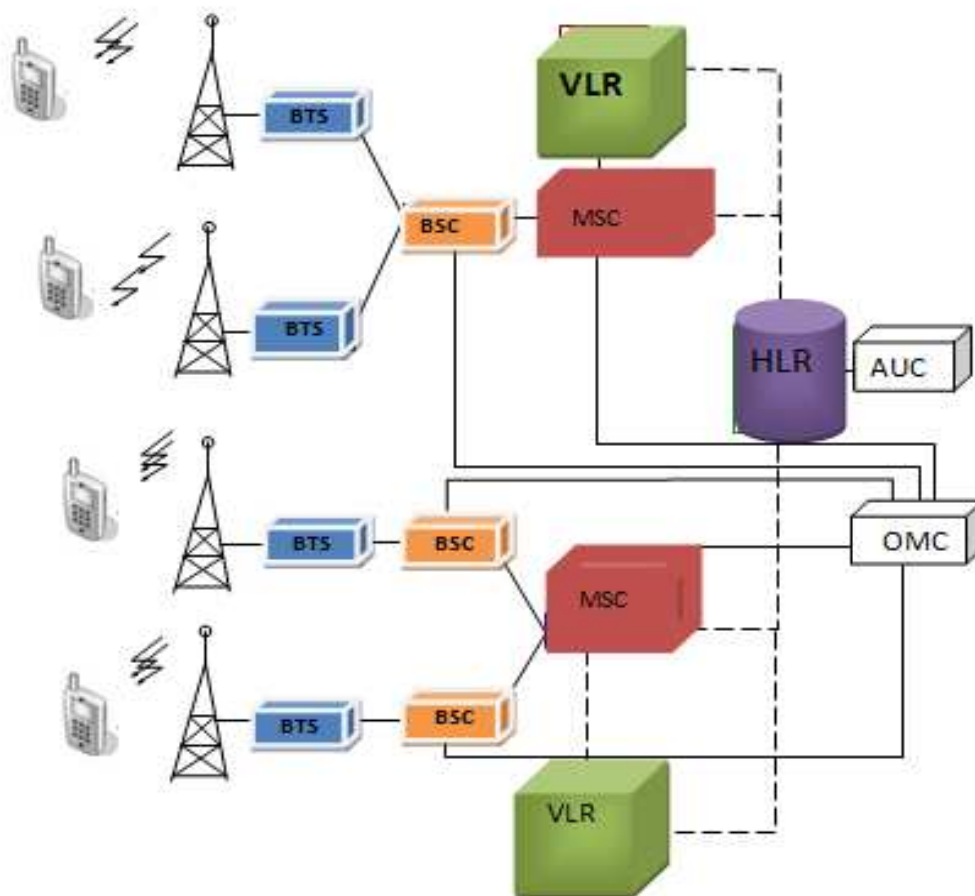


Figure 1-2 : Architecture du réseau GSM

A. Le sous-système radio (BSS) :

BSS (base station sub-system), c'est un sous-système de l'architecture GSM qui assure les transmissions radioélectriques et gère la ressource radio. Le BSS comprend les BTS qui sont des émetteurs-récepteurs ayant un minimum d'intelligence et les BSC (Le contrôleur de station de base) qui contrôlent un ensemble de BTS et permettent une première concentration des circuits.

B- Le sous-système réseau (NSS) :

Le sous-système réseau, appelé *Network Switching Center* (NSS), joue un rôle essentiel dans un réseau mobile. Alors que le sous-réseau radio gère l'accès radio, les éléments du NSS prennent en charge toutes les fonctions de contrôle et d'analyse d'informations contenues dans des bases de données nécessaires à l'établissement de connexions utilisant une ou plusieurs des fonctions suivantes : chiffrement, authentification ou roaming.

Le NSS est constitué de :

- MSC : (*Mobile Switching Center*) Le centre de commutation mobile
- HLR : (*Home Location Register*) L'enregistreur de localisation
- AUC: (*Authentication Center*)
- VLR : (*Visitor Location Register*) L'enregistreur de localisation des visiteurs.
- EIR : (*Equipment Identity Register*) L'enregistreur des identités des équipements

C- Le centre d'exploitation et de maintenance (OSS) :

Cette partie du réseau regroupe trois activités principales de gestion : la gestion administrative, la gestion commerciale et la gestion technique. Le réseau de maintenance technique s'intéresse au fonctionnement des éléments du réseau. Il gère notamment les alarmes, les pannes, la sécurité, . . . Ce réseau s'appuie sur un réseau de transfert de données, totalement dissocié du réseau de communication GSM.

C-1- OMC :

les OMC permettent une supervision locale des équipements (BSC /MSC / VLR) et assurent une fonction de médiation.

1-2-4- le GPRS (*General Packet Radio Service*) 2.5G: [4]

L'idée du GPRS est venue de l'utilisation de plus en plus courante de l'internet. Lors de la consultation de pages web, une session peut durer plusieurs dizaines de minutes, alors que les données ne sont réellement transmises que pendant quelques secondes, durant le téléchargement des pages. Le trafic de données engendré est donc très sporadique, contrairement à un trafic de voix.

Le changement important apporté au réseau GSM est l'addition d'une unité de contrôle paquet PCU (Packet Control Unit) à la station de contrôle de base BSC. Le GPRS avec tous ces éléments est semblable au GSM excepté, l'ajout d'une partie de manipulation des paquets

1-2-4-1-l'architecture du réseau GPRS :

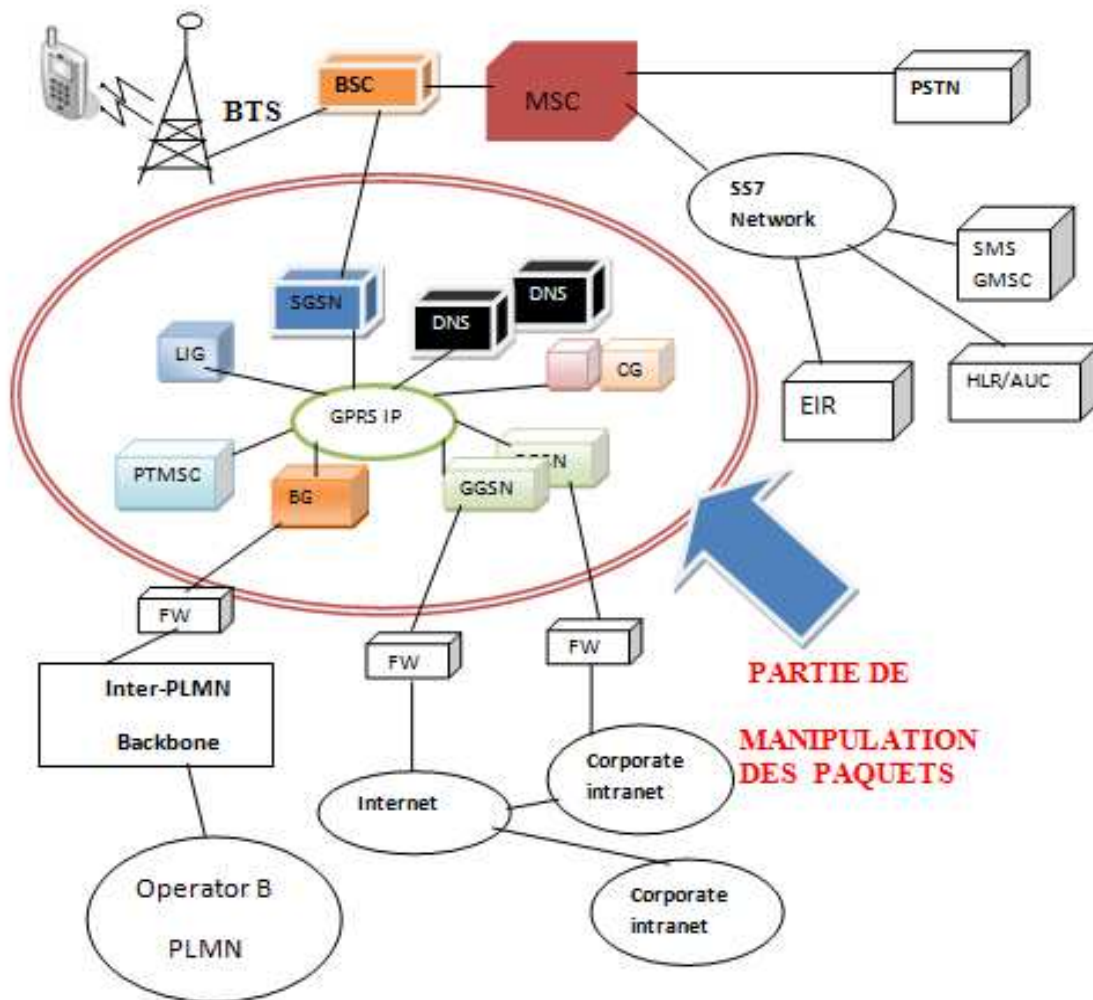


FIGURE 1-3: Architecture du réseau GPRS.

A- La station mobile GPRS :

La différence fondamentale entre le mobile GSM et le mobile GPRS est que la station mobile GPRS est arrangée en trois classes, A, B, et C, basées sur leur capacité de manipuler les réseaux cellulaires. Les mobiles de la classe A sont connectés aux deux réseaux en même temps, GSM et GPRS et ils peuvent les utiliser simultanément. Les mobiles de la classe B sont connectés aussi aux deux en même temps, mais, ils ne peuvent utiliser qu'un seul à un temps donné. Les mobiles de la classe C ne peuvent être connectés qu'à un seul réseau à la fois.

B- Le commutateur SGSN (Serving GPRS Support Node) :

Le commutateur SGSN est l'élément le plus important dans le réseau GPRS. C'est le point du service d'accès à la station mobile. Ces principales fonctions incluent la gestion de mobilité, l'enregistrement et l'authenticité (légalisation). Il trouve son utilité beaucoup plus avec les mobiles à flux de données en paquet, qui peuvent être compressés et segmentés par des protocoles comme le SNDCP (Sub-Network Dependent Convergence Protocol) et le LLC (Logical Link Control). Le SGSN est aussi responsable de l'accordement du protocole GTP (Gate Tunnelling Protocol) aux autres commutateurs.

C- Le commutateur GGSN (Gateway GPRS Support Node) :

Le GGSN est connecté au SGSN sur le bord du réseau et aux autres réseaux mondiaux extérieurs comme l'internet et le X.25. Comme il est la porte vers les réseaux extérieurs, sa principale fonction est de protéger le réseau GPRS de tout événement extérieur. Quand les données sont issues d'un réseau externe, après vérification d'adresse, les données sont envoyées vers le SGSN. Si l'adresse est invalide, les données sont rejetées. D'autre part, le SGSN achemine les paquets reçus du mobile vers le réseau correct. Pour les réseaux externes, le rôle de SGSN est l'acheminement d'information.

D- La porte frontière BG (Border Gateway) :

Elle interconnecte différents opérateurs de réseaux d'interconnexion GPRS, afin de faciliter le roaming, basé sur la technologie du routeur standard IP.

E- La porte d'interception légale LIG (Legal Interception Gateway) :

Elle performe les fonctions dans le réseau. La souscription des données et la signalisation peuvent être interceptées en utilisant cette porte, ce qui aide les autorités à attaquer les activités criminelles. La porte LIG est requise quand le service GPRS est lancé.

F- Le système nom de domaine DNS (Domain Name System) :

Il translate le nom host IP (Internet Protocol) à une adresse IP, ce qui rend la configuration du réseau IP facile. Dans le réseau d'interconnexion GPRS, Le SGSN utilise le DNS pour avoir l'adresse IP de GGSN et de SGSN.

G- L'unité de contrôle paquet PCU (Packet Control Unit) :

C'est une nouvelle carte implantée dans le BSC afin de gérer le trafic du réseau GPRS. La PCU trouve sa limitation par le nombre d'émetteurs/ récepteurs et les stations de base qui peut gérer, qui veut dire que, l'augmentation de la capacité de PCU inclus directement une élévation en coût de la conception du hardware du réseau.

H- Les interfaces dans le réseau GPRS :

Les différentes interfaces du réseau GPRS sont représentées par la figure 1-4 :

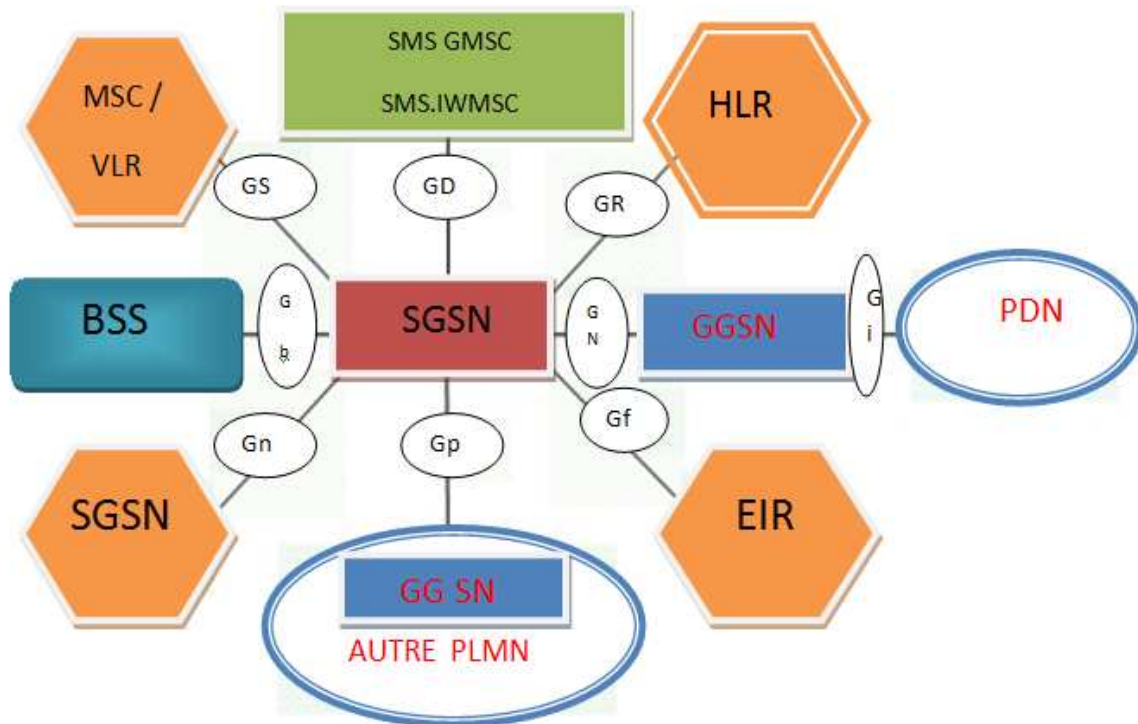


Figure 1-4 : Les interfaces dans le réseau GPRS

- **L'interface Gb:** C'est une interface qui relie entre le BSS et le SGSN. elle emporte le trafic et assure la signalisation d'information entre le BSS (du GSM) et le réseau GPRS, ce qui la rend la plus importante interface dans l'élaboration du réseau.
- **L'interface Gn:** C'est une interface SGSN/SGSN et SGSN/GGSN du même réseau. Elle fournit les données et la signalisation pour le fonctionnement d'intra-système.
- **L'interface Gd:** Elle se trouve entre le SMS-GSMC/SMS-IWMSC et le SGSN, retrouvée pour une bonne utilisation du service SMS
- **L'interface Gp:** Elle relie le SGSN au GGSN des autres réseaux publics des autres pays, dans d'autre terme c'est une interface entre deux réseaux GPRS. Elle est très importante, selon son emplacement stratégique et ses fonctions incluant la sécurité, le routage ...etc.
- **L'interface Gs:** Elle relie le SGSN au MSC/VLR.
- **L'interface Gr:** C'est l'interface entre le SGSN et HLR, toutes les informations concernant l'abonné sont estimées par le SGSN de HLR.
- **L'interface Gf:** Elle fournit des informations au SGSN concernant **MSC/ VLR**

Les équipements matériels dans l'EIR (Equipment Identity Register)

1-3- La 3^{ème} génération de la téléphonie mobile UMTS (Universal Mobile Terrestrial System) : [5]

La 3G a été impulsée pour permettre des applications vidéo sur le mobile et améliorer la QoS du Multimédia. Les applications visées étaient la possibilité de regarder youtube, de la visiophonie,... Outre l'augmentation de débit, un point complexe à résoudre était de passer d'un service de téléphonie (à connexion circuit) vers un service DATA (connexion paquets). L'idée était d'ajouter des amplificateurs avant chaque antenne, il amplifie le signal pour que celui-ci puisse être reçu par une autre antenne, en changeant les techniques de modulation. Pour cela il a fallu améliorer les terminaux (Smartphone, Tablette...) permettant un usage plus confortable de la connexion haut débit.

1-3-1- Architecture du réseau UMTS : [6,7]

L'architecture du réseau UMTS est composée de trois domaines: le domaine utilisateur, le domaine d'accès radio ou réseau d'accès (Access Network), et le domaine du réseau cœur (Core Network) Comme la montre la figure 1-5.

Le domaine utilisateur : est similaire à celui qui avait été défini pour le GSM. Il se compose d'un terminal capable de gérer l'interface radio et d'une carte à puce, la carte USIM (Utilisator Subscriber Identity Module), qui contient les caractéristiques de l'utilisateur et de son abonnement.

Le domaine d'accès radio : l'UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network)

Le domaine du réseau cœur : (Core Network) est hérité de l'architecture NSS du GSM et est constitué d'une partie commutation de circuits (MSC-GSM). Les nœuds de signalisation, la gestion de la mobilité, les services réseaux intelligents et les HLR, AUC, EIR ... devront évoluer pour intégrer les spécificités UMTS. En outre, ce réseau cœur peut être connecté à d'autres réseaux radios que l'UTRAN: GERAN ou BRAN (broadband Radio Access Network), utilisant une technologie du type Hiperlan 2 ou IEEE 802.11.

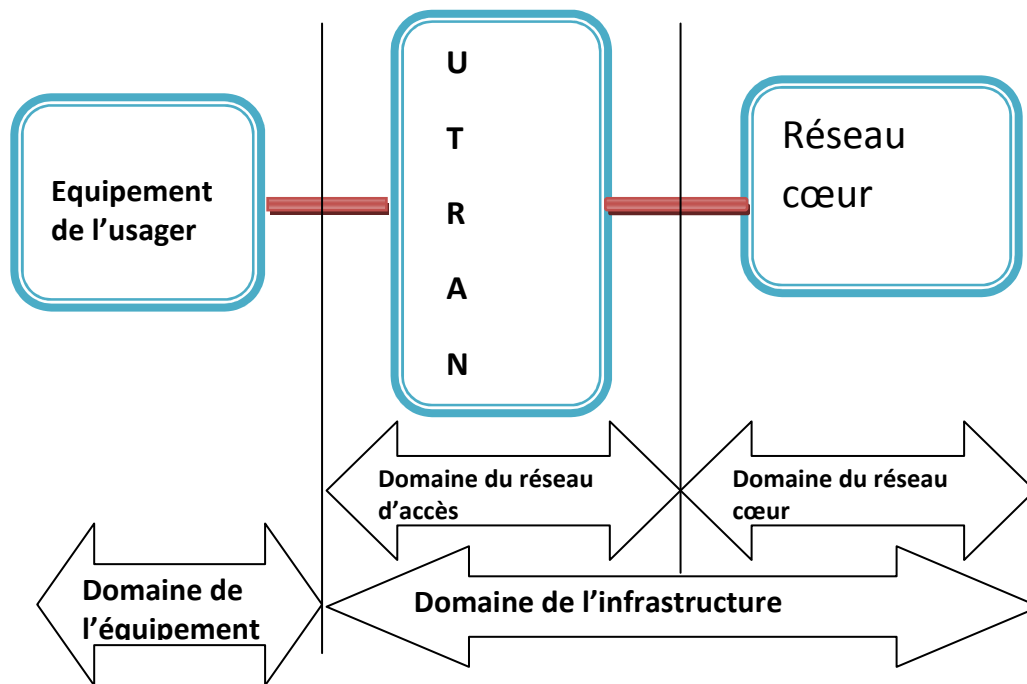


Figure 1-5 : Les trois grandes composantes de l'architecture d'un réseau UMTS.

Le réseau UMTS est constitué d'entités logiques assurant chacune une fonction précise. Ces entités sont groupées dans UTRAN chargé des fonctions radio UE l'interface utilisateur exploitant le médium radio et le CN responsable de la communication et du routage d'appels et de données vers le réseau extérieurs. La figure 1-6 montre l'architecture générale de l'UMTS

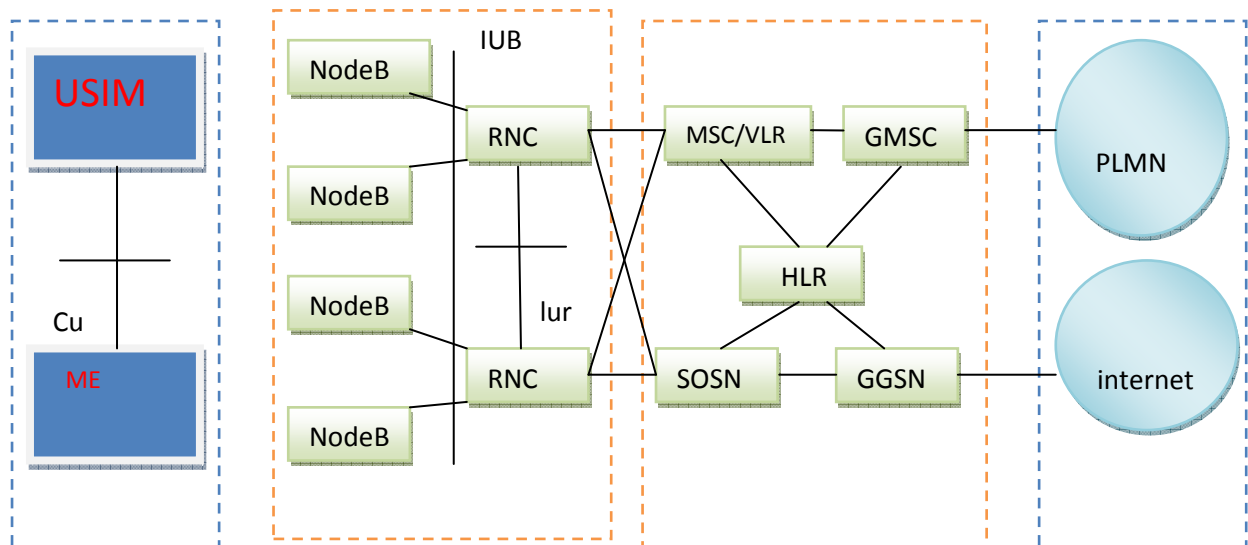


Figure 1-6 : Architecture générale de l'UMTS.

1-3-1-1- Domaine de l'équipement de l'utilisateur (UE) :

L'équipement usager est utilisé pour désigner la station mobile dans un réseau UMTS. Il représente le vecteur qui permet à l'abonné d'accéder au réseau et également à ses services. On distingue deux différentes parties au point de vue fonctionnel :

L'équipement mobile : (ME : Mobile Equipment) et le module d'identité

Universel de l'abonné :(USIM : Universal Subscriber Identity Module).

A- ME (Mobile Equipment)

L'équipement mobile est chargé de la transmission radio et des procédures associées. Il est encore divisé en deux parties : la terminaison mobile (MT : Mobile Termination) et l'équipement terminal (TE : Terminal Equipment).

La terminaison mobile assure la transmission de l'information vers le réseau UMTS (ou autre) à travers l'interface radio et applique les fonctions de modulation, de correction d'erreurs, d'étalement de spectre et d'autre encore qui lui sont l'intermédiaire d'un adaptateur, est la partie de l'UE où les données d'information sont générées en émission ou traitées en réception.

Le MT et le TE peuvent faire partie d'un équipement unique ou être séparés en deux équipements. Le TE peut être par exemple, un ordinateur portable et le MT un terminal mobile utilisé comme modem.

B- USIM (UMTS Integrated Circuit Card):

L'USIM est une application qui permet à l'abonné d'accéder aux services souscrits. Elle gère également les informations associées à la souscription de l'abonné et les procédures d'authentification et de chiffrement. L'USIM réside dans une carte à puce (smart card) appelée UICC (UMTS Integrated Circuit Card).

Comme la carte SIM (Subscriber Identity Module) utilisée en GSM, l'USIM conserve les informations liées à l'abonné et bien d'autres propres à un environnement où plusieurs opérateurs et plusieurs fournisseurs de services peuvent intervenir. L'USIM peut être utilisée sur un terminal UMTS indépendamment du fabricant et en général de l'opérateur du réseau : la carte associe un abonné à un ou plusieurs fournisseurs de service et pas nécessairement à l'opérateur du réseau courant.

Au niveau de l'infrastructure, c'est dans le réseau nominal que les informations concernant les services souscrits par l'abonné sont enregistrées. L'USIM est la clef d'accès à ces services.

Lors d'une demande de service (un appel téléphonique par exemple), le réseau de service dans lequel l'abonné est itinérant doit dialoguer avec le réseau d'accès (radio ou câblés) nécessaire suivant les conditions et les caractéristiques des services souscrits.

L'UICC peut contenir une application USIM et SIM, ce qui peut permettre son utilisateur aussi bien dans un réseau UMTS que GSM. D'ailleurs, les mécanismes permettant l'accès à un réseau GSM peuvent être directement imbriqués dans l'USIM. Enfin, plusieurs applications USIM peuvent résider dans une même UICC, chacune pouvant être associée à différents fournisseurs de service. Toutes ces possibles configurations pour l'UICC sont schématisées ci-dessous. (Figure 1-7).

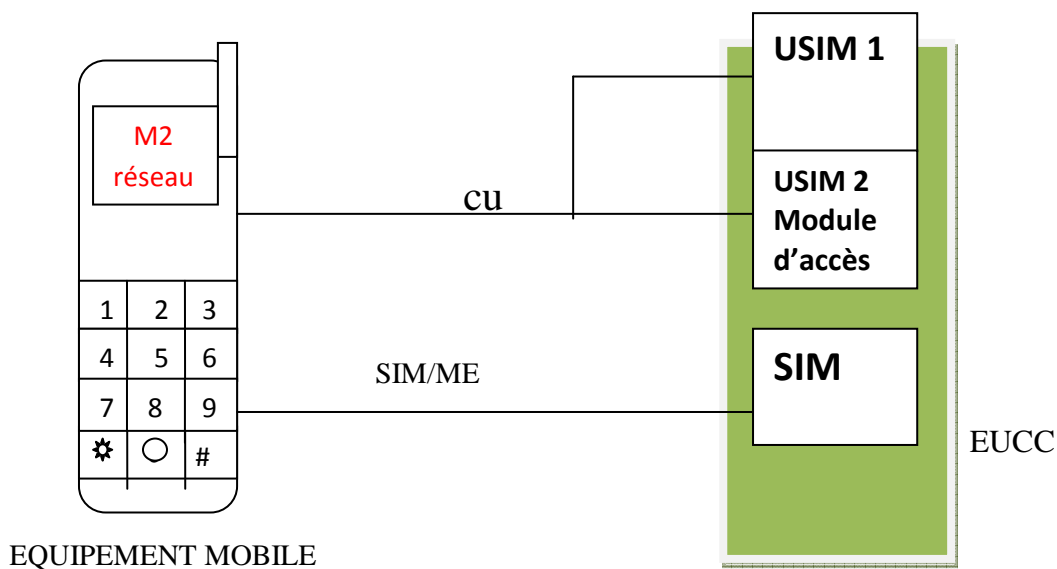


Figure 1-7 : l'équipement de l'utilisateur (UE)

Les informations contenues dans l'USIM comprennent :

- 1- Des informations permettant l'identification de l'UICC : un numéro unique associé à la carte et à son utilisateur
- 2- La langue ou les langues à utiliser
- 3- Le répertoire des applications
- 4- L'IMSI et le(s) MSISDN(s)
- 5- Les clefs de chiffrement
- 6- Les codes pour les appels d'urgence
- 7- Les messages courts et les paramètres associés ;
- 8- La liste des services et le nom de ses fournisseurs ;

9- La liste des porteuses à utiliser pour la sélection d'une cellule.

C-Protocoles d'interface radio : Uu (figure 1-8)

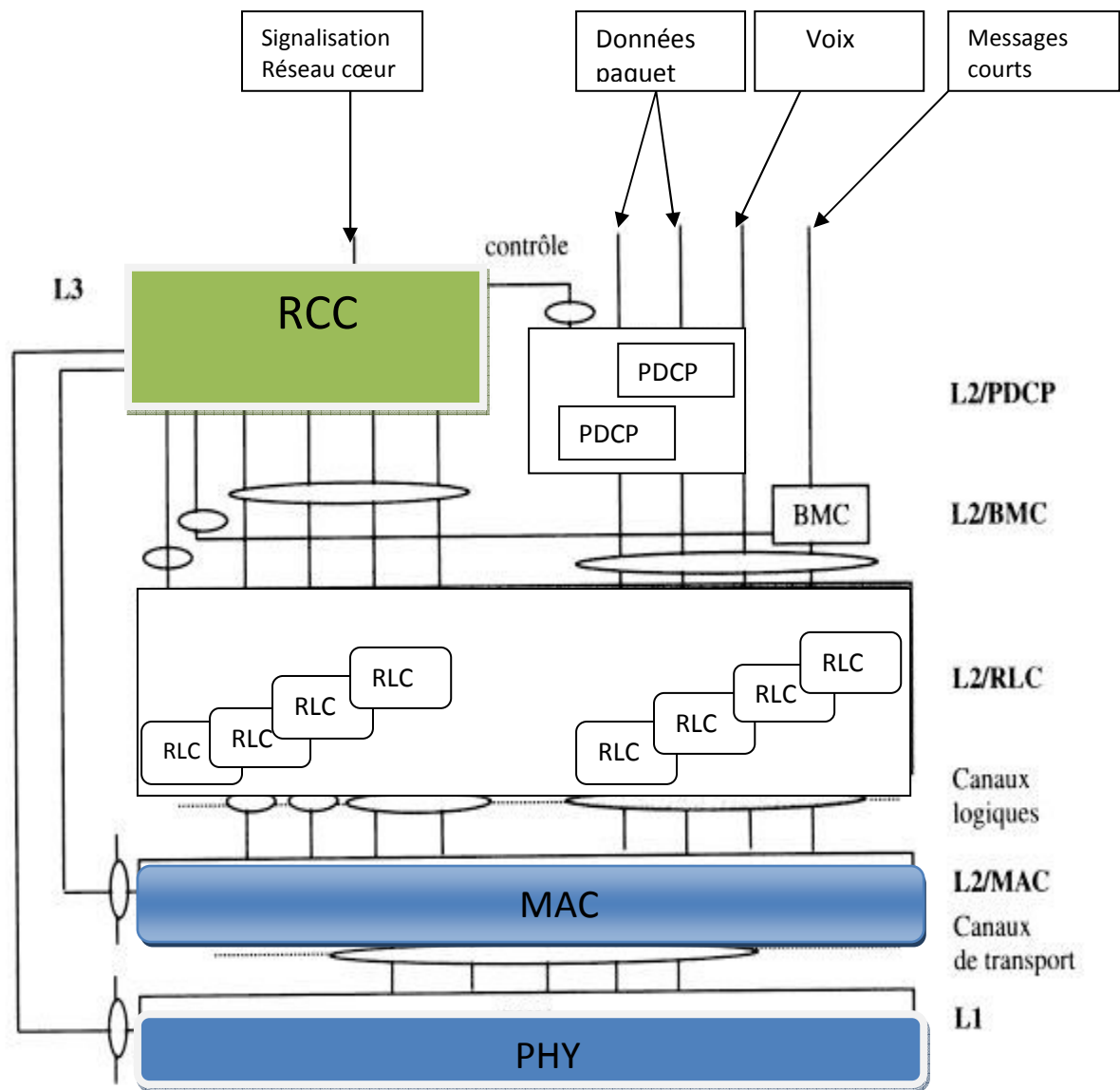


Figure 1-8 : Protocoles d'interface radio : Uu

Le protocole mis en œuvre entre un terminal mobile et le réseau d'accès radio du système UMTS est le protocole d'interface radio UU. Cette interface est composée de plusieurs couches et de canaux :

C-1- La couche physique :

Elle assure les fonctions suivantes :

- Le codage/ décodage canal pour la protection contre les erreurs sur les canaux de transport.

- Le multiplexage de plusieurs canaux de transport en un bloc composite ;
- L'adaptation de débit qui consiste à rajouter ou à retirer des bits de projection pour ajuste la taille des données à la capacité du canal physique ;
- La modulation et l'étalement de spectre ;
- La synchronisation en fréquence et en temps.

C-2- La couche MAC

Elle gère l'accès au médium de transmission à travers un ensemble de fonctions :

- L'association des canaux logiques avec les canaux de transport ;
- La communication sur ordre de RRC du type de canal de transport associé à un canal logique.
- Le contrôle de volume de trafic sur chaque canal de transport actif à l'aide des informations fournies par la couche RLC.
- La gestion des priorités entre les différents flux de données d'utilisateurs ;
- Le multiplexage en émission des données de plusieurs canaux logiques sur un canal de transport et démultiplexage en réception de plusieurs canaux logiques supportés par un seul canal de transport.
- L'identification des mobiles lorsqu'ils utilisent les canaux de transport commun

C-3- La couche RLC :

Elle fournit le service de transfert des unités de données des couches supérieures (SDU RLC).

C-4- La couche PDCP :

Elle fournit le service de transfert des communications par paquets en s'appuyant des services offerts par la couche RLC

C-5- La couche BMC :

Elle assure du côté de l'UTRAN le service de diffusion de messages utilisateur sur l'interface radio pour le compte d'un centre de diffusion CBC externe à l'UTRAN et relié au RNC. Du côté du mobile, elle assure la livraison des messages diffusés à l'utilisateur de la couche.

C-6- La couche RRC :

Elle est la « tour de contrôle » de l'interface radio, elle gère la signalisation entre l'UTRAN et les mobiles. Cette couche assure les fonctions suivantes :

- La gestion de la connexion RRC.
- La gestion des états de service de RRC.
- La diffusion des informations système.
- La gestion de *paging*.
- La sélection de cellule.

- La gestion de la mobilité dans l'UTRAN.
- Le contrôle des mesures.
- La configuration du chiffrement et de l'intégrité.

1-3-1-2- Domaine du réseau d'accès UTRAN : [8,9]

A- Architecture de l'UTRAN :

Comme le GSM, le réseau UMTS est composé d'un réseau cœur (CN : Core Network) et d'un réseau d'accès (AN : Access Network) comme la montre la figure 1-9



L'interface entre le réseau de cœur de l'UMTS et le réseau d'accès, est appelé Iu. Cette interface a été définie d'une manière aussi polyvalente que possible, afin de pouvoir connecter n'importe quel type de réseau d'accès de technologies différentes (BRAN, SRAN, etc.), au réseau cœur de l'UMTS.

Cette notion est très importante car elle signifie, que l'UTRAN, bien qu'étant le réseau d'accès de l'UMTS, n'est qu'une des alternatives d'accès à la voie radio. L'UMTS est donc un système polyvalent et très modulable.

Si l'on regarde de plus près le fonctionnement interne du réseau d'accès UTRAN, on remarque qu'il est constitué de plusieurs éléments, ou modules, qui permettent, d'une part, à l'utilisateur de se connecter au réseau, et d'autre part d'acheminer les informations vers le cœur du réseau de l'UMTS

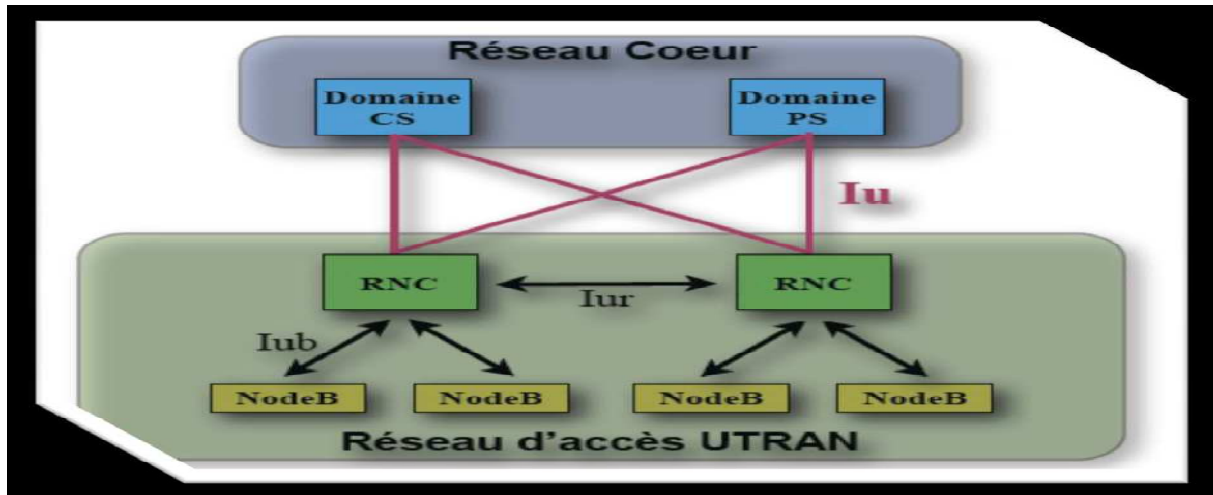
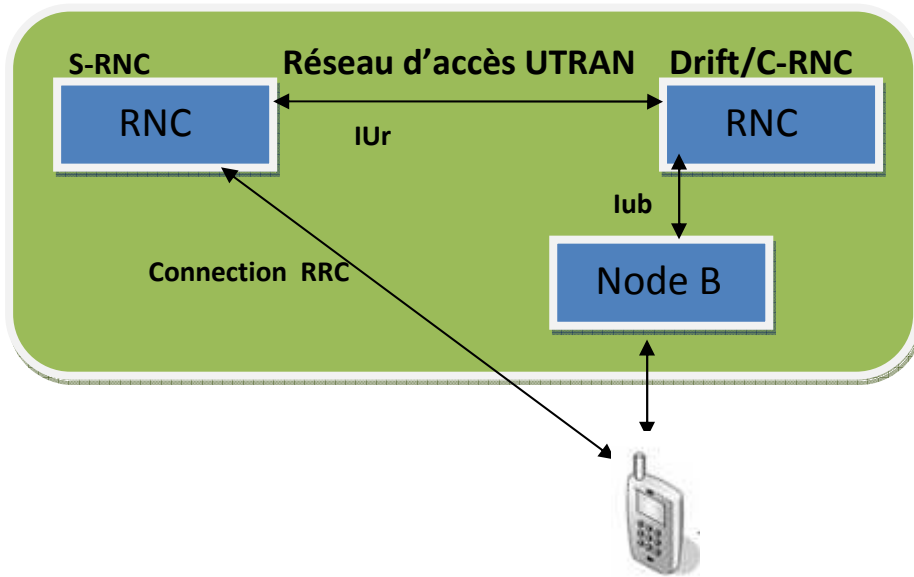


Figure 1-9 : Architecture du réseau d'accès UTRAN.

Le RNC (Radio Network Controller) a une fonction équivalente au BSC des réseaux GSM, c'est à dire principalement le routage des communications entre le NodeB et le réseau cœur d'une part, et le contrôle et la supervision du NodeB d'autre part. Lorsqu'un mobile est en communication, une connexion RRC est établie entre le mobile et un RNC de l'UTRAN. Le RNC en charge de cette connexion est appelé S-RNC (*Serving* - Radio Network Controller). Lorsque l'utilisateur se déplace dans le réseau, il peut être conduit à changer de cellule (zone active d'une antenne NodeB) en cours de communication et peut même se retrouver dans la cellule d'un NodeB ne dépendant plus de son S-RNC. On appelle alors C-RNC (*Controlling* - RNC), le RNC en charge de ces cellules distantes. D'un point de vue RNC, le RNC distant est appelé *Drift* RNC.

Dans ce cas de figure, les données échangées entre le *Serving* RNC et le mobile transitent par les interfaces Iur et Iub. Le Controlling RNC joue donc le rôle d'un simple routeur vis-à-vis de ces données. Si chaque RNC a un rôle bien établi de *Controlling* RNC vis-à-vis des équipements NodeB qui lui sont rattachés, il n'en va pas de même des rôles *Serving* et *Drift*. Ainsi, chaque RNC peut être à la fois *Serving* et *Drift* pour des mobiles différents, suivant la manière dont les connexions RRC sont établies.



A-1- Méthode d'accès radio : UTRA/FDD UTRA/TDD :

La norme UMTS propose deux techniques de multiplexage pour son interface radio :

Le TDD (*Time Division Duplex*, figure a.).

Le FDD (*Frequency Division Duplex*, figure b.).

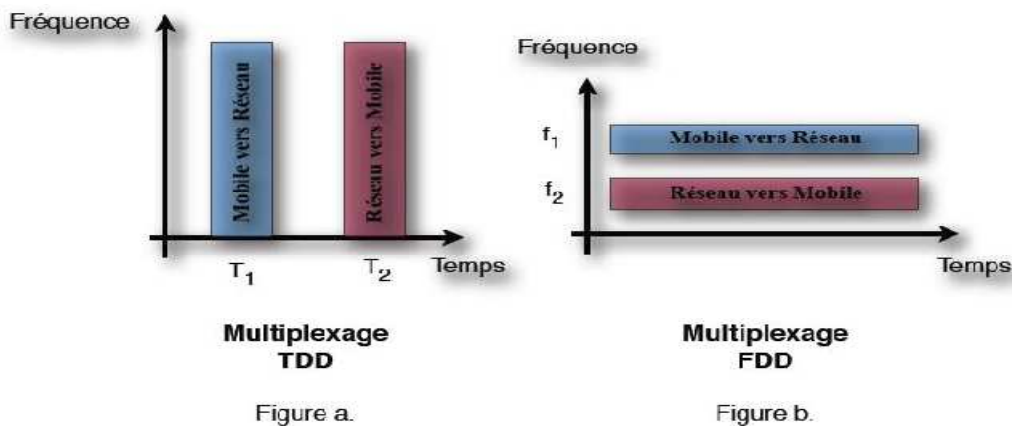


Figure 1-10 : technique de multiplexage pour la norme UMTS

En TDD, une seule et unique fréquence est utilisée alternativement par les deux voies de communications. Cette technique est la plus flexible lorsque le spectre n'est disponible qu'en quantité limitée.

En revanche, en FDD, chaque sens de communication (Mobile vers Réseau et Réseau vers Mobile) utilise une fréquence particulière. Le mobile et le réseau peuvent donc transmettre simultanément. L'un des inconvénients de cette technique réside dans l'écart duplex, entre les

deux voies de communication, utilisé pour séparer les étages de transmission et de réception radio. La nécessité de maintenir cet écart, également appelé "*Bande de Garde*", entraîne une sous utilisation du spectre radio.

En FDD, on attribue en général la même quantité de spectre aux deux voies de communication, ce qui est tout à fait adapté aux applications présentant un débit symétrique, comme la téléphonie. En revanche, lorsque les débits ne sont pas équilibrés (comme la navigation sur internet), cette technique n'est pas optimale

1-3-1-3- Domaine du réseau cœur :

Le réseau Cœur (core network) est la partie du système chargée de la gestion des appels. Il permet aux abonnés de communiquer à l'intérieur d'un même réseau de téléphonie mobile et assure l'interconnexion de ce dernier avec des réseaux externes, fixes ou mobiles. Il fournit enfin les logiciels d'application qui permettent, tout en garantissant la sécurité des échanges, de maintenir la communication, même lorsque l'utilisateur est itinérant.

Dans le réseau cœur, on distingue deux sous-réseaux ou domaines : le domaine CS (Circuit-Switched) et le domaine PS (Packet Switched) qui ont pour fonction d'assurer la communication de circuits et la communication de paquets.

A- Architecture du réseau cœur UMTS :

Principales caractéristiques de la phase 1 (release 99) :

- 1- Débit de transmission de données d'au moins 64 kbps par utilisateur en mode circuit et 2 Mbps en mode paquet.
- 2- Support d'au moins tous les services spécifiés pour le GSM phase 2+.
- 3- Possibilité de moduler la QoS des services supports au cours de la communication plusieurs services support assortis d'attributs différents peuvent être traités simultanément.
- 4- Possibilité d'interconnexion avec un RTCP, un RNIS, un réseau X25 ou IP.
- 5- Possibilité pour un terminal bi-mode GSM/UMTS d'être itinérant entre ces deux réseaux sans coupure de communication.

1-3-1-4- Domaine à commutation de circuits : domaine CS :

Le domaine CS assure la connexion à un réseau RNIS (bande étroite) et est mieux adapté pour la transmission de voix et pour les services de type à temps réel.

Pour établir une communication – procédure d'appel d'un poste téléphonique d'un réseau externe, une connexion CS doit d'abord être faite. L'UE signale, pour ce faire, au MSC

qu'elle nécessite une connexion CS à un numéro particulier. Le MSC consulte le profil de l'utilisateur dans le

VLR pour déterminer si l'utilisateur a la permission d'appeler le numéro. Si l'appel est permis, le MSC vérifie s'il dispose de circuits disponibles et si l'UTRAN dispose de ressources pour supporter la communication. Si c'est le cas, il établit la connexion CS de l'UE, par l'interface air, passant par l'UTRAN jusqu'au MSC du CN. Le MSC commute alors l'appel au GMSC, qui se charge de la commutation dans le réseau externe CS. Le réseau externe CS effectue alors les fonctions de commutations nécessaires pour diriger l'appel à la destination.

Quand la communication est terminée, le MSC et le GMSC produisent un Call Detail Record (CDR). Le CDR contient les informations concernant l'identité des parties appelante et appelée, les ressources utilisées, etc. et est transmis au serveur de facturation.

Pour la réception de communication – procédure d'appel de l'UE depuis un réseau externe, la procédure est différente. D'abord, l'appel est routé à travers le réseau externe vers le GMSC. Le GMSC détermine alors le HLR contenant le profil de l'utilisateur appelé sur base de son numéro de téléphone. Le HLR connaît la « location area » de l'UE (un ensemble de cellules dans lesquelles l'UE est susceptible de se trouver et d'être appelée), et est de ce fait capable d'envoyer une requête de numéro indiquant le MSC de destination au VLR responsable de cette location area. Le VLR renvoie le numéro du MSC, et le HLR transmet alors le numéro au GMSC. Le GMSC est maintenant capable de router l'appel jusqu'au MSC. A partir du VLR, le MSC connaît le RNC responsable de la location area de l'UE appelée et peut dès lors demander à ce RNC l'établissement d'un canal vers l'UE. Le RNC signale alors l'appel à l'UE dans la dernière location area connue et établit une connexion à l'UE à travers le NodeB quand l'UE répond à l'appel. Quand la liaison de transmission est établie, l'UE se met à sonner. Quand l'utilisateur décroche, la communication est commutée par la liaison établie.

Quand la connexion de signalisation pour les services CS est fermée, lors de la clôture de communication ou lors d'un défaut de liaison radio, l'UE peut être ordonnée par le réseau de passer en mode inactif CS. Alternativement, l'UE peut passer en état détaché soit sur ordre du réseau soit par l'utilisateur. Si la connexion de signalisation des services CS est fermée, l'UE passe de l'état connecté CS à l'état inactif CS. Le réseau arrête le traçage de localisation de l'UE et l'UE écoute le canal de diffusion des cellules. Tant que l'UE reste dans la même location area, la situation demeure inchangée. Si l'UE se déplace dans une nouvelle location area, il informe le MSC de son changement de localisation. La mise à jour de localisation est

stockée dans le HLR et copiée dans le VLR attachée au MSC. Si l'utilisateur désire effectuer un appel, l'UE passe en état de connexion CS et effectue la procédure d'établissement de communication. S'il y a une communication entrante pour l'UE, le RNC le signale à l'UE. Quand l'UE répond, le RNC établit la connexion et l'UE se met à sonner. Quand l'utilisateur décroche, la communication est commutée.

1-3-1-5- Domaine à commutation de paquets : domaine PS

Le domaine PS s'appuie sur l'architecture du réseau fédérateur GPRS. Il assure la connexion aux réseaux utilisant le protocole IP (Internet, Intranet) et aux réseaux X.25. Il est approprié à la transmission de données. Pour établir une communication, une connexion PS doit être établie. L'UE active d'abord le contexte PDP (Packet Data Protocol) dans le GGSN. Un contexte PDP est un ensemble de paramètres définissant les réseaux de paquets qu'un utilisateur peut employer pour transmettre des données. La liste des contextes PDP permis pour l'utilisateur est stockée dans le HLR. Pour activer le contexte PDP, l'UE établit une connexion par le RNC jusqu'au SGSN et envoie un message de requête d'établissement de connexion à un réseau PS externe. Le SGSN transmet la requête au GGSN, qui interroge alors le HLR pour vérifier si l'utilisateur est autorisé à accéder aux réseaux PS externes. Si l'utilisateur est autorisé, le GGSN active le contexte et informe l'UE en incluant une adresse IP. L'activation du contexte crée un tunnel IP fixe vers lequel les paquets de données sortants sont envoyés au RNC et transmis ensuite au GGSN. Le GGSN commute alors l'appel dans le réseau PS externe, qui effectue les fonctions de commutation nécessaires pour diriger l'appel à destination. Le tunnel est actif jusqu'à ce que l'UE désactive le contexte soit en fermant l'application soit en se déconnectant du SGSN.

Le SGSN est informé continuellement de la routing area actuelle de l'UE (la routing area est l'équivalent PS de la location area). Si l'UE change de routing area pour une area avec un nouveau SGSN responsable de cette area, la route dans le GGSN est adaptée à cette area. Grâce à la requête au HLR, le SGSN et le GGSN sont conscients de la qualité de service (QoS) demandée pour le transfert de paquet et sont capables d'établir un chemin de transfert de paquet conformément à la QoS désirée.

Les catégories de QoS pour les connexions PS sont conversationnel (voix), streaming (Streaming vidéo), interactif (navigation web) et background (transfert de fichier, e-mails). Quand la communication est terminée, le SGSN génère un enregistrement de facturation sur base du contexte PDP et l'envoie au serveur de facturation. Pour recevoir un appel PS, un autre processus est requis.

D'abord, l'appel entrant est routé à travers le réseau PS externe jusqu'au GGSN. Le GGSN détermine alors le HLR dans lequel le profil de l'utilisateur appelé est stocké sur base de son numéro de téléphone. Le GGSN interroge ensuite le HLR et détermine si l'UE est attachée au réseau et a activé un contexte PDP. Si l'UE n'est pas attaché au réseau, l'appel est rejeté. Si l'UE est attachée au réseau mais ne dispose pas d'un contexte PDP, l'UE doit être localisée et recevoir un signal d'activation de contexte PDP. Le HLR connaît la routing area de l'UE. Il connaît également le SGSN responsable de l'UE. Le GGSN obtient cette information et vérifie le profil de l'utilisateur dans le HLR concernant l'attachement au réseau de l'UE et le statut du contexte PDP. Le GGSN est à présent capable de router l'appel vers le SGSN. Le SGSN connaît le RNC responsable de la routing area et demande au RNC d'établir un canal vers l'UE. Le RNC appelle l'UE dans la dernière routing area connue et établit une connexion à l'UE à travers le NodeB utilisé par l'UE lors de sa réponse à l'appel. Une fois la liaison établie, l'UE reçoit l'appel PS et la communication débute

1-3-2- Fonctionnement du CDMA :

Trois normes : TDMA, FDMA et CDMA :

Afin de permettre aux différents usagers mobiles d'accéder au réseau, il est nécessaire de partager les ressources radio. Il existe trois principales techniques de partage des ressources, autrement appelées Accès Multiple :

- 1- Le partage en fréquence FDMA (Frequency Division Multiple Access, cf. figure a) ;
- 2- Le partage en temps TDMA (Time Division Multiple Access, cf. figure b) ;
- 3- Le partage en code CDMA (Code Division Multiple Access, cf figure c).

L'accès CDMA se distingue des deux précédents par son approche radicalement différente du problème et sa complexité. En effet, alors que les accès FDMA et TDMA se font respectivement par répartition fréquentielle et temporelle entre les différents utilisateurs, l'accès CDMA attribue à chacun un codage particulier qui permet l'accès simultané sur les mêmes bandes de fréquences (cf. figures a, b et c)

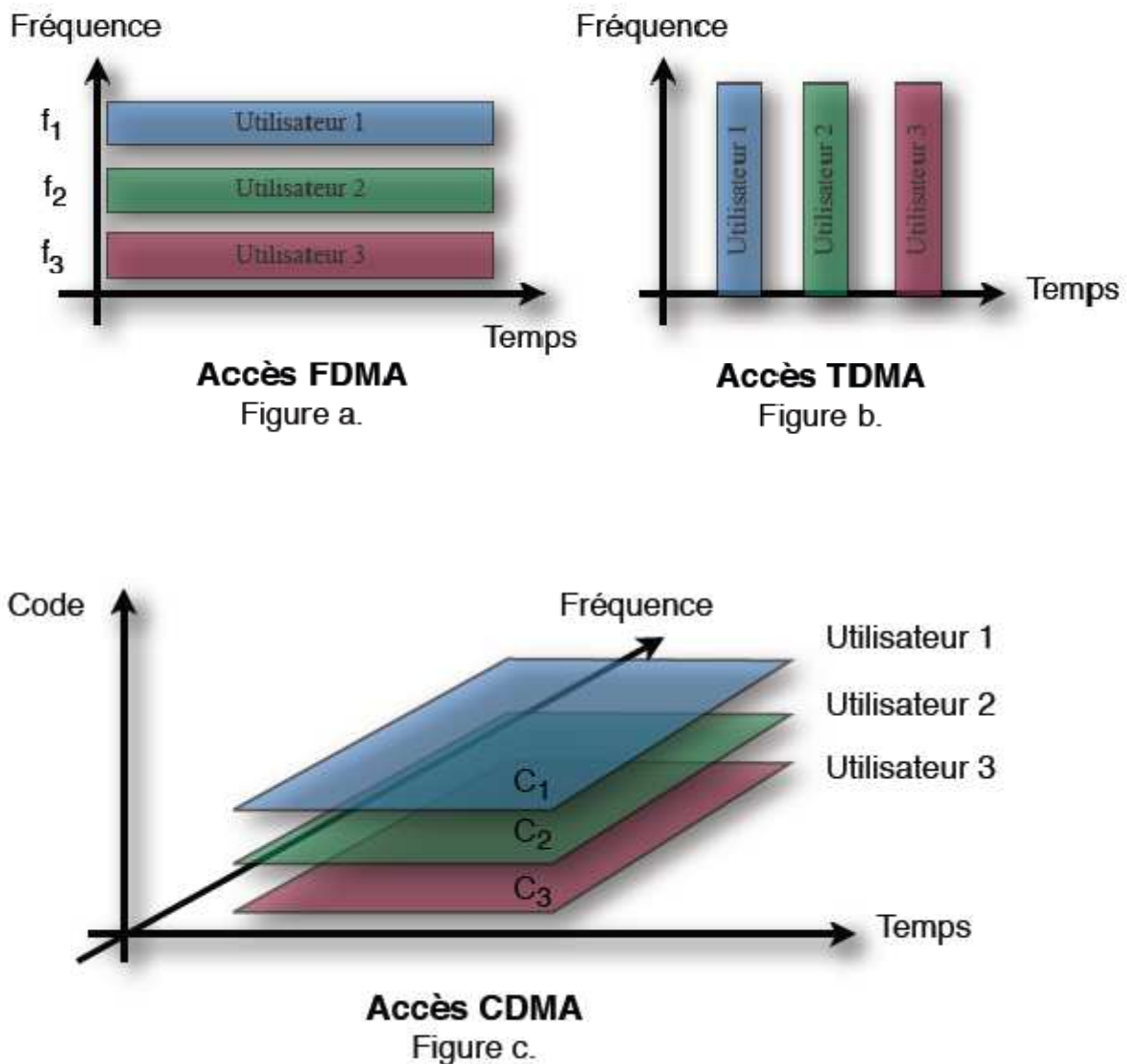


Figure 1-11 : méthodes d'accès CDMA.

1-4 La quatrième génération des téléphones mobiles 4G (LTE) :

La 4G est la quatrième génération de réseau mobile. Elle est la norme succédant à la 3G, on étudiera cette génération plus en détail dans le prochain chapitre.

Pour résumer, la 4G c'est la norme des standards de téléphonie mobile permettant des débits jusqu'à 50 fois plus important que la première norme.

1-4-1 Définition des réseaux LTE

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 d'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 le 4G, on se dirige vers la transmission de toutes les informations. Voix et données. Par IP, le même protocole qu'on utilise sur Internet. Pour les fournisseurs, 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.

Selon les critères de l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui établit les normes pour les réseaux cellulaires, le vrai 4G devrait offrir des vitesses de téléchargement de 100 Mbit/s pour un utilisateur en mouvement et de 1 Gbit/s en mode stationnaire.

Conclusion :

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté d'une façon générale les différentes générations de téléphone mobile et les principales caractéristiques d'un réseau cellulaire.

Ainsi, la mise en œuvre du service GPRS implique une évolution matérielle et logiciel

S'ajoutant au réseau GSM déjà existants. L'évolution du GSM vers GPRS prépare à

L'introduction des Réseaux de troisième génération l'UMTS. En ce qui concerne

L'infrastructure, des modifications doivent être effectuées pour l'intégration du GPRS ou

L'UMTS par l'ajout d'autres équipements, et le chargement de logiciels.

Le GPRS constitue une évolution majeure vers la troisième génération (UMTS). Il est conçu pour la transmission de données en mode paquet pour assurer l'accès simple au réseau Internet.

Pour les réseaux 4G (LTE), nous avons présenté un bref aperçu et dans le prochain chapitre, nous allons le détailler.

Introduction :

La planification d'un réseau mobile consiste à déterminer l'ensemble des composantes matérielles et logicielles de ces systèmes, les positionner, les interconnecter et les utiliser de façon optimale, en respectant, entre autres, une série de contraintes de qualité de service. Ce processus qui peut être à la fois long et coûteux a lieu avant la mise en opération du réseau.

Pour les réseaux de première génération (1G), de deuxième génération (2G) et de troisième génération (3G), les réseaux de prochaine génération orientent la planification des réseaux cellulaires vers de nouvelles avenues de recherche. En effet, les tendances portent de plus en plus vers une intégration transparente des technologies sans fil existantes, comme les systèmes GSM, LAN en un environnement totalement hétérogène. Cette nouvelle vague de pensée distingue la 4ème génération des générations précédentes, où seul primait le besoin de développement de nouvelles normes et de nouveaux standards. Les systèmes 4G sont complètement orientés vers l'utilisateur final, en fournissant des services variés à haut débit et sans coupure à travers les réseaux. Toutefois, la migration des systèmes actuels vers la 4ème génération constitue un énorme défi. Dans la littérature, plusieurs travaux abordent ce problème en considérant plusieurs aspects.

2-1 Définition :

Les nouvelles normes LTE visent à améliorer l'efficacité spectrale, à diminuer la latence, à augmenter la performance du réseau, à offrir des débits élevés en situation de mobilité à grande ou faible vitesse, à permettre et à faciliter l'interconnexion et l'interopérabilité entre différentes technologies existantes et à réduire les coûts de déploiement et d'exploitation en introduisant de nouvelles architectures et technologies. Le LTE est basé sur des techniques radios telles que la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant, la technique SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour le sens montant et la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour l'émission-réception. Les largeurs de bande du LTE peuvent s'étendre de 1,25 à 20 MHz en liaison montante comme en liaison descendante, ce qui permet à un opérateur d'adapter cette technologie aux bandes de fréquence qu'il possède. En outre, l'architecture MIMO contribue à augmenter les débits de transfert de données du LTE en autorisant plusieurs chemins de signaux [10, 11].

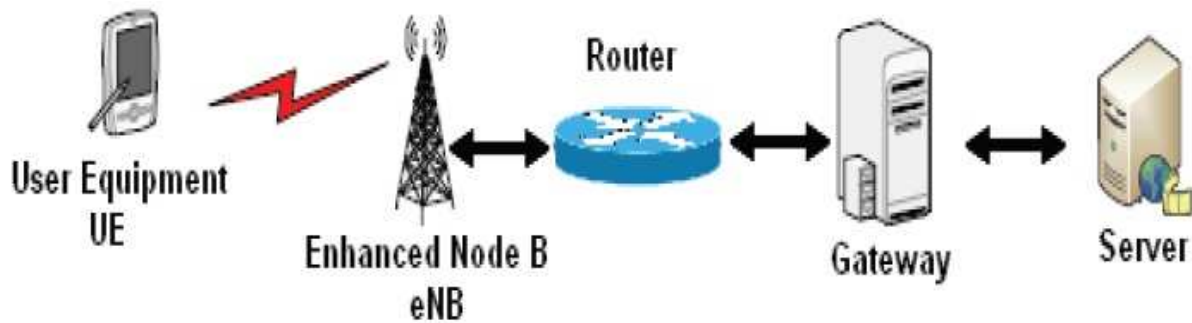


Figure 2-1 : Présentation générale sur le système LTE

2-2 Buts de la 4G LTE :

La 4^{ème} génération vise 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 transparent 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 relève, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets.
- Minimiser le coût de signalisation.

2-3 Architecture du LTE :

A côté de l'évolution d'accès radio E-UTRAN (LTE), il existe une évolution d'architecture du cœur du réseau connue sous le nom de SAE (System Architecture Evolution). Contrairement aux normes de la 2G et de la 3G qui proposent deux domaines de commutation : la commutation de circuit (CS - Circuit Switched) et la commutation de paquet (PS - Packet Switched), le SAE ne propose qu'un domaine de paquet fondé sur l'IP appelé l'EPC (Evolved Packet Core) [12, 13]. L'EPC est un cœur du réseau paquet tout IP. Cela signifie que tous les services devront être offerts sur IP y compris ceux qui étaient auparavant offerts par le domaine circuit tels que la voix, le SMS et tous les services de téléphonie, etc. La combinaison entre le LTE et le SAE est l'EPS (Evolved Packet System).

- Comparaison des architectures existantes:

MME (Mobility Management Entity) remplace les dispositifs PDSN/SGSN et BSC/RNC

eNodeB remplace BTS/NodeB

PDSN: Packet Data Serving Node de

Seving/PDN (Packet Data Network) gateway remplace HA/GGSN

BTS/NodeB: Base transceiver Station

HA/GGSN: Home Agent/ Gateway GPRS Support Node. CDMA2000

SGSN: Serving GPRS Support Node

BSC: Base Station controller

RNC: Radio Network control

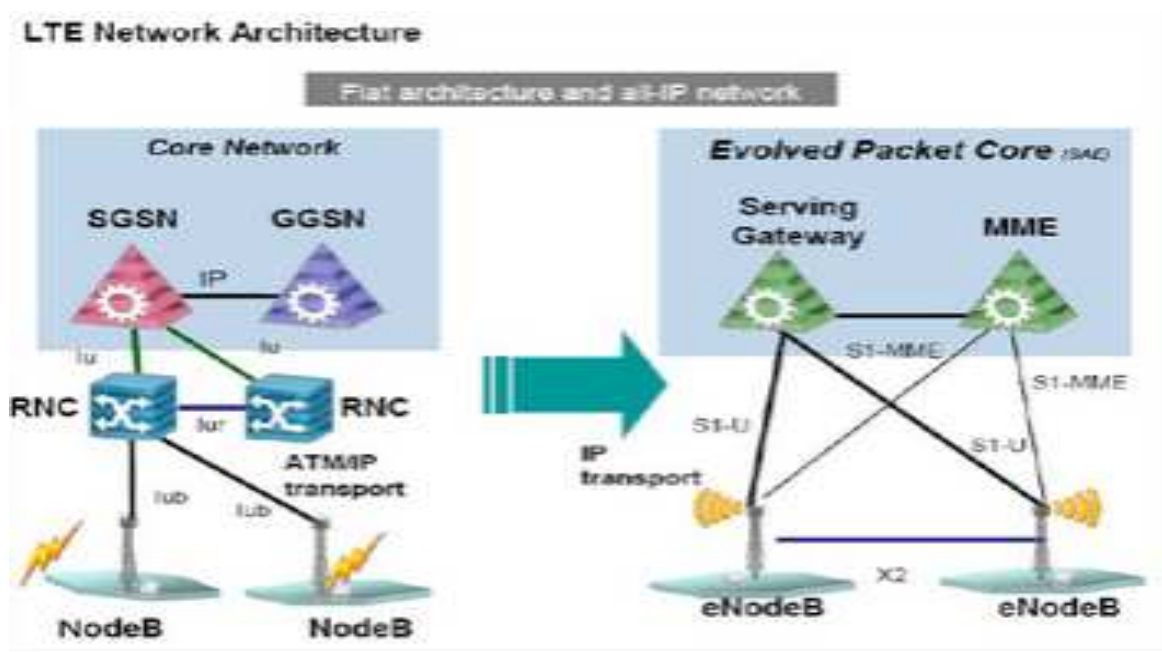


Figure 2-2 : Architecture générale du LTE

Les nouveaux blocs spécifiés pour l'architecture, connus aussi sous le nom d'EPS (Evolved Packet System), sont l'EPC (Evolved Packet Core) et l'E-UTRAN (Evolved UTRAN). La figure 2.3 présente une architecture simplifiée de la partie EPS du réseau LTE.

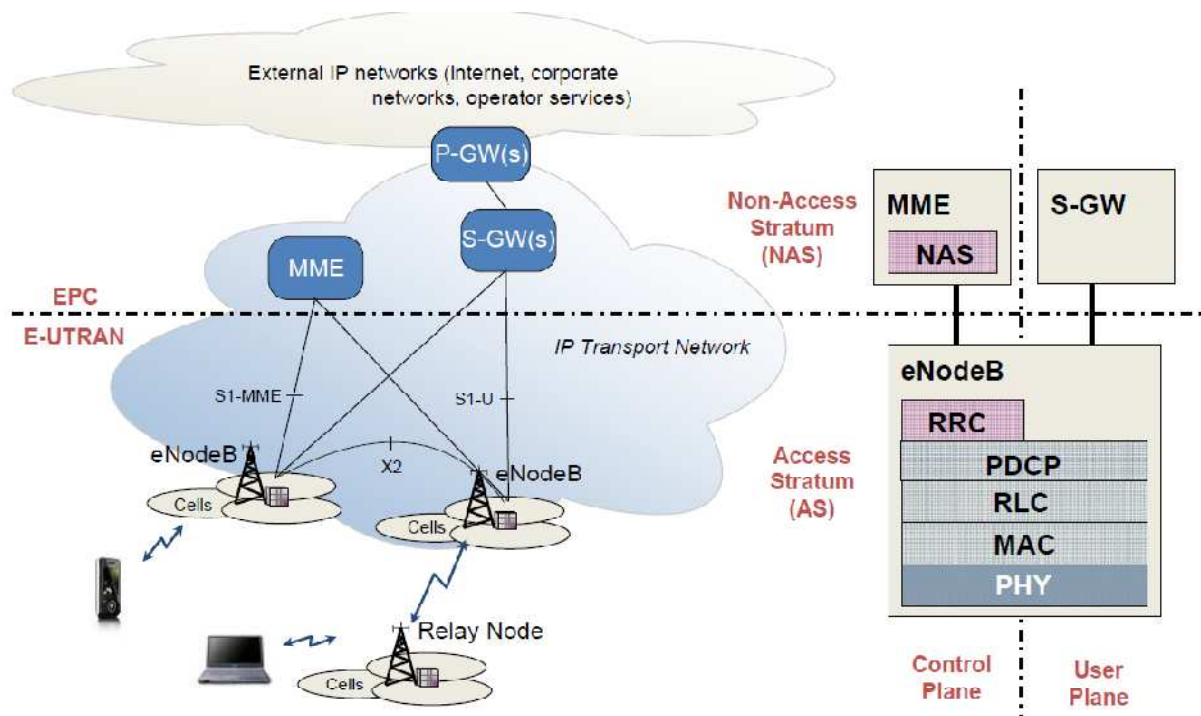


Figure 2-3: Architecture d'EPS (Evolved Packet System) [14].

2-3-1 EPC : Evolved Packet Core :

Le cœur de réseau appelé « EPC » (Evolved Packet Core) utilise des technologies « full IP », c'est-à-dire basées sur les protocoles Internet pour la signalisation qui permet des temps de latence réduits, le transport de la voix et des données. Ce cœur de réseau permet L'interconnexion via des routeurs avec les autres eNodeB distants, les réseaux des autres opérateurs mobiles, les réseaux de téléphonie fixe et le réseau Internet.

EPC Simplifie le réseau d'architecture à tout IP, comme il assure la mobilité entre 3GPP based système, et aussi non 3GPP based système par exemple WIMAX et CDMA2000.

Le réseau cœur EPC est constitué de plusieurs éléments comme la montre la figure suivante :

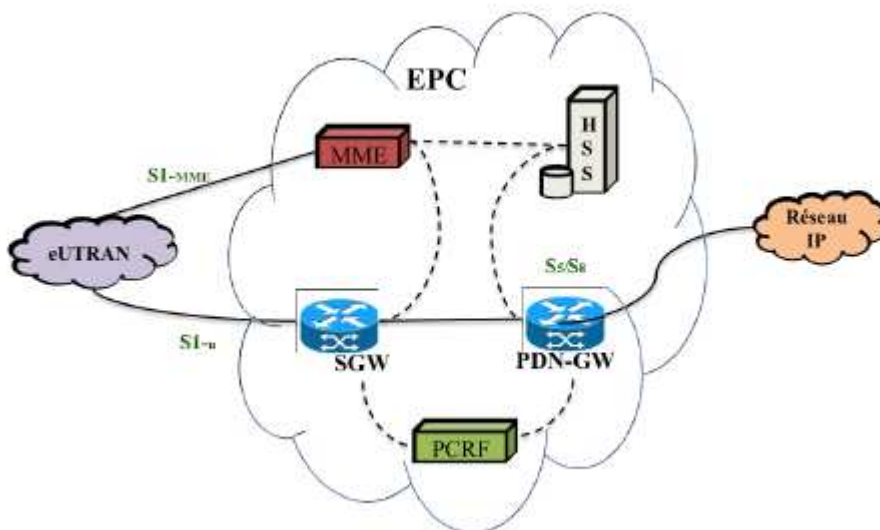


Figure 2-4 : Architecture du réseau cœur EPC [15].

EPC est l'élément principal de l'architecture SAE. Il a un rôle équivalent du NSS dans le réseau GPRS.

Le cœur réseau est composé de deux parties séparées :

2-3-1-1 La partie Signalisation :

Gère la mobilité et le rattachement des abonnés sur le réseau, il s'agit du MME. Une base de données permettant entre autre d'authentifier l'abonné, de consulter leurs abonnements et de chiffrer les communications, il s'agit du HSS.

Une politique de tarification, qui permet de gérer l'accès au réseau de données (PDN) en fonction du forfait de l'abonné, il s'agit du PCRF.

➤ **MME : Mobility Management Entity (3GPP Release 8) :**

Cette partie est responsable de la localisation et la poursuite du terminal mobile (UE) entre les appels et la sélection d'une bonne S-GW (Serving-GetWay) à travers une connexion. Comme elle réalise le dernier point de la protection par codage, donc par conséquent c'est le point qui valide l'interception de signalisation. Ainsi, qu'elle contrôle le signal entre le UE (Utilisateur Equipment) et le réseau cœur, et assure l'établissement, la maintenance, et L'élargissement de la porteuse radio services.

➤ **HSS : Home Subscriber Service :**

Base de données similaire au HLR en GSM / WCDMA réseau cœur qui contient les informations du subscriber-related (les abonnés voisins), et porte l'appel de control et la session management. Elle est Principalement désignée à l'authentification, l'autorisation, la sécurité, le débit et fournit une localisation détaillée à l'utilisateur.

➤ **PDN-GW: Packet Data Network GateWay (3GPP Release8):**

Est une porteuse du chemin de données entre UE et PDN à trois segments:

- La porteuse radio entre UE et eNodeB.
- La porteuse des données entre eNodeB et SGW.
- La porteuse des données entre SGW et PGW.

➤ **PCRF: Policy and Charging Rules Function (3GPP Release7):**

Responsable sur la décision principale du control. Il fournit une QoS d'autorisation pour décider le traitement des données en respectant l'abonnement des utilisateurs.

➤ **SGW: Serving Gateway (3GPP Release 8):**

C'est la jonction principale entre le réseau radio accès et le réseau cœur Serving GetWay (SGW) achemine les paquets de données, maintient la connexion de l'inter-eNodeB handover, puis inter-système handover entre LTE et GSM/UMTS et réserve le contexte du terminal mobile (UE), comme les paramètres de la porteuse service et le routage des informations.

➤ **P-GW: Packet-Switch GetWay:**

Packet-Switch GetWay (P-GW) Fournit la connectivité au terminal mobile (UE) vers le paquet externe du réseau de l'information et alloue les adresses IP d'un UE, ainsi que les applications de la QoS, et maintient la connexion mobile entre LTE/UMTS/GSM systèmes et le non 3GPP système.

➤ **SGSN : Serving GRPS Support Nom :**

Interconnecte le LTE, UMTS, et le réseau GSM pour augmenter la mobilité.

2-3-2 La partie radio eUTRAN :

Le cœur du réseau se compose plusieurs nœuds logiques tandis que le réseau d'accès contient seulement un nœud logique qui s'appelle eNB. En comparaison avec l'UMTS, on a éliminé le RNC (Radio Network Controller) et installé les fonctions de RNC dans les eNBs [22, 12]. Cela permet d'améliorer l'efficacité et de diminuer la latence du réseau en augmentant l'interaction entre les protocoles dans l'E-UTRAN. Cette partie radio du réseau,

est simplifiée par rapport à celles des réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN) par l'intégration dans les stations de base « eNodeB » avec des liaisons en fibres optiques et des liens IP reliant les eNodeB entre eux (liens X2).

Cette partie est responsable sur le management des ressources radio, la porteuse, la compression, la sécurité, et la connectivité vers le réseau cœur évolué.

➤ **eNodeB**

L'eNodeB est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM et NodeB dans l'UMTS, la fonctionnalité de handover est plus robuste dans LTE. Ce sont des antennes qui relient les UE avec le réseau cœur du LTE via les RF air interface. Ainsi qu'ils fournies la fonctionnalité du contrôleur radio réside dans eNodeB, le résultat est plus efficace, et le réseau est moins latent, par exemple la mobilité est déterminée par eNodeB a la place de BSC ou RNC.

2-3-3 La partie IMS (IP Multimedia Sub-system)

➤ **Définition**

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 de l'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 qu'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.

➤ **Exemples de services de l'IMS :**

- Echange de fichiers pendant un appel.
- Un usager peut créer une règle qui le montre connecté après une certaine heure et rejette tous les appels en provenance d'un appelant de son groupe professionnel.

- Un usager peut couper lorsque ses collègues professionnels appellent et les rediriger vers une page Web spécifique présentant l'hôtel où il passe ses vacances.

- Un usager peut activer la sonnerie au niveau de tous ses appareils en fonction de l'appelant.

- Messagerie instantanée et vidéo conférence

2-4-Principales différences entre les normes LTE et 3G UMTS :

Les normes LTE, définies par le consortium 3GPP⁶ sont dérivées des normes UMTS, mais apportent de nombreuses modifications et améliorations, notamment :

- Un débit descendant théorique allant jusqu'à 326,4 Mbit/s crête (300 Mbit/s utiles) en mode MIMO 4x4.
- Un débit montant théorique allant jusqu'à 86,4 Mbit/s crête (75 Mbit/s utiles).
- Cinq classes de terminaux LTE ont été définies, elles supportent des débits allant de 10 Mbit/s (catégorie 1), jusqu'au débit maximal descendant prévu par la norme LTE (300 Mbit/s pour la catégorie 5). Tous les terminaux LTE doivent être compatibles avec les largeurs de bandes de fréquence allant de 1,4 à 20 MHz.
- Un débit de données trois à quatre fois plus important que celui de l'UMTS/HSPA.
- Une efficacité spectrale (nombre de bits transmis par seconde par hertz) trois fois plus élevée que la version de l'UMTS appelée HSPA.
- Un temps de latence RTT (Round Trip Time) proche de 10 ms (contre 70 à 200 ms en HSPA et UMTS).
- L'utilisation du codage OFDMA pour la liaison descendante et du SC-FDMA pour la liaison montante (au lieu du W-CDMA en UMTS).
- Des performances et des débits radios améliorés par l'utilisation de la technologie multi-antennes MIMO du côté équipement terrestre (eNodeB) et du côté terminal (en réception uniquement).
- L'utilisation de codes correcteur d'erreur de type « Turbo codes » associés aux algorithmes de retransmission HARQ.
- La possibilité d'utiliser une bande de fréquence allouée à un opérateur variant de 1,4 MHz à 20 MHz, permet une plus grande souplesse (par rapport à la largeur spectrale fixe de 5 MHz de l'UMTS / W-CDMA).
- Une large gamme de bandes de fréquences hertziennes supportées, y compris celles historiquement attribuées au GSM et à l'UMTS et de nouvelles bandes spectrales notamment autour de 800 MHz et de 2,6 GHz : 39 bandes sont normalisées par le 3GPP

(dont 27 en LTE [FDD](#) et 11 en [TDD](#)⁷). La possibilité d'utiliser des sous-bandes de fréquences non-contiguës.

- La contrepartie du grand nombre de bandes de fréquences prévues par la norme est la quasi impossibilité pour un terminal de prendre en charge simultanément toutes les fréquences normalisées ; il y a donc des risques importants d'incompatibilité entre terminaux mobiles et réseaux nationaux.
- La prise en charge de plus de 200 terminaux actifs simultanément dans chaque cellule.
- Un bon support des terminaux en mouvement rapide. De bonnes performances ont été enregistrées jusqu'à 350 km/h, voire jusqu'à 500 km/h, en fonction des bandes de fréquence utilisées.

Contrairement aux normes 3G [HSPA](#) et [HSPA+](#), qui utilisent la même couverture radio que l'UMTS, le LTE nécessite des fréquences radio et des [antennes](#) qui lui sont propres mais qui peuvent être localisées avec celles d'un réseau 2G ou 3G.

2-5-Les caractéristiques de la 4G :

2-5-1-Les fréquences utilisées :

Les bandes de fréquences hertziennes prévues par les normes 3GPP pour le LTE et le [LTE Advanced](#) sont très nombreuses (plus de 30) et s'étalent de 600 MHz à 3,8 GHz. Celles situées dans la zone des 800 et 900 MHz sont utilisables sur tout le territoire et particulièrement dans les zones rurales car elles ont une plus grande portée que les [ondes radio](#) de fréquences plus élevées. Le rayon de couverture de chaque cellule est variable, allant de quelques centaines de mètres (débits optimaux en zones urbaines) jusqu'à 30 à 50 km (zones rurales).

Dans l'[Union européenne](#), les discussions sur l'utilisation de la bande de fréquence des 800 MHz qui était auparavant utilisée pour la télévision analogique [UHF](#) (canaux 61-69), ont abouti à l'affectation de ces bandes spectrales aux réseaux mobiles 4G LTE. Ces canaux sont disponibles en France depuis début 2012, suite à la libération de ce que l'on appelle le « [dividende numérique](#) », obtenu par le passage à la TV numérique (TNT) de tous les États membres européens.

Dans les villes et zones urbaines, les bandes hertziennes affectées, au LTE ont des fréquences plus élevées (entre 2,5 et 2,7 GHz en France et au sein de l'UE). Dans ce cas, la taille de la cellule radio (zone de couverture) sera de quelques kilomètres ou moins (small cells).

Pour pouvoir utiliser les bandes des 900 et 1 800 MHz, il est nécessaire d'effectuer un « réaménagement » du spectre en libérant des canaux initialement attribués au [GSM](#) (2G) et à l'UMTS (3G). Dans de nombreux pays européens, certains opérateurs ont déjà réutilisé une partie de la bande de fréquence des 1 800 MHz pour le LTE ; cette bande de fréquence est la plus utilisée dans les réseaux 4G/LTE européens fin 2012¹⁵.

En France, l'autorisation d'utiliser une partie de cette bande de fréquence des 1 800 MHz a été accordée à Bouygues Telecom par l'[Arcep](#) le 14 février 2013 avec une date de mise en service fixée au 1^{er} octobre 2013¹⁶. Cette bande de fréquence aura donc pendant quelques années une utilisation mixte 2G (GSM) et LTE. Bouygues Telecom a, par exemple, commencé par attribuer 10 MHz duplex de sa bande de fréquence des 1800 MHz au LTE, puis à partir d'avril 2014 il a, dans certaines zones géographiques, élargi à 15 MHz la part affectée au LTE (au détriment du GSM)¹⁷.

2-5-2-Débits théoriques et débits réels :

Le débit réel de données observé par l'utilisateur d'un réseau LTE peut être très fortement réduit par rapport aux [débits binaires](#) théoriques annoncés et définis par la norme LTE. Les principaux facteurs ayant une influence sur le débit effectif sont les suivants :

- le nombre d'utilisateurs actifs se partageant la bande passante au sein d'une cellule (surface radiante d'une antenne) LTE ; plus il y a d'abonnés en communication, moins chacun a de débit unitaire ;
- la [largeur](#) de la bande de fréquence attribuée à l'[opérateur](#) du réseau. Le débit utile global est proportionnel à cette largeur de bande qui peut varier de 1,4 MHz à 20 MHz en LTE et jusqu'à 100 MHz en [LTE Advanced](#) ;
- les types d'antennes utilisés, coté terminal et coté réseau ([antenne relais](#)) : le débit binaire maximal de 300 Mbit/s suppose des antennes MIMO 4×4 (quadruples) aux 2 extrémités de la liaison radio LTE (cas de figure peu réaliste pour un [téléphone mobile](#) ou un [smartphone](#) à cause de leur petite taille). À noter : le [LTE Advanced](#) permet d'atteindre et même dépasser les 300 Mbit/s avec seulement une antenne double MIMO 2×2 ;
- la distance entre le terminal et la (ou les) antenne(s) relais (le débit est très inférieur en périphérie de cellules radio à cause des interférences avec les cellules adjacentes) et les conditions de réception radio : interférences, [bruit](#), échos liés aux réflexions sur les immeubles... ;

- la position fixe (statique) ou « en mouvement » du terminal de l'abonné ; le débit utile est réduit pour un terminal en mouvement ;
- la capacité en débit et le nombre maximum d'utilisateurs simultanés permis par la station de base ([eNode B](#)) et le débit des liens cuivres ou optiques reliant cette station au cœur de réseau (réseau de [backhaul](#)).

Le type et la [catégorie du terminal](#) influent aussi sur le débit maximum possible ; par exemple un terminal LTE (UE « [User Equipment](#) » en anglais) de catégorie 1, ne supporte qu'un débit binaire de 10 Mbit/s alors qu'un autre de catégorie 3 supportera 100 Mbit/s en contrepartie, plus la catégorie du terminal est élevée, plus le terminal sera complexe (coûteux) et moins son autonomie sera grande (à niveau technologique égal et capacité de batterie égale).

2-5-3- Débits et fréquences du réseau 4G :

L'évolution des débits suit une progression semblable à celle de la capacité de calcul. Chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmente les débits et suscite une attente de débits supérieurs. Il était ainsi également clair dès 2004 que le LTE devrait fournir de très hauts débits. Au-delà des limitations capacitaires, le débit fourni à un utilisateur dépend de ses conditions radio, liées en particulier à sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la ressource spectrale disponible.

L'établissement des standards de performances communément admis pour les réseaux 4G :

- 100 Mbit/s sur le lien radio descendant (antenne relais vers mobile), et 50 Mbit/s maximum sur le lien montant (mobile vers antenne relais). La technologie LTE fonctionne dans une variété de fréquences selon la zone géographique couverte : 700 MHz aux Etats-Unis pour le réseau de Verizon Wireless, 2,6 GHz et 800 MHz en Europe, et 2,1 GHz pour le réseau japonais de NTT Docomo (opérateur japonais).

Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

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

Ces chiffres supposent un UE de référence comprenant :

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

Pour le LTE y aura, deux antennes d'émission à la station de base et deux antennes en réception au niveau de l'UE.

L'utilisateur peut ainsi accéder à ses services favoris chez lui ou hors de son domicile avec une fluidité homogène. En complément, le débit est jugé comme un facteur de comparaison entre opérateurs et une course aux débits est en marche dans certains pays.

Enfin, des débits toujours plus élevés ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services, sources de revenus et/ou de différenciation pour les opérateurs.

2-5-4 Latence :

La latence est l'un des caractéristiques le plus important qui est relié a la vitesse, et il est mesuré en millisecondes. Le plus faible taux de latence, ou le retard dans le temps de réponse, le plus rapide de l'interaction entre l'appareil et le réseau qu'il est allumé.

Réseaux 4G LTE sont rapides; en fait, ils sont jusqu'à 10 fois plus rapide que les réseaux 3G existants, fournir des données aux appareils sans fil à des taux de 5 à 12 mégaoctets par seconde en liaison descendante et de 2 à 5 mégaoctets par seconde sur la liaison montante.

Le temps de latence est grandement amélioré, il peut être vécu en temps réel.

La latence du système se traduit par sa capacité à réagir rapidement à des demandes d'utilisateurs ou de services. Elle se décline en latence du plan de contrôle et latence du plan usager.

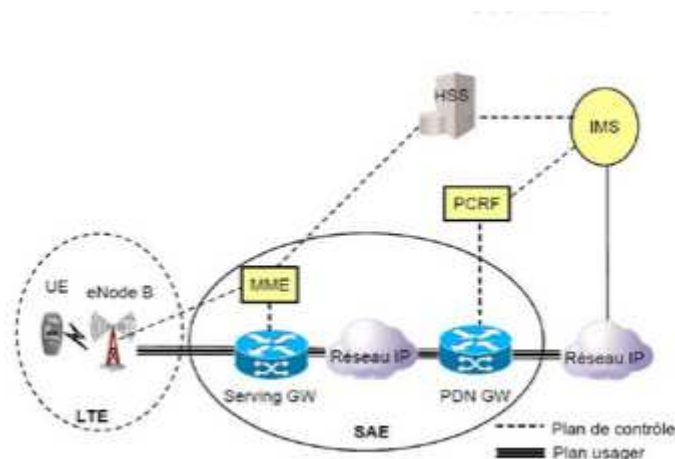


Figure 2-5 : le plan usager et le plan de contrôle

A- Latence du plan de contrôle

L'objectif fixé pour le 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.

B-Latence du plan usager

La latence du plan usager est définie par le temps de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE et la couche IP d'un n'ud 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. Le 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 2.1 présente les deux types de latence existante dans le réseau LTE, ainsi que leurs différences dans les domaines de duplexage (FDD et TDD) :

<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 2-1 : La latence pour chaque multiplexage.

2-5-5-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.

2-5-6 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.

2-5-6-1 Structure d'une trame LTE :

Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. 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 2.6 présente la trame radio dans le réseau LTE.

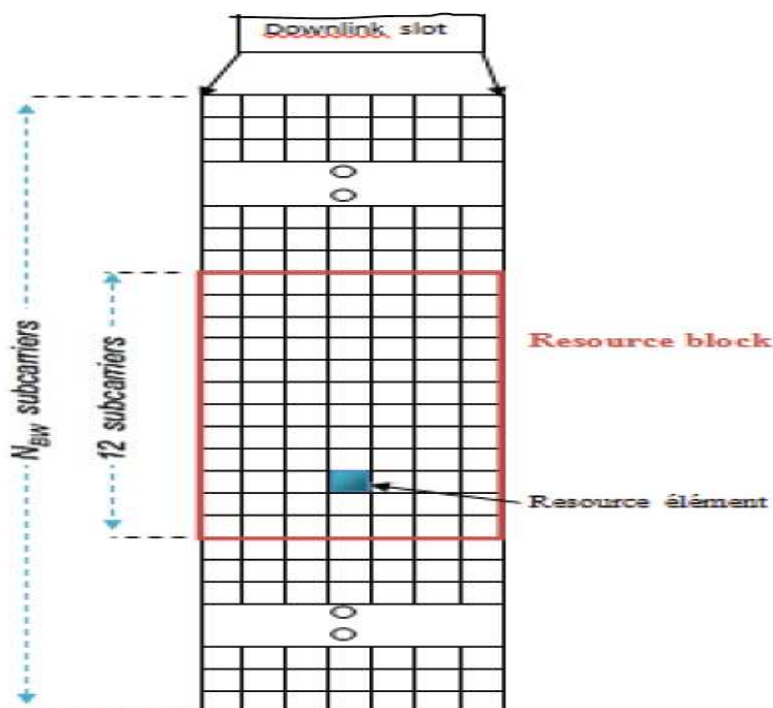


Figure 2-6 : Le fonctionnement d'une trame radio.

1 symbole peut transmettre 1 bit à 6 bits selon la modulation choisie (QPSK à 128 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.

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 2.7 présente la trame FDD.

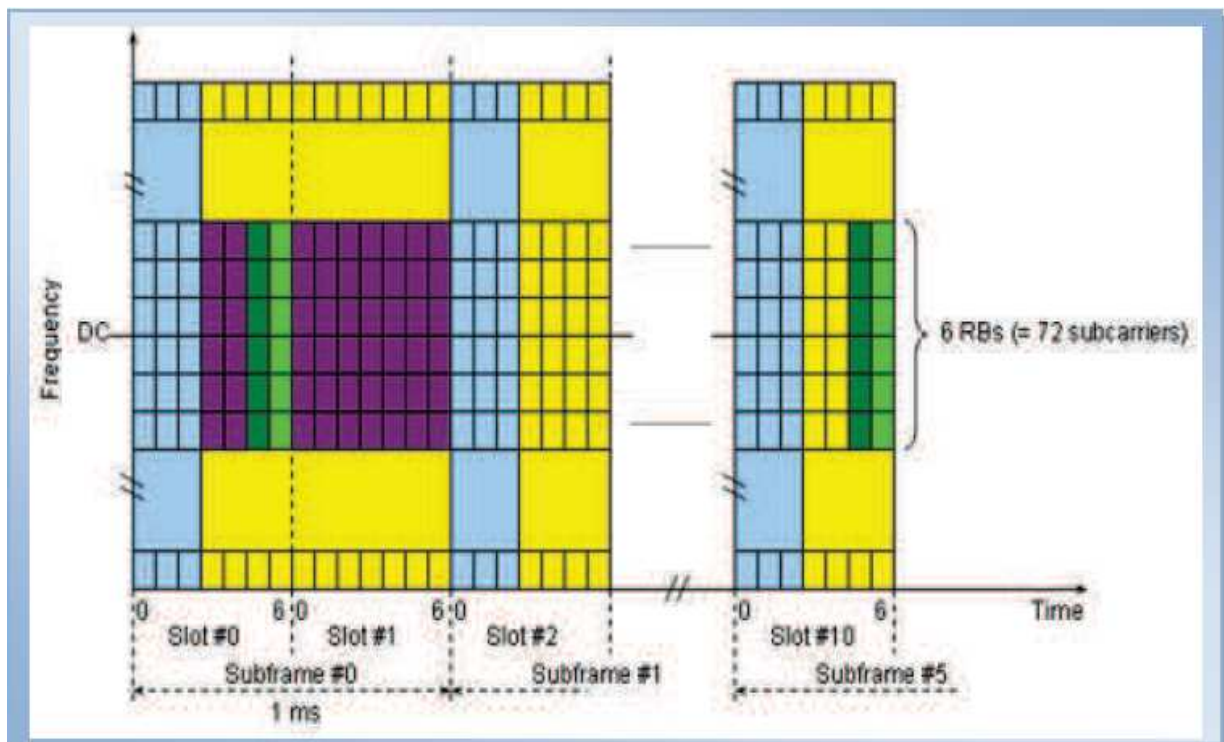


Figure 2-7 : Structure de la trame radio.

Nous pouvons représenter un signal LTE dans une carte à deux dimensionnelle comme indiqué dans la figure 2.7. 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 multiple des unités, signifiant une combinaison multiple d'une unité plus petite devient de plus grandes unités.

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.

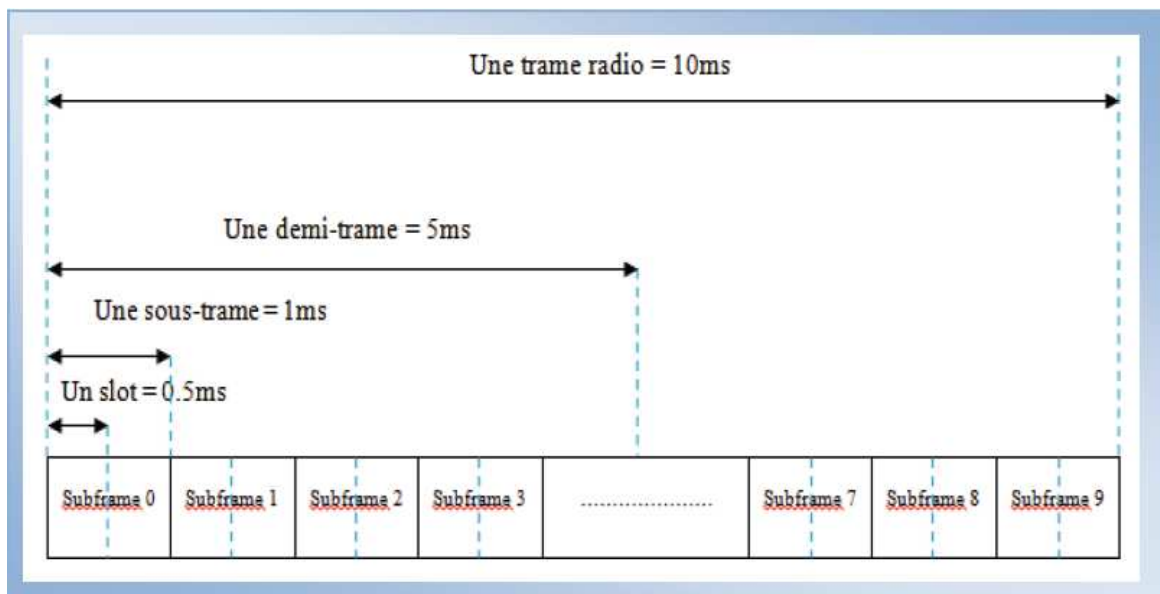


Figure 2-8 : Les slots d'une trame radio.

LTE a l'avantage de s'adapter aux anciennes normes existantes. La transition est donc possible avec le l'UMTS FDD (W-CDMA), l'UMTS TDD et le GSM/EDGE.

Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent respectivement les bandes de fréquences utilisées pour le FDD ainsi que pour le TDD.

Bandes	Fréquences UL/DL (MHz)
1	1920-1980/2110-2170
2	1850-1910/1930-1990
3	1710-1785/1805-1880
4	1710-1755/2110-2155
5	824-849/869-894
6	830-840/875-885
7	2500-2570/2620-2690
8	880-915/925-960
9	1750-1785/1845-1880
10	1710-1770/2110-2170
11	1428-1453/1476-1501
12	698-716/728-746
13	777-787/746-756
14	788-798/758-768
15	704-716/734-746

Tableau 2.2 : Les bandes de FDD.

Bandes	Fréquences UL/DL (MHz)
33.34	1900-1920 2010-2025
35.36	1850-1910 1930-1990
37	1910-1930
38	2570-2620
39	1880-1920
40	2300-2400

Tableau 2.3 : Les bandes de TDD.

2-5-7 La mobilité

La mobilité est une fonction clé pour les réseaux mobiles. Le LTE vise à rester fonctionnel pour des UE se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'UE faibles (entre 0 et 15 km/h). L'effet des handovers intra-système (procédure de mobilité entre deux cellules LTE) sur la qualité vocale est moins qu'en GSM, ou équivalent. Le système

intègre également des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets lors d'un handover intra-système [16].

2-5-8 Modulation adaptative et codage :

Principalement par la mise en œuvre de la modulation 16 QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation à 16 états). Cette modulation permet de doubler la capacité de transfert par rapport à la modulation utilisée pour l'UMTS, la QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) qui est basée sur deux porteuses de même fréquence déphasées de 90 degrés, soit 2 puissance 2 = 4 états d'information. Pour sa part, la 16 QAM combine deux niveaux d'amplitude avec deux porteuses en quadrature, soit 2 puissance 4 = 16 états d'information. Chacune de ces modulations est utilisée pour un lien précis tel que :

Modulations Downlink : QPSK, 16QAM et 64QAM

Modulations Uplink : QPSK et 16QAM

2-5-8-1 La modulation 16QAM

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature

(Une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée [6].

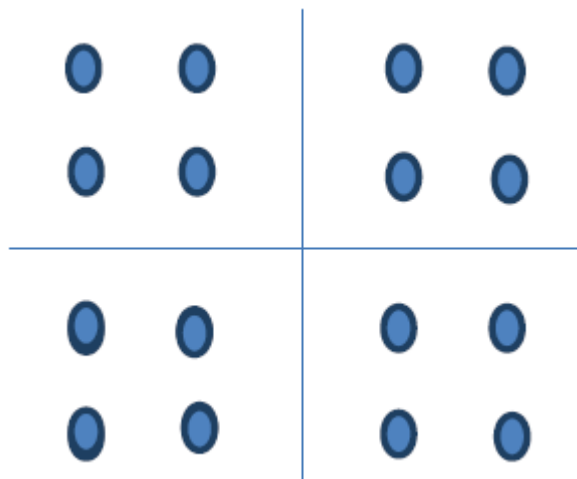


Figure 2-9 : Constellation QAM à 16 états [17].

L'amplitude et la phase de la porteuse sont simultanément modifiées en fonction de l'information à transmettre.

La figure 2-10 montre la constellation, qu'elle est en conséquence le nombre de bits pouvant être transmis en une fois, peut être augmentée pour un meilleur débit binaire, ou diminuée pour améliorer la fiabilité de la transmission en générant moins d'erreurs binaires. Le nombre de points de la constellation est indiqué avant le type de modulation QAM.

Le format de modulation QAM est étudié de plus en plus sérieusement dans le domaine des télécommunications par fibre optique afin de répondre à l'augmentation du débit.

2-5-8-2- La modulation QPSK :

Deux signaux FI en quadrature sont générés à partir d'un oscillateur local à la fréquence quadruple. Le train de donnée binaire est séparé en deux "sous trains" appelés I et Q. La paire de valeur, constitue ce que l'on appelle un symbole.

Pour des considérations électroniques, les signaux I et Q sont centrés sur 0V. On peut donc considérer que I et Q prennent symboliquement deux niveaux +1, -1 correspondant aux états binaires.

Chacun attaque un multiplieur. Le résultat de chaque multiplication est sommé en sortie de façon à obtenir un signal modulé $v_s(t)$: $V_s(t) = I \cos \omega t + Q \sin \omega t$.

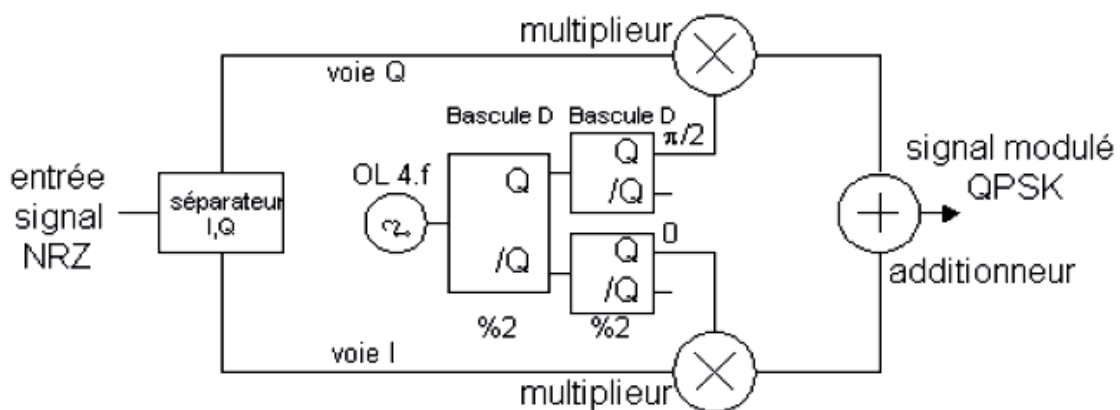


Figure 2-10 : Schéma du principe du modulateur QPSK [17].

Les états de phases du signal modulé se représentent en coordonnées polaires dans le plan I, Q. Suivant les combinaisons de ces derniers, on obtient alors le diagramme de communément constellation [17].

2-5-9- Les types de transmission utilisée dans la 4 G :

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

2-5-9-1-OFDMA :

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

➤ Origine et avantages

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, ainsi qu'il est compatible avec la technique des antennes MIMO.

L'OFDMA a attiré l'attention comme une alternative séduisante au codage CDMA qui est utilisé dans les réseaux 3G UMTS, particulièrement dans le sens de transmission downlink des réseaux mobiles, car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé grâce à sa grande efficacité spectrale (nombre de bits transmis par Hertz) et à sa capacité à conserver un débit élevé même dans des environnements défavorables avec échos et trajets multiples des ondes radio. Ce codage (tout comme le CDMA utilisé dans les réseaux mobiles 3G) permet un facteur de réutilisation des fréquences égal à « 1 », c'est-à-dire que des cellules radio adjacentes peuvent réutiliser les mêmes fréquences hertziennes.

➤ Principes

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

Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long

(66.7 μ s pour le LTE) ; cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de fading liés aux « chemins multiples de propagation » qui existent dans les liaisons radio de moyenne et longue portées (quand le débit binaire sur une porteuse est élevé, l'écho d'un symbole arrivant en retard à cause d'une propagation multi-trajets perturbe le ou les symboles suivants) :

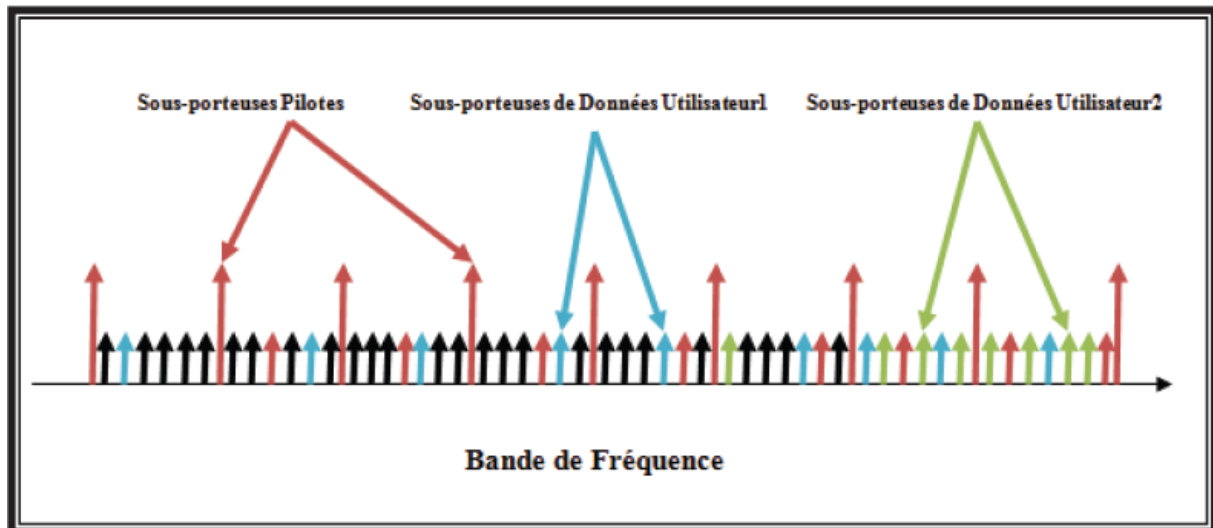


Figure 2-11 : Les porteuses de l'OFDMA.

Un filtrage séparé de chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage dans le terminal récepteur, une « Transformée de Fourier » FFT est suffisante pour séparer les sous porteuses l'une de l'autre. Dans le cas du LTE, il y a jusqu'à 1200 porteuses indépendantes.

Orthogonalité (le « O » de OFDMA) : en utilisant des signaux orthogonaux les uns aux autres pour les sous-porteuses contiguës, il évite les interférences mutuelles. Ce résultat est obtenu en ayant un écart de fréquence entre les sous-porteuses qui est égal à la fréquence des symboles sur chaque sous-porteuse. Cela signifie que lorsque les signaux sont démodulés, ils ont un nombre entier de cycles dans la durée du symbole et leur contribution aux interférences est égale à zéro; en d'autres termes, le produit scalaire entre chacune des sous-porteuses est nul pendant la durée de transmission d'un symbole (66.7 μ s en LTE, soit une fréquence de 15 KHz, ce qui correspond à l'écart de fréquence entre 2 sous-porteuses).

Un CP (préfixe cyclique) est utilisé dans les transmissions OFDMA, afin de conserver l'orthogonalité et les propriétés sinusoïdales du signal pour les canaux à trajets multiples. Ce préfixe cyclique est ajouté au début des symboles émis. En LTE, deux longueurs différentes de préfixe cyclique sont prévues pour s'adapter à des temps différents de propagation du canal

de transmission qui dépendent de la taille de la cellule radio et de l'environnement : un préfixe cyclique normal de 4,7!s, et un préfixe cyclique étendu de 16,6!s utilisé dans les très grandes cellules radio (ce préfixe représente de 7 à 25 % de la durée d'un symbole).

Ce codage est associé dans les réseaux LTE à des modulations de type QPSK ou QAM utilisées sur chacun des canaux, pour s'adapter aux conditions radio locales et à la distance séparant l'antenne de chaque terminal [17].

2-5-9-2- SC-FDMA :

Le single-carrier FDMA est une technologie de codage radio de type accès multiple par répartition en fréquence utilisée notamment dans les réseaux de téléphonie mobile de 4^{ème} génération LTE.

Comme pour d'autres techniques à schéma d'accès multiples (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA), le but est l'attribution et le partage d'une ressource radio commune (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs. Le SC-FDMA peut être considéré comme une variante linéaire des codages OFDM et OFDMA, dans le sens où il consiste aussi à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses du signal numérique, mais il utilise en complément, une « **DFT** » (Transformation de Fourier discrète du signal) supplémentaire pour pré-coder l'OFDMA conventionnel.

Le SC-FDMA a attiré l'attention comme une alternative séduisante à l'OFDMA, particulièrement dans les communications terre-satellite et dans le sens de transmission montant des réseaux 4G LTE où son **PAPR** (peak-to-average power ratio) plus faible que celui de l'OFDMA bénéficie au terminal mobile en termes d'efficacité énergétique, en diminuant la puissance crête d'émission et donc le poids et le coût du terminal (smartphone ou tablette tactile).

Il a été adopté pour les liaisons uplink de certaines normes 3GPP, plus particulièrement pour la partie radio (eUTRAN) des réseaux mobiles « LTE », car ce codage permet de diminuer la consommation électrique du terminal et donc d'augmenter l'autonomie de sa batterie. Pour les liaisons radio downlink des réseaux LTE, pour lesquelles il y a moins de contraintes énergétiques, c'est l'OFDMA qui est utilisé car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé.

Codage radio OFDMA et SC-FDMA : conversion numérique/analogique.

2-5-9-3 Comparaison entre l'OFDMA et le SC-FDMA

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

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

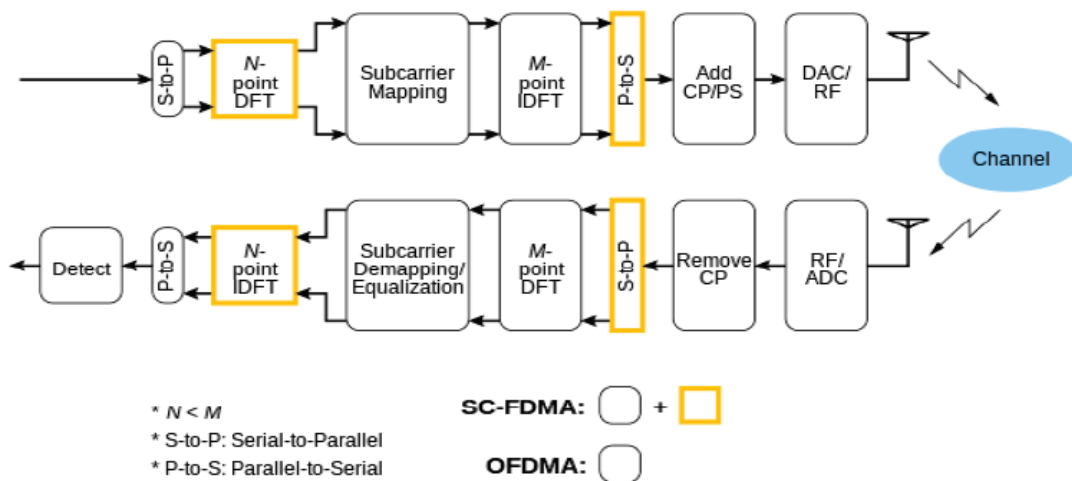


Figure 2-12 : Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA [18].

Mais ces techniques n'ont pas que des points communs. La différence majeure entre elles, réside dans le fait que l'OFDMA est une technique de transmission multi-porteuse tandis que la SC-FDMA est une technique mono-porteuse [7].

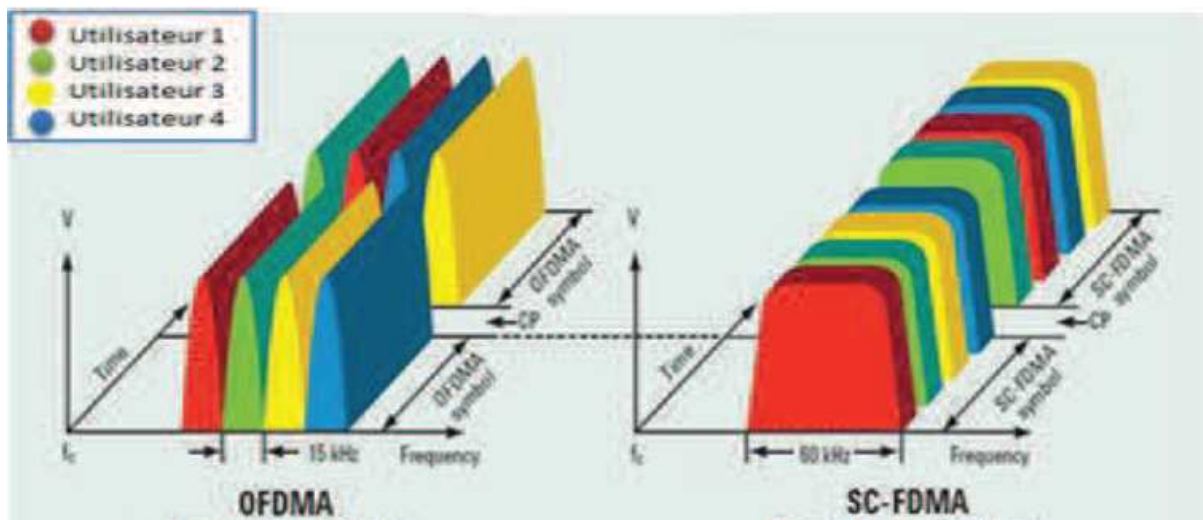


Figure 2-14 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA [19].

2-6 La qualité de service (QOS) :

2-6-1 Définition :

La qualité de service (QDS) ou Quality of service (QoS) est la capacité de transmission dans de bonnes conditions un certain nombre de paquet dans une connexion entre un émetteur et un récepteur, et cela peut être présenté sous plusieurs termes tel que la disponibilité, débit, délais de transmission, gigue, taux de perte de paquets.

Elle regroupe un ensemble de technologies mise en œuvre pour assurer des débits suffisants et constants sur tous les types de réseaux [20].

2-6-2 But de la QoS :

Le but de la QoS est donc d'optimiser les ressources du réseau et de garantir de bonnes performances aux applications. La qualité de service sur les réseaux permet d'offrir aux utilisateurs des débits et des temps de réponse différenciés par application suivant les protocoles mis en œuvre au niveau de la couche réseau.

Elle permet ainsi aux fournisseurs de services de s'engager formellement auprès de leurs clients sur les caractéristiques de transport des données applicatives sur leurs infrastructures IP [21].

Selon les types d'un service envisagé, la qualité pourra résider :

- Le débit (téléchargement ou diffusion vidéo).
- Le délai (pour les applications ou la téléphonie).
- La disponibilité (accès à un service partagé).
- Le taux de pertes de paquets.

2-6-3 Paramètres de la QoS :

Au sein d'un réseau donné, la qualité de service est évaluée en fonction des différents équipements qui composent ce réseau, ainsi que du trafic qui y circule, etc.

Des applications multimédia telles que la voix-IP ou la vidéo à la demande, en plus des applications classiques, seront de plus en plus utilisées dans ce type de réseaux. Ces applications multimédia nécessitent un niveau minimal de qualité de service en termes de bande passante, de délai, de gigue ou de taux de pertes de paquets.

➤ Le Débit :

Il définit le volume maximal pouvant être atteint pour la transmission de l'information (bits) par unité de temps (s) dans une communication entre un émetteur et un récepteur.

➤ **La perte de paquet :**

Elle correspond aux octets perdus lors de la transmission des paquets. Elle s'exprime en taux de perte. Plutôt rare, Elle correspond au nombre de paquet de données qui n'ont pas été reçus par la destination lors d'une communication. Cela peut être causé par plusieurs facteurs, la plupart du temps due à un encombrement du réseau.

➤ **Le délai de transit (latence)**

C'est le délai de traversée du réseau, d'un bout à l'autre, par un paquet. Les différentes applications présentes dans un réseau n'auront pas le même degré d'exigence en fonction de leur nature : faible, s'il s'agit d'une messagerie électronique ou de fichiers échangés, ce degré d'exigence sera fort s'il s'agit de données "voix". La latence dépend du temps de propagation (fonction du type de média de transmission), du temps de traitement (fonction du nombre d'équipements traversés) et de la taille des paquets (temps de sérialisation).

➤ **La gigue**

Désigne les variations de latence des paquets. La présence de gigue dans les flux peut provenir des changements d'intensité de trafic sur les liens de sorties des commutateurs. Plus globalement, elle dépend du volume de trafic et du nombre d'équipements sur le réseau.

➤ **La bande passante**

Il existe deux modes de disponibilité de la bande passante, en fonction du type de besoin exprimé par l'application :

- Le mode "burst" est un mode immédiat, qui monopolise toute la bande passante disponible (par exemple lors d'un transfert de fichier).
- Le mode "stream" est un mode constant, plus adapté aux fonctions audio/vidéo ou aux applications interactives.

➤ **Priorité des paquets**

Afin d'arbitrer entre les modes "burst" et "streaming" précédemment cités, une gestion du trafic peut soit être installée au sein du réseau, soit à ses extrémités. S'il s'agit de l'intérieur du réseau, les nœuds de ce réseau opèrent alors comme étant des éléments de classification et de priorisation des paquets qui y circulent. Si le dispositif se trouve à l'extérieur, les équipements constituant le réseau se trouvent déchargés de toute QoS. Deux mécanismes sont alors à l'œuvre : le contrôle de débit TCP, qui modifie le débit des applications TCP en fonction des conditions de charge du réseau et du niveau de priorité des applications, et la gestion des files d'attente personnalisées, qui affecte les flux entrants aux files d'attente qui leur correspondent.

2-6-4 Qualité de service dans le réseau 4G :

Le développement du réseau Internet et le nombre d'utilisateurs pouvant se connectés à ce réseau impose le recours à des niveaux importants de QoS. Dans cette perspective, plusieurs groupes de travail ont vu le jour pour les réseaux 4G. Les nouveaux besoin en termes de mobilité des utilisateurs et la croissance des réseaux permettant le nomadisme des utilisateurs ont fait migrer le problème vers la des réseaux sans fil.

- **Le bearer EPS**

Le bearer EPS est un équivalent du contexte PDP en 2G/3G. Il représente un concept logique qui est établi entre le terminal et la PDN GW et qui agrège plusieurs flux data transportés entre les deux entités.

Il permet d'identifier de manière unique des flux de trafic recevant la même qualité de service entre le terminal et la PDN GW. Tous les flux associés à un bearer EPS reçoivent les mêmes traitements en termes de forwarding (expédition des paquets).

Il existe deux types de bearers EPS :

- Le Default bearer, le premier bearer établi lorsque le terminal se connecte à un PDN, il reste actif durant toute la connexion.
- Les Dedicated bearer, tous les bearers additionnels établis avec le même PDN [22].

2-6-5 Exemple de Qualité de Service :

On voit à travers ces quelques exemples que les besoins en QoS peuvent être différents. Par exemple si l'on veut diffuser de la vidéo à la demande, on aura besoin d'un transfert quasi temps-réel avec une latence très faible et une gigue faible, en revanche il ne sera pas dramatique de perdre une image de temps en temps ou alors d'avoir une qualité d'image un peu dégradée.

Selon l'application utilisée, on s'efforcera de faire le bon compromis pour assurer la meilleure QoS possible, sachant qu'il n'existe pas de solution qui résolve tous les problèmes à la fois.

Avec un débit toujours plus grand proposé aux utilisateurs, les applications réseau ont évolué, ou plus exactement de nouvelles applications sont apparues : les applications multimédia. On peut compter parmi ces applications : la téléphonie sur IP, la diffusion de musique, la vidéoconférence, la vidéo à la demande. Ces nouvelles applications étant gourmandes en ressources, les réseaux traditionnels doivent mettre en œuvre des mécanismes de QoS pour ces flux dits continus. Nous allons voir ici les contraintes de ces applications.

➤ **Contraintes communes aux applications multimédia**

Dans les applications multimédia, les données sont soumises à des contraintes temporelles quasi temps réel. Cela implique qu'il n'est pas possible d'utiliser le protocole de transport TCP puisque si des paquets sont détruits en cas de congestion, leur réémission serait pénalisante et inutile pour le flux multimédia. Il faut donc utiliser un protocole de transport non fiable tel que l'UDP.

➤ **La téléphonie sur IP**

La principale contrainte de la téléphonie sur IP est le délai. Pour qu'une conversation puisse avoir lieu convenablement, il est nécessaire d'avoir une latence inférieure à 35 ms.

Pour assurer ce délai, les routeurs ne doivent pas comporter des files d'attente trop longues.

En effet, de longues files d'attente permettent d'obtenir un débit plus élevé puisque moins de paquets sont perdus mais le temps passé dans les files augmente. Dans l'idéal, les routeurs doivent avoir une file prioritaire à faible latence pour les flux de voix sur IP.

➤ **La vidéoconférence**

Pour la vidéoconférence, le débit est essentiel pour que la qualité de la vidéo soit suffisante et les contraintes en termes de délais sont identiques à celles de la voix sur IP. Il est en effet très gênant que l'image soit décalée du son ou que le média soit saccadé.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des différents composants et caractéristiques de la technologie LTE (quatrième génération) afin de présenter par la suite la terminologie des termes utilisés dans cette technologie.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le système MIMO-OFDM et ses différentes fonctionnalités.

Introduction :

Trois éléments forment, principalement, les systèmes de communications sans fils : L'émetteur, le récepteur et un canal radio via lequel les informations provenant de l'émetteur sont véhiculées au récepteur.

Donc, avant d'aborder une étude dans ce domaine il est indispensable de connaître les caractéristiques du canal radio à savoir les facteurs perturbateurs qui peuvent affecter une information transmise [24]. Nous allons dans un premier temps décrire la structure d'un système de communication radio et les étapes d'acheminement de l'information de la source vers l'utilisateur.

3-1 Système OFDM :**3-1-1 Présentation de l'OFDM :**

Les origines de l'OFDM remontent à 1930 lorsque les célèbres laboratoires de recherche Bell ont développé une nouvelle technique d'accès pour le canal radio, qui succéda au FDM bien établi, et fut appelée OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

L'intérêt pour cette technologie a connu un renouveau au milieu des années soixante, délaissé ensuite lors du développement de la théorie de l'égalisation pour les systèmes mono-porteuse (de moindre complexité), l'OFDM dû son retour en grâce, vers le milieu des années 1980, au projet de la radiodiffusion numérique DAB (Digital Audio Broad casting).

En effet, les systèmes mono-porteuse, contrairement à l'OFDM, ne remplissaient pas les conditions de résistance aux trajets multiples et le débit élevé pour un taux d'erreur binaire faible requis par cette nouvelle application [25]. Depuis lors, l'OFDM est restée une technique prépondérante, puisqu'elle est utilisée dans de nombreux standards tels que la radiodiffusion numérique terrestre ou DAB, la norme de télévision numérique terrestre ou DVB-T, la technologie ADSL et les réseaux sans-fils WLAN définis par les normes IEEE 802.11a, 802.11g (WIFI), 802.16g (WIMAX) et HIPERLAN [26].

Enfin l'OFDM s'adapte parfaitement aux communications mobiles, et semble incontournable pour les standards de troisième et quatrième génération, où il est notamment question de l'associer au CDMA (Code Division Multiple Access) ou aux systèmes multi-antennes MIMO (Multi Input Multi Output) [24].

3-1-2 Principe de la modulation OFDM :

Le principe de l'OFDM consiste à diviser sur un grand nombre de 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 indépendants (exemple: des émetteurs) et à des fréquences différentes (multiplexage fréquentiel) [27].

Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre elles. Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes fréquences porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des trajets multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de trajets, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites [26]. Chaque porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques : BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), QAM-16 (*Quadrature Amplitude Modulation*), QAM-64.

La figure suivante décrit le principe de base de la modulation OFDM:

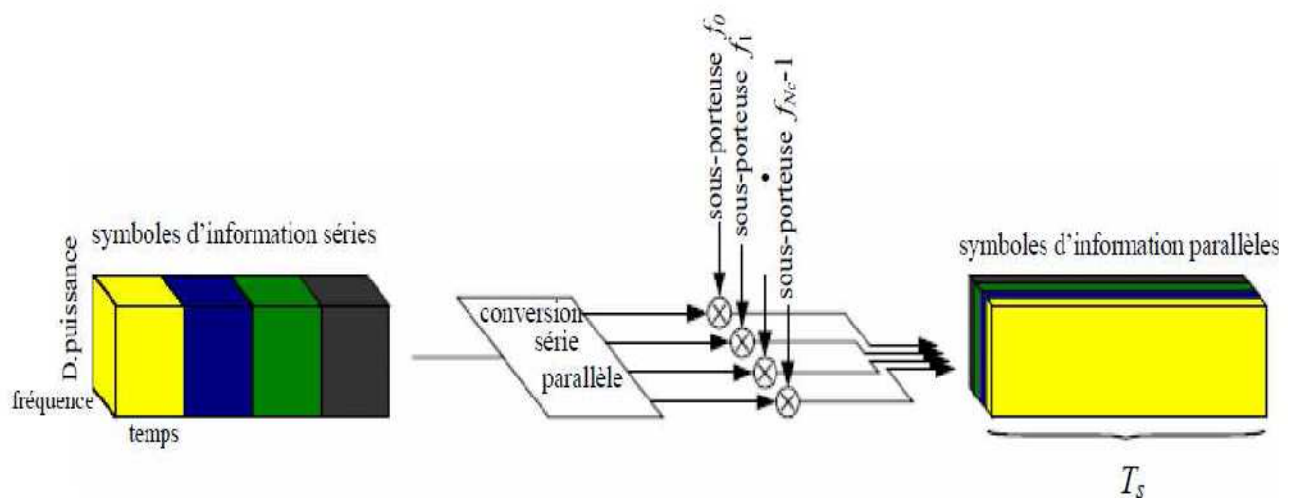


Figure 3-1 : Modulation OFDM avec $N_c=4$ sous-porteuse [23].

Le principe de l'orthogonalité permet de limiter l'interférence entre symboles (IES). Pour l'éliminer, on peut ajouter un intervalle de garde (c'est-à-dire une période pendant laquelle il n'y a aucune transmission) après chaque symbole émis très grand devant l'étalement des retards [26].

3-1-2-1 Notion d'orthogonalité :

L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence.

Mathématiquement, l'orthogonalité de deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ dans l'intervalle $[a, b]$ est défini par la relation [27]:

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) \cdot dt = 0 \quad (3-1)$$

➤ **L'orthogonalité temporelle :**

Le signal OFDM est composé d'une somme de N sinusoides de fréquences Respectives $f_k = k/T_u$ transmises durant une durée T_u .

Chaque sous-porteuse $g_k(t)$ peut se mettre sous la forme [27] :

$$g_k(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi k \cdot \frac{t}{T_u}\right) & 0 \leq t < T_u \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{pour } k=[0,1,\dots,N-1] \quad (3-2)$$

Ainsi deux sous-porteuses $g_i(t)$ et $g_j(t)$, de fréquences respectives f_i et f_j , définis par l'expression (3.2), sont orthogonales sur l'intervalle $[0, T_u]$.

➤ **L'orthogonalité fréquentielle :**

Chaque sous-porteuse étant transmise pendant une durée T_u . cela revient à appliquer à la sous-porteuse une porte de durée T_u dont le contenu spectral est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences $f_{-1} = f_k - 1/T_u$ et $f_{+1} = f_k + 1/T_u$

fréquences sont respectivement égale à f_{k-1} et f_{k+1} . la figure (3.2) présente le spectre d'une sous porteuse K de la bande $\Delta f = 1/T_u$

On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée sur la figure (3-3). La figure (3-2) montre que l'emplacement entre chaque sous-porteuse $1/T_u$ permet d'organiser ces sous-porteuses de telle sorte qu'au maximum d'une sous-porteuse donnée les autres sous-porteuses sont nulles : c'est la condition d'orthogonalité dans le domaine fréquentiel. Cette

condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et éviter les interférences entre les sous-porteuses (IEP) [26].

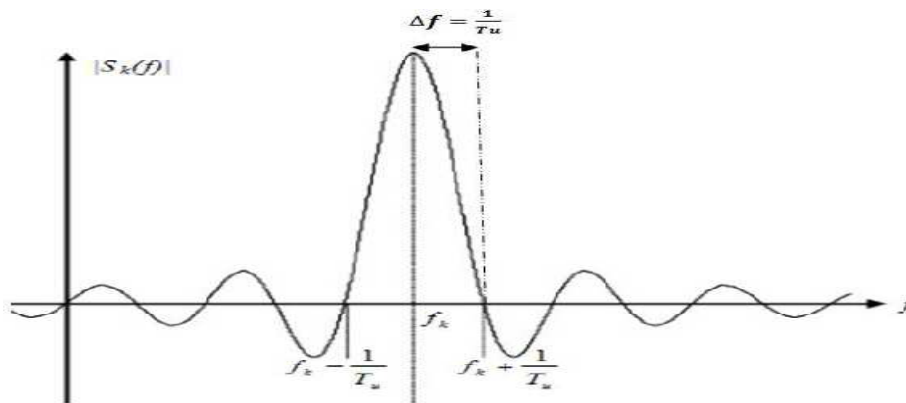


Figure 3-2 : Le spectre d'une sous-porteuse.

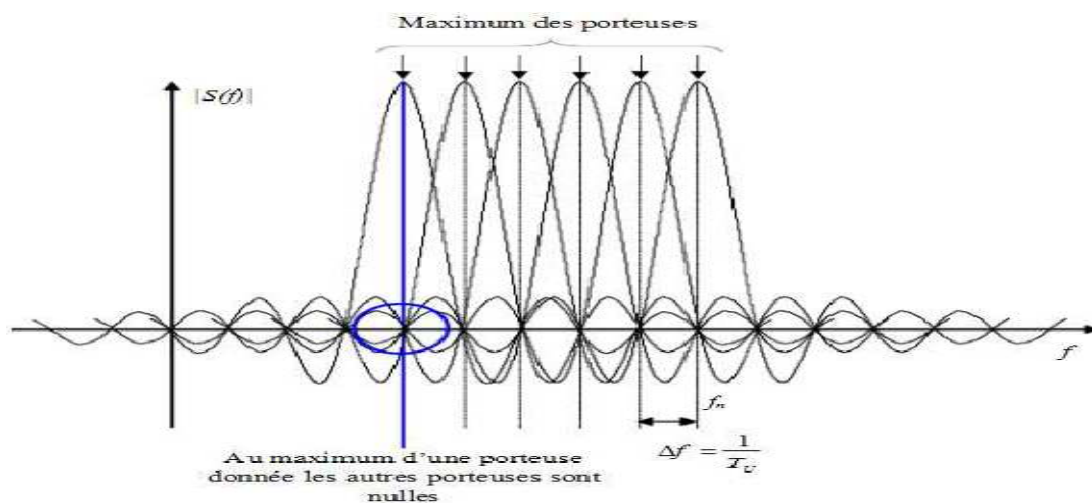


Figure3-3 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM [27].

La bande passante du spectre d'un symbole OFDM est constante et s'écrit $B = N/T_u$ avec N est le nombre maximal de sous-porteuses. Donc, la bande passante de chaque sous-porteuse est $B_{sp} = B/N$

Si on augmente le nombre de sous-porteuses, on constate que le temps T_u du symbole

OFDM devient grand devant l'étalement des retards τ_{\max} et la bande passante **BSP** de chaque sous-porteuse devient inférieure à la bande de cohérence **BC** du canal, par conséquent, chaque sous-porteuse OFDM éprouve un effet de non sélectivité en fréquence et ceci se traduit par l'absence d'interférence entre symboles (**IES**) ce qui réduit la complexité d'égalisation à la réception.

3-1-3 Modulation et démodulation OFDM :

➤ Modulation OFDM :

Les données d'entrée d'un système OFDM sont sous la forme d'un flux binaire mis en série. Des symboles complexes C_k sont, ensuite, définis à partir de ces éléments binaires selon une constellation typiquement de modulation BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM (selon le compromis robustesse / débit).

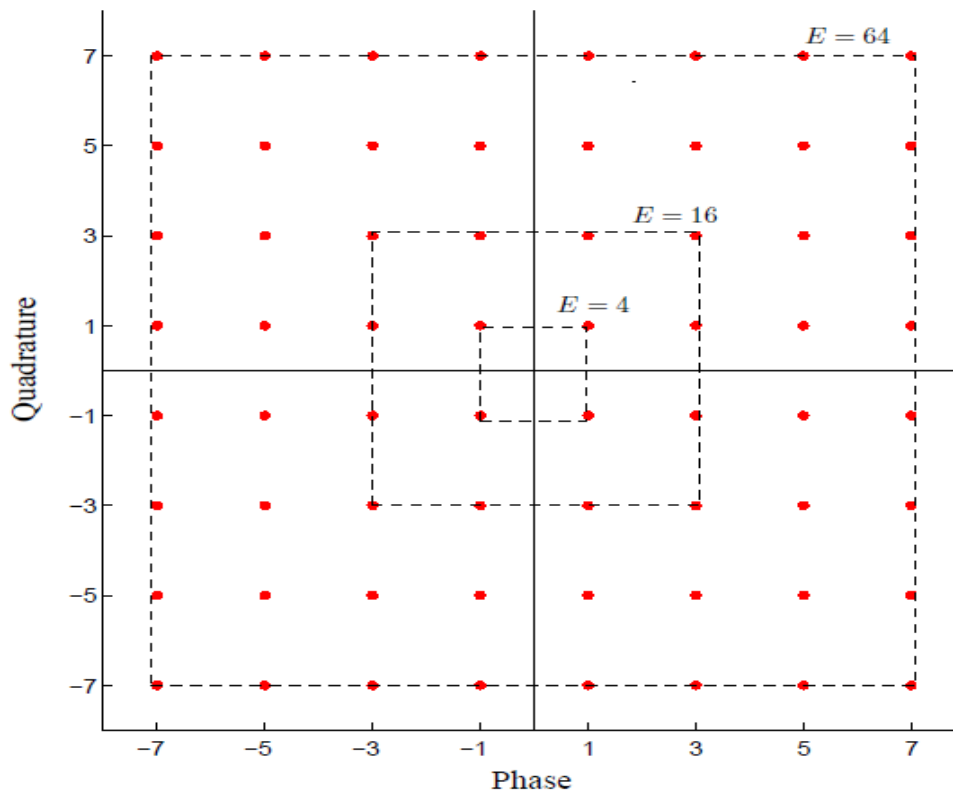


Figure 3-4 : Exemple d'une constellation E-QAM :

Les données C_k passent, ensuite, dans un buffer permettant de les convertir de série en parallèle. Après cela, chaque donnée C_k module une porteuse à la fréquence f_k .

Ces données sont, ensuite, groupées en paquets de N éléments qu'on appelle symbole OFDM.

Cette étape caractérise ce qu'on appelle la modulation OFDM.

Voici le schéma de principe de la modulation OFDM

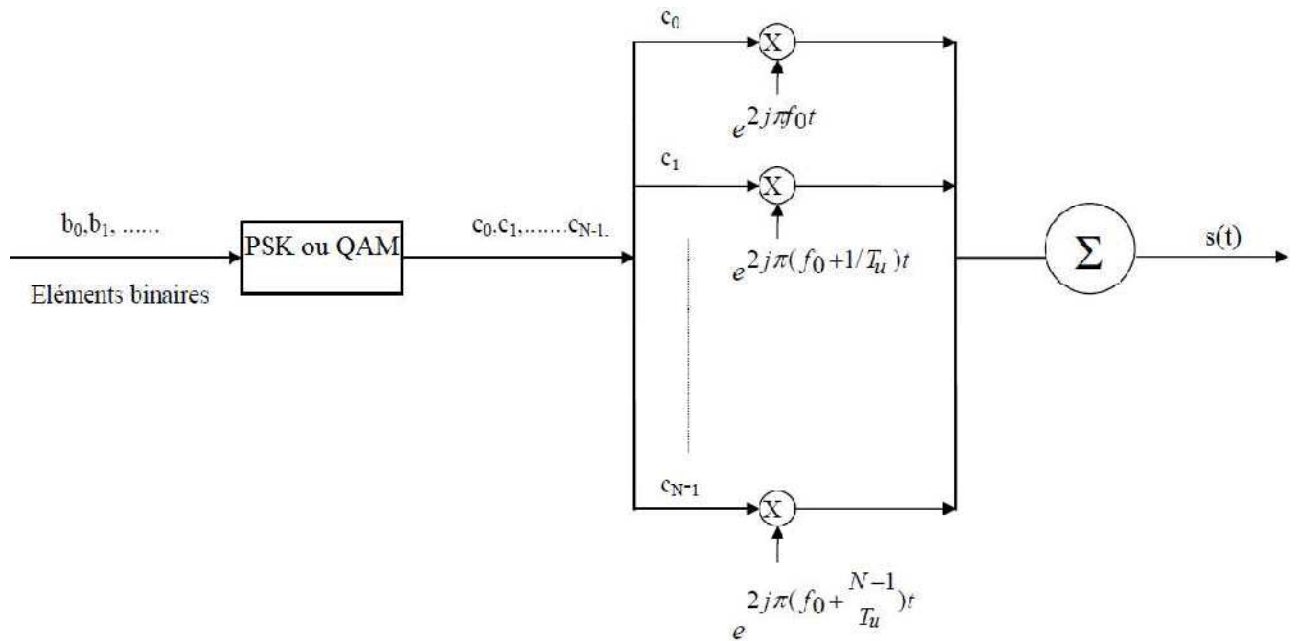


Figure 3-5 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Considérons une séquence de N données (symboles complexes) ,**c0,c1,c2Cn-1**

Appelons **Tu** la durée utile d'un symbole OFDM

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les sous-porteuses est **1/Tu**

Alors : **fk = f0 + k/Tu avec k=[0.1.2.....,N-1]** (3.3)

La fonction de base de chaque sous-porteuse est choisie tel que :

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{2j\pi f_k t} , & 0 < t < Tu \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Le signal individuel s'écrit sous la forme complexe : **ck.e^{2j\pi f_k t}** (3.5)

Le signal total transmis **s(t)** correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est

La somme des signaux individuels :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (3.6)$$

➤ **Demodulation OFDM:**

Au niveau du récepteur, le signal reçu $r(t)$ est corrélé avec les conjugués complexes de chaque fonction de base $g_i(t) = e^{-2j\pi f_i t}$ dans le but de récupérer les données CK du symbole OFDM transmis [30].

Voici le schéma de principe de la démodulation OFDM

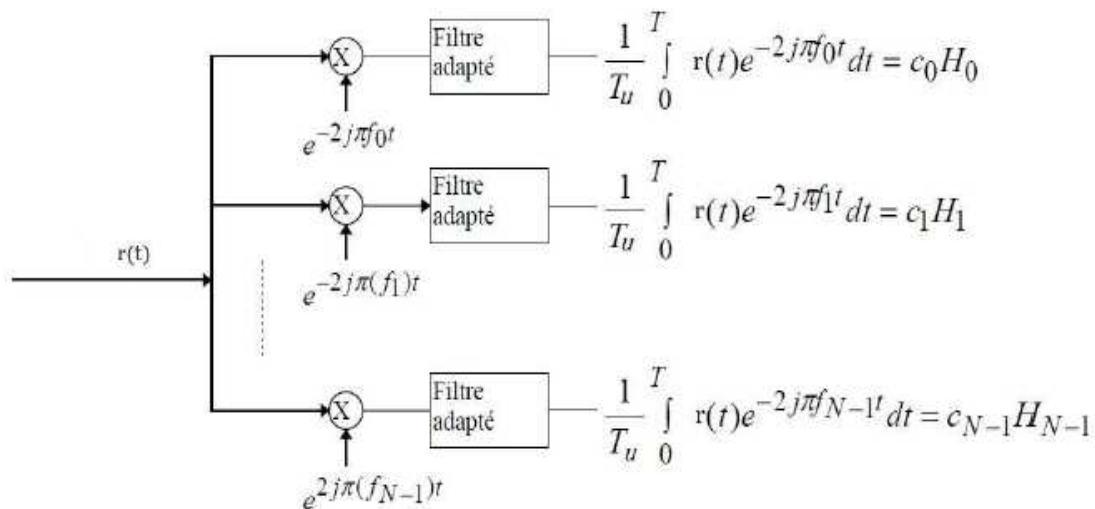


Figure 3-6 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.

En considérant le canal est sans bruit, le signal parvenant au récepteur s'écrit [26] :

$$r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi(f_0 + k/T_u)t} \quad \text{avec : } 0 \leq t < T_u \quad (3.7)$$

Où $H_k(t)$ 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_u .

La condition d'orthogonalité nous montre que [26] :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} r(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} c_k H_k e^{2j\pi(k-i)t/T_u} dt = c_i H_i \quad (3.8)$$

$$\text{Car : } \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} e^{2j\pi(k-i)t/T_u} dt = \begin{cases} 0 & \text{si } k \neq i \\ 1 & \text{si } k = i \end{cases} \quad (3.9)$$

3-1-4 Implémentation numérique :

La réalisation analogique d'un modulateur OFDM est très complexe car il faut utiliser un banc de modulateurs/démodulateurs synchronisés et un banc de filtres de mise en forme.

Heureusement, avec les progrès dans les domaines du traitement numérique du signal, ce problème s'est simplifié par l'utilisation des processus de la transformée de Fourier rapide (FFT) et la transformée inverse (IFFT) qui sont mathématiquement équivalentes à la transformée de Fourier discret (DFT) et la transformée inverse (IDFT), respectivement, mais plus efficace en terme de réduction de la complexité de calcul à mettre en œuvre

➤ **Transformée de Fourier rapide :**

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme couramment utilisé en traitement numérique du signal pour transformer des données discrètes du domaine temporel au domaine fréquentiel, sa définition mathématique qui associe aux symboles x_n pour $n \in 0, 1, \dots, N-1$ les symboles x_k avec $k \in 0, 1, \dots, N-1$ est donnée par la relation suivante [28]

$$x_k = \text{FFT} \{x_n\} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2j\pi k.n/N} \quad (3.10)$$

La transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) des symboles x_k est donnée par :

$$X(n) = \text{IFFT} \{x_n\} = 1/N \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{2j\pi k.n/N} \quad (3.11)$$

➤ **Implémentation numérique de modulateur:**

L'équation (3.6) du signal $s(t)$ peut être réécrite sous la forme :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi k t/T_u}, \quad 0 \leq t \leq T_u \quad (3.12)$$

Cela peut être considéré comme un signal en bande de base $SB(t)$ qui est modulé par la fréquence f_0 [30].

$$SB(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi k t/T_u} \quad k \text{ appartient } [0, 1, \dots, N-1] \quad (3.13)$$

Envisageons maintenant un échantillonnage du signal en bande de base $SB(t)$ avec un pas d'échantillonnage $T_e = T_u/N$, avec N représente le nombre de sous-porteuses.

A chaque instant $t = nT_e$, le signal échantillonné $SB(nT_e)$ noté $SB(n)$ s'écrit :

$$SB(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi k n/N} \quad \text{avec } n \text{ appartient } [0, 1, \dots, N-1] \quad (3.14)$$

Donc, le signal échantillonné $SB(n)$ est reconnue comme une IFFT (Inverse Fast Fourier Transforme) des symboles C_k à l'exception du facteur scalaire $1/N$. Après l'IFFT, le signal temporel discret résultant $SB(n)$ est convertit en un signal temporel continu $SB(t)$ par un filtre en racine de Nyquist [29].

Dans le but de trouver le signal $s(t)$ le signal en bande de base doit être modulé par la fréquence f_0 [30].

$$S(t) = SB(t) \cdot e^{2j\pi f_0 t} \quad 0 \leq t \leq Tu \quad (3.15)$$

Le schéma de principe du modulateur est le suivant :

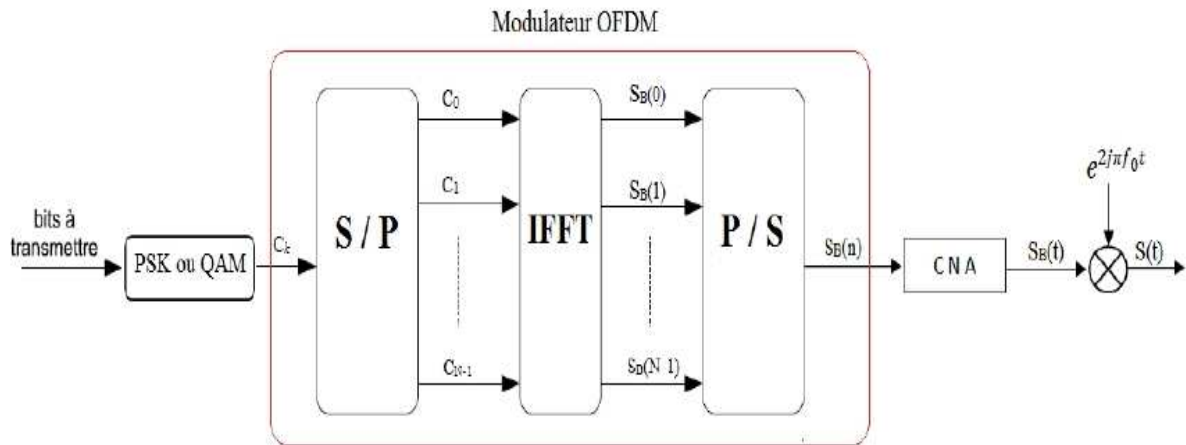


Figure 3-7 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM numérique.

➤ **Implémentation numérique de démodulateur :**

Du côté du récepteur les symboles transmis peuvent être récupérés par la démodulation du signal reçu $r(t)$ afin d'obtenir le signal en bande de base $rB(t)$. Après échantillonnage de ce dernier, on effectue la FFT sur la séquence $rB(n)$ [30].

En considérant la transmission est sans bruit additif, le signal parvenant au récepteur s'écrit [31]:

$$e^{2j\pi f_0 t} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot H_k \cdot e^{2j\pi \cdot k t / Tu} \quad 0 \leq t \leq Tu \quad (3.16)$$

En démodulant le signal $r(t)$ par la fréquence f_0 , on obtient un signal en bande de base $rB(t)$ qui s'écrit :

$$rB(t) = r(t) e^{-2j\pi f_0 t} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot H_k \cdot e^{2j\pi k t / Tu} \quad K \text{ appartient } [0.1 \dots N-1] \quad (3.17)$$

Après l'échantillonnage du signal $rB(t)$, le signal discret $rB(nTe)$ noté $rB(n)$ s'écrit :

$$\mathbf{rB}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot H_k e^{2j\pi k.n/N} \quad \mathbf{n} \text{ appartient } [0.1.2.....N-1] \quad (3.18)$$

On voit que $\mathbf{rB}(n)$ est la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) de la séquence $C_k \cdot H_k$, la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier rapide directe (FFT) sur la séquence $\mathbf{rB}(n)$ pour récupérer la séquence $C_k \cdot H_k$

$$C_k \cdot H_k = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{rB}(n) e^{-2j\pi k.n/N} \quad \mathbf{k} \text{ appartient } [0.1.2.....N-1] \quad (3.19)$$

Le schéma de principe du démodulateur est le suivant :

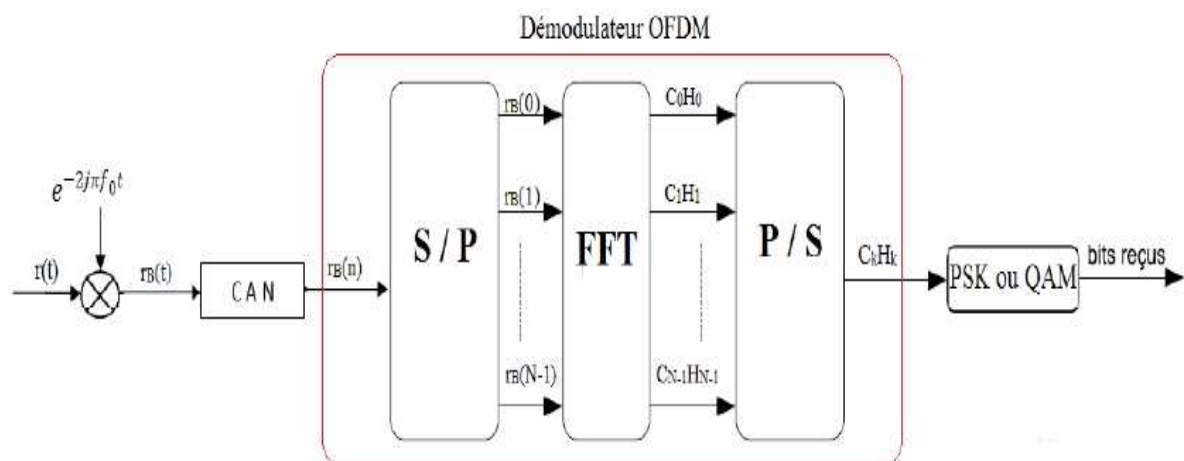


Figure 3-8 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM numérique.

D'après les deux figures (3-7) et (3-8), On remarque que l'IFFT est utilisée dans la partie émission, puisque qu'on passe du domaine fréquentiel au domaine temporel.

Au niveau de l'émetteur, le système OFDM traite les symboles de la source (par exemple, des symboles QAM) dans le domaine fréquentiel. Ces symboles sont utilisés comme entrées du bloc IFFT qui amène le signal dans le domaine temporel.

Les fonctions de bases pour l'IFFT sont N sinusoïdes orthogonales de fréquences différentes. Étant donné que les symboles d'entrée sont complexes, la valeur du symbole détermine à la fois l'amplitude et la phase de la sinusoïde de chaque sous-porteuse.

La sortie IFFT est la somme de toutes les N sinusoïdes qui forme un seul symbole OFDM. Ainsi, le bloc IFFT fournit un moyen simple pour moduler les données sur N sous-porteuses orthogonales.

Après quelques traitements supplémentaires, le signal temporel qui résulte de l'IFFT est transmis à travers le canal. Au niveau du récepteur, le bloc FFT est utilisé pour traiter le signal reçu et le convertir en spectre fréquentiel [30].

La figure (3-9) représente le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM utilisant la modulation QAM [30]:

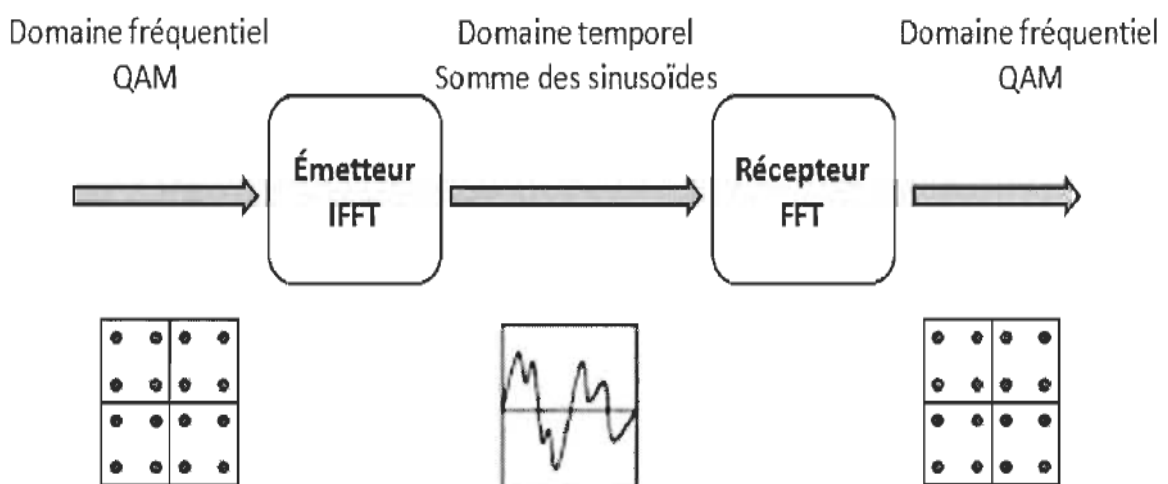


Figure 3-9 : Passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM

3-1-5 Problème d'interférences :

A cause du comportement multi-trajets du canal, l'orthogonalité entre les sous-porteuses n'est pas conservée. Ce qui perturbe la récupération des données à la réception.

En effet, un symbole émis lors d'une période mTu peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(m-1)Tu$. Il se produit alors des interférences entre les symboles transmis (IES). Pour remédier à ce problème, le système OFDM ajoute entre deux symboles OFDM un intervalle de garde appelé « préfixe cyclique ».

➤ Préfixe cyclique :

Le préfixe cyclique (Cyclic Prefix(CP)) est une copie de la fin du symbole OFDM ajoutée à son début à l'émission juste après la sortie de l'IFFT, puis enlevé à la réception avant d'effectuer la FFT. Cet intervalle doit être d'une durée TCP plus grande que l'étalement des

retards du canal τ_{max} . Ainsi les derniers échos du symbole OFDM d'indice $m-1$ auront lieu durant cet intervalle de garde, et le symbole OFDM suivant d'indice m ne sera plus perturbé par le précédent.

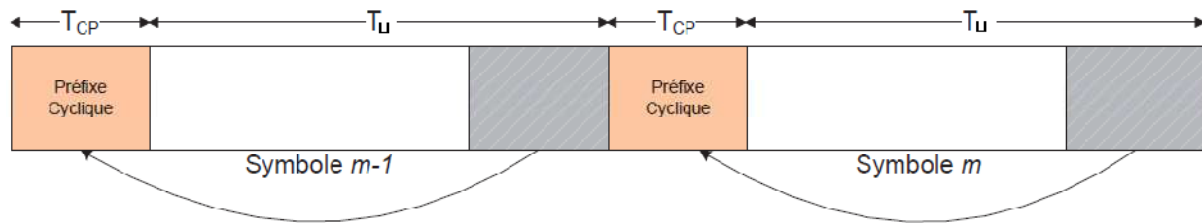


Figure 3-10 : Principe du préfixe cyclique.

La durée du symbole OFDM après l'ajout du préfixe cyclique est : $T_s = T_u + T_{cp}$ Où T_u est la durée initiale du symbole généré par l'IFFT.

T_{CP} est la durée du préfixe cyclique ajouté.

L'intervalle de garde est ajouté dans le domaine temporel et son essentiel rôle est de prévenir aux interférences entre symboles (IES), par contre une bande de garde (porteuses virtuelles) est ajoutée dans le domaine fréquentiel qui a pour but d'élimination des interférences entre porteuses (IEP) du signal OFDM.

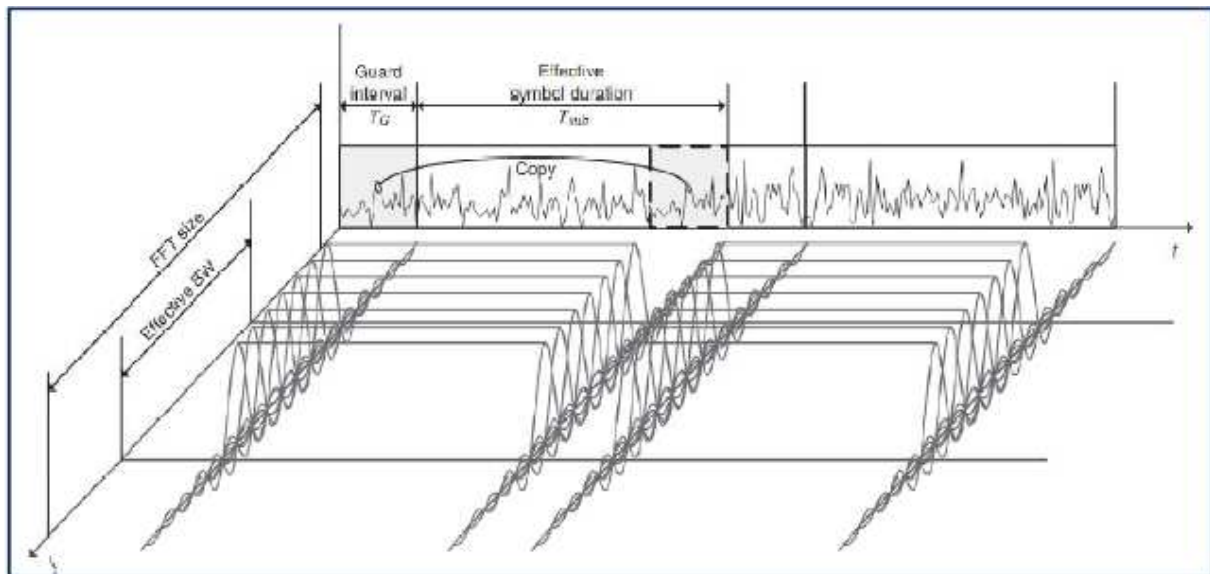


Figure 3-11 : Description dans le domaine temps/fréquence d'un symbole OFDM avec un préfixe cyclique (CP) [32]

3-1-6 diagramme en bloc d'un émetteur/ récepteur OFDM :

La figure (3-12) présente le diagramme en blocs d'un émetteur/récepteur OFDM. Le mapper transforme les données binaires b_i de durée T_b en symboles complexes C_j . En utilisant des modulations numériques BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM après la conversion série/ parallèle, ces symboles sont transformés en trames noté $\{c\}_{1..N}$ en appliquant ensuite une transformée de Fourier inverse IFFT, on obtient la trame parallèle OFDM formé de N symboles S_n , notée $\{s\}_{1:N}$. Ensuite, un préfixe cyclique formé de L derniers symboles est ajouté au début de la trame après la conversion parallèle / série on obtient le symbole OFDM à transmettre. A la réception, on réalise les opérations inverses. Un estimateur de canal est nécessaire afin de compenser l'effet du canal multi-trajets.

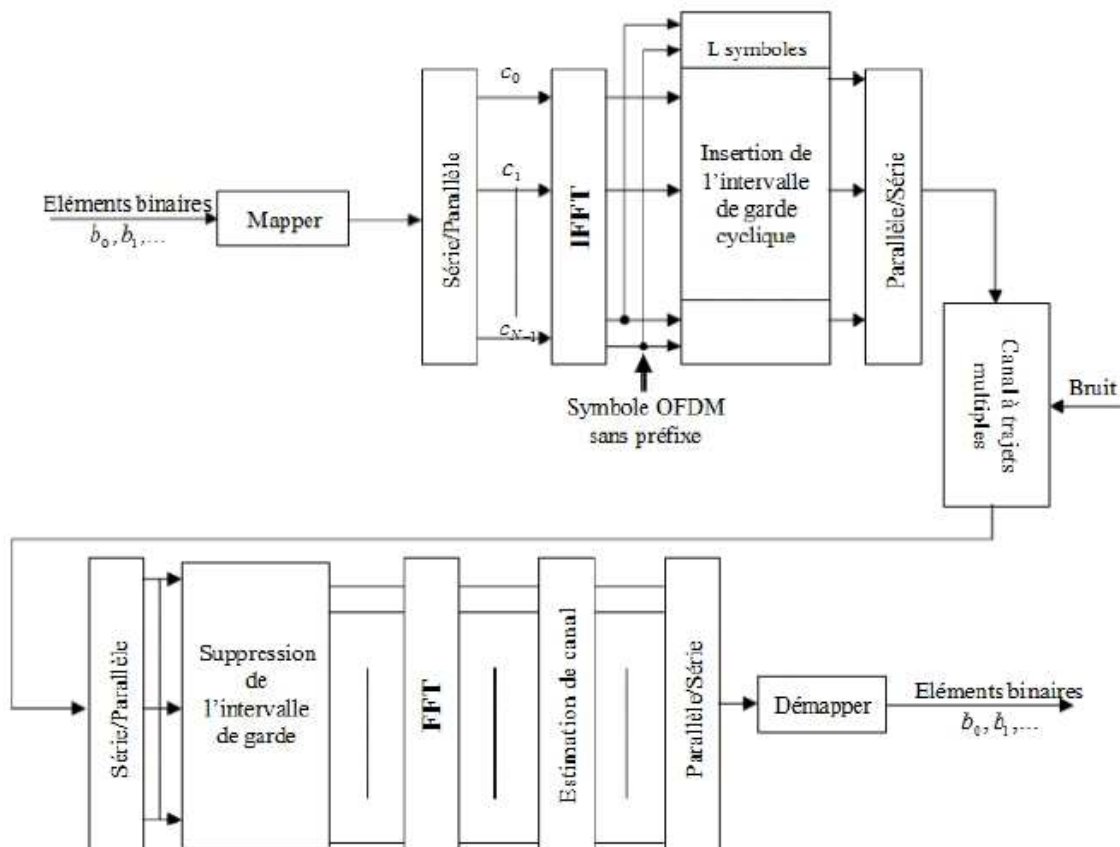


Figure 3-12 : Diagramme en bloc d'un émetteur/récepteur OFDM [27]

3-2 Système MIMO :

3-2-1 Principe de la technique MIMO :

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output) (Fig. 3-13). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes

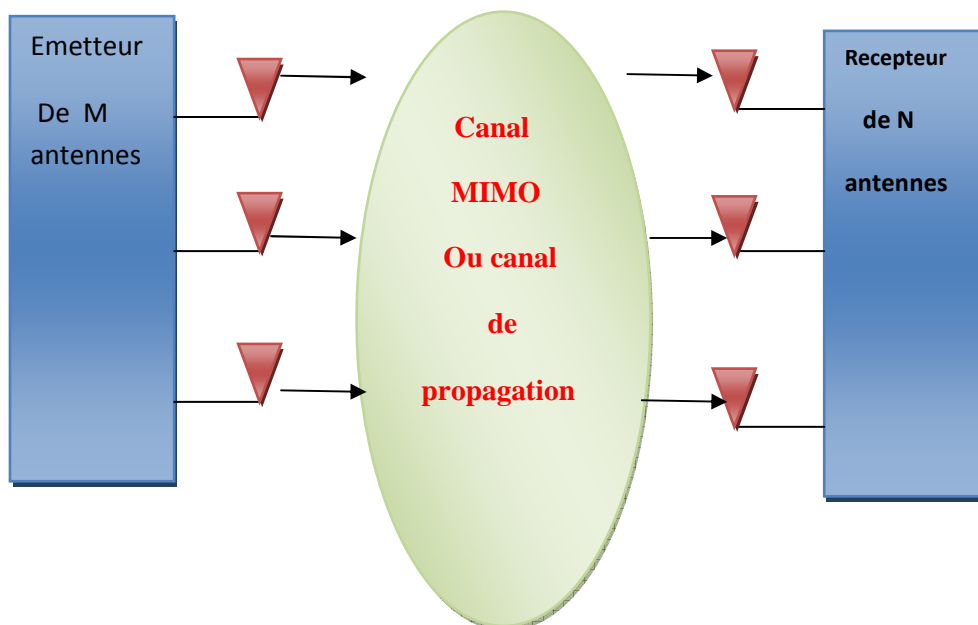


Figure 3-13 : Principe du système MIMO.

3-2-2 Les différents types de codage MIMO :

Dans un système MIMO, il existe plusieurs méthodes pour effectuer le codage des signaux :

3-2-2-1 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale:

(OFDM Orthogonal frequency Division Multiplexing) consiste à diviser sur un grand nombre de porteuses, le signal numérique que nous souhaitons transmettre (comme si nous combinons le signal à transmettre sur des émetteurs indépendants et à des fréquences différentes). Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité, n'interfèrent pas entre eux. Ainsi, dans un environnement multi-trajets où certaines fréquences seront détruites à cause des perturbations, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui elles n'auront pas été détruites [24].

3-2-2-2 Le multiplexage par division spatiale :

(SDM Spatial Division Multiplexing) au cours duquel plusieurs flux de données indépendants (essentiellement des canaux virtuels) sont simultanément multiplexés dans un canal spectral. Le multiplexage SDM peut améliorer le débit de façon significative, car le nombre de données spatiales résolues est plus important. Chaque flux spatial doit disposer de sa propre paire d'antennes de transmission/réception à chaque extrémité du lien radio. Il est important de noter qu'une chaîne de radio-fréquences RF et qu'un convertisseur analogique-numérique distincts sont nécessaires pour chaque antenne du système MIMO. Les configurations qui nécessitent plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être conçues avec attention pour maintenir des coûts peu élevés tout en répondant aux attentes en matière de performances [33].

3-2-2-3 Le codage spatio-temporel par bloc :

(STBC Space-Time Bloc Code) tout comme le SDM permet d'envoyer des signaux différents sur chaque antenne. Le principe du STBC est d'introduire une redondance d'information entre les deux antennes. Le canal STBC comprend $M*N$ sous canaux. Chaque sous canal est un canal à évanouissements indépendants ; ce qui fait que le STBC augmente la diversité du canal de transmission et donc la robustesse du récepteur. Cette méthode est très attractive car elle n'exige pas la connaissance de l'état du canal (CSI) même si cela peut réduire la capacité de transmission des données [24]. Le gain de diversité résultant améliore la fiabilité des liaisons sans fil à évanouissements et améliore la qualité de la transmission. Il est

à noter que ce type de codage n'améliore pas la capacité de transmission linéairement avec le nombre d'éléments utilisés. Ainsi pour améliorer à la fois la capacité et la qualité, un système MIMO doit être implémenté avec les deux types de codages à savoir le SDM et le STBC [34].

3-2-3 Capacité de canal :

3-2-3-1 Capacité d'un système SISO :

Soit un système SISO (Fig.3.14), avec h le gain du canal, γ le rapport signal sur bruit à l'antenne de réception ; la capacité sans connaître le CSI est :

$$C = \log_2(1 + \gamma |h|^2) \quad \text{bit/s/Hz}$$

Ainsi la capacité théorique sera alors :

$$C_t = E_c = \log_2(1 + \gamma E |h|^2) \quad \text{bit/s/Hz}$$

OR $E |h|^2 = 1$. ainsi : $C_t = \log_2(1 + \gamma) \quad \text{bit/s/Hz}$

Elle augmente, en fonction du logarithme de $1 + \gamma$. Lorsque le SNR est élevé, un gain de 3dB sur le γ ne fournira une augmentation que d'un bit par seconde par hertz (bit/s/Hz)[33]

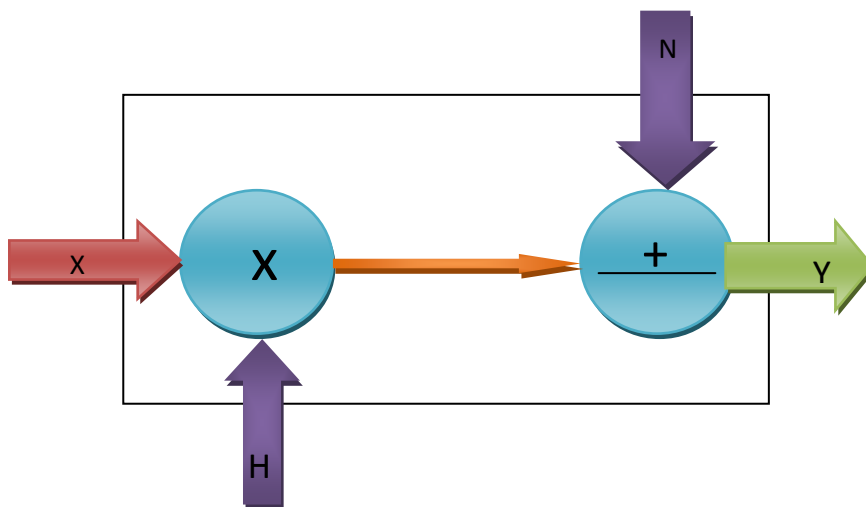


Figure 3-14: Système SISO

3-2-3-2 Canal SIMO : [35]

Un canal SIMO (Single Input, Multiple Output), est un système multi-antennes (Fig.3.15) (réalisant par exemple, de la formation de voix en réception) avec une antenne à l'émission et

N antennes à la réception. Avec h_i le gain complexe entre l'antenne émettrice et la i -ème antenne réceptrice, sa capacité sera alors :

$$C = \log_2 (1 + \gamma \sum_{i=1}^N |h_i|^2) \quad \text{bits/s}$$

Sa capacité de Shannon est donnée par :

$$Ct = Ec = \log_2 (1 + \gamma N^2) \quad \text{bits/s}$$

Avec $E. (\sum_{i=1}^N |h_i|^2) = N^2$ bits/s

Nous constatons que sa capacité augmente en fonction du logarithmique de $1 + \rho R N^2$, soit un peu plus vite que dans le cas SISO.

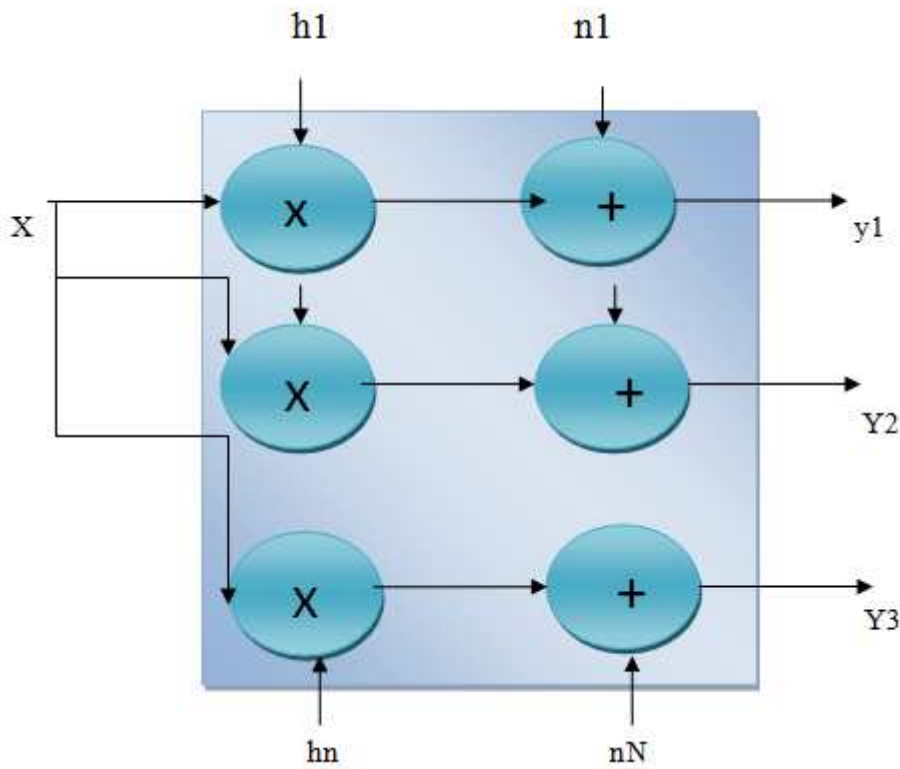


Figure 3-15 : Système SIMO

3-2-3-3 Canal MIMO : [36].

Pour un canal MIMO (Fig.3.16), avec M antennes émettrices et N antennes réceptrices

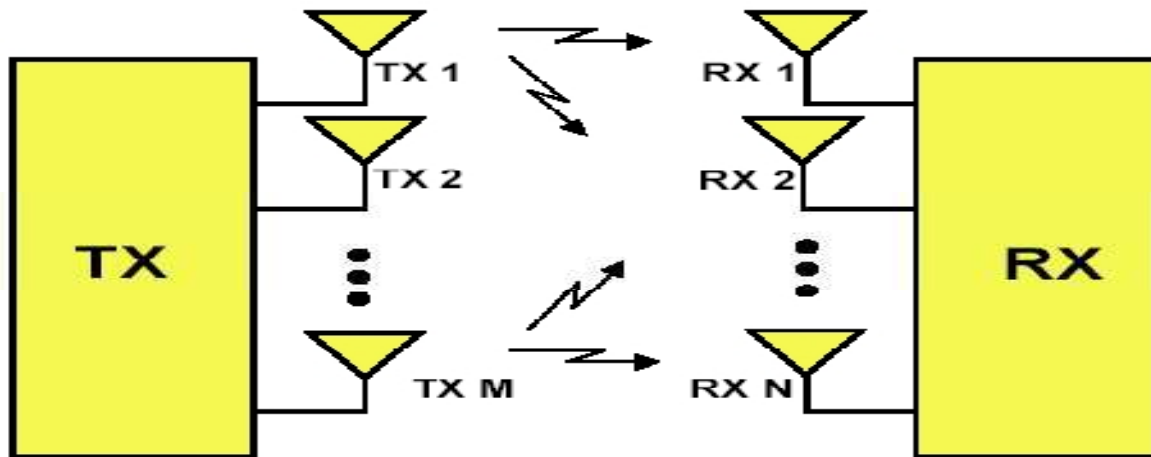


Fig. 3-16 : Système MIMO

La matrice complexe H du canal peut alors s'écrire :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix}$$

h_{ij} est le gain complexe du canal entre la j -ème antenne émettrice et la i -ème antenne réceptrice.

$$c = \log_2(\det [IN + \frac{\gamma}{M} \cdot H \cdot H^h]) \quad \text{bits/s/hz}$$

Lorsque N et M sont grands, l'espérance de la capacité pour un canal de Rayleigh croît proportionnellement à N :

$$E[c] = N \log_2(1 + \gamma)$$

La capacité augmente donc beaucoup plus vite que dans les cas SISO et SIMO grâce au grand nombre d'antennes.

3-3 Système MIMO-OFDM :

Maintenant que nous avons exploré les concepts de systèmes MIMO et OFDM, nous pouvons plonger dans le coeur de notre sujet, c'est-à-dire ceux qui combinent ces deux notions: les systèmes MIMO-OFDM. Il s'agit en fait simplement d'un système OFDM appliqué sur plusieurs antennes qui transmettent des informations parallèles.

Nous commencerons d'abord par définir les principales composantes du système MIMO-OFDM. Comme tout système de télécommunications, celui-ci est constitué d'un transmetteur, d'un canal, et d'un récepteur, qui sont eux-mêmes composés de quelques éléments.

3-3-1 Transmetteur MIMO-OFDM :

Avant d'aller plus loin, mentionnons qu'il existe deux types principaux de transmission MIMO. Ces deux choix mettent en évidence un problème courant en télécommunications: choisir entre un débit plus élevé ou bien en une meilleure qualité de transmission. En effet, dans un système MIMO, nous pourrions choisir d'envoyer, avec chaque antenne, la même information, afin d'augmenter encore la diversité des canaux. Toutefois, cette technique est peu utilisée.

Nous considérons donc que les antennes de transmission envoient des informations différentes, que nous voudrions reconstruire avec le récepteur. Nous pouvons voir sur la figure (3.17) les différentes parties du transmetteur MIMO-OFDM.[26]

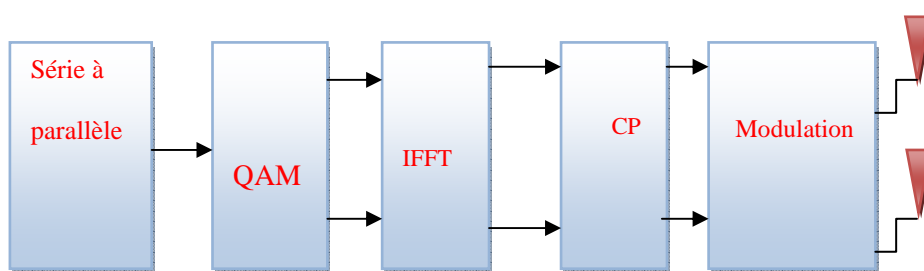


Figure 3-17 : Transmetteur MIMO-OFDM

La chaîne de données d'entrée est, à l'origine en série. La première étape sera donc de faire passer ces données en parallèle, afin de les répartir sur autant de séries qu'il y aura d'antennes de transmission.

-Les données ainsi mises en parallèle seront ensuite encodées selon une constellation **QAM**. À ce point, nous avons, à l'entrée de ce bloc, des valeurs de $[0, \dots, N_{QAM}-1]$, où N_{QAM} est le nombre de symboles possibles dans la constellation que nous avons choisie (64 pour du 64-QAM, par exemple). Celles-ci sont ensuite associées à leur valeur complexe correspondante de la constellation.

Nous appliquons ensuite l'**IFFT** sur ces valeurs, donnant pour sortie des valeurs complexes. Un préfixe cyclique (*cyclic prefix; CP*) est apposé au début de chaque groupe de données **OFDM**, contenant une copie des dernières données. C'est à ce point que le signal est réparti sur les antennes de transmission et pour être envoyé.

3-3-2 Récepteur MIMO-OFDM :

Voici maintenant à quoi ressemble un récepteur MIMO-OFDM (figure 3.18) :[26]

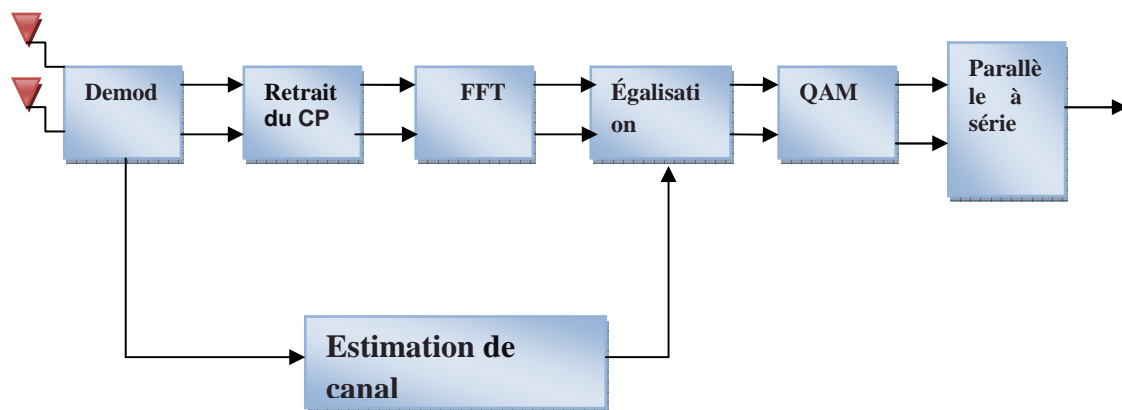


Figure 3.18 : Récepteur MIMO-OFDM

Le signal reçu est d'abord démodulé, afin de retrouver des données numériques.

Ensuite, nous retirons le CP qui a été apposé, car il n'a aucune valeur en tant qu'information. Puis nous appliquons la FFT pour retourner dans le domaine fréquentiel. C'est ensuite que l'égalisation à lieu. Par contre, pour la plupart des techniques, il est nécessaire de connaître le canal pour pouvoir procéder à la détection. C'est pourquoi nous retrouvons, dans ces systèmes, un estimateur de canal. Cette estimation peut se faire avec des pilotes ajoutés aux signaux, par exemple. La détection donne donc une estimation des données qui ont été envoyées à l'origine. Pour terminer, celles-ci se font attribuer leur valeur réelle en fonction de

la constellation qui avait été choisie au départ. C'est ainsi que se déroule, en résumé, le trajet du signal.

3-4 Quelques Techniques de réception MIMO-OFDM :

3-4-1 Zero-forcing (ZF) :

Le ZF est de loin la technique la plus simple et la plus instinctive. Il s'agit d'une technique d'égalisation linéaire non adaptative. Elle est basée sur le raisonnement suivant:

si le signal reçu est donné par la multiplication du signal par le canal, alors nous pouvons récupérer le signal d'origine en multipliant le signal reçu par la réciproque du canal. Pour ce faire, nous voulons déterminer la matrice de poids W qui permet de trouver l'estimation \tilde{A} du signal transmis x . [37]

$$\tilde{A} = Wy \quad (3.20)$$

Où

$$W = H^+ = (H^*H)^{-1} h^* \quad (3.21)$$

L'opération que nous avons ici symbolisée par une croix (+) se nomme la pseudo-inverse de Moore-Penrose. L'astérisque est la conjuguée transposée de la matrice. Comme la matrice de canal est de dimensions $Nr * Nt$ elle ne sera pas nécessairement carrée, d'où l'impossibilité de faire une inversion selon la définition de base. C'est pourquoi nous employons ici cette pseudo-inverse telle que définie par l'équation 3.21. Cette opération donne d'ailleurs le même résultat que l'inverse sur les matrices qui peuvent effectivement être inversées normalement. Dans notre contexte, nous pouvons considérer que le pseudo-inverse n'est qu'une généralisation de l'inversion de matrice, plus largement applicable.

D'ailleurs, comme nous le verrons, cette opération est utilisée dans plusieurs autres techniques d'égalisation.

Nous nous devons d'observer que pour cette technique d'égalisation, nous ne tenons pas compte du bruit v . C'est d'ailleurs en grande partie pour cette raison que l'algorithme est aussi simple. Toutefois, il n'est pas moins présent. C'est aussi le principal inconvénient de cette technique, qui, de par son ignorance du bruit, a parfois même tendance à en amplifier les effets.

Dans la littérature, cette technique est souvent utilisée comme base de comparaison due à son extrême simplicité algorithmique. Par le fait même, ses performances sont généralement

moins bonnes que les autres techniques auxquelles elle est comparée. Malgré tout, cette technique fait bel et bien une égalisation de base, et sert de pilier sur lequel viennent s'appuyer d'autres techniques plus avancées.

3-4-2 Recursive least-squares (RLS) :

Le RLS est un autre algorithme linéaire adaptatif largement utilisé. D'une complexité plus grande, celui-ci offre en contrepartie une convergence beaucoup plus rapide. Nous retrouvons donc toujours cette dualité entre l'efficacité et la complexité. Le raisonnement qui conduit à cette technique a été présenté dans maints ouvrages de référence, dont l'algorithme du RLS est comme suit [37]

$$\text{Initialisation : } \mathbf{P}_0 = \pi \mathbf{0I} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{X}_{est} = \mathbf{W}_i \mathbf{Y}_i \quad (3.23)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{X}_{des} - \mathbf{X}_{est} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{P}_{i+1} = 1/\lambda (\mathbf{P}_i - [\lambda^{-1} \mathbf{P}_i \mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_i^* \mathbf{P}_i] / [1 + \lambda^{-1} \mathbf{Y}_i^* \mathbf{P}_i \mathbf{Y}_i]) \quad (3.25)$$

$$\mathbf{W}_{i+1} = \mathbf{W}_i + \mathbf{e} \mathbf{Y}_i^* \mathbf{P}_{i+1} \quad (3.26)$$

Comme nous le voyons dans l'équation (3.22), la matrice \mathbf{P} est initialisée par un scalaire (généralement de valeur la plus élevée possible) multiplié à une matrice identité de taille $N_r.N_r$. Cette phase d'initialisation faite, nous estimons ensuite le vecteur d'informations transmises à l'aide des poids calculés jusqu'à maintenant (0 à la toute première estimation) en 3.23. Suite à cela, l'erreur est calculée dans l'équation 3.24 par rapport aux données désirées. Puis la matrice \mathbf{P} est mise à jour en 3.25. Pour ce faire, nous faisons usage du facteur d'oubli λ , qui prend généralement une valeur près de 1. Ce facteur d'oubli dicte la quantité de valeurs passées prises en compte dans les calculs de coefficients (avec 1, toutes les valeurs sont prises en compte). Enfin, l'équation 3.26 calcule les nouvelles valeurs de la matrice de poids \mathbf{W} . Comme pour le LMS, une fois l'adaptation terminée, seule l'équation 3.23 est utilisée pour faire l'égalisation avec les poids obtenus lors de l'adaptation.

Par définition, le RLS minimise l'erreur quadratique. En contraste, le LMS minimise l'erreur quadratique moyenne. Ce dernier dépend donc des statistiques du signal, tandis que le RLS dépend directement du signal lui-même. C'est ce qui explique en bonne partie la plus grande précision qui est attribuée au RLS dans sa recherche de poids.

Nous devons faire attention au facteur d'oubli en utilisant le RLS, les résultats peuvent varier beaucoup selon la valeur qui lui est attribuée. De plus, notons qu'une valeur de 1 utilise toutes les données passées. À l'opposé, en réduisant cette valeur, nous réduisons la fenêtre de données utiles pour calculer les poids. En général, nous voulons être près de 1, mais sans y être, car le fait d'utiliser toutes les données vient à minimiser l'importance des données récentes. La conséquence à cela est donc une perte en adaptabilité, surtout si les conditions sont changeantes.

Introduction :

La planification d'un réseau mobile consiste à déterminer l'ensemble des composantes matérielles et logicielles de ces systèmes, les positionner, les interconnecter et les utiliser de façon optimale, en respectant, entre autres, une série de contraintes de qualité de service. Ce processus qui peut être à la fois long et coûteux a lieu avant la mise en opération du réseau. Pour les réseaux de première génération (1G), de deuxième génération (2G) et de troisième génération (3G), les réseaux de prochaine génération orientent la planification des réseaux cellulaires vers de nouvelles avenues de recherche. En effet, les tendances portent de plus en plus vers une intégration transparente des technologies sans fil existantes, comme les systèmes GSM, LAN en un environnement totalement hétérogène. Cette nouvelle vague de pensée distingue la 4ème génération des générations précédentes, où seul primait le besoin de développement de nouvelles normes et de nouveaux standards. Les systèmes 4G sont complètement orientés vers l'utilisateur final, en fournissant des services variés à haut débit et sans coupure à travers les réseaux. Toutefois, la migration des systèmes actuels vers la 4ème génération constitue un énorme défi. Dans la littérature, plusieurs travaux abordent ce problème en considérant plusieurs aspects.

2-1 Définition :

Les nouvelles normes LTE visent à améliorer l'efficacité spectrale, à diminuer la latence, à augmenter la performance du réseau, à offrir des débits élevés en situation de mobilité à grande ou faible vitesse, à permettre et à faciliter l'interconnexion et l'interopérabilité entre différentes technologies existantes et à réduire les coûts de déploiement et d'exploitation en introduisant de nouvelles architectures et technologies. Le LTE est basé sur des techniques radios telles que la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant, la technique SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour le sens montant et la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour l'émission-réception. Les largeurs de bande du LTE peuvent s'étendre de 1,25 à 20 MHz en liaison montante comme en liaison descendante, ce qui permet à un opérateur d'adapter cette technologie aux bandes de fréquence qu'il possède. En outre, l'architecture MIMO contribue à augmenter les débits de transfert de données du LTE en autorisant plusieurs chemins de signaux [10, 11].

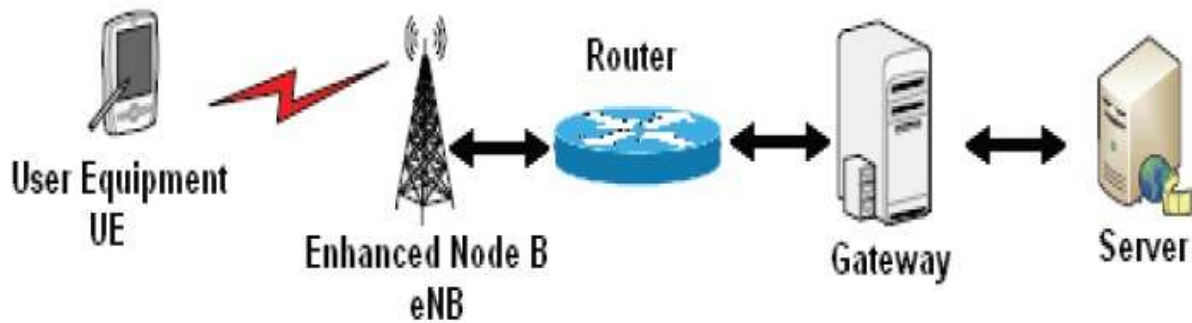


Figure 2-1 : Présentation générale sur le système LTE

2-2 Buts de la 4G LTE :

La 4^{ème} génération vise 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 transparent 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 relève, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets.
- Minimiser le coût de signalisation.

2-3 Architecture du LTE :

A côté de l'évolution d'accès radio E-UTRAN (LTE), il existe une évolution d'architecture du cœur du réseau connue sous le nom de SAE (System Architecture Evolution). Contrairement aux normes de la 2G et de la 3G qui proposent deux domaines de commutation : la commutation de circuit (CS - Circuit Switched) et la commutation de paquet (PS - Packet Switched), le SAE ne propose qu'un domaine de paquet fondé sur l'IP appelé l'EPC (Evolved Packet Core) [12, 13]. L'EPC est un cœur du réseau paquet tout IP. Cela signifie que tous les services devront être offerts sur IP y compris ceux qui étaient auparavant offerts par le domaine circuit tels que la voix, le SMS et tous les services de téléphonie, etc. La combinaison entre le LTE et le SAE est l'EPS (Evolved Packet System).

- Comparaison des architectures existantes:

MME (Mobility Management Entity) remplace les dispositifs PDSN/SGSN et BSC/RNC

eNodeB remplace BTS/NodeB

PDSN: Packet Data Serving Node de

Seving/PDN (Packet Data Network) gateway remplace HA/GGSN

BTS/NodeB: Base transceiver Station

HA/GGSN: Home Agent/ Gateway GPRS Support Node. CDMA2000

SGSN: Serving GPRS Support Node

BSC: Base Station controller

RNC: Radio Network control

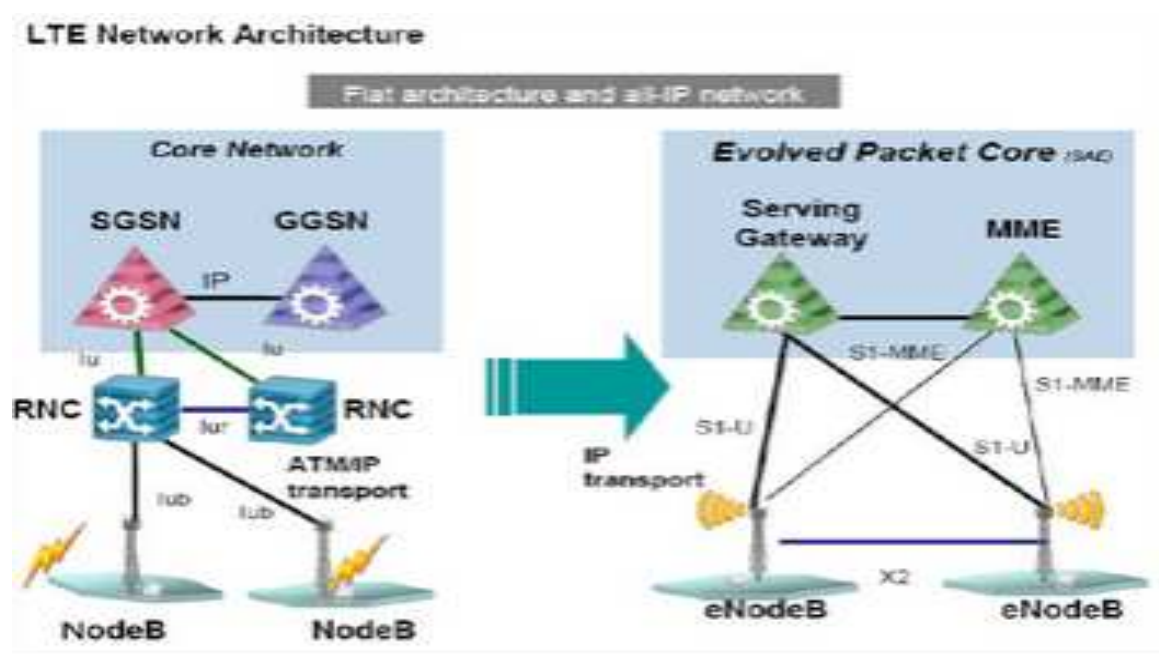


Figure 2-2 : Architecture générale du LTE

Les nouveaux blocs spécifiés pour l'architecture, connus aussi sous le nom d'EPS (Evolved Packet System), sont l'EPC (Evolved Packet Core) et l'E-UTRAN (Evolved UTRAN). La figure 2.3 présente une architecture simplifiée de la partie EPS du réseau LTE.

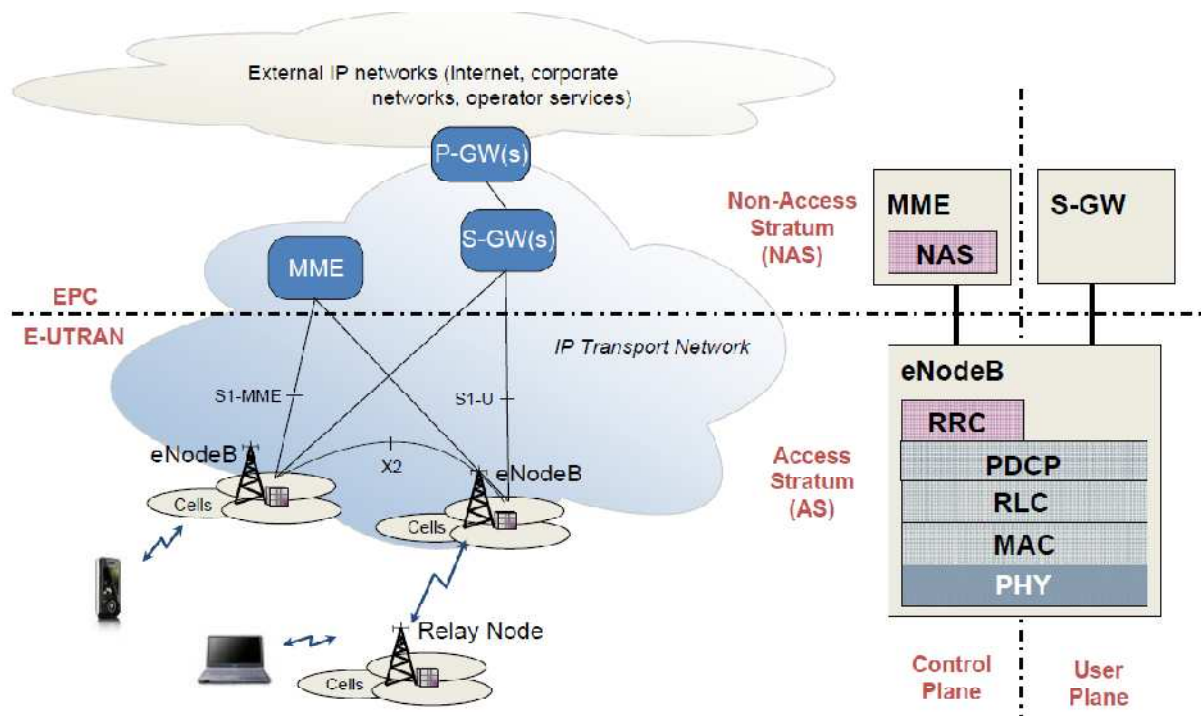


Figure 2-3: Architecture d'EPS (Evolved Packet System) [14].

2-3-1 EPC : Evolved Packet Core :

Le cœur de réseau appelé « EPC » (Evolved Packet Core) utilise des technologies « full IP », c'est-à-dire basées sur les protocoles Internet pour la signalisation qui permet des temps de latence réduits, le transport de la voix et des données. Ce cœur de réseau permet L'interconnexion via des routeurs avec les autres eNodeB distants, les réseaux des autres opérateurs mobiles, les réseaux de téléphonie fixe et le réseau Internet.

EPC Simplifie le réseau d'architecture à tout IP, comme il assure la mobilité entre 3GPP based système, et aussi non 3GPP based système par exemple WIMAX et CDMA2000.

Le réseau cœur EPC est constitué de plusieurs éléments comme la montre la figure suivante :

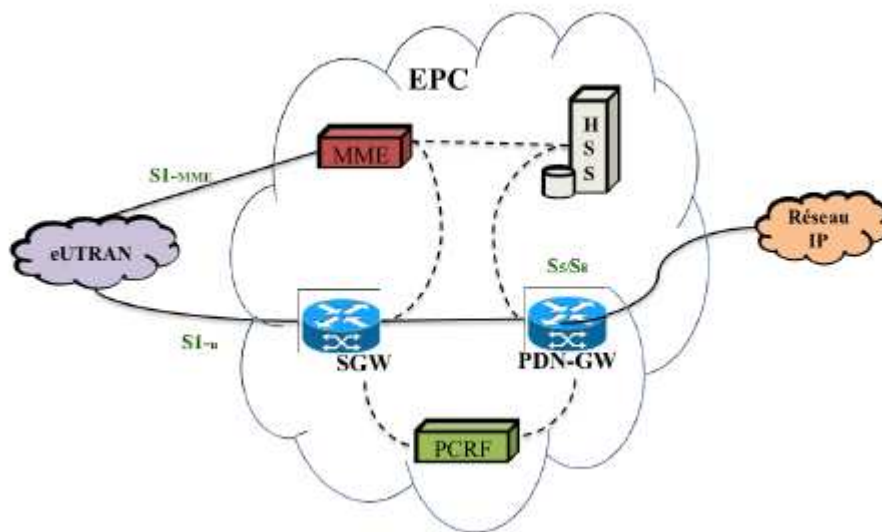


Figure 2-4 : Architecture du réseau cœur EPC [15].

EPC est l'élément principal de l'architecture SAE. Il a un rôle équivalent du NSS dans le réseau GPRS.

Le cœur réseau est composé de deux parties séparées :

2-3-1-1 La partie Signalisation :

Gère la mobilité et le rattachement des abonnés sur le réseau, il s'agit du MME. Une base de données permettant entre autre d'authentifier l'abonné, de consulter leurs abonnements et de chiffrer les communications, il s'agit du HSS.

Une politique de tarification, qui permet de gérer l'accès au réseau de données (PDN) en fonction du forfait de l'abonné, il s'agit du PCRF.

➤ **MME : Mobility Management Entity (3GPP Release 8) :**

Cette partie est responsable de la localisation et la poursuite du terminal mobile (UE) entre les appels et la sélection d'une bonne S-GW (Serving-GetWay) à travers une connexion. Comme elle réalise le dernier point de la protection par codage, donc par conséquent c'est le point qui valide l'interception de signalisation. Ainsi, qu'elle contrôle le signal entre le UE (Utilisateur Equipment) et le réseau cœur, et assure l'établissement, la maintenance, et L'élargissement de la porteuse radio services.

➤ **HSS : Home Subscriber Service :**

Base de données similaire au HLR en GSM / WCDMA réseau cœur qui contient les informations du subscriber-related (les abonnés voisins), et porte l'appel de control et la session management. Elle est Principalement désignée à l'authentification, l'autorisation, la sécurité, le débit et fournit une localisation détaillée à l'utilisateur.

➤ **PDN-GW: Packet Data Network GateWay (3GPP Release8):**

Est une porteuse du chemin de données entre UE et PDN à trois segments:

- La porteuse radio entre UE et eNodeB.
- La porteuse des données entre eNodeB et SGW.
- La porteuse des données entre SGW et PGW.

➤ **PCRF: Policy and Charging Rules Function (3GPP Release7):**

Responsable sur la décision principale du control. Il fournit une QoS d'autorisation pour décider le traitement des données en respectant l'abonnement des utilisateurs.

➤ **SGW: Serving Gateway (3GPP Release 8):**

C'est la jonction principale entre le réseau radio accès et le réseau cœur Serving GetWay (SGW) achemine les paquets de données, maintient la connexion de l'inter-eNodeB handover, puis inter-système handover entre LTE et GSM/UMTS et réserve le contexte du terminal mobile (UE), comme les paramètres de la porteuse service et le routage des informations.

➤ **P-GW: Packet-Switch GetWay:**

Packet-Switch GetWay (P-GW) Fournit la connectivité au terminal mobile (UE) vers le paquet externe du réseau de l'information et alloue les adresses IP d'un UE, ainsi que les applications de la QoS, et maintient la connexion mobile entre LTE/UMTS/GSM systèmes et le non 3GPP système.

➤ **SGSN : Serving GRPS Support Nom :**

Interconnecte le LTE, UMTS, et le réseau GSM pour augmenter la mobilité.

2-3-2 La partie radio eUTRAN :

Le cœur du réseau se compose plusieurs nœuds logiques tandis que le réseau d'accès contient seulement un nœud logique qui s'appelle eNB. En comparaison avec l'UMTS, on a éliminé le RNC (Radio Network Controller) et installé les fonctions de RNC dans les eNBs [22, 12]. Cela permet d'améliorer l'efficacité et de diminuer la latence du réseau en augmentant l'interaction entre les protocoles dans l'E-UTRAN. Cette partie radio du réseau,

est simplifiée par rapport à celles des réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN) par l'intégration dans les stations de base « eNodeB » avec des liaisons en fibres optiques et des liens IP reliant les eNodeB entre eux (liens X2).

Cette partie est responsable sur le management des ressources radio, la porteuse, la compression, la sécurité, et la connectivité vers le réseau cœur évolué.

➤ **eNodeB**

L'eNodeB est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM et NodeB dans l'UMTS, la fonctionnalité de handover est plus robuste dans LTE. Ce sont des antennes qui relient les UE avec le réseau cœur du LTE via les RF air interface. Ainsi qu'ils fournies la fonctionnalité du contrôleur radio réside dans eNodeB, le résultat est plus efficace, et le réseau est moins latent, par exemple la mobilité est déterminée par eNodeB a la place de BSC ou RNC.

2-3-3 La partie IMS (IP Multimedia Sub-system)

➤ **Définition**

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 de l'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 qu'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.

➤ **Exemples de services de l'IMS :**

- Echange de fichiers pendant un appel.
- Un usager peut créer une règle qui le montre connecté après une certaine heure et rejette tous les appels en provenance d'un appelant de son groupe professionnel.

- Un usager peut couper lorsque ses collègues professionnels appellent et les rediriger vers une page Web spécifique présentant l'hôtel où il passe ses vacances.

- Un usager peut activer la sonnerie au niveau de tous ses appareils en fonction de L'appelant.

- Messagerie instantanée et vidéo conférence

2-4-Principales différences entre les normes LTE et 3G UMTS :

Les normes LTE, définies par le consortium 3GPP⁶ sont dérivées des normes UMTS, mais apportent de nombreuses modifications et améliorations, notamment :

- Un débit descendant théorique allant jusqu'à 326,4 Mbit/s crête (300 Mbit/s utiles) en mode MIMO 4×4.
- Un débit montant théorique allant jusqu'à 86,4 Mbit/s crête (75 Mbit/s utiles).
- Cinq classes de terminaux LTE ont été définies, elles supportent des débits allant de 10 Mbit/s (catégorie 1), jusqu'au débit maximal descendant prévu par la norme LTE (300 Mbit/s pour la catégorie 5). Tous les terminaux LTE doivent être compatibles avec les largeurs de bandes de fréquence allant de 1,4 à 20 MHz.
- Un débit de données trois à quatre fois plus important que celui de l'UMTS/HSPA.
- Une efficacité spectrale (nombre de bits transmis par seconde par hertz) trois fois plus élevée que la version de l'UMTS appelée HSPA.
- Un temps de latence RTT (Round Trip Time) proche de 10 ms (contre 70 à 200 ms en HSPA et UMTS).
- L'utilisation du codage OFDMA pour la liaison descendante et du SC-FDMA pour la liaison montante (au lieu du W-CDMA en UMTS).
- Des performances et des débits radios améliorés par l'utilisation de la technologie multi-antennes MIMO du côté équipement terrestre (eNodeB) et du côté terminal (en réception uniquement).
- L'utilisation de codes correcteur d'erreur de type « Turbo codes » associés aux algorithmes de retransmission HARQ.
- La possibilité d'utiliser une bande de fréquence allouée à un opérateur variant de 1,4 MHz à 20 MHz, permet une plus grande souplesse (par rapport à la largeur spectrale fixe de 5 MHz de l'UMTS / W-CDMA).
- Une large gamme de bandes de fréquences hertziennes supportées, y compris celles historiquement attribuées au GSM et à l'UMTS et de nouvelles bandes spectrales notamment autour de 800 MHz et de 2,6 GHz : 39 bandes sont normalisées par le 3GPP

(dont 27 en LTE FDD et 11 en TDD⁷). La possibilité d'utiliser des sous-bandes de fréquences non-contiguës.

- La contrepartie du grand nombre de bandes de fréquences prévues par la norme est la quasi impossibilité pour un terminal de prendre en charge simultanément toutes les fréquences normalisées ; il y a donc des risques importants d'incompatibilité entre terminaux mobiles et réseaux nationaux.
- La prise en charge de plus de 200 terminaux actifs simultanément dans chaque cellule.
- Un bon support des terminaux en mouvement rapide. De bonnes performances ont été enregistrées jusqu'à 350 km/h, voire jusqu'à 500 km/h, en fonction des bandes de fréquence utilisées.

Contrairement aux normes 3G HSPA et HSPA+, qui utilisent la même couverture radio que l'UMTS, le LTE nécessite des fréquences radio et des antennes qui lui sont propres mais qui peuvent être localisées avec celles d'un réseau 2G ou 3G.

2-5-Les caractéristiques de la 4G :

2-5-1-Les fréquences utilisées :

Les bandes de fréquences hertziennes prévues par les normes 3GPP pour le LTE et le LTE Advanced sont très nombreuses (plus de 30) et s'étalent de 600 MHz à 3,8 GHz. Celles situées dans la zone des 800 et 900 MHz sont utilisables sur tout le territoire et particulièrement dans les zones rurales car elles ont une plus grande portée que les ondes radio de fréquences plus élevées. Le rayon de couverture de chaque cellule est variable, allant de quelques centaines de mètres (débits optimaux en zones urbaines) jusqu'à 30 à 50 km (zones rurales).

Dans l'Union européenne, les discussions sur l'utilisation de la bande de fréquence des 800 MHz qui était auparavant utilisée pour la télévision analogique UHF (canaux 61-69), ont abouti à l'affectation de ces bandes spectrales aux réseaux mobiles 4G LTE. Ces canaux sont disponibles en France depuis début 2012, suite à la libération de ce que l'on appelle le « dividende numérique », obtenu par le passage à la TV numérique (TNT) de tous les États membres européens.

Dans les villes et zones urbaines, les bandes hertziennes affectées, au LTE ont des fréquences plus élevées (entre 2,5 et 2,7 GHz en France et au sein de l'UE). Dans ce cas, la taille de la cellule radio (zone de couverture) sera de quelques kilomètres ou moins (small cells).

Pour pouvoir utiliser les bandes des 900 et 1 800 MHz, il est nécessaire d'effectuer un « réaménagement » du spectre en libérant des canaux initialement attribués au GSM (2G) et à l'UMTS (3G). Dans de nombreux pays européens, certains opérateurs ont déjà réutilisé une partie de la bande de fréquence des 1 800 MHz pour le LTE ; cette bande de fréquence est la plus utilisée dans les réseaux 4G/LTE européens fin 2012¹⁵.

En France, l'autorisation d'utiliser une partie de cette bande de fréquence des 1 800 MHz a été accordée à Bouygues Telecom par l'Arcep le 14 février 2013 avec une date de mise en service fixée au 1^{er} octobre 2013¹⁶. Cette bande de fréquence aura donc pendant quelques années une utilisation mixte 2G (GSM) et LTE. Bouygues Telecom a, par exemple, commencé par attribuer 10 MHz duplex de sa bande de fréquence des 1800 MHz au LTE, puis à partir d'avril 2014 il a, dans certaines zones géographiques, élargi à 15 MHz la part affectée au LTE (au détriment du GSM)¹⁷.

2-5-2-Débits théoriques et débits réels :

Le débit réel de données observé par l'utilisateur d'un réseau LTE peut être très fortement réduit par rapport aux débits binaires théoriques annoncés et définis par la norme LTE. Les principaux facteurs ayant une influence sur le débit effectif sont les suivants :

- le nombre d'utilisateurs actifs se partageant la bande passante au sein d'une cellule (surface radiante d'une antenne) LTE ; plus il y a d'abonnés en communication, moins chacun a de débit unitaire ;
- la largeur de la bande de fréquence attribuée à l'opérateur du réseau. Le débit utile global est proportionnel à cette largeur de bande qui peut varier de 1,4 MHz à 20 MHz en LTE et jusqu'à 100 MHz en LTE Advanced ;
- les types d'antennes utilisés, coté terminal et coté réseau (antenne relais) : le débit binaire maximal de 300 Mbit/s suppose des antennes MIMO 4×4 (quadruples) aux 2 extrémités de la liaison radio LTE (cas de figure peu réaliste pour un téléphone mobile ou un smartphone à cause de leur petite taille). À noter : le LTE Advanced permet d'atteindre et même dépasser les 300 Mbit/s avec seulement une antenne double MIMO 2×2 ;
- la distance entre le terminal et la (ou les) antenne(s) relais (le débit est très inférieur en périphérie de cellules radio à cause des interférences avec les cellules adjacentes) et les conditions de réception radio : interférences, bruit, échos liés aux réflexions sur les immeubles... ;

- la position fixe (statique) ou « en mouvement » du terminal de l'abonné ; le débit utile est réduit pour un terminal en mouvement ;
- la capacité en débit et le nombre maximum d'utilisateurs simultanés permis par la station de base (eNode B) et le débit des liens cuivres ou optiques reliant cette station au cœur de réseau (réseau de backhaul).

Le type et la catégorie du terminal influent aussi sur le débit maximum possible ; par exemple un terminal LTE (UE « User Equipment » en anglais) de catégorie 1, ne supporte qu'un débit binaire de 10 Mbit/s alors qu'un autre de catégorie 3 supportera 100 Mbit/s en contrepartie, plus la catégorie du terminal est élevée, plus le terminal sera complexe (coûteux) et moins son autonomie sera grande (à niveau technologique égal et capacité de batterie égale).

2-5-3- Débits et fréquences du réseau 4G :

L'évolution des débits suit une progression semblable à celle de la capacité de calcul. Chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmente les débits et suscite une attente de débits supérieurs. Il était ainsi également clair dès 2004 que le LTE devrait fournir de très hauts débits. Au-delà des limitations capacitaires, le débit fourni à un utilisateur dépend de ses conditions radio, liées en particulier à sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la ressource spectrale disponible.

L'établissement des standards de performances communément admis pour les réseaux 4G :

- 100 Mbit/s sur le lien radio descendant (antenne relais vers mobile), et 50 Mbit/s maximum sur le lien montant (mobile vers antenne relais). La technologie LTE fonctionne dans une variété de fréquences selon la zone géographique couverte : 700 MHz aux Etats-Unis pour le réseau de Verizon Wireless, 2,6 GHz et 800 MHz en Europe, et 2,1 GHz pour le réseau japonais de NTT Docomo (opérateur japonais).

Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

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

Ces chiffres supposent un UE de référence comprenant :

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

Pour le LTE y aura, deux antennes d'émission à la station de base et deux antennes en réception au niveau de l'UE.

L'utilisateur peut ainsi accéder à ses services favoris chez lui ou hors de son domicile avec une fluidité homogène. En complément, le débit est jugé comme un facteur de comparaison entre opérateurs et une course aux débits est en marche dans certains pays.

Enfin, des débits toujours plus élevés ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services, sources de revenus et/ou de différenciation pour les opérateurs.

2-5-4 Latence :

La latence est l'un des caractéristiques le plus important qui est relié a la vitesse, et il est mesuré en millisecondes. Le plus faible taux de latence, ou le retard dans le temps de réponse, le plus rapide de l'interaction entre l'appareil et le réseau qu'il est allumé.

Réseaux 4G LTE sont rapides; en fait, ils sont jusqu'à 10 fois plus rapide que les réseaux 3G existants, fournir des données aux appareils sans fil à des taux de 5 à 12 mégaoctets par seconde en liaison descendante et de 2 à 5 mégaoctets par seconde sur la liaison montante.

Le temps de latence est grandement amélioré, il peut être vécu en temps réel.

La latence du système se traduit par sa capacité à réagir rapidement à des demandes d'utilisateurs ou de services. Elle se décline en latence du plan de contrôle et latence du plan usager.

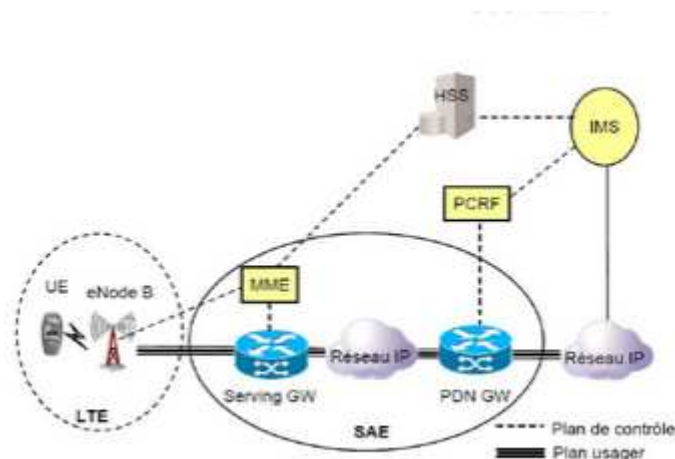


Figure 2-5 : le plan usager et le plan de contrôle

A- Latence du plan de contrôle

L'objectif fixé pour le 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.

B-Latence du plan usager

La latence du plan usager est définie par le temps de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE et la couche IP d'un n'ud 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. Le 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 2.1 présente les deux types de latence existante dans le réseau LTE, ainsi que leurs différences dans les domaines de duplexage (FDD et TDD) :

<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 2-1 : La latence pour chaque multiplexage.

2-5-5-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.

2-5-6 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.

2-5-6-1 Structure d'une trame LTE :

Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. 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 2.6 présente la trame radio dans le réseau LTE.

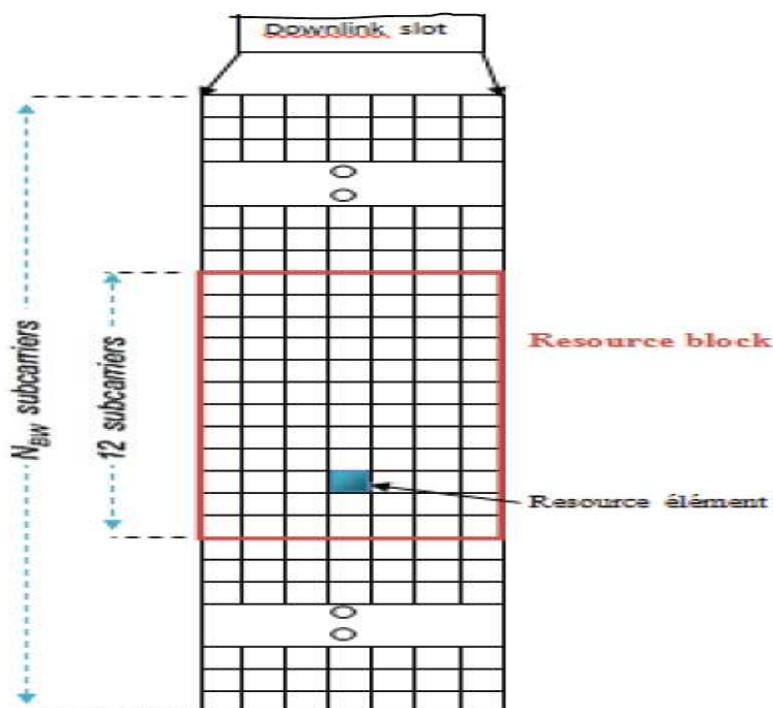


Figure 2-6 : Le fonctionnement d'une trame radio.

1 symbole peut transmettre 1 bit à 6 bits selon la modulation choisie (QPSK à 128 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.

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 2.7 présente la trame FDD.

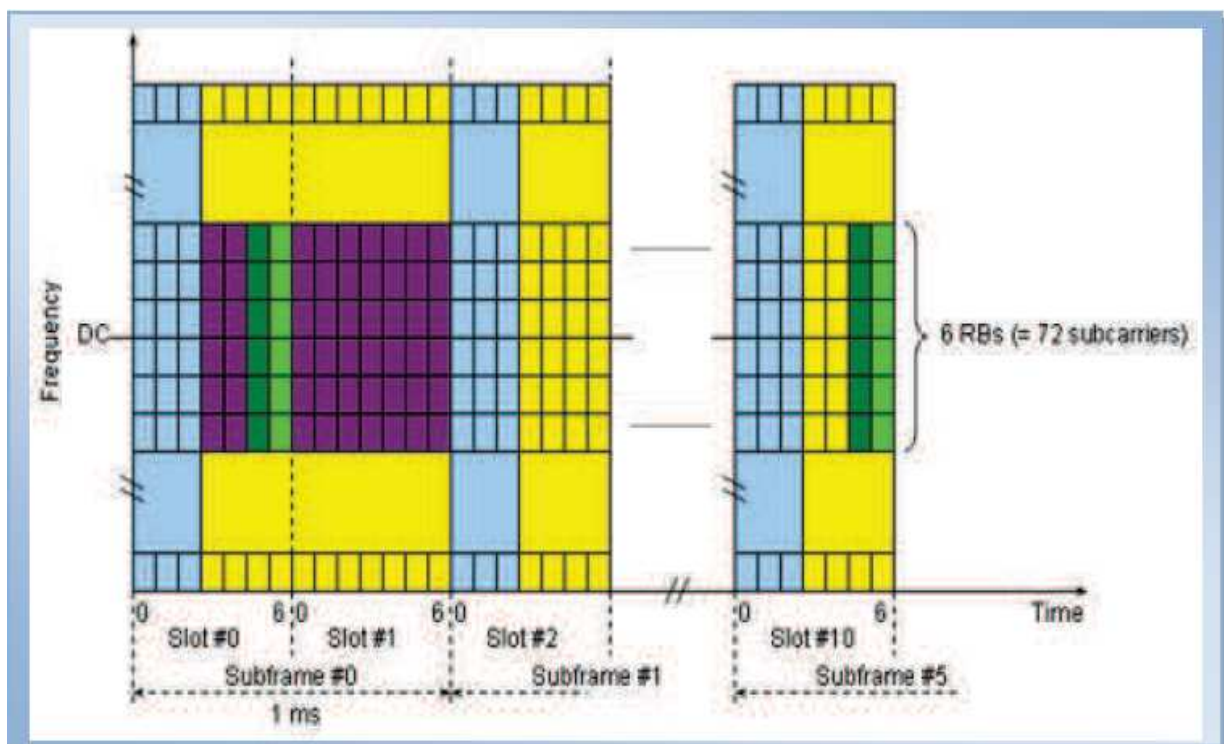


Figure 2-7 : Structure de la trame radio.

Nous pouvons représenter un signal LTE dans une carte à deux dimensionnelle comme indiqué dans la figure 2.7. 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 multiple des unités, signifiant une combinaison multiple d'une unité plus petite devient de plus grandes unités.

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.

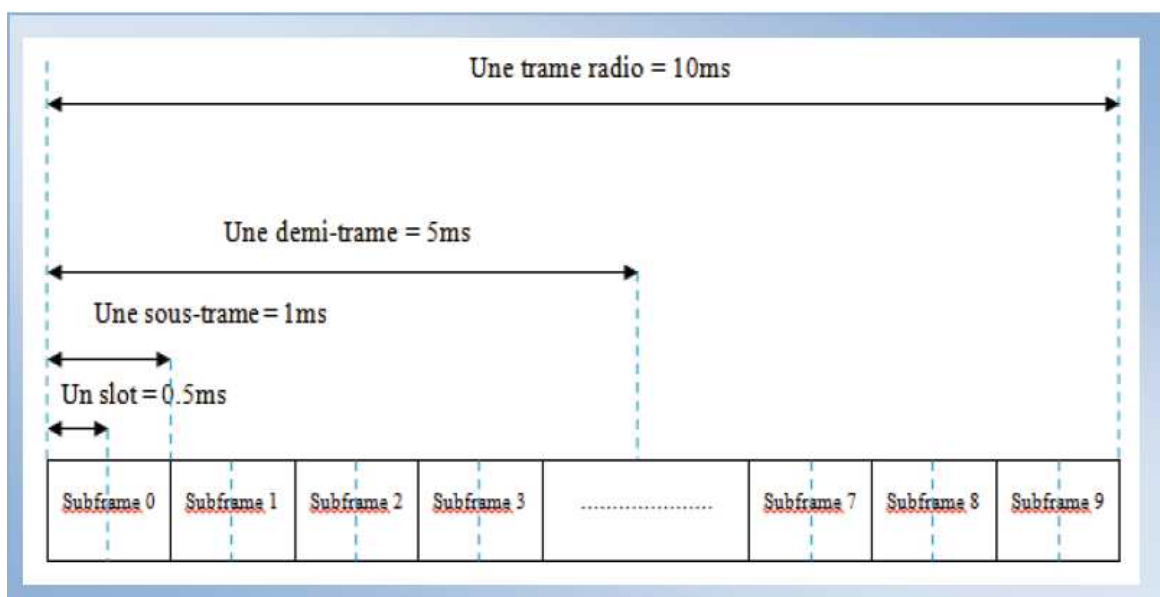


Figure 2-8 : Les slots d'une trame radio.

LTE a l'avantage de s'adapter aux anciennes normes existantes. La transition est donc possible avec le l'UMTS FDD (W-CDMA), l'UMTS TDD et le GSM/EDGE.

Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent respectivement les bandes de fréquences utilisées pour le FDD ainsi que pour le TDD.

Bandes	Fréquences UL/DL (MHz)
1	1920-1980/2110-2170
2	1850-1910/1930-1990
3	1710-1785/1805-1880
4	1710-1755/2110-2155
5	824-849/869-894
6	830-840/875-885
7	2500-2570/2620-2690
8	880-915/925-960
9	1750-1785/1845-1880
10	1710-1770/2110-2170
11	1428-1453/1476-1501
12	698-716/728-746
13	777-787/746-756
14	788-798/758-768
15	704-716/734-746

Tableau 2.2 : Les bandes de FDD.

Bandes	Fréquences UL/DL (MHz)
33.34	1900-1920 2010-2025
35.36	1850-1910 1930-1990
37	1910-1930
38	2570-2620
39	1880-1920
40	2300-2400

Tableau 2.3 : Les bandes de TDD.

2-5-7 La mobilité

La mobilité est une fonction clé pour les réseaux mobiles. Le LTE vise à rester fonctionnel pour des UE se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'UE faibles (entre 0 et 15 km/h). L'effet des handovers intra-système (procédure de mobilité entre deux cellules LTE) sur la qualité vocale est moins qu'en GSM, ou équivalent. Le système

intègre également des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets lors d'un handover intra-système [16].

2-5-8 Modulation adaptative et codage :

Principalement par la mise en œuvre de la modulation 16 QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation à 16 états). Cette modulation permet de doubler la capacité de transfert par rapport à la modulation utilisée pour l'UMTS, la QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) qui est basée sur deux porteuses de même fréquence déphasées de 90 degrés, soit 2 puissance 2 = 4 états d'information. Pour sa part, la 16 QAM combine deux niveaux d'amplitude avec deux porteuses en quadrature, soit 2 puissance 4 = 16 états d'information. Chacune de ces modulations est utilisée pour un lien précis tel que :

Modulations Downlink : QPSK, 16QAM et 64QAM

Modulations Uplink : QPSK et 16QAM

2-5-8-1 La modulation 16QAM

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature

(Une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée [6].

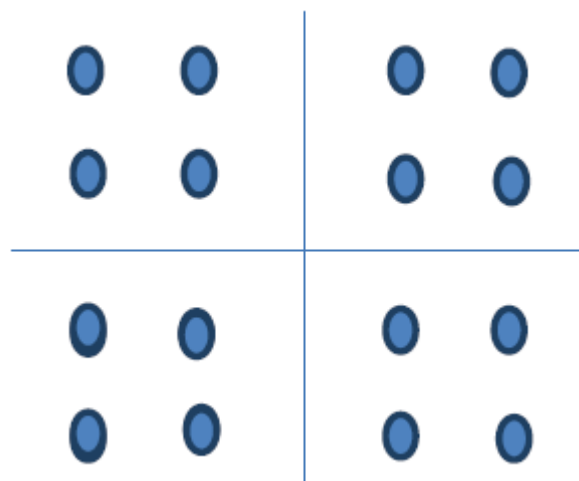


Figure 2-9 : Constellation QAM à 16 états [17].

L'amplitude et la phase de la porteuse sont simultanément modifiées en fonction de l'information à transmettre.

La figure 2-10 montre la constellation, qu'elle est en conséquence le nombre de bits pouvant être transmis en une fois, peut être augmentée pour un meilleur débit binaire, ou diminuée pour améliorer la fiabilité de la transmission en générant moins d'erreurs binaires. Le nombre de points de la constellation est indiqué avant le type de modulation QAM.

Le format de modulation QAM est étudié de plus en plus sérieusement dans le domaine des télécommunications par fibre optique afin de répondre à l'augmentation du débit.

2-5-8-2- La modulation QPSK :

Deux signaux FI en quadrature sont générés à partir d'un oscillateur local à la fréquence quadruple. Le train de donnée binaire est séparé en deux "sous trains" appelés I et Q. La paire de valeur, constitue ce que l'on appelle un symbole.

Pour des considérations électroniques, les signaux I et Q sont centrés sur 0V. On peut donc considérer que I et Q prennent symboliquement deux niveaux +1, -1 correspondant aux états binaires.

Chacun attaque un multiplieur. Le résultat de chaque multiplication est sommé en sortie de façon à obtenir un signal modulé $v_s(t)$: $V_s(t) = I \cos \omega t + Q \sin \omega t$.

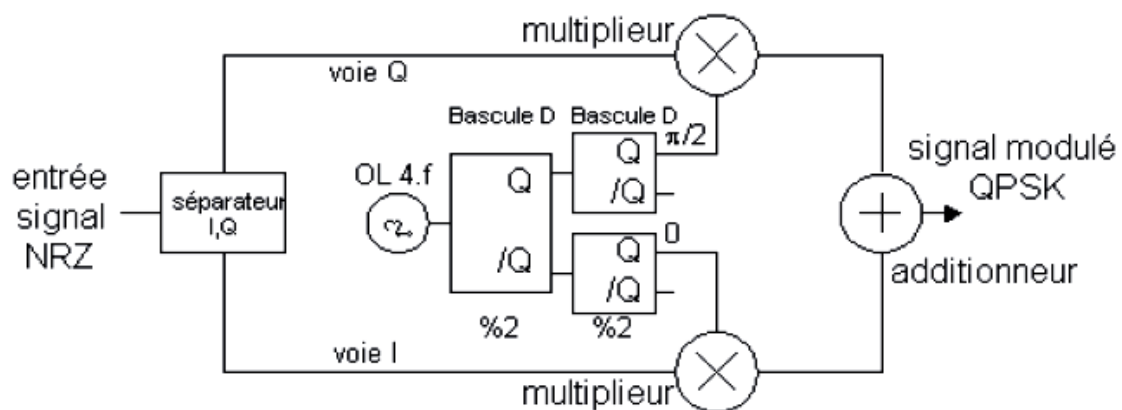


Figure 2-10 : Schéma du principe du modulateur QPSK [17].

Les états de phases du signal modulé se représentent en coordonnées polaires dans le plan I, Q. Suivant les combinaisons de ces derniers, on obtient alors le diagramme de communément constellation [17].

2-5-9- Les types de transmission utilisée dans la 4 G :

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

2-5-9-1-OFDMA :

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

➤ Origine et avantages

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, ainsi qu'il est compatible avec la technique des antennes MIMO.

L'OFDMA a attiré l'attention comme une alternative séduisante au codage CDMA qui est utilisé dans les réseaux 3G UMTS, particulièrement dans le sens de transmission downlink des réseaux mobiles, car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé grâce à sa grande efficacité spectrale (nombre de bits transmis par Hertz) et à sa capacité à conserver un débit élevé même dans des environnements défavorables avec échos et trajets multiples des ondes radio. Ce codage (tout comme le CDMA utilisé dans les réseaux mobiles 3G) permet un facteur de réutilisation des fréquences égal à « 1 », c'est-à-dire que des cellules radio adjacentes peuvent réutiliser les mêmes fréquences hertziennes.

➤ Principes

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

Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long

(66.7 μ s pour le LTE) ; cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de fading liés aux « chemins multiples de propagation » qui existent dans les liaisons radio de moyenne et longue portées (quand le débit binaire sur une porteuse est élevé, l'écho d'un symbole arrivant en retard à cause d'une propagation multi-trajets perturbe le ou les symboles suivants) :

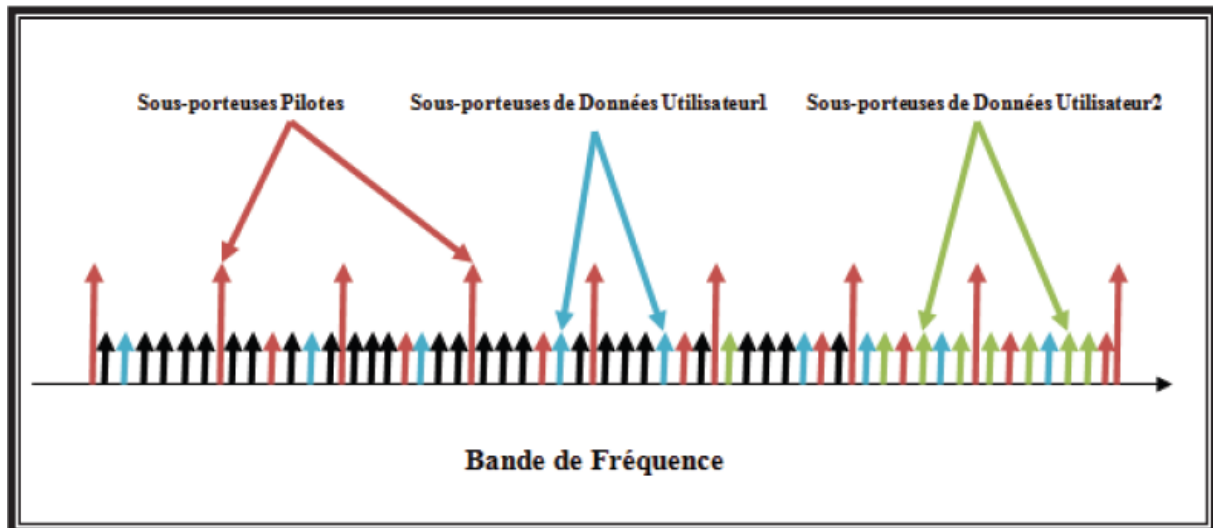


Figure 2-11 : Les porteuses de l'OFDMA.

Un filtrage séparé de chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage dans le terminal récepteur, une « Transformée de Fourier » FFT est suffisante pour séparer les sous porteuses l'une de l'autre. Dans le cas du LTE, il y a jusqu'à 1200 porteuses indépendantes.

Orthogonalité (le « O » de OFDMA) : en utilisant des signaux orthogonaux les uns aux autres pour les sous-porteuses contiguës, il évite les interférences mutuelles. Ce résultat est obtenu en ayant un écart de fréquence entre les sous-porteuses qui est égal à la fréquence des symboles sur chaque sous-porteuse. Cela signifie que lorsque les signaux sont démodulés, ils ont un nombre entier de cycles dans la durée du symbole et leur contribution aux interférences est égale à zéro; en d'autres termes, le produit scalaire entre chacune des sous-porteuses est nul pendant la durée de transmission d'un symbole (66.7 μ s en LTE, soit une fréquence de 15 KHz, ce qui correspond à l'écart de fréquence entre 2 sous-porteuses).

Un CP (préfixe cyclique) est utilisé dans les transmissions OFDMA, afin de conserver l'orthogonalité et les propriétés sinusoidales du signal pour les canaux à trajets multiples. Ce préfixe cyclique est ajouté au début des symboles émis. En LTE, deux longueurs différentes de préfixe cyclique sont prévues pour s'adapter à des temps différents de propagation du canal

de transmission qui dépendent de la taille de la cellule radio et de l'environnement : un préfixe cyclique normal de 4,7!s, et un préfixe cyclique étendu de 16,6!s utilisé dans les très grandes cellules radio (ce préfixe représente de 7 à 25 % de la durée d'un symbole).

Ce codage est associé dans les réseaux LTE à des modulations de type QPSK ou QAM utilisées sur chacun des canaux, pour s'adapter aux conditions radio locales et à la distance séparant l'antenne de chaque terminal [17].

2-5-9-2- SC-FDMA :

Le single-carrier FDMA est une technologie de codage radio de type accès multiple par répartition en fréquence utilisée notamment dans les réseaux de téléphonie mobile de 4^{ème} génération LTE.

Comme pour d'autres techniques à schéma d'accès multiples (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA), le but est l'attribution et le partage d'une ressource radio commune (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs. Le SC-FDMA peut être considéré comme une variante linéaire des codages OFDM et OFDMA, dans le sens où il consiste aussi à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses du signal numérique, mais il utilise en complément, une « **DFT** » (Transformation de Fourier discrète du signal) supplémentaire pour pré-coder l'OFDMA conventionnel.

Le SC-FDMA a attiré l'attention comme une alternative séduisante à l'OFDMA, particulièrement dans les communications terre-satellite et dans le sens de transmission montant des réseaux 4G LTE où son **PAPR** (peak-to-average power ratio) plus faible que celui de l'OFDMA bénéficie au terminal mobile en termes d'efficacité énergétique, en diminuant la puissance crête d'émission et donc le poids et le coût du terminal (smartphone ou tablette tactile).

Il a été adopté pour les liaisons uplink de certaines normes 3GPP, plus particulièrement pour la partie radio (eUTRAN) des réseaux mobiles « LTE », car ce codage permet de diminuer la consommation électrique du terminal et donc d'augmenter l'autonomie de sa batterie. Pour les liaisons radio downlink des réseaux LTE, pour lesquelles il y a moins de contraintes énergétiques, c'est l'OFDMA qui est utilisé car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé.

Codage radio OFDMA et SC-FDMA : conversion numérique/analogique.

2-5-9-3 Comparaison entre l'OFDMA et le SC-FDMA

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

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

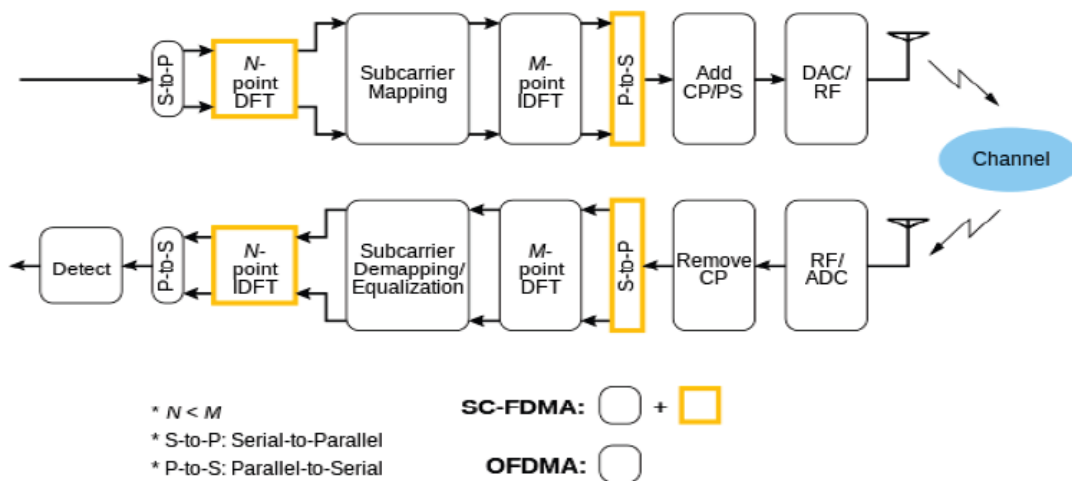


Figure 2-12 : Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA [18].

Mais ces techniques n'ont pas que des points communs. La différence majeure entre elles, réside dans le fait que l'OFDMA est une technique de transmission multi-porteuse tandis que la SC-FDMA est une technique mono-porteuse [7].

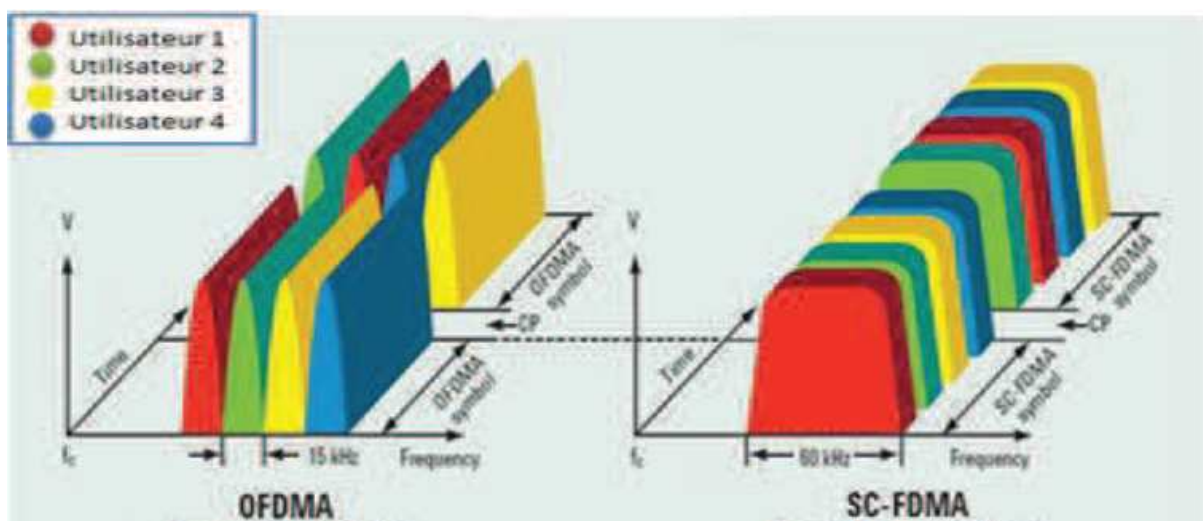


Figure 2-14 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA [19].

2-6 La qualité de service (QOS) :

2-6-1 Définition :

La qualité de service (QDS) ou Quality of service (QoS) est la capacité de transmission dans de bonnes conditions un certain nombre de paquet dans une connexion entre un émetteur et un récepteur, et cela peut être présenté sous plusieurs termes tel que la disponibilité, débit, délais de transmission, gigue, taux de perte de paquets.

Elle regroupe un ensemble de technologies mise en œuvre pour assurer des débits suffisants et constants sur tous les types de réseaux [20].

2-6-2 But de la QoS :

Le but de la QoS est donc d'optimiser les ressources du réseau et de garantir de bonnes performances aux applications. La qualité de service sur les réseaux permet d'offrir aux utilisateurs des débits et des temps de réponse différenciés par application suivant les protocoles mis en œuvre au niveau de la couche réseau.

Elle permet ainsi aux fournisseurs de services de s'engager formellement auprès de leurs clients sur les caractéristiques de transport des données applicatives sur leurs infrastructures IP [21].

Selon les types d'un service envisagé, la qualité pourra résider :

- Le débit (téléchargement ou diffusion vidéo).
- Le délai (pour les applications ou la téléphonie).
- La disponibilité (accès à un service partagé).
- Le taux de pertes de paquets.

2-6-3 Paramètres de la QoS :

Au sein d'un réseau donné, la qualité de service est évaluée en fonction des différents équipements qui composent ce réseau, ainsi que du trafic qui y circule, etc.

Des applications multimédia telles que la voix-IP ou la vidéo à la demande, en plus des applications classiques, seront de plus en plus utilisées dans ce type de réseaux. Ces applications multimédia nécessitent un niveau minimal de qualité de service en termes de bande passante, de délai, de gigue ou de taux de pertes de paquets.

➤ Le Débit :

Il définit le volume maximal pouvant être atteint pour la transmission de l'information (bits) par unité de temps (s) dans une communication entre un émetteur et un récepteur.

➤ **La perte de paquet :**

Elle correspond aux octets perdus lors de la transmission des paquets. Elle s'exprime en taux de perte. Plutôt rare, Elle correspond au nombre de paquet de données qui n'ont pas été reçus par la destination lors d'une communication. Cela peut être causé par plusieurs facteurs, la plupart du temps due à un encombrement du réseau.

➤ **Le délai de transit (latence)**

C'est le délai de traversée du réseau, d'un bout à l'autre, par un paquet. Les différentes applications présentes dans un réseau n'auront pas le même degré d'exigence en fonction de leur nature : faible, s'il s'agit d'une messagerie électronique ou de fichiers échangés, ce degré d'exigence sera fort s'il s'agit de données "voix". La latence dépend du temps de propagation (fonction du type de média de transmission), du temps de traitement (fonction du nombre d'équipements traversés) et de la taille des paquets (temps de sérialisation).

➤ **La gigue**

Désigne les variations de latence des paquets. La présence de gigue dans les flux peut provenir des changements d'intensité de trafic sur les liens de sorties des commutateurs. Plus globalement, elle dépend du volume de trafic et du nombre d'équipements sur le réseau.

➤ **La bande passante**

Il existe deux modes de disponibilité de la bande passante, en fonction du type de besoin exprimé par l'application :

- Le mode "burst" est un mode immédiat, qui monopolise toute la bande passante disponible (par exemple lors d'un transfert de fichier).
- Le mode "stream" est un mode constant, plus adapté aux fonctions audio/vidéo ou aux applications interactives.

➤ **Priorité des paquets**

Afin d'arbitrer entre les modes "burst" et "streaming" précédemment cités, une gestion du trafic peut soit être installée au sein du réseau, soit à ses extrémités. S'il s'agit de l'intérieur du réseau, les nœuds de ce réseau opèrent alors comme étant des éléments de classification et de priorisation des paquets qui y circulent. Si le dispositif se trouve à l'extérieur, les équipements constituant le réseau se trouvent déchargés de toute QoS. Deux mécanismes sont alors à l'œuvre : le contrôle de débit TCP, qui modifie le débit des applications TCP en fonction des conditions de charge du réseau et du niveau de priorité des applications, et la gestion des files d'attente personnalisées, qui affecte les flux entrants aux files d'attente qui leur correspondent.

2-6-4 Qualité de service dans le réseau 4G :

Le développement du réseau Internet et le nombre d'utilisateurs pouvant se connectés à ce réseau impose le recours à des niveaux importants de QoS. Dans cette perspective, plusieurs groupes de travail ont vu le jour pour les réseaux 4G. Les nouveaux besoin en termes de mobilité des utilisateurs et la croissance des réseaux permettant le nomadisme des utilisateurs ont fait migrer le problème vers la des réseaux sans fil.

- **Le bearer EPS**

Le bearer EPS est un équivalent du contexte PDP en 2G/3G. Il représente un concept logique qui est établi entre le terminal et la PDN GW et qui agrège plusieurs flux data transportés entre les deux entités.

Il permet d'identifier de manière unique des flux de trafic recevant la même qualité de service entre le terminal et la PDN GW. Tous les flux associés à un bearer EPS reçoivent les mêmes traitements en termes de forwarding (expédition des paquets).

Il existe deux types de bearers EPS :

- Le Default bearer, le premier bearer établi lorsque le terminal se connecte à un PDN, il reste actif durant toute la connexion.
- Les Dedicated bearer, tous les bearers additionnels établis avec le même PDN [22].

2-6-5 Exemple de Qualité de Service :

On voit à travers ces quelques exemples que les besoins en QoS peuvent être différents. Par exemple si l'on veut diffuser de la vidéo à la demande, on aura besoin d'un transfert quasi temps-réel avec une latence très faible et une gigue faible, en revanche il ne sera pas dramatique de perdre une image de temps en temps ou alors d'avoir une qualité d'image un peu dégradée.

Selon l'application utilisée, on s'efforcera de faire le bon compromis pour assurer la meilleure QoS possible, sachant qu'il n'existe pas de solution qui résolve tous les problèmes à la fois.

Avec un débit toujours plus grand proposé aux utilisateurs, les applications réseau ont évolué, ou plus exactement de nouvelles applications sont apparues : les applications multimédia. On peut compter parmi ces applications : la téléphonie sur IP, la diffusion de musique, la vidéoconférence, la vidéo à la demande. Ces nouvelles applications étant gourmandes en ressources, les réseaux traditionnels doivent mettre en œuvre des mécanismes de QoS pour ces flux dits continus. Nous allons voir ici les contraintes de ces applications.

➤ **Contraintes communes aux applications multimédia**

Dans les applications multimédia, les données sont soumises à des contraintes temporelles quasi temps réel. Cela implique qu'il n'est pas possible d'utiliser le protocole de transport TCP puisque si des paquets sont détruits en cas de congestion, leur réémission serait pénalisante et inutile pour le flux multimédia. Il faut donc utiliser un protocole de transport non fiable tel que l'UDP.

➤ **La téléphonie sur IP**

La principale contrainte de la téléphonie sur IP est le délai. Pour qu'une conversation puisse avoir lieu convenablement, il est nécessaire d'avoir une latence inférieure à 35 ms.

Pour assurer ce délai, les routeurs ne doivent pas comporter des files d'attente trop longues.

En effet, de longues files d'attente permettent d'obtenir un débit plus élevé puisque moins de paquets sont perdus mais le temps passé dans les files augmente. Dans l'idéal, les routeurs doivent avoir une file prioritaire à faible latence pour les flux de voix sur IP.

➤ **La vidéoconférence**

Pour la vidéoconférence, le débit est essentiel pour que la qualité de la vidéo soit suffisante et les contraintes en termes de délais sont identiques à celles de la voix sur IP. Il est en effet très gênant que l'image soit décalée du son ou que le média soit saccadé.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des différents composants et caractéristiques de la technologie LTE (quatrième génération) afin de présenter par la suite la terminologie des termes utilisés dans cette technologie.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le système MIMO-OFDM et ses différentes fonctionnalités.

Introduction :

Trois éléments forment, principalement, les systèmes de communications sans fils : L'émetteur, le récepteur et un canal radio via lequel les informations provenant de l'émetteur sont véhiculées au récepteur.

Donc, avant d'aborder une étude dans ce domaine il est indispensable de connaître les caractéristiques du canal radio à savoir les facteurs perturbateurs qui peuvent affecter une information transmise [24]. Nous allons dans un premier temps décrire la structure d'un système de communication radio et les étapes d'acheminement de l'information de la source vers l'utilisateur.

3-1 Système OFDM :**3-1-1 Présentation de l'OFDM :**

Les origines de l'OFDM remontent à 1930 lorsque les célèbres laboratoires de recherche Bell ont développé une nouvelle technique d'accès pour le canal radio, qui succéda au FDM bien établi, et fut appelée OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

L'intérêt pour cette technologie a connu un renouveau au milieu des années soixante, délaissé ensuite lors du développement de la théorie de l'égalisation pour les systèmes mono-porteuse (de moindre complexité), l'OFDM dû son retour en grâce, vers le milieu des années 1980, au projet de la radiodiffusion numérique DAB (Digital Audio Broad casting).

En effet, les systèmes mono-porteuse, contrairement à l'OFDM, ne remplissaient pas les conditions de résistance aux trajets multiples et le débit élevé pour un taux d'erreur binaire faible requis par cette nouvelle application [25]. Depuis lors, l'OFDM est restée une technique prépondérante, puisqu'elle est utilisée dans de nombreux standards tels que la radiodiffusion numérique terrestre ou DAB, la norme de télévision numérique terrestre ou DVB-T, la technologie ADSL et les réseaux sans-fils WLAN définis par les normes IEEE 802.11a, 802.11g (WIFI), 802.16g (WIMAX) et HIPERLAN [26].

Enfin l'OFDM s'adapte parfaitement aux communications mobiles, et semble incontournable pour les standards de troisième et quatrième génération, où il est notamment question de l'associer au CDMA (Code Division Multiple Access) ou aux systèmes multi-antennes MIMO (Multi Input Multi Output) [24].

3-1-2 Principe de la modulation OFDM :

Le principe de l'OFDM consiste à diviser sur un grand nombre de 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 indépendants (exemple: des émetteurs) et à des fréquences différentes (multiplexage fréquentiel) [27].

Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre elles. Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes fréquences porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des trajets multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de trajets, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites [26]. Chaque porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques : BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), QAM-16 (*Quadrature Amplitude Modulation*), QAM-64.

La figure suivante décrit le principe de base de la modulation OFDM:

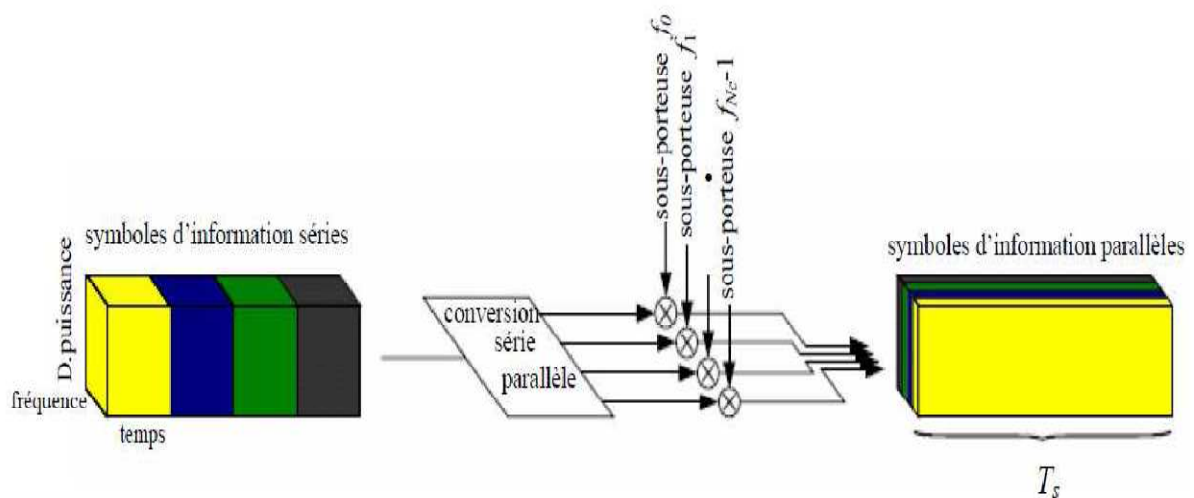


Figure 3-1 : Modulation OFDM avec $N_c=4$ sous-porteuse [23].

Le principe de l'orthogonalité permet de limiter l'interférence entre symboles (IES). Pour l'éliminer, on peut ajouter un intervalle de garde (c'est-à-dire une période pendant laquelle il n'y a aucune transmission) après chaque symbole émis très grand devant l'étalement des retards [26].

3-1-2-1 Notion d'orthogonalité :

L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux d'informations multiples dans un même canal et de les détecter sans interférence.

Mathématiquement, l'orthogonalité de deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ dans l'intervalle $[a, b]$ est défini par la relation [27]:

$$\int_a^b f(t) \cdot g(t) \cdot dt = 0 \quad (3-1)$$

➤ **L'orthogonalité temporelle :**

Le signal OFDM est composé d'une somme de N sinusoides de fréquences Respectives $f_k = k/T_u$ transmises durant une durée T_u .

Chaque sous-porteuse $g_k(t)$ peut se mettre sous la forme [27] :

$$g_k(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi k \cdot \frac{t}{T_u}\right) & 0 \leq t < T_u \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{pour } k=[0,1,\dots,N-1] \quad (3-2)$$

Ainsi deux sous-porteuses $g_i(t)$ et $g_j(t)$, de fréquences respectives f_i et f_j , définis par l'expression (3.2), sont orthogonales sur l'intervalle $[0, T_u]$.

➤ **L'orthogonalité fréquentielle :**

Chaque sous-porteuse étant transmise pendant une durée T_u . cela revient à appliquer à la sous-porteuse une porte de durée T_u dont le contenu spectral est un sinus cardinal qui s'annule aux premières fréquences $f_{k-1} = f_k - 1/T_u$ et $f_{k+1} = f_k + 1/T_u$

fréquences sont respectivement égale à f_{k-1} et f_{k+1} . la figure (3.2) présente le spectre d'une sous porteuse K de la bande $\Delta f = 1/T_u$

On obtient ainsi l'enveloppe spectrale représentée sur la figure (3-3). La figure (3-2) montre que l'emplacement entre chaque sous-porteuse $1/T_u$ permet d'organiser ces sous-porteuses de telle sorte qu'au maximum d'une sous-porteuse donnée les autres sous-porteuses sont nulles : c'est la condition d'orthogonalité dans le domaine fréquentiel. Cette

condition permet ainsi d'avoir une occupation spectrale idéale et éviter les interférences entre les sous-porteuses (IEP) [26].

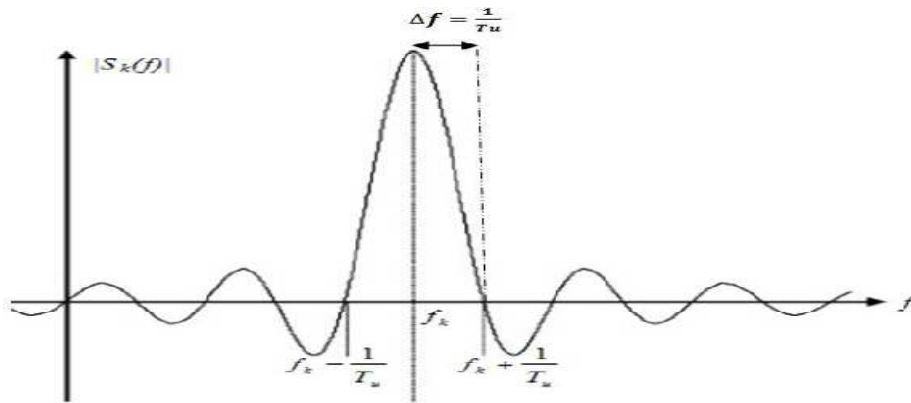


Figure 3-2 : Le spectre d'une sous-porteuse.

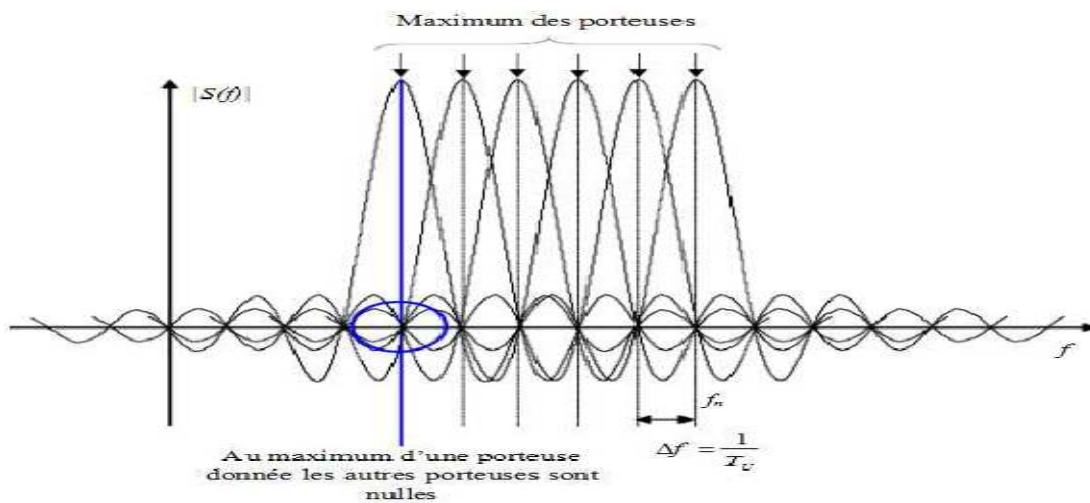


Figure3-3 : Principe d'orthogonalité des sous-porteuses en OFDM [27].

La bande passante du spectre d'un symbole OFDM est constante et s'écrit $B = N/T_u$ avec N est le nombre maximal de sous-porteuses. Donc, la bande passante de chaque sous-porteuse est $B_{sp} = B/N$

Si on augmente le nombre de sous-porteuses, on constate que le temps T_u du symbole

OFDM devient grand devant l'étalement des retards τ_{\max} et la bande passante **BSP** de chaque sous-porteuse devient inférieure à la bande de cohérence **BC** du canal, par conséquent, chaque sous-porteuse OFDM éprouve un effet de non sélectivité en fréquence et ceci se traduit par l'absence d'interférence entre symboles (**IES**) ce qui réduit la complexité d'égalisation à la réception.

3-1-3 Modulation et démodulation OFDM :

➤ Modulation OFDM :

Les données d'entrée d'un système OFDM sont sous la forme d'un flux binaire mis en série. Des symboles complexes C_k sont, ensuite, définis à partir de ces éléments binaires selon une constellation typiquement de modulation BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM (selon le compromis robustesse / débit).

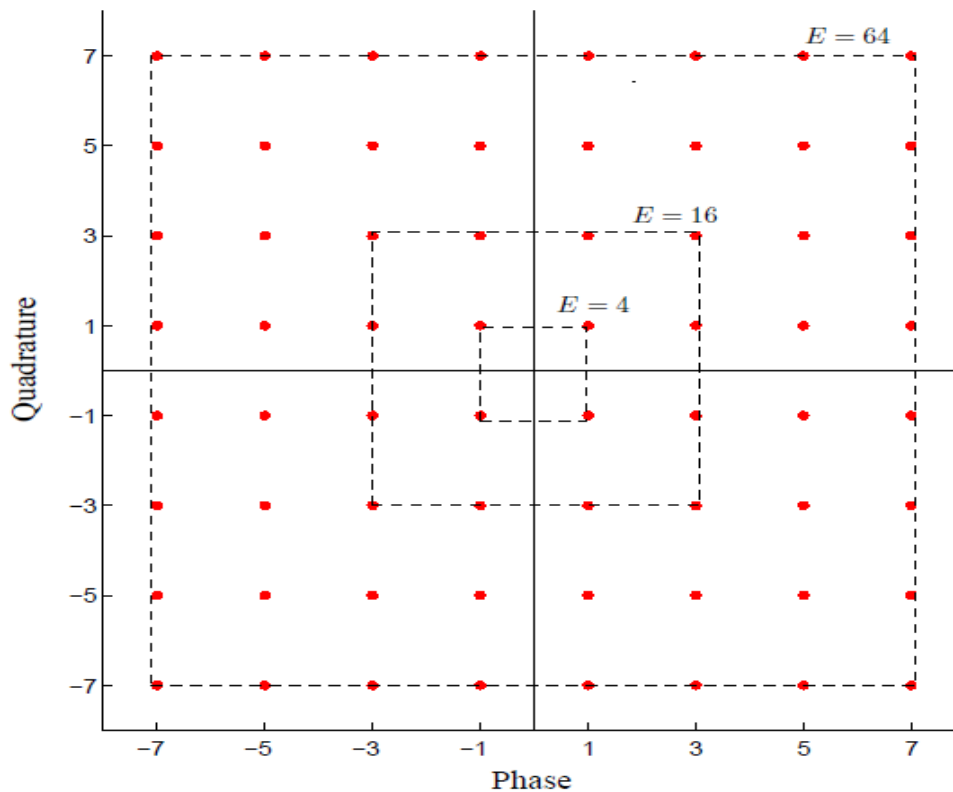


Figure 3-4 : Exemple d'une constellation E-QAM :

Les données C_k passent, ensuite, dans un buffer permettant de les convertir de série en parallèle. Après cela, chaque donnée C_k module une porteuse à la fréquence f_k .

Ces données sont, ensuite, groupées en paquets de N éléments qu'on appelle symbole OFDM.

Cette étape caractérise ce qu'on appelle la modulation OFDM.

Voici le schéma de principe de la modulation OFDM

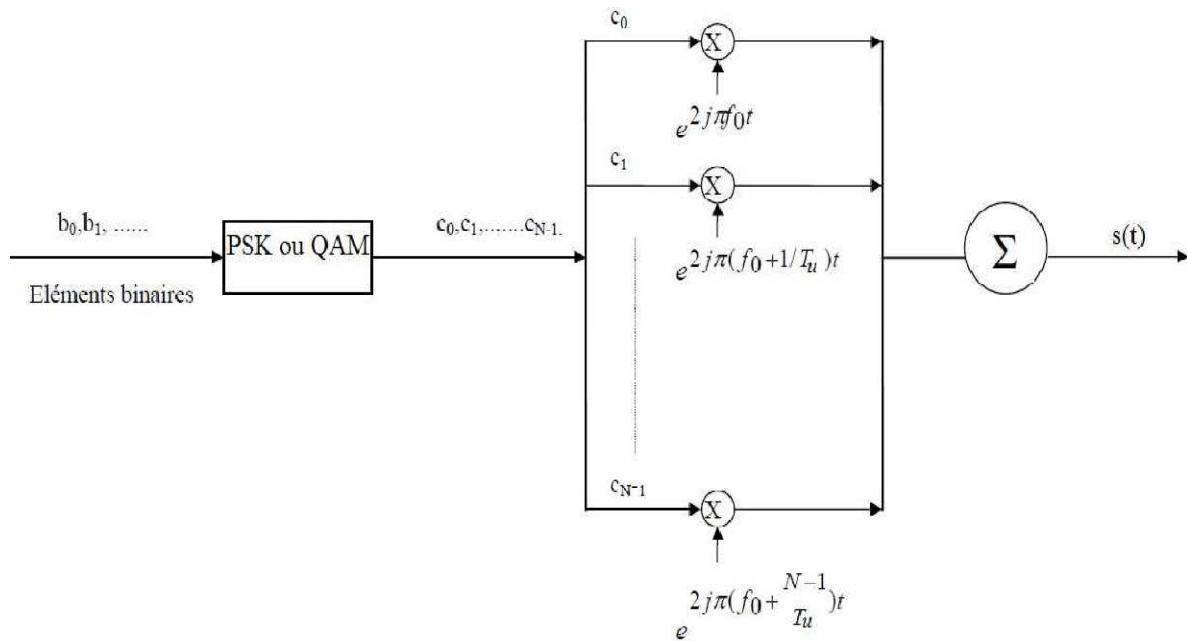


Figure 3-5 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Considérons une séquence de N données (symboles complexes) ,**c0,c1,c2Cn-1**

Appelons **Tu** la durée utile d'un symbole OFDM

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les sous-porteuses est **1/Tu**

Alors : **fk = f0 + k/Tu avec k=[0.1.2.....,N-1]** (3.3)

La fonction de base de chaque sous-porteuse est choisie tel que :

$$gk(t) = \begin{cases} e^{2j\pi f_k t} , & 0 < t < Tu \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Le signal individuel s'écrit sous la forme complexe : **ck.e^{2j\pi f_k t}** (3.5)

Le signal total transmis **s(t)** correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est

La somme des signaux individuels :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} Ck e^{2j\pi f_k t} \quad (3.6)$$

➤ **Demodulation OFDM:**

Au niveau du récepteur, le signal reçu $r(t)$ est corrélé avec les conjugués complexes de chaque fonction de base $g_i(t) = e^{-2j\pi f_i t}$ dans le but de récupérer les données CK du symbole OFDM transmis [30].

Voici le schéma de principe de la démodulation OFDM

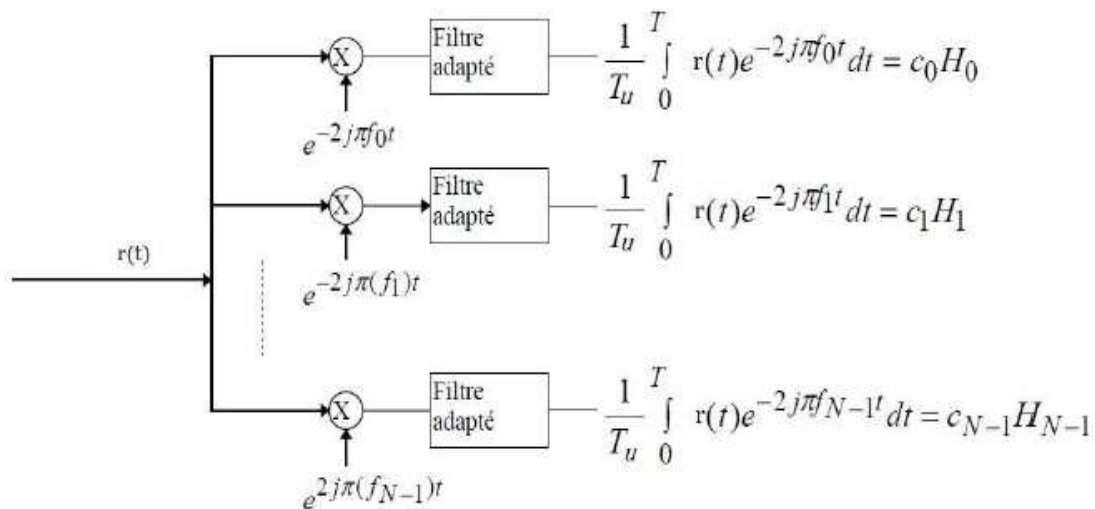


Figure 3-6 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.

En considérant le canal est sans bruit, le signal parvenant au récepteur s'écrit [26] :

$$r(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi(f_0 + k/T_u)t} \quad \text{avec : } 0 \leq t < T_u \quad (3.7)$$

Où $H_k(t)$ 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_u .

La condition d'orthogonalité nous montre que [26] :

$$\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} r(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} c_k H_k e^{2j\pi(k-i)t/T_u} dt = c_i H_i \quad (3.8)$$

$$\text{Car : } \frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} e^{2j\pi(k-i)t/T_u} dt = \begin{cases} 0 & \text{si } k \neq i \\ 1 & \text{si } k = i \end{cases} \quad (3.9)$$

3-1-4 Implémentation numérique :

La réalisation analogique d'un modulateur OFDM est très complexe car il faut utiliser un banc de modulateurs/démodulateurs synchronisés et un banc de filtres de mise en forme.

Heureusement, avec les progrès dans les domaines du traitement numérique du signal, ce problème s'est simplifié par l'utilisation des processus de la transformée de Fourier rapide (FFT) et la transformée inverse (IFFT) qui sont mathématiquement équivalentes à la transformée de Fourier discret (DFT) et la transformée inverse (IDFT), respectivement, mais plus efficace en terme de réduction de la complexité de calcul à mettre en œuvre

➤ **Transformée de Fourier rapide :**

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme couramment utilisé en traitement numérique du signal pour transformer des données discrètes du domaine temporel au domaine fréquentiel, sa définition mathématique qui associe aux symboles x_n pour $n \in 0, 1, \dots, N-1$ les symboles x_k avec $k \in 0, 1, \dots, N-1$ est donnée par la relation suivante [28]

$$\mathbf{x}_k = \text{FFT} \{ \mathbf{x}_n \} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2j\pi k.n/N} \quad (3.10)$$

La transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) des symboles \mathbf{x}_k est donnée par :

$$\mathbf{X}(n) = \text{IFFT} \{ \mathbf{x}_n \} = 1/N \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{2j\pi k.n/N} \quad (3.11)$$

➤ **Implémentation numérique de modulateur:**

L'équation (3.6) du signal $s(t)$ peut être réécrite sous la forme :

$$\mathbf{S}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi k t / T_u}, \quad 0 \leq t \leq T_u \quad (3.12)$$

Cela peut être considéré comme un signal en bande de base $\mathbf{SB}(t)$ qui est modulé par la fréquence f_0 [30].

$$\mathbf{SB}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi k t / T_u} \quad \mathbf{k} \text{ appartient } [0, 1, \dots, N-1] \quad (3.13)$$

Envisageons maintenant un échantillonnage du signal en bande de base $\mathbf{SB}(t)$ avec un pas d'échantillonnage $T_e = T_u/N$, avec N représente le nombre de sous-porteuses.

A chaque instant $t = nT_e$, le signal échantillonné $\mathbf{SB}(nT_e)$ noté $\mathbf{SB}(n)$ s'écrit :

$$\mathbf{SB}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi k n / N} \quad \text{avec } \mathbf{n} \text{ appartient } [0, 1, \dots, N-1] \quad (3.14)$$

Donc, le signal échantillonné $\mathbf{SB}(n)$ est reconnue comme une IFFT (Inverse Fast Fourier Transforme) des symboles C_k à l'exception du facteur scalaire $1/N$. Après l'IFFT, le signal temporel discret résultant $\mathbf{SB}(n)$ est convertit en un signal temporel continu $\mathbf{SB}(t)$ par un filtre en racine de Nyquist [29].

Dans le but de trouver le signal $s(t)$ le signal en bande de base doit être modulé par la fréquence f_0 [30].

$$S(t) = SB(t) \cdot e^{2j\pi f_0 t} \quad 0 \leq t \leq Tu \quad (3.15)$$

Le schéma de principe du modulateur est le suivant :

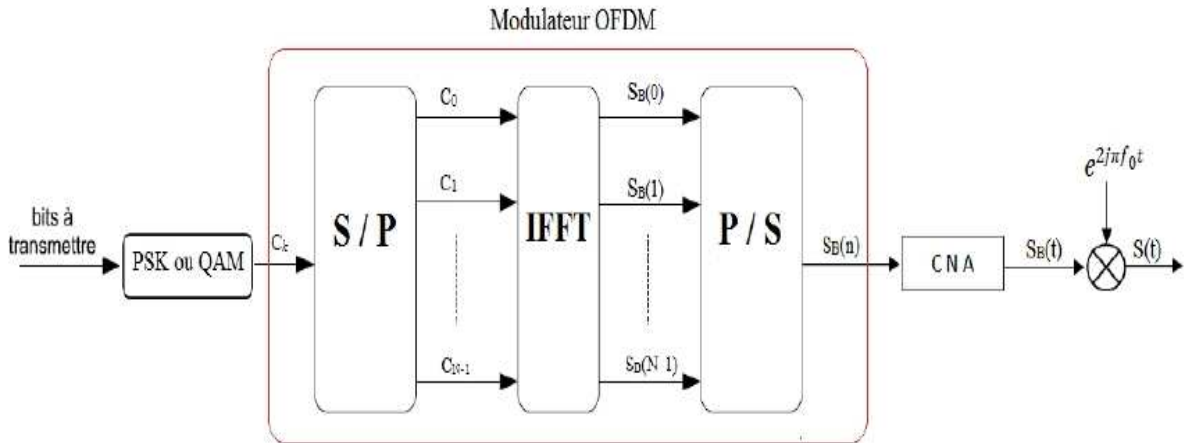


Figure 3-7 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM numérique.

➤ **Implémentation numérique de démodulateur :**

Du côté du récepteur les symboles transmis peuvent être récupérés par la démodulation du signal reçu $r(t)$ afin d'obtenir le signal en bande de base $rB(t)$. Après échantillonnage de ce dernier, on effectue la FFT sur la séquence $rB(n)$ [30].

En considérant la transmission est sans bruit additif, le signal parvenant au récepteur s'écrit [31]:

$$e^{2j\pi f_0 t} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot H_k \cdot e^{2j\pi \cdot k t / Tu} \quad 0 \leq t \leq Tu \quad (3.16)$$

En démodulant le signal $r(t)$ par la fréquence f_0 , on obtient un signal en bande de base $rB(t)$ qui s'écrit :

$$rB(t) = r(t) e^{-2j\pi f_0 t} = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot H_k \cdot e^{2j\pi k t / Tu} \quad K \text{ appartient } [0.1 \dots N-1] \quad (3.17)$$

Après l'échantillonnage du signal $rB(t)$, le signal discret $rB(nTe)$ noté $rB(n)$ s'écrit :

$$rB(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot H_k e^{2j\pi k.n/N} \quad n \text{ appartient } [0.1.2.....N-1] \quad (3.18)$$

On voit que $rB(n)$ est la transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) de la séquence $C_k \cdot H_k$, la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier rapide directe (FFT) sur la séquence $rB(n)$ pour récupérer la séquence $C_k \cdot H_k$

$$C_k \cdot H_k = \sum_{k=0}^{N-1} rB(n) e^{-2j\pi k.n/N} \quad k \text{ appartient } [0.1.2.....N-1] \quad (3.19)$$

Le schéma de principe du démodulateur est le suivant :

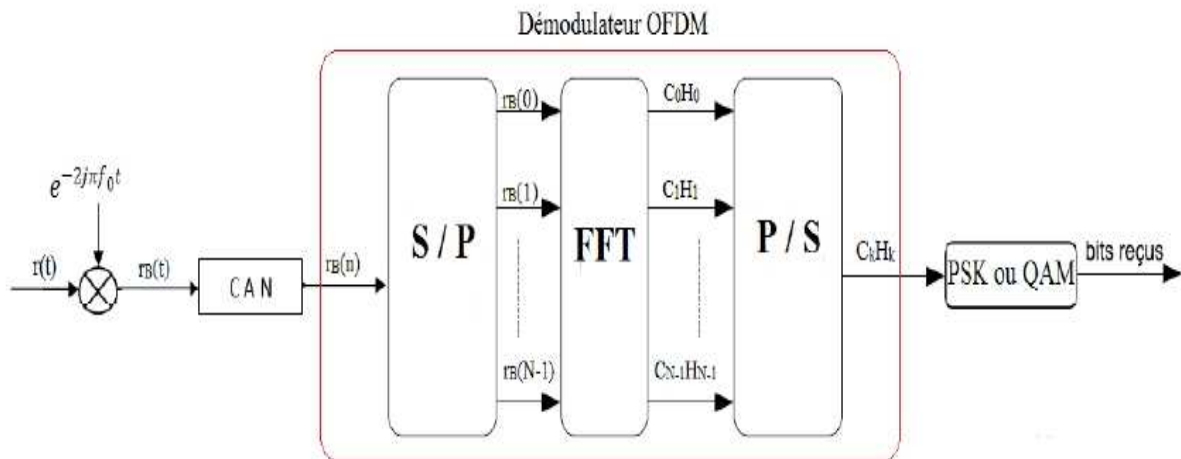


Figure 3-8 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM numérique.

D'après les deux figures (3-7) et (3-8), On remarque que l'IFFT est utilisée dans la partie émission, puisque qu'on passe du domaine fréquentiel au domaine temporel.

Au niveau de l'émetteur, le système OFDM traite les symboles de la source (par exemple, des symboles QAM) dans le domaine fréquentiel. Ces symboles sont utilisés comme entrées du bloc IFFT qui amène le signal dans le domaine temporel.

Les fonctions de bases pour l'IFFT sont N sinusoïdes orthogonales de fréquences différentes. Étant donné que les symboles d'entrée sont complexes, la valeur du symbole détermine à la fois l'amplitude et la phase de la sinusoïde de chaque sous-porteuse.

La sortie IFFT est la somme de toutes les N sinusoïdes qui forme un seul symbole OFDM. Ainsi, le bloc IFFT fournit un moyen simple pour moduler les données sur N sous-porteuses orthogonales.

Après quelques traitements supplémentaires, le signal temporel qui résulte de l'IFFT est transmis à travers le canal. Au niveau du récepteur, le bloc FFT est utilisé pour traiter le signal reçu et le convertir en spectre fréquentiel [30].

La figure (3-9) représente le passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM utilisant la modulation QAM [30]:

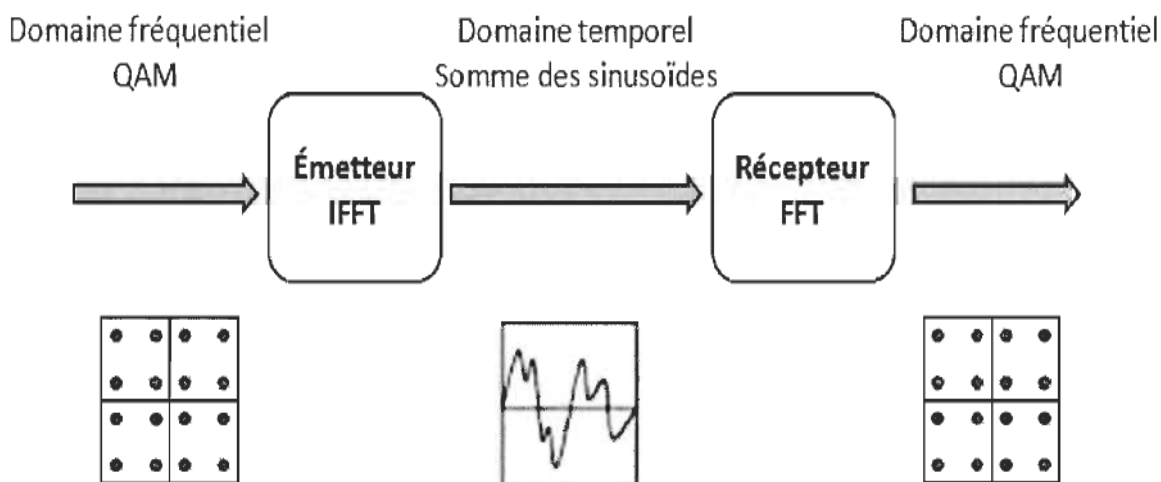


Figure 3-9 : Passage du domaine fréquentiel au domaine temporel dans un système OFDM

3-1-5 Problème d'interférences :

A cause du comportement multi-trajets du canal, l'orthogonalité entre les sous-porteuses n'est pas conservée. Ce qui perturbe la récupération des données à la réception.

En effet, un symbole émis lors d'une période mT_u peut se superposer à un écho provenant du symbole émis à la période $(m-1)T_u$. Il se produit alors des interférences entre les symboles transmis (IES). Pour remédier à ce problème, le système OFDM ajoute entre deux symboles OFDM un intervalle de garde appelé « préfixe cyclique ».

➤ Préfixe cyclique :

Le préfixe cyclique (Cyclic Prefix(CP)) est une copie de la fin du symbole OFDM ajoutée à son début à l'émission juste après la sortie de l'IFFT, puis enlevé à la réception avant d'effectuer la FFT. Cet intervalle doit être d'une durée T_{CP} plus grande que l'étalement des

retards du canal τ_{max} . Ainsi les derniers échos du symbole OFDM d'indice $m-1$ auront lieu durant cet intervalle de garde, et le symbole OFDM suivant d'indice m ne sera plus perturbé par le précédent.

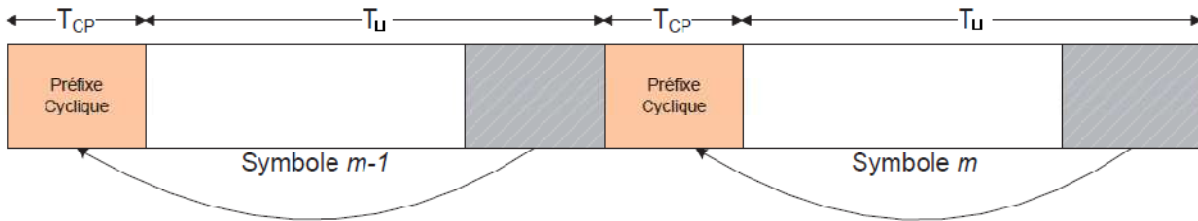


Figure 3-10 : Principe du préfixe cyclique.

La durée du symbole OFDM après l'ajout du préfixe cyclique est : $T_s = T_u + T_{cp}$ Où T_u est la durée initiale du symbole généré par l'IFFT.

T_{CP} est la durée du préfixe cyclique ajouté.

L'intervalle de garde est ajouté dans le domaine temporel et son essentiel rôle est de prévenir aux interférences entre symboles (IES), par contre une bande de garde (porteuses virtuelles) est ajoutée dans le domaine fréquentiel qui a pour but d'élimination des interférences entre porteuses (IEP) du signal OFDM.

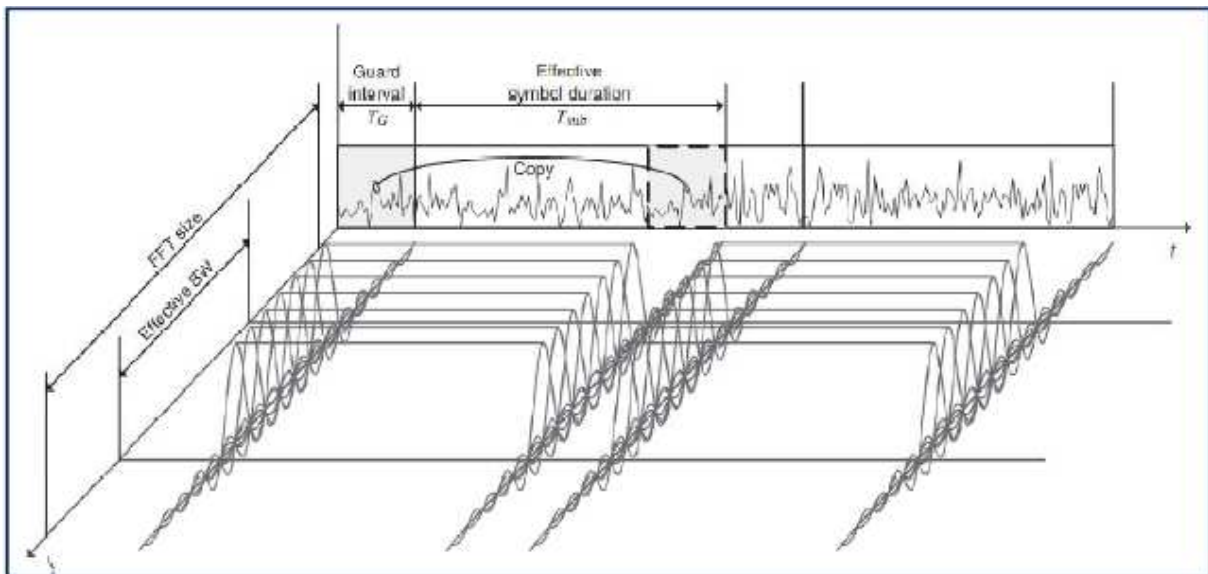


Figure 3-11 : Description dans le domaine temps/fréquence d'un symbole OFDM avec un préfixe cyclique (CP) [32]

3-1-6 diagramme en bloc d'un émetteur/ récepteur OFDM :

La figure (3-12) présente le diagramme en blocs d'un émetteur/récepteur OFDM. Le mapper transforme les données binaires b_i de durée T_b en symboles complexes C_j . En utilisant des modulations numériques BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM après la conversion série/ parallèle, ces symboles sont transformés en trames noté $\{c\}_{1..N}$ en appliquant ensuite une transformée de Fourier inverse IFFT, on obtient la trame parallèle OFDM formé de N symboles S_n , notée $\{s\}_{1:N}$. Ensuite, un préfixe cyclique formé de L derniers symboles est ajouté au début de la trame après la conversion parallèle / série on obtient le symbole OFDM à transmettre. A la réception, on réalise les opérations inverses. Un estimateur de canal est nécessaire afin de compenser l'effet du canal multi-trajets

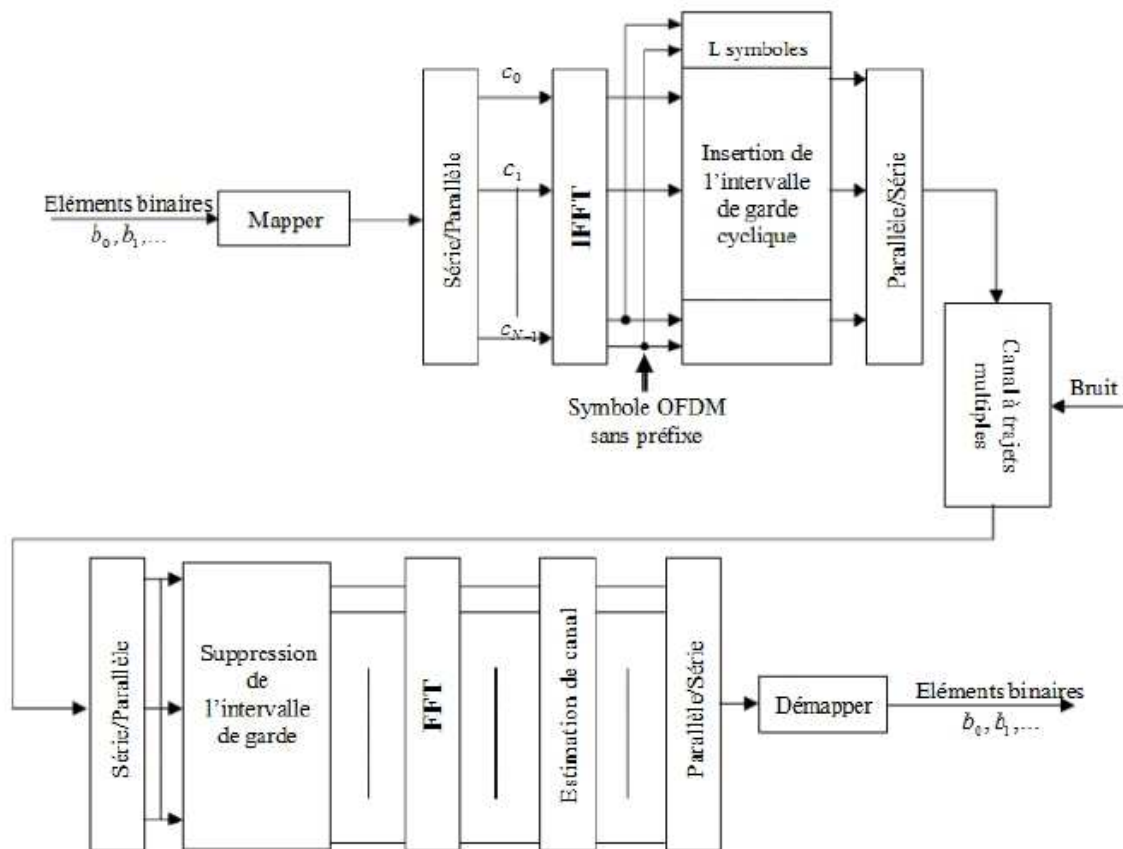


Figure 3-12 : Diagramme en bloc d'un émetteur/récepteur OFDM [27]

3-2 Système MIMO :**3-2-1 Principe de la technique MIMO :**

Dans les systèmes de communications traditionnels, il n'existe qu'une antenne à l'émission et une antenne à la réception (SISO). Or les futurs services de communications mobiles sans fils demandent plus de transmissions de données (augmentation de la capacité de transmission). Ainsi pour augmenter la capacité des systèmes SISO et satisfaire ces demandes, les bandes passantes de ces systèmes et les puissances à transmettre ont été largement augmentées. Mais les récents développements ont montré que l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception permettait d'augmenter le débit de transmission des données et cela sans augmenter ni la bande passante de l'antenne réceptrice du système SISO, ni la puissance du signal à l'émission. Cette technique de transmission s'appelle MIMO (Multiple Input, Multiple Output) (Fig. 3-13). Un système MIMO tire profit de l'environnement multi-trajets en utilisant les différents canaux de propagation créés par réflexion et/ou par diffraction des ondes pour augmenter la capacité de transmission. D'où l'intérêt aussi d'obtenir des signaux indépendants sur les antennes

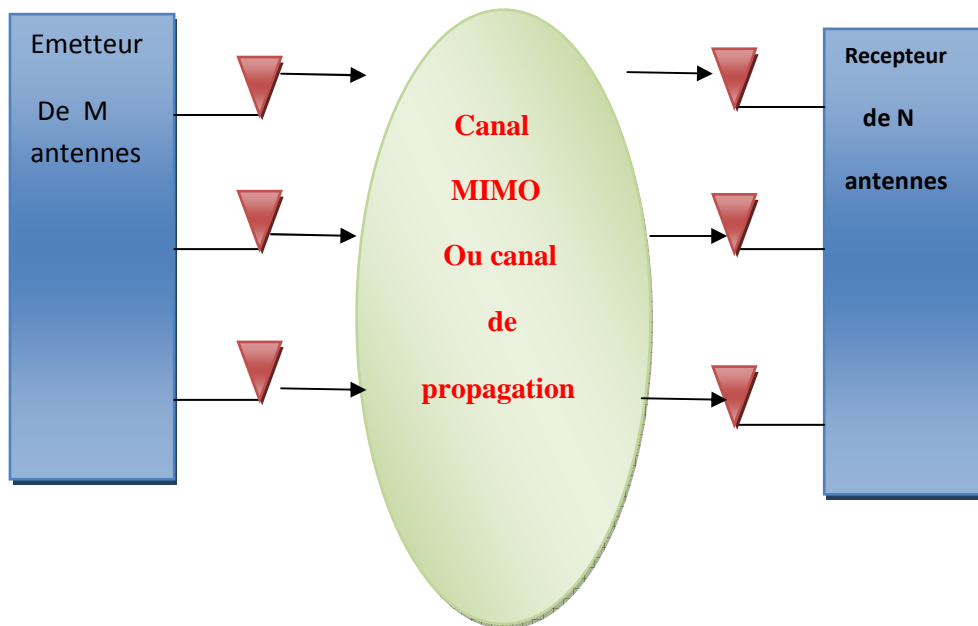


Figure 3-13 : Principe du système MIMO.

3-2-2 Les différents types de codage MIMO :

Dans un système MIMO, il existe plusieurs méthodes pour effectuer le codage des signaux :

3-2-2-1 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale:

(OFDM Orthogonal frequency Division Multiplexing) consiste à diviser sur un grand nombre de porteuses, le signal numérique que nous souhaitons transmettre (comme si nous combinons le signal à transmettre sur des émetteurs indépendants et à des fréquences différentes). Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité, n'interfèrent pas entre eux. Ainsi, dans un environnement multi-trajets où certaines fréquences seront détruites à cause des perturbations, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui elles n'auront pas été détruites [24].

3-2-2-2 Le multiplexage par division spatiale :

(SDM Spatial Division Multiplexing) au cours duquel plusieurs flux de données indépendants (essentiellement des canaux virtuels) sont simultanément multiplexés dans un canal spectral. Le multiplexage SDM peut améliorer le débit de façon significative, car le nombre de données spatiales résolues est plus important. Chaque flux spatial doit disposer de sa propre paire d'antennes de transmission/réception à chaque extrémité du lien radio. Il est important de noter qu'une chaîne de radio-fréquences RF et qu'un convertisseur analogique-numérique distincts sont nécessaires pour chaque antenne du système MIMO. Les configurations qui nécessitent plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être conçues avec attention pour maintenir des coûts peu élevés tout en répondant aux attentes en matière de performances [33].

3-2-2-3 Le codage spatio-temporel par bloc :

(STBC Space-Time Bloc Code) tout comme le SDM permet d'envoyer des signaux différents sur chaque antenne. Le principe du STBC est d'introduire une redondance d'information entre les deux antennes. Le canal STBC comprend $M*N$ sous canaux. Chaque sous canal est un canal à évanouissements indépendants ; ce qui fait que le STBC augmente la diversité du canal de transmission et donc la robustesse du récepteur. Cette méthode est très attractive car elle n'exige pas la connaissance de l'état du canal (CSI) même si cela peut réduire la capacité de transmission des données [24]. Le gain de diversité résultant améliore la fiabilité des liaisons sans fil à évanouissements et améliore la qualité de la transmission. Il est

à noter que ce type de codage n'améliore pas la capacité de transmission linéairement avec le nombre d'éléments utilisés. Ainsi pour améliorer à la fois la capacité et la qualité, un système MIMO doit être implémenté avec les deux types de codages à savoir le SDM et le STBC [34].

3-2-3 Capacité de canal :

3-2-3-1 Capacité d'un système SISO :

Soit un système SISO (Fig.3.14), avec h le gain du canal, γ le rapport signal sur bruit à l'antenne de réception ; la capacité sans connaître le CSI est :

$$C = \log_2(1 + \gamma |h|^2) \quad \text{bit/s/Hz}$$

Ainsi la capacité théorique sera alors :

$$C_t = E_c = \log_2(1 + \gamma E |h|^2) \quad \text{bit/s/Hz}$$

OR $E |h|^2 = 1$. ainsi : $C_t = \log_2(1 + \gamma) \quad \text{bit/s/Hz}$

Elle augmente, en fonction du logarithme de $1 + \gamma$. Lorsque le SNR est élevé, un gain de 3dB sur le γ ne fournira une augmentation que d'un bit par seconde par hertz (bit/s/Hz)[33]

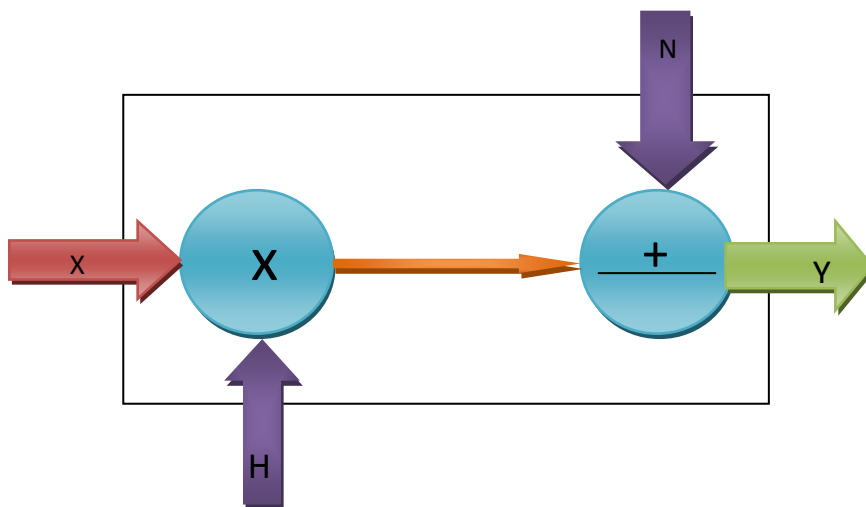


Figure 3-14: Système SISO

3-2-3-2 Canal SIMO : [35]

Un canal SIMO (Single Input, Multiple Output), est un système multi-antennes (Fig.3.15) (réalisant par exemple, de la formation de voix en réception) avec une antenne à l'émission et

N antennes à la réception. Avec h_i le gain complexe entre l'antenne émettrice et la i -ème antenne réceptrice, sa capacité sera alors :

$$C = \log_2 (1 + \gamma \sum_{i=1}^N |h_i|^2) \quad \text{bits/s}$$

Sa capacité de Shannon est donnée par :

$$Ct = Ec = \log_2 (1 + \gamma N^2) \quad \text{bits/s}$$

Avec $E. (\sum_{i=1}^N |h_i|^2) = N^2$ bits/s

Nous constatons que sa capacité augmente en fonction du logarithmique de $1 + \rho R N^2$, soit un peu plus vite que dans le cas SISO.

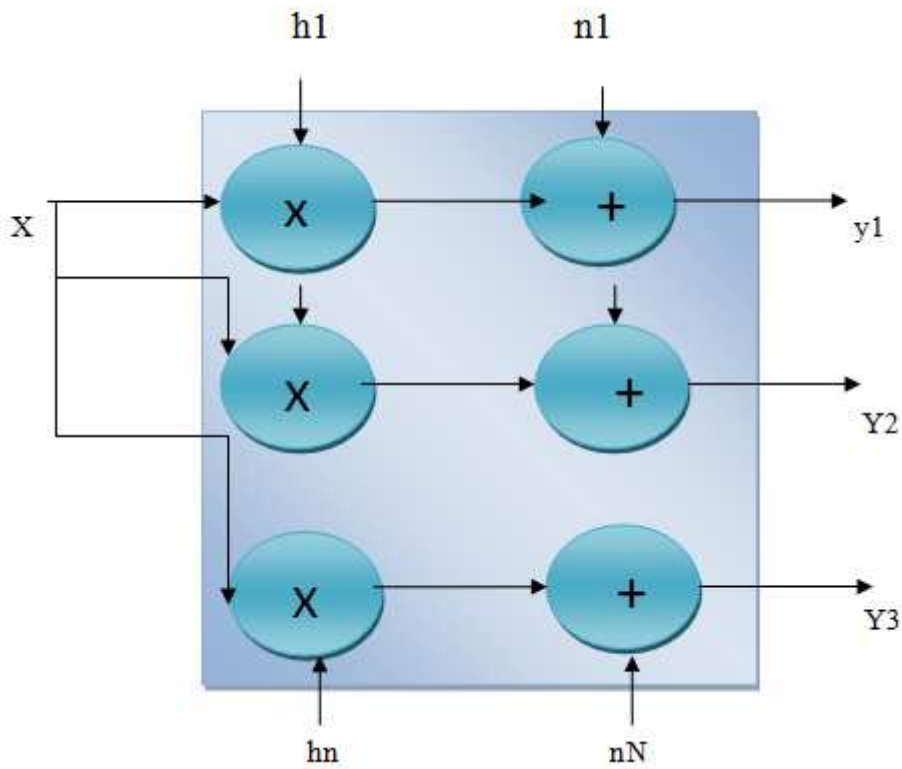


Figure 3-15 : Système SIMO

3-2-3-3 Canal MIMO : [36].

Pour un canal MIMO (Fig.3.16), avec M antennes émettrices et N antennes réceptrices

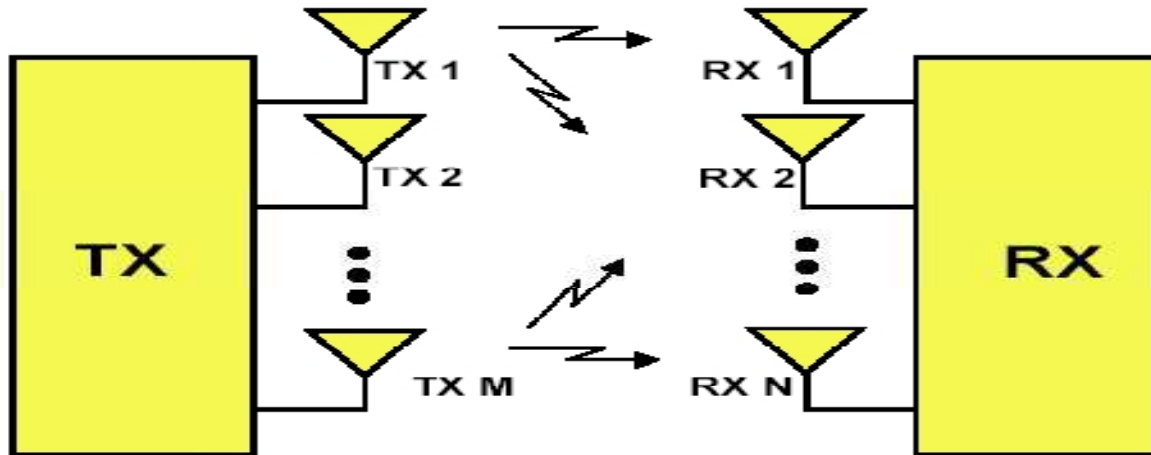


Fig. 3-16 : Système MIMO

La matrice complexe H du canal peut alors s'écrire :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix}$$

h_{ij} est le gain complexe du canal entre la j -ème antenne émettrice et la i -ème antenne réceptrice.

$$c = \log_2(\det [IN + \frac{\gamma}{M} \cdot H \cdot H^h]) \quad \text{bits/s/hz}$$

Lorsque N et M sont grands, l'espérance de la capacité pour un canal de Rayleigh croît proportionnellement à N :

$$E[c] = N \log_2(1 + \gamma)$$

La capacité augmente donc beaucoup plus vite que dans les cas SISO et SIMO grâce au grand nombre d'antennes.

3-3 Système MIMO-OFDM :

Maintenant que nous avons exploré les concepts de systèmes MIMO et OFDM, nous pouvons plonger dans le coeur de notre sujet, c'est-à-dire ceux qui combinent ces deux notions: les systèmes MIMO-OFDM. Il s'agit en fait simplement d'un système OFDM appliqué sur plusieurs antennes qui transmettent des informations parallèles.

Nous commencerons d'abord par définir les principales composantes du système MIMO-OFDM. Comme tout système de télécommunications, celui-ci est constitué d'un transmetteur, d'un canal, et d'un récepteur, qui sont eux-mêmes composés de quelques éléments.

3-3-1 Transmetteur MIMO-OFDM :

Avant d'aller plus loin, mentionnons qu'il existe deux types principaux de transmission MIMO. Ces deux choix mettent en évidence un problème courant en télécommunications: choisir entre un débit plus élevé ou bien en une meilleure qualité de transmission. En effet, dans un système MIMO, nous pourrions choisir d'envoyer, avec chaque antenne, la même information, afin d'augmenter encore la diversité des canaux. Toutefois, cette technique est peu utilisée.

Nous considérons donc que les antennes de transmission envoient des informations différentes, que nous voudrions reconstruire avec le récepteur. Nous pouvons voir sur la figure (3.17) les différentes parties du transmetteur MIMO-OFDM.[26]

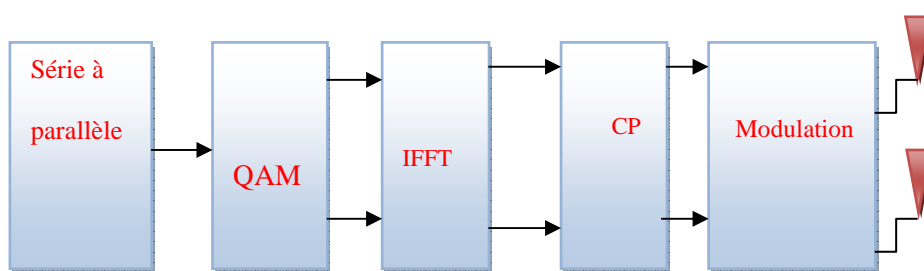


Figure 3-17 : Transmetteur MIMO-OFDM

La chaîne de données d'entrée est, à l'origine en série. La première étape sera donc de faire passer ces données en parallèle, afin de les répartir sur autant de séries qu'il y aura d'antennes de transmission.

-Les données ainsi mises en parallèle seront ensuite encodées selon une constellation **QAM**. À ce point, nous avons, à l'entrée de ce bloc, des valeurs de $[0, \dots, N_{QAM}-1]$, où N_{QAM} est le nombre de symboles possibles dans la constellation que nous avons choisie (64 pour du 64-QAM, par exemple). Celles-ci sont ensuite associées à leur valeur complexe correspondante de la constellation.

Nous appliquons ensuite l'**IFFT** sur ces valeurs, donnant pour sortie des valeurs complexes. Un préfixe cyclique (*cyclic prefix; CP*) est apposé au début de chaque groupe de données **OFDM**, contenant une copie des dernières données. C'est à ce point que le signal est réparti sur les antennes de transmission et pour être envoyé.

3-3-2 Récepteur MIMO-OFDM :

Voici maintenant à quoi ressemble un récepteur MIMO-OFDM (figure 3.18) :[26]

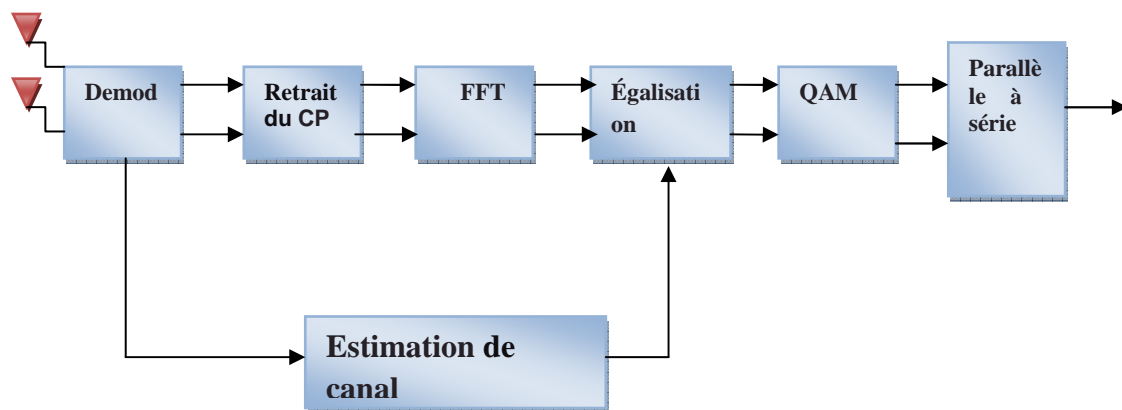


Figure 3.18 : Récepteur MIMO-OFDM

Le signal reçu est d'abord démodulé, afin de retrouver des données numériques.

Ensuite, nous retirons le CP qui a été apposé, car il n'a aucune valeur en tant qu'information. Puis nous appliquons la FFT pour retourner dans le domaine fréquentiel. C'est ensuite que l'égalisation à lieu. Par contre, pour la plupart des techniques, il est nécessaire de connaître le canal pour pouvoir procéder à la détection. C'est pourquoi nous retrouvons, dans ces systèmes, un estimateur de canal. Cette estimation peut se faire avec des pilotes ajoutés aux signaux, par exemple. La détection donne donc une estimation des données qui ont été envoyées à l'origine. Pour terminer, celles-ci se font attribuer leur valeur réelle en fonction de

la constellation qui avait été choisie au départ. C'est ainsi que se déroule, en résumé, le trajet du signal.

3-4 Quelques Techniques de réception MIMO-OFDM :

3-4-1 Zero-forcing (ZF) :

Le ZF est de loin la technique la plus simple et la plus instinctive. Il s'agit d'une technique d'égalisation linéaire non adaptative. Elle est basée sur le raisonnement suivant:

si le signal reçu est donné par la multiplication du signal par le canal, alors nous pouvons récupérer le signal d'origine en multipliant le signal reçu par la réciproque du canal. Pour ce faire, nous voulons déterminer la matrice de poids W qui permet de trouver l'estimation \tilde{A} du signal transmis x . [37]

$$\tilde{A} = Wy \quad (3.20)$$

Où

$$W = H^+ = (H^*H)^{-1} h^* \quad (3.21)$$

L'opération que nous avons ici symbolisée par une croix (+) se nomme la pseudo-inverse de Moore-Penrose. L'astérisque est la conjuguée transposée de la matrice. Comme la matrice de canal est de dimensions $Nr * Nt$ elle ne sera pas nécessairement carrée, d'où l'impossibilité de faire une inversion selon la définition de base. C'est pourquoi nous employons ici cette pseudo-inverse telle que définie par l'équation 3.21. Cette opération donne d'ailleurs le même résultat que l'inverse sur les matrices qui peuvent effectivement être inversées normalement. Dans notre contexte, nous pouvons considérer que le pseudo-inverse n'est qu'une généralisation de l'inversion de matrice, plus largement applicable.

D'ailleurs, comme nous le verrons, cette opération est utilisée dans plusieurs autres techniques d'égalisation.

Nous nous devons d'observer que pour cette technique d'égalisation, nous ne tenons pas compte du bruit v . C'est d'ailleurs en grande partie pour cette raison que l'algorithme est aussi simple. Toutefois, il n'est pas moins présent. C'est aussi le principal inconvénient de cette technique, qui, de par son ignorance du bruit, a parfois même tendance à en amplifier les effets.

Dans la littérature, cette technique est souvent utilisée comme base de comparaison due à son extrême simplicité algorithmique. Par le fait même, ses performances sont généralement

moins bonnes que les autres techniques auxquelles elle est comparée. Malgré tout, cette technique fait bel et bien une égalisation de base, et sert de pilier sur lequel viennent s'appuyer d'autres techniques plus avancées.

3-4-2 Recursive least-squares (RLS) :

Le RLS est un autre algorithme linéaire adaptatif largement utilisé. D'une complexité plus grande, celui-ci offre en contrepartie une convergence beaucoup plus rapide. Nous retrouvons donc toujours cette dualité entre l'efficacité et la complexité. Le raisonnement qui conduit à cette technique a été présenté dans maints ouvrages de référence, dont l'algorithme du RLS est comme suit [37]

$$\text{Initialisation : } \mathbf{P}_0 = \pi \mathbf{0I} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{X}_{est} = \mathbf{W}_i \mathbf{Y}_i \quad (3.23)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{X}_{des} - \mathbf{X}_{est} \quad (3.24)$$

$$\mathbf{P}_{i+1} = 1/\lambda (\mathbf{P}_i - [\lambda^{-1} \mathbf{P}_i \mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_i^* \mathbf{P}_i] / [1 + \lambda^{-1} \mathbf{Y}_i^* \mathbf{P}_i \mathbf{Y}_i]) \quad (3.25)$$

$$\mathbf{W}_{i+1} = \mathbf{W}_i + \mathbf{e} \mathbf{Y}_i^* \mathbf{P}_{i+1} \quad (3.26)$$

Comme nous le voyons dans l'équation (3.22), la matrice \mathbf{P} est initialisée par un scalaire (généralement de valeur la plus élevée possible) multiplié à une matrice identité de taille $N_r.N_r$. Cette phase d'initialisation faite, nous estimons ensuite le vecteur d'informations transmises à l'aide des poids calculés jusqu'à maintenant (0 à la toute première estimation) en 3.23. Suite à cela, l'erreur est calculée dans l'équation 3.24 par rapport aux données désirées. Puis la matrice \mathbf{P} est mise à jour en 3.25. Pour ce faire, nous faisons usage du facteur d'oubli λ , qui prend généralement une valeur près de 1. Ce facteur d'oubli dicte la quantité de valeurs passées prises en compte dans les calculs de coefficients (avec 1, toutes les valeurs sont prises en compte). Enfin, l'équation 3.26 calcule les nouvelles valeurs de la matrice de poids \mathbf{W} . Comme pour le LMS, une fois l'adaptation terminée, seule l'équation 3.23 est utilisée pour faire l'égalisation avec les poids obtenus lors de l'adaptation.

Par définition, le RLS minimise l'erreur quadratique. En contraste, le LMS minimise l'erreur quadratique moyenne. Ce dernier dépend donc des statistiques du signal, tandis que le RLS dépend directement du signal lui-même. C'est ce qui explique en bonne partie la plus grande précision qui est attribuée au RLS dans sa recherche de poids.

Nous devons faire attention au facteur d'oubli en utilisant le RLS, les résultats peuvent varier beaucoup selon la valeur qui lui est attribuée. De plus, notons qu'une valeur de 1 utilise toutes les données passées. À l'opposé, en réduisant cette valeur, nous réduisons la fenêtre de données utiles pour calculer les poids. En général, nous voulons être près de 1, mais sans y être, car le fait d'utiliser toutes les données vient à minimiser l'importance des données récentes. La conséquence à cela est donc une perte en adaptabilité, surtout si les conditions sont changeantes.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Introduction :

Dans les chapitres précédents nous avons présenté les bases théoriques de la technologie 4G LTE et des systèmes MIMO et OFDM.

Dans ce chapitre, nous allons simuler un exemple que nous avons implémenté à savoir le système 4G (LTE/OFDM) et nous allons faire varier ses paramètres dans le but de constater le système le plus performant. Pour atteindre ces objectifs nous allons utiliser le logiciel MATLAB R2014a.

Nous avons travaillé sur le logiciel MATLAB Simulink où la technologie LTE a été modélisée.

Pour bien comprendre le fonctionnement du système 4G (LTE/OFDM), nous avons réalisé un modèle Simulink sous MATLAB.

Nous avons aussi réalisé un programme qui calcule le taux de bits erronés (BER)

4-1- structure globale d'un système LTE/OFDM sous MATLAB :

Ce modèle montre le canal partagé de liaison descendante (de eNodeB à l'UE) il permet le traitement de la Long Term Evolution (LTE) et sa couche physique (PHY), cette spécification développée par la Third Generation Partnership (3GPP), LTE-Advanced est l'un des candidats à la quatrième génération (4G) des systèmes de communication, approuvée par l'Union internationale des télécommunications (UIT), avec des débits de données attendus de liaison descendante de pointe de plus de 1 Gbps. Cet exemple met en évidence le schéma de transmission multi-antenne qui permet de donner des débits élevés.

La configuration 2-en-2 et 4-en-4 antenne permet l'utilisation de plusieurs antennes à la fois dans l'émission et dans la réception, en utilisant la catégorie de 5 paramètres UE. Le mode 4-en-4 permet jusqu'à un taux de transmission de liaison descendante 300 Mbps, cet exemple emploie une transmission à multiplexage spatial multi-mot de code.

La figure 4-1 montre la structure globale d'un système LTE /OFDM

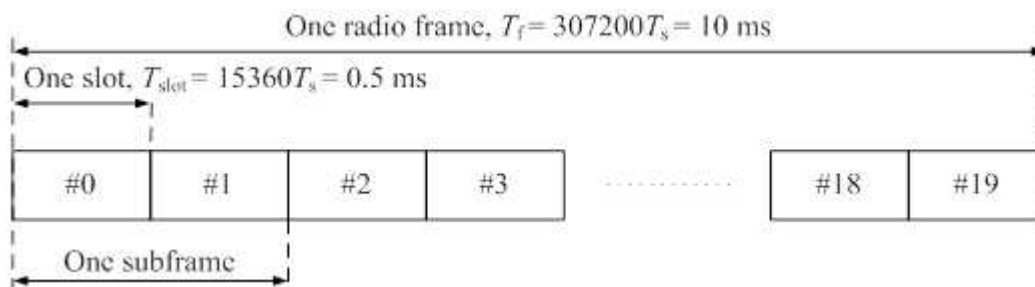
**Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G)
sous Matlab.**

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Ce modèle utilise des couleurs pour mettre en évidence l'effet des différentes composantes du modèle :

- blocs mis en évidence en orange correspondent aux composants de traitement de canal de liaison descendante.
- blocs mis en évidence dans la lumière bleu correspondent au harnais de modélisation.
- blocs en jaune permettent une interaction de l'utilisateur.

Le modèle utilise une trame radio de 10 ms composé de 10 sous-trames ainsi chaque sous-trame de 1ms durée dispose de deux emplacements consécutifs.



- modèle traite une sous-trame par pas de temps.
- Le traitement du canal partagé de liaison descendante à la station de base (eNodeB) comprend un traitement de canal de transport et du traitement du canal physique (PDSCH), avec la dualité correspondant au niveau du récepteur (UE) pour récupérer les bits de données transmis.

4-1-1-Les principaux éléments mis en évidence dans le modèle simulé comprennent :

- génération de charge utile De taille variable.
- Insertion CRC par bloc de transport.
- Code-block avec la segmentation par code-block insertion de CRC.
- Channel (turbo) codage.
- Taux de correspondance avec la sélection de bits.
- niveau de Bit de brouillage.
- Modulation de données (QPSK, 16QAM ou 64QAM).
- La cartographie de la couche pour deux et quatre antennes.
- Resource-élément cartographie.
- génération du signal OFDM.

4-1-2-Description des différents blocs :

Transport Channel Processing (Traitement de canal de transport):

Les canaux de transport assurent l'interface entre la couche MAC et la couche physique.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Le canal partagé de liaison descendante (DL-SCH) est le principal type de canal de transport dans le LTE. Il est utilisé aussi bien pour les données d'utilisateur et des informations de commande dédié.

Insertion CRC par bloc de transport

L'exemple calcule et ajoute un CRC de 24 bits pour chaque bloc de transport généré. Ceci permet la détection d'erreurs à fin de recevoir pour le bloc décodé.

Segmentation du code en bloc et insertion du CRC:

En raison des longueurs de bloc entre l'encodeur turbo - codage pris en charge par la technologie LTE (un maximum de 6144 bits), un bloc de transport qui est supérieure à cette taille est segmenté en plusieurs petits blocs codés. Basé sur les paramètres de la liaison configurés et la taille de bloc de transport déterminé, le modèle détermine le nombre de segments (blocs de code) et les traite de manière séquentielle (TB codage canal blocs). Aucun bit de remplissage n'est nécessaire dans le cadre du processus de segmentation. Pour plusieurs blocs de code par bloc de transport, le modèle calcule et ajoute un CRC de 24 bits pour chaque bloc de code. Ceci permet la détection précoce des blocs de code décodés correctement.

Adaptation de débit :

Extrait le nombre exacte de bit à transmettre dans une sous trame à partir des bits codés. Ce modèle implémente les sous bloc d'entrelacement qui sont alors concaténés pour le traitement du canal physique.

Physical Channel (PDSCH) Processing (Traitement de canal physique (PDSCH)) :

Un canal physique correspond à un ensemble de ressources de temps-fréquence utilisée pour la transmission d'une chaîne de transport particulière. Chaque canal de transport à un canal physique correspondant. Le canal physique partagé de la liaison descendante (PDSCH) est le principal canal physique utilisé pour la transmission de données de monodiffusion le traitement de canal physique de liaison descendante comprend:

Scrambling(Brouillage) :

Les bits codés de canal de transport sont brouillés par une séquence de bits de brouillage. La séquence de brouillage dépend de l'identité de cellule de la couche physique pour assurer la randomisation des interférences entre les cellules afin d'assurer la transmission mono-utilisateur sur la liaison descendante de la cellule unique, le modèle assume une ID de cellule, mais se différencie de la séquence par mot de code transmis.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Data Modulation (modulation des données) :

La modulation des données descendantes convertit les bits brouillés en symboles complexes modulés. L'ensemble des schémas de modulation pris en charge incluent QPSK, 16QAM et 64QAM, correspondant à deux, quatre et six bits par symbole de modulation respectivement.

Layer Mapping (Cartographie de la couche):

Les symboles modulés complexes de ces deux mots sont mappés aux couches (ports d'antenne). Le nombre de couches est égal au nombre d'antennes (ce dernier déterminé au paramètre de configuration de l'antenne sur le bloc de paramètres du modèle) de transmission.

Resource Element Mapping (Cartographie Élément ressources):

Les symboles pré-codés à transmettre sur chaque antenne sont mises en correspondance avec les éléments de ressource de blocs de ressources disponibles pour la transmission. Le nombre de blocs de ressources disponibles est une fonction du paramètre de largeur de bande du canal sur le bloc des paramètres du modèle, selon le tableau ci-dessous (reproduit à partir de la norme LTE).

Channel bandwidth BW_{Channel} [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration N_{RB}	6	15	25	50	75	100

Pour la configuration choisie, chaque bloc de ressource correspondant à 12 sous-porteuses, qui à 15 KHz espacement de sous-porteuse de 180 KHz revient à de spectre. Ainsi, à bande passante de 20 MHz de canal, les 100 blocs de ressources disponibles occupent 18 MHz de bande passante de canal.

Transmission OFDM :

En utilisant le bloc modulateur OFDM. Le nombre de points FFT dépend de la largeur de bande du canal spécifié.

Modèle de Canal MIMO :

Le bloc MIMO fading Canal met en œuvre les profils évanouissement MIMO. Les profils de mobilité plus élevés sont exclus, car le mode de multiplexage spatial en boucle fermée serait applicable à haut débit de données et de scénarios à faible mobilité seulement. Elle utilise l'objet système LTE MIMO Channel et l'objet système MIMO Channel, avec une

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

faible mise entre les multiples liens de corrélation.

Traitement du Récepteur (UE) :

Les principaux éléments du traitement de récepteur (à l'UE) modélisés dans ce model comprennent:

-Récepteur OFDM - défait les longueurs de préfixe cycliques inégales par symbole OFDM dans une fente et le convertit à la structure du temps et dans le domaine fréquentiel grille, en utilisant le bloc OFDM démodulateur

-MIMO récepteur sous-système qui comprend: L'estimation du canal utilisé et l'estimation des moindres carrés en utilisant une moyenne sur une sous - trame pour la réduction du bruit pour les signaux de référence, et une interpolation linéaire sur les sous-porteuses pour les éléments de données. Celui-ci utilise les signaux de RSE pour les estimations de canal.

-Sélection Codebook emploie le critère moyenne minimale erreur au carré (MMSE) pour calculer l'index de code par sous-trame. Lorsque le paramètre Feedback Activer PMI est activé, cet indice est renvoyé à l'émetteur pour une utilisation à l'étape de la prochaine fois. Dans le cas contraire, l'indice de bibliothèque de code définie par l'utilisateur est utilisée pour la durée de la simulation. La granularité de contre-réaction modélisé est une fois pour l'ensemble de sous-trame (large bande) et appliqué à l'autre sous-trame de transmission.

-Récepteur MIMO emploie un récepteur MMSE linéaire pour lutter contre l'ingérence des transmissions multiples d'antenne.

Soft-décision démodulation est employée par mot de code pour faciliter aval décodage turbo decoding.

4-2 Implémentation sous Matlab du traitement d'un canal descendant LTE :

Ce schéma représente l'émission d'une BTS LTE à travers un canal AWGN vers un équipement usagers (mobile) : (figure 4-2)

**Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G)
sous Matlab.**

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

4-3 Paramètres de la simulation :

Nous avons étudié le cas de deux transmissions :

4-3-1 Transmission LTE/OFDM MIMO 2*2 :

Dans cette partie nous allons utiliser un canal MIMO 2*2 avec la possibilité de changer à chaque fois les paramètres indiqués dans le tableau des paramètres. Cette partie est subdivisée en deux sous-parties :

La 1^{ère} sous-partie :

Consiste à utiliser un canal MIMO 2*2 en utilisant la modulation OFDM avec un **seul symbole** par sous-trame avec la possibilité de faire changer les autres paramètres indiqués dans le tableau des paramètres.

La 2^{ème} sous-partie

Consiste à utiliser le canal MIMO 2*2 en utilisant la modulation OFDM avec deux symboles par sous-trame avec la possibilité de changer à chaque fois les paramètres indiqués dans le tableau des paramètres.

Nous allons commencer notre simulation par la 1^{ère} sous-partie et on va faire varier tous les paramètres indiqués dans le tableau des paramètres.

À chaque simulation on extrait grâce à l'appareil de mesure **BIT ERROR RATE** :

- le nombre de bits envoyés
- le nombre de bits reçus
- le nombre de bits erronés
- le taux d'erreur

Ainsi nous allons extraire trois figures pour chaque variation des paramètres de simulation grâce aux instruments de visualisation :

- **La 1^{ère} figure** : montre la constellation après la réception :
- La 2^{ème} figure** : montre la constellation après la pré-démodulation
- La 3^{ème} figure** : montre le signal émis en jaune et le signal reçu en bleu

Tableau des paramètres

- 1) **Bande passante du signal = XX Mhz**
- 2) **MIMO= 2*2**
- 3) **Type de modulation = 16 QAM-64 QAM-QPSK**
- 4) **Fading chanel model= EPA 0Hz-EPA 5Hz**
- 5) **Nombre de symbole par sous trame = 1 ou 2**
- 6) **SNR= en db**

4-3-1-1 La 1^{ère} sous-partie :

1-Utilisation de la modulation OFDM avec un seul symbole par sous-trame :

1-1 La 1^{er} simulation : utilisation d'un fading chanel model = EPA 5Hz

Dans cette simulation nous allons fixer : 1) la bande passante a 10 MHz

2) type de modulation 16 QAM

3) fading chanel model = EPA 5Hz

Et nous allons faire varier le SNR deux fois SNR=18 et SNR=10

1-1-1 Résultat obtenue : pour un SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	28800	28800
Nombre de bits reçus	857376	857376
Nombre de bits erroné	47350	12171
Taux d'erreur	5%	1,4%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

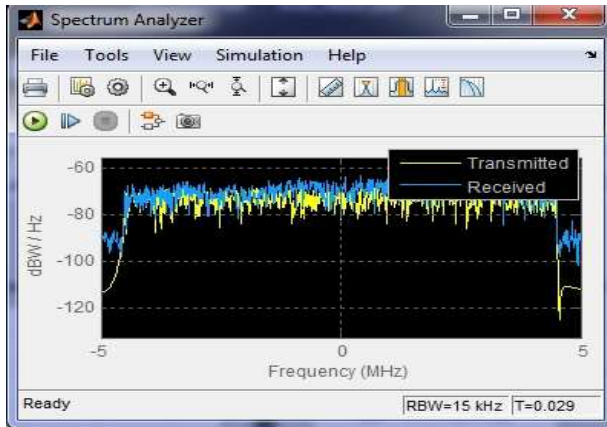


Figure 4.1

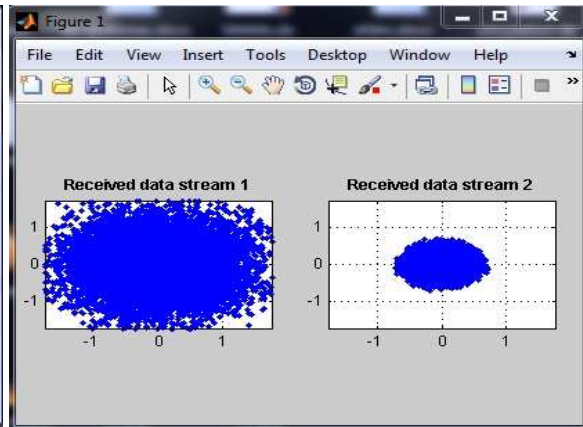


Figure 4.2

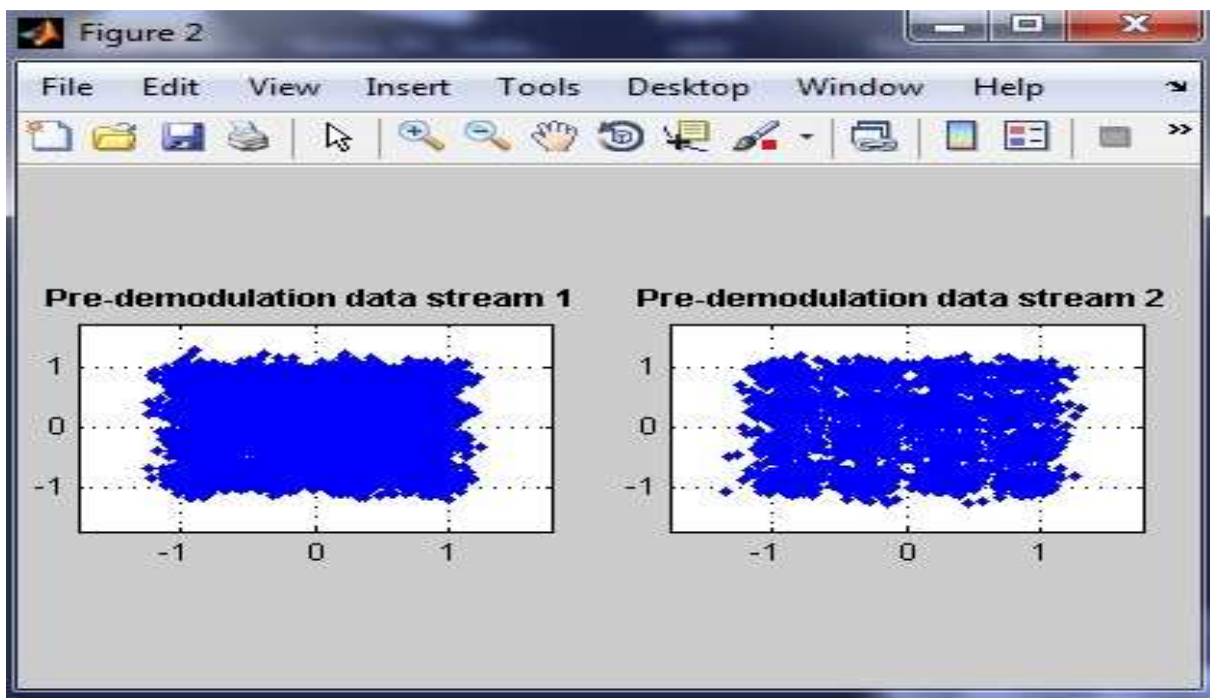


Figure 4.3

1-1-2 Résultat obtenue : pour un SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	28800	28800
Nombre de bits reçus	857376	857376
Nombre de bits erroné	218425	99192
Taux d'erreur	25%	11%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

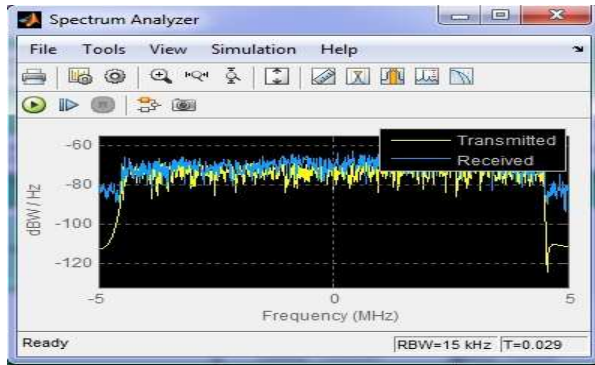


Figure 4.4

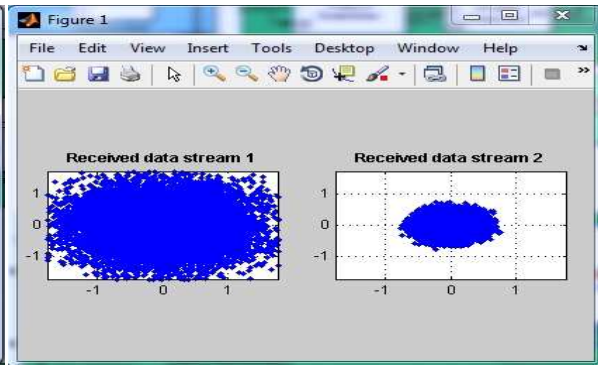


Figure 4.5

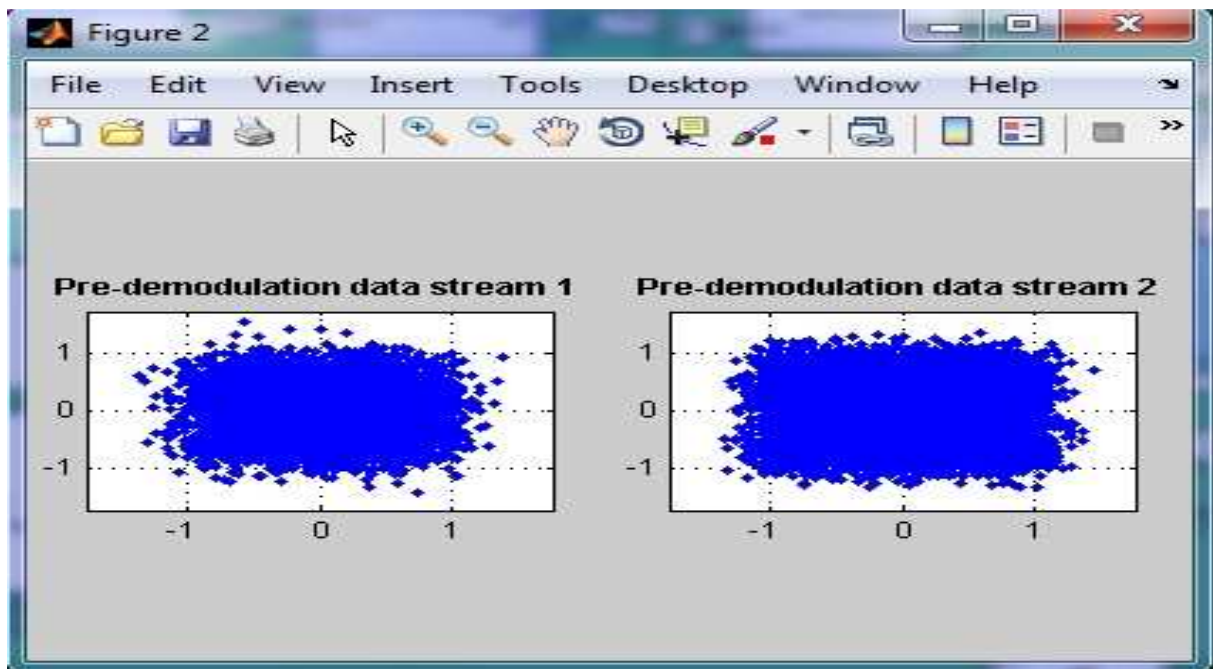


Figure 4.6

Interprétations :

Dans cette simulation nous constatons que l'utilisation d'un fading channel model = EPA 5Hz avec un SNR=18 nous permet d'avoir une bonne transmission, le taux d'erreur est de 5% (source 1) et de 1,4% (source 2), contrairement à l'utilisation d'un SNR=10 nous avons un taux d'erreur trop élevé (25% source 1 et 11% source 2).

Sur la constellation de la figure 4.3 nous remarquons que les points sont séparés (16 points) se qui permet de dire qu'on a une bonne résolution et d'extraire les symboles numériques contrairement, avec l'utilisation du SNR=10, on ne peut pas distinguer les points (figure 4.6).

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

1-2 La 2^{eme} simulation : utilisation de la modulation 64QAM et QPSK :

Dans cette simulation en fixe 1) bande passante =10Mhz

2) fading chanel model = EPA 0Hz

3) type de modulation= 64 QAM et QPSK

Et nous allons faire varier le SNR entre 18 et 10

1-2-1 Utilisation de la modulation 64-QAM

1-2-1-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	43200	43200
Nombre de bits reçus	1286064	1286064
Nombre de bits erroné	83010	49255
Taux d'erreur	6.4%	3.8%

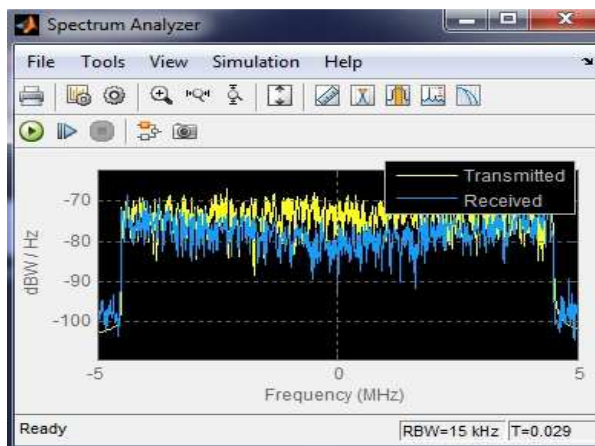


Figure 4.7

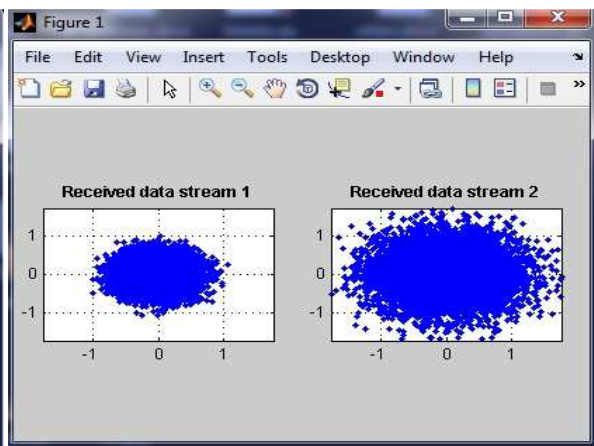


Figure 4.8

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

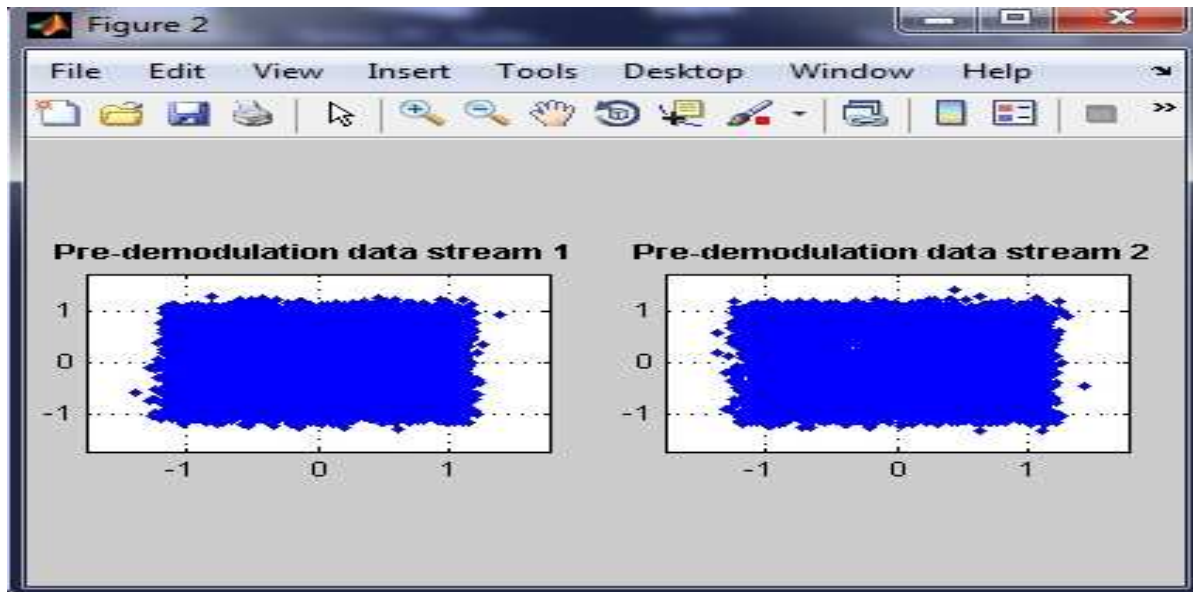


Figure 4.9

1-2-1-2) Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	43200	43200
Nombre de bits reçus	1286064	1286064
Nombre de bits erroné	348083	257046
Taux d'erreur	27%	19%

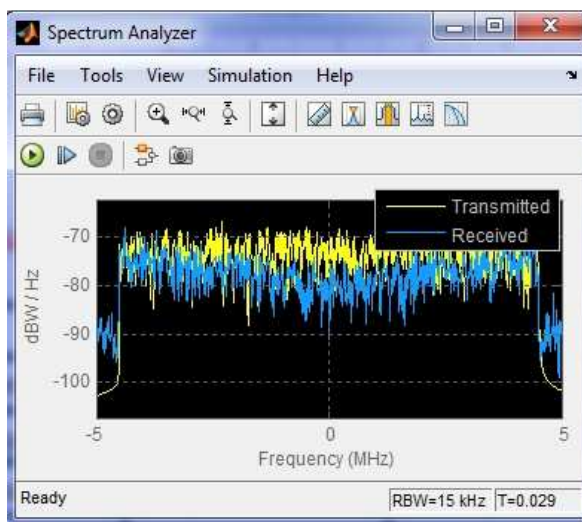


Figure 4.10

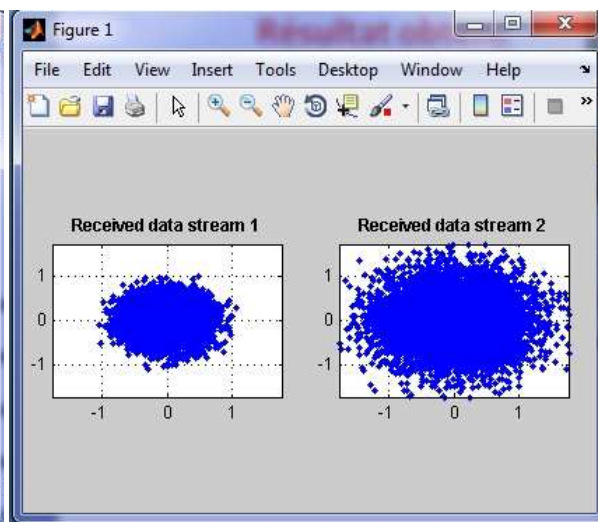


Figure 4.11

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

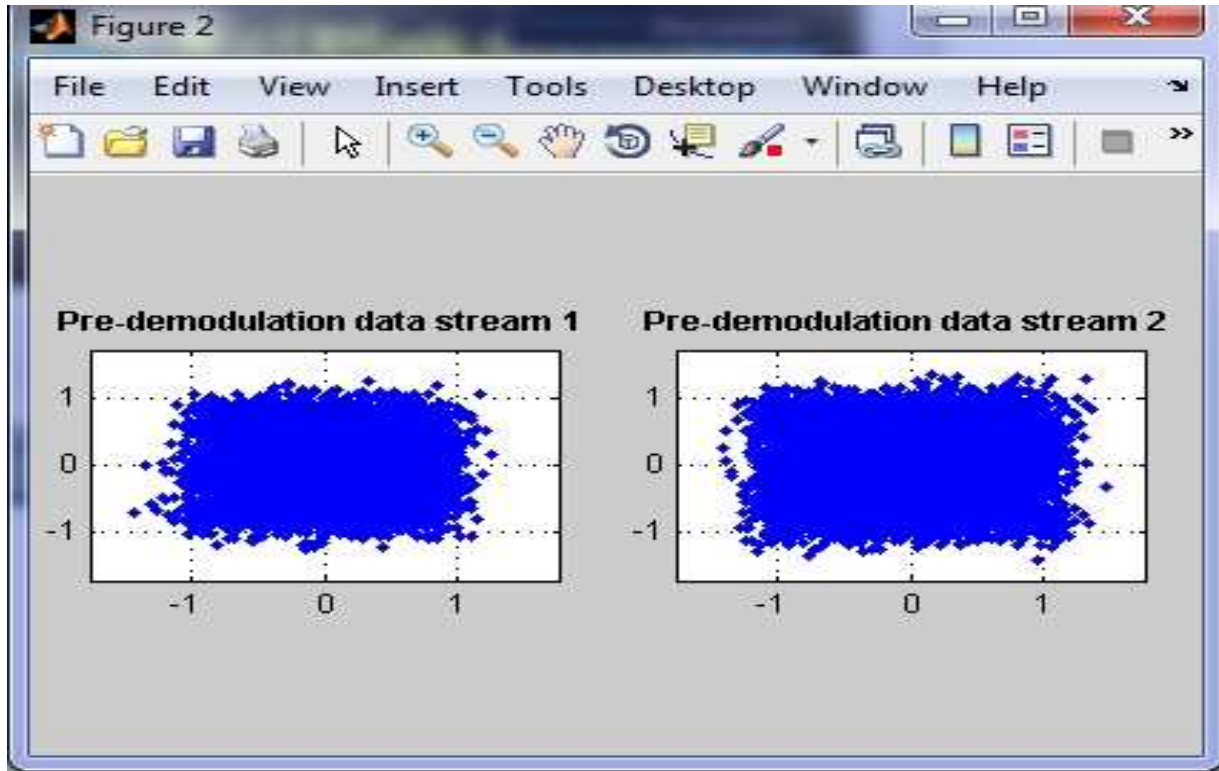


Figure 4.12

Ici on garde les mêmes paramètres et on change juste le type de la modulation au lieu de 64 QAM on utilise la modulation QPSK et on suit les même étapes.

1-2-2 Utilisation de la modulation QPSK :

1-2-2-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	14400	14400
Nombre de bits reçus	428688	428688
Nombre de bits erroné	0	0
Taux d'erreur	0%	0%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

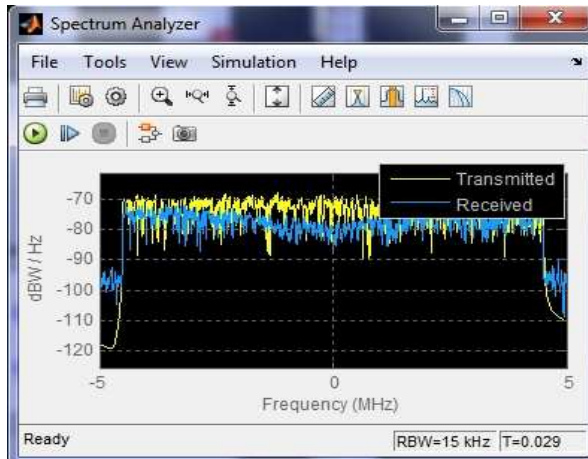


Figure 4.13

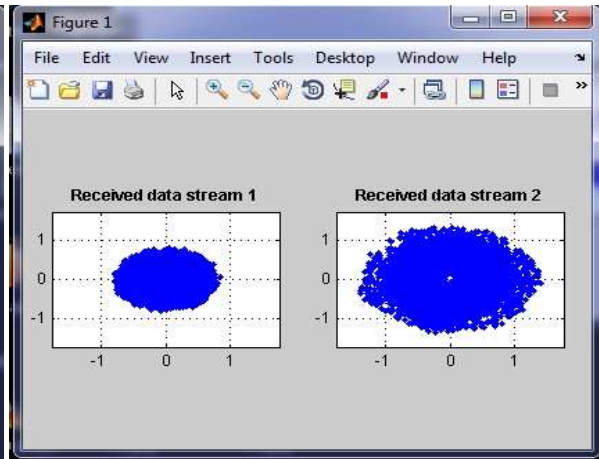


Figure 4.14

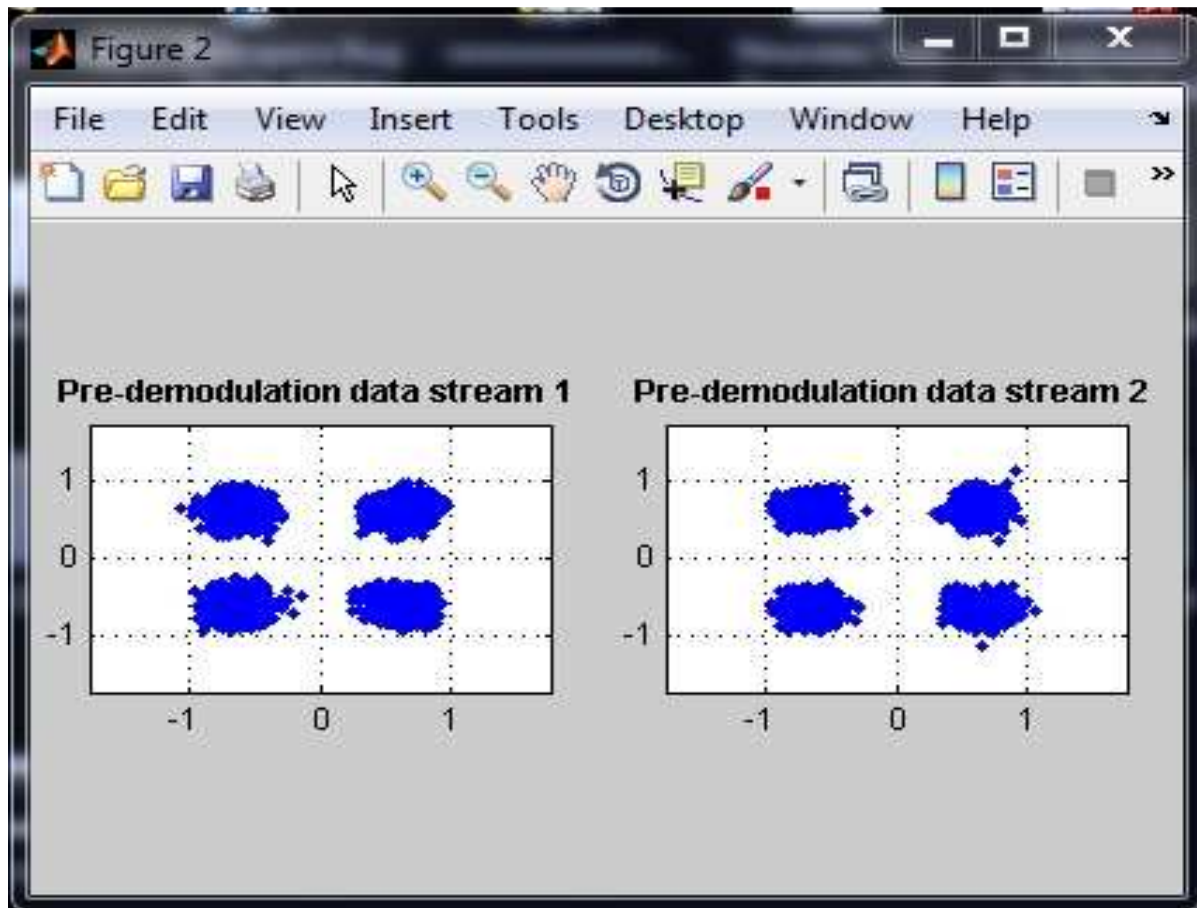


Figure 4.15

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

1-2-2-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	14400	14400
Nombre de bits reçus	428688	428688
Nombre de bits erroné	3888	1472
Taux d'erreur	0.9%	0.3%

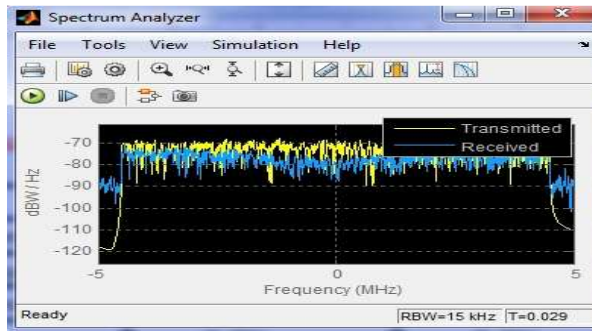


Figure 4.16

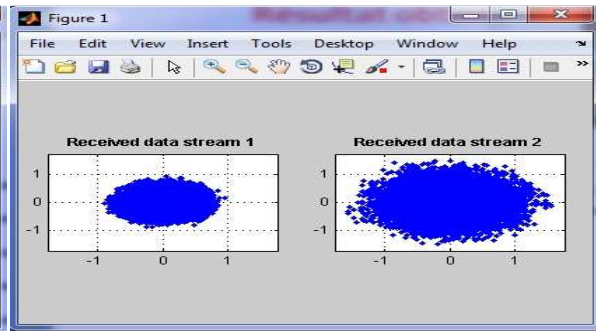


Figure 4.17

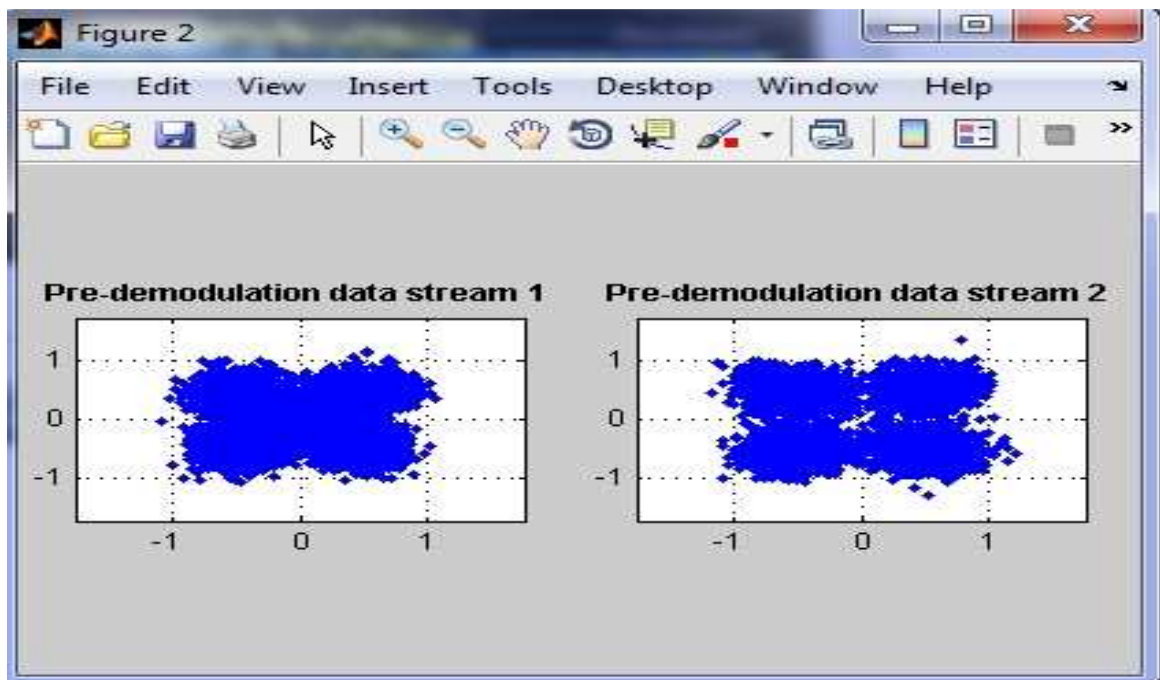


Figure 4.18

Interprétation :

Nous constatons dans cette simulation que l'utilisation d'une modulation QPSK avec un SNR=18 est parfaite sans erreur (taux d'erreur=0% pour les deux sources) cela ne nous empêche pas de dire aussi qu'elle est presque parfaite pour un SNR=10 (taux d'erreur source 1=0.9, source 2=0.3).

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Nous remarquons aussi que dans les figures de constellation 4.15 et 4.18 les points sont bien séparés se qui permet de dire qu'on a une très bonne résolution.

Par contre, avec l'utilisation de la modulation 64QAM elle n'est pas aussi performante que la QPSK mais, nous constatons aussi qu'elle nous permet d'avoir une bonne transmission car on a un taux d'erreur faible avec un SNR=18 (taux d'erreur source1=6.3, taux d'erreur source2=3.6), contrairement a l'utilisation du SNR=10 la transmission est mauvaise.

La figure 4.7 et 4.13 et la figure 4.16 nous montre que les signaux transmis et les signaux reçus sont presque identiques (signal récupérer).

1-3 La 3^{eme} simulation : utilisation d'une Bande passante 20Mhz :

- Dans cette simulation on fixe
- 1) la bande passante a 20 MHz
 - 2) type de modulation 16 QAM
 - 3) fading chanel model = EPA 0Hz

Et on varie le SNR deux fois SNR=18 et SNR=10

1-3-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	57600	57600
Nombre de bits reçus	1721376	1721376
Nombre de bits erroné	14064	3774
Taux d'erreur	0.8%	0.2%

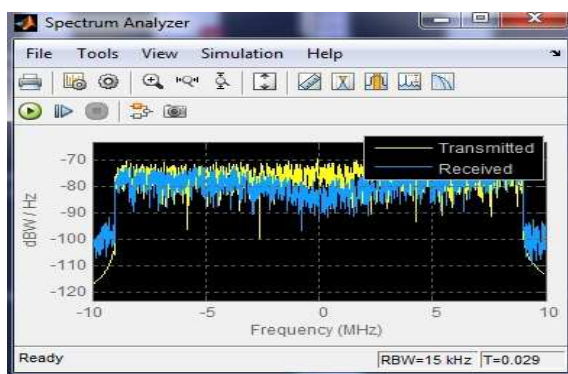


Figure 4.19

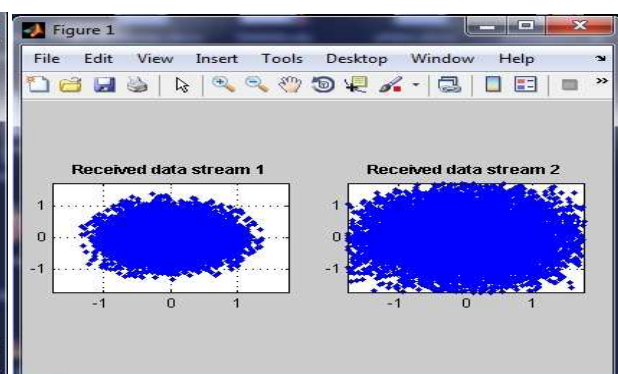


Figure 4.20

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

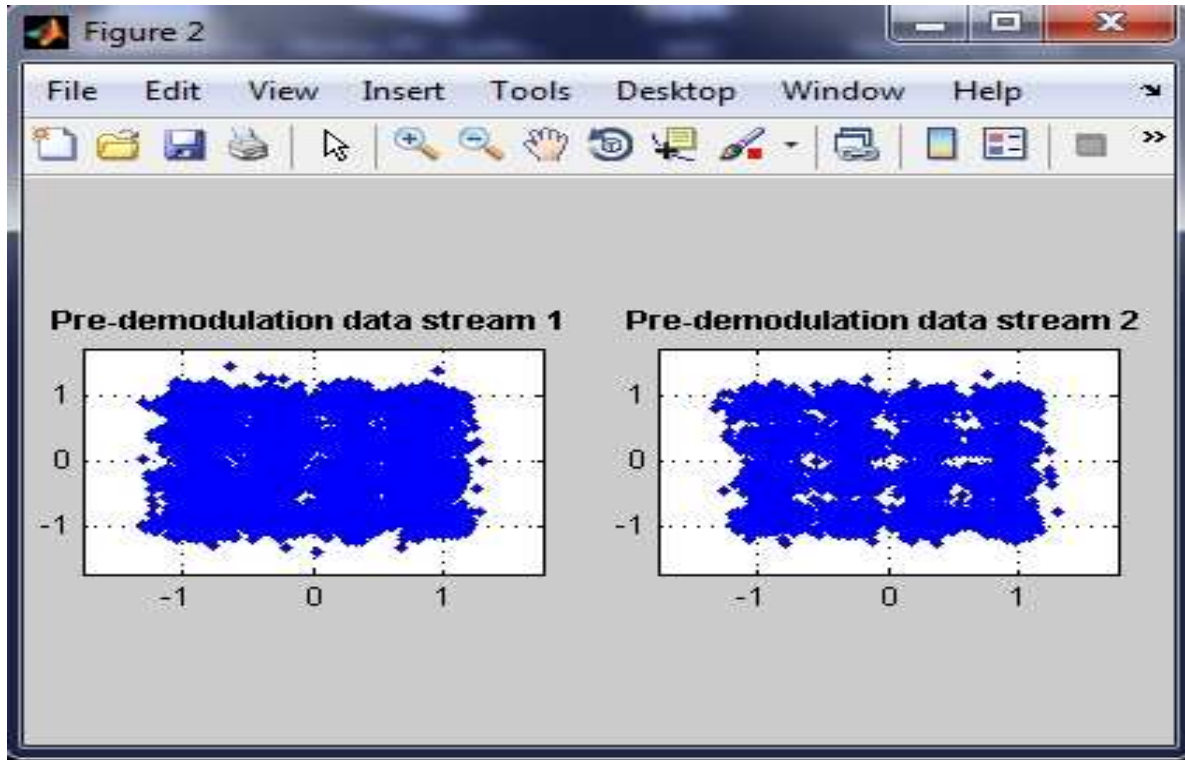


Figure 4.21

1-3-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	57600	57600
Nombre de bits reçus	1721376	1721376
Nombre de bits erroné	277469	139341
Taux d'erreur	16%	8%

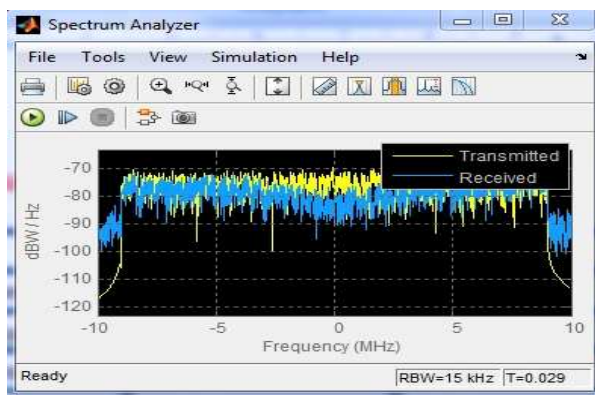


Figure 4.22

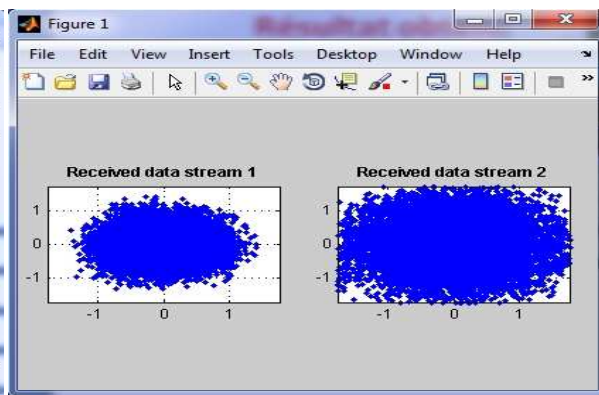


Figure 4.23

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

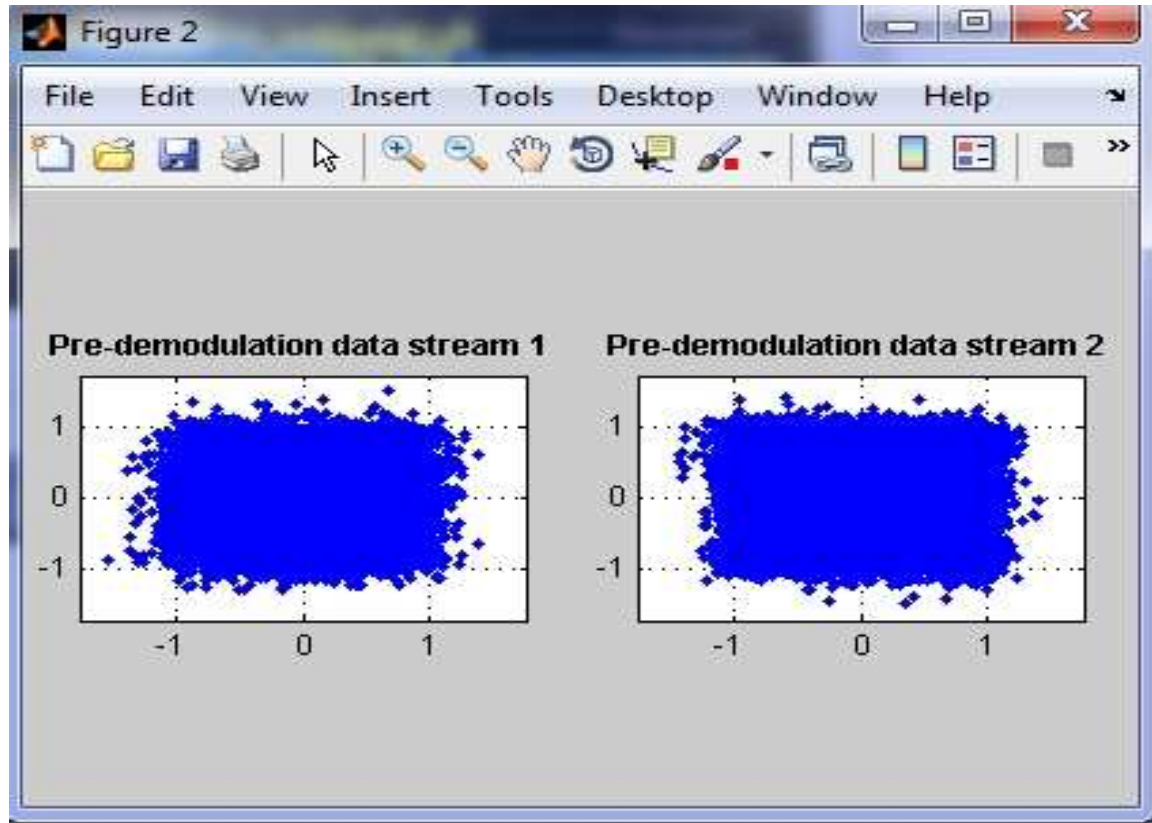


Figure 4.24

Interprétation :

D'après ses résultats nous constatons que l'utilisation d'une bande passante de largeur=20Mhz avec un SNR=18 nous permet d'avoir une bonne transmission avec un taux d'erreur faible (source1=0.8, source2=0.2) contrairement à l'utilisation d'un SNR=10.

La constellation de la figure 4.21 montre que les points sont bien distincts (bonne résolution).

Nous constatons aussi que la bande passante n'influe pas sur la qualité de transmission.

4-3-1-2 - 2 eme sous-partie

2-utilisation de la modulation OFDM avec 2 symboles par sous-trame

Dans cette 2eme sous-partie on va utiliser la modulation OFDM avec deux symboles par sous-trame les paramètres utilisés sont les mêmes qu'on a utilisés dans les simulations de la 1^{er} sous-partie avec un même enchaînement des changements effectués les appareils de mesures et les appareils de visualisation restent inchangés.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

2-1 La 1^{er} simulation : Utilisation d'un fading Chanel model = EPA 5Hz

- Dans cette simulation on fixe
- 1) la bande passante a 10 MHz
 - 2) type de modulation 16 QAM
 - 3) fading chanel model = EPA 5Hz

Et on varie le SNR deux fois **SNR=18** et **SNR=10**

2-1-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	26400	26400
Nombre de bits reçue	785376	785376
Nombre de bits erroné	42267	10985
Taux d'erreur	5%	1%

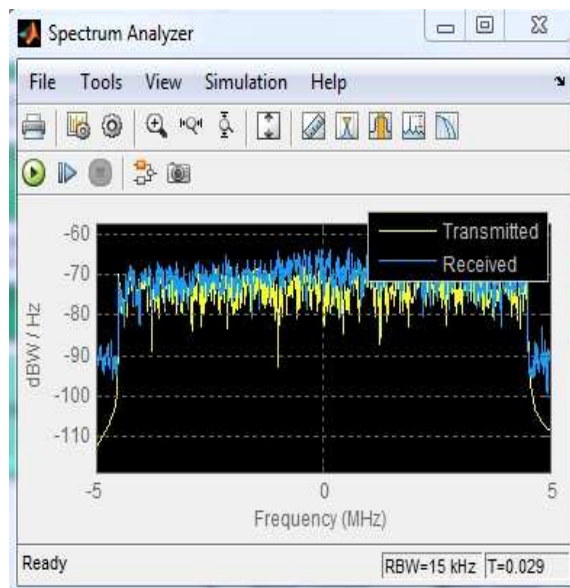


Figure 4.25

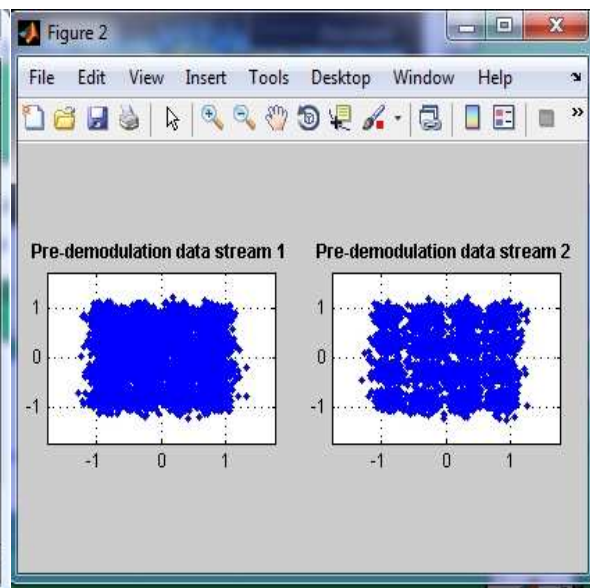


Figure 4.26

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

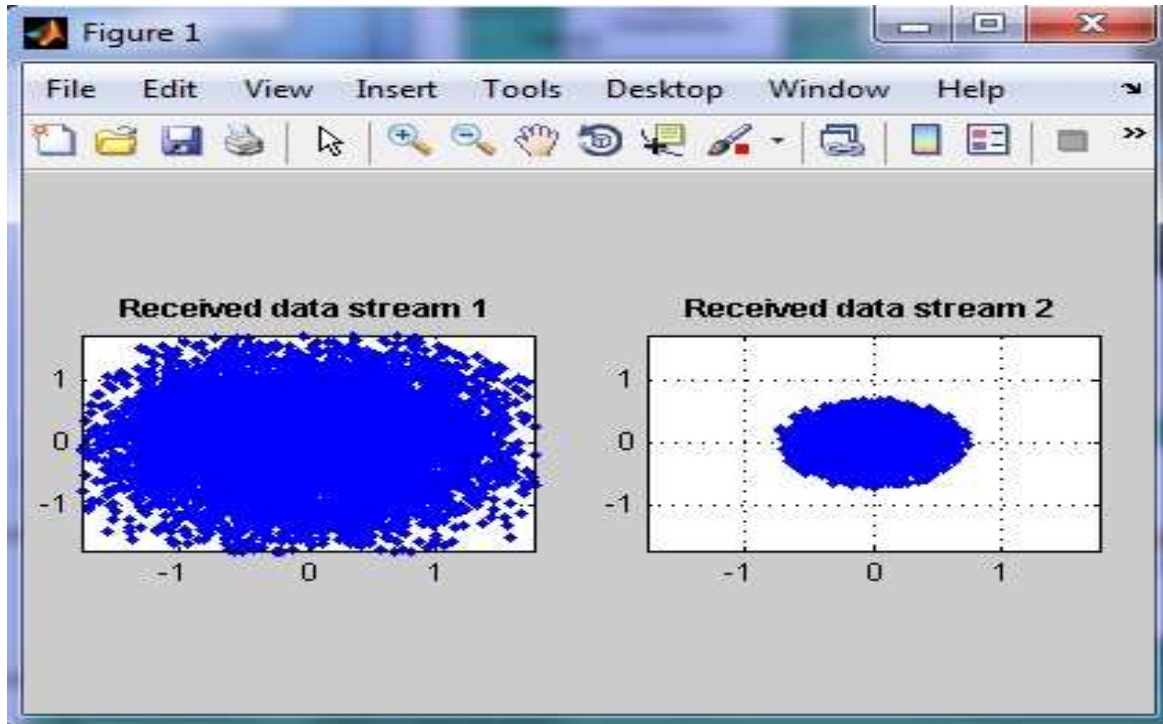


Figure 4.27

2-1-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	26400	26400
Nombre de bits reçus	785376	785376
Nombre de bits erroné	198768	89240
Taux d'erreur	25%	11%

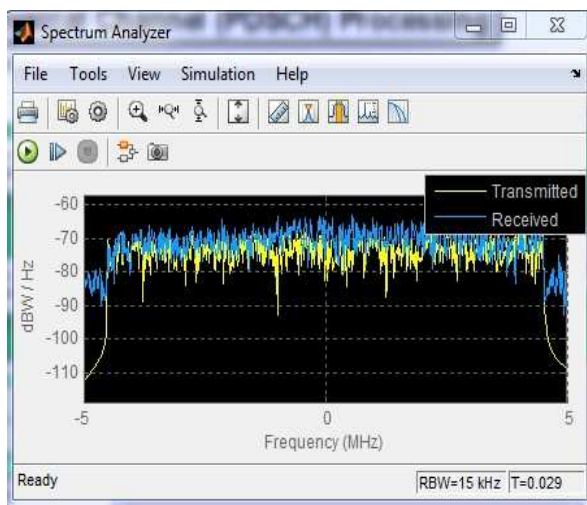


Figure 4.28

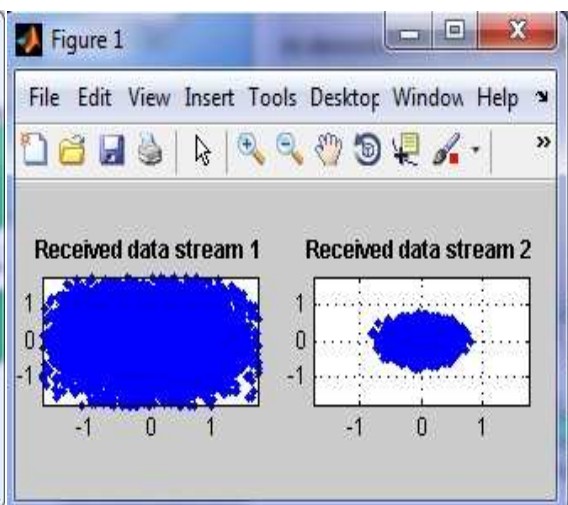


Figure 4.29

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

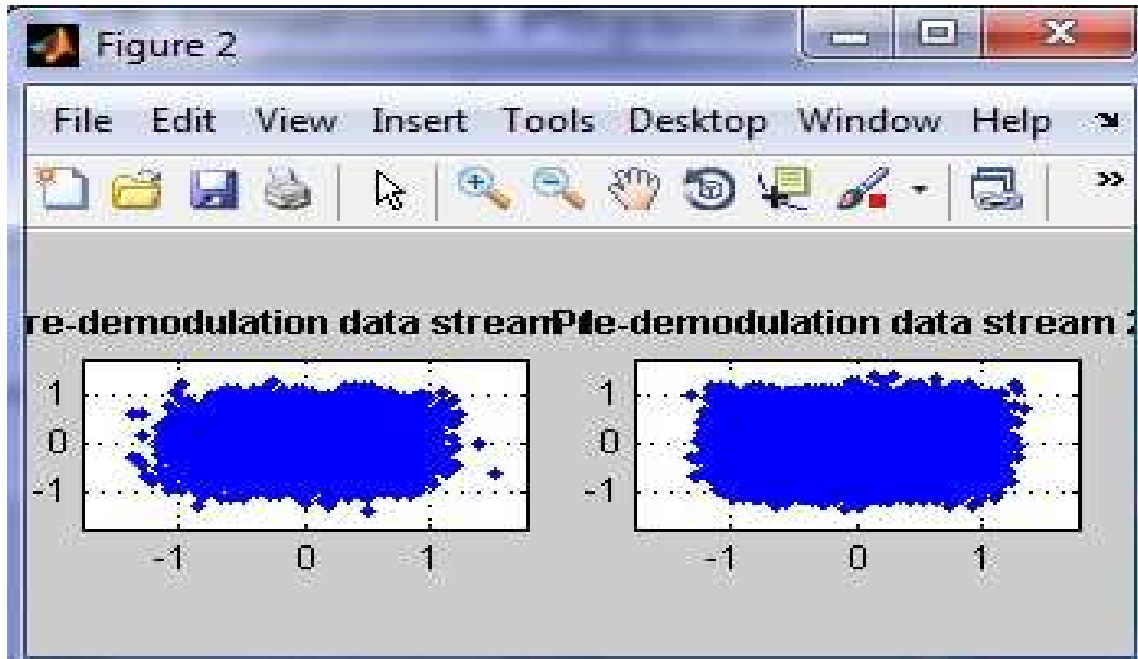


Figure 4.30

2-2 La 2^{ème} simulation : type de la modulation 64QAM-QPSK

Dans cette simulation en fixe 1) bande passante =10Mhz

2) fading chanel model = EPA 0Hz

3) type de modulation 64 QAM -QPSK

Et on fait varier le SNR (18,10)

2-2-1 utilisation de la modulation 64 QAM

2-2-1-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	39600	39600
Nombre de bits reçus	1178064	1178064
Nombre de bits erroné	72624	42624
Taux d'erreur	6%	3%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

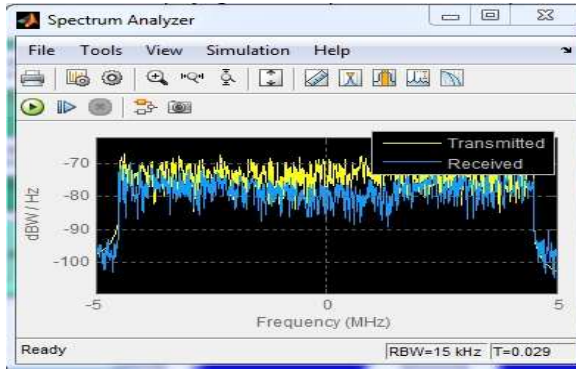


Figure 4.31

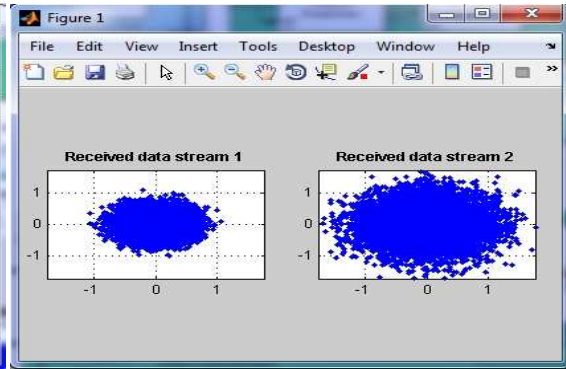


Figure 4.32

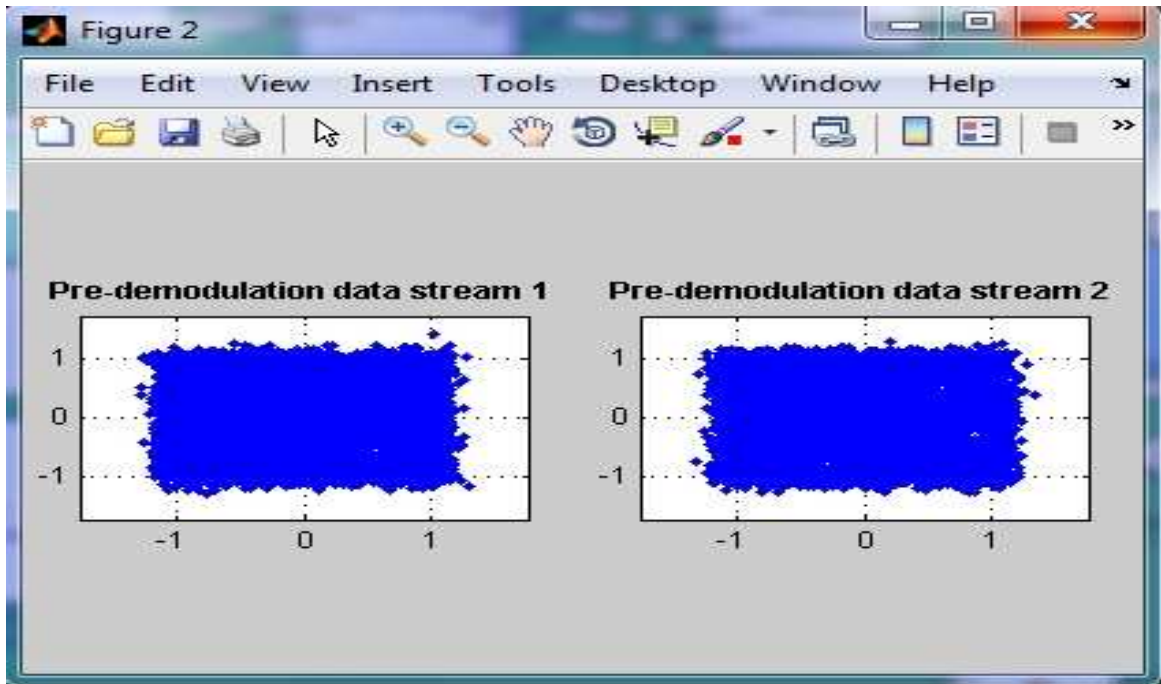


Figure 4.33

2-2-1-2 Résultat obtenue : SNR =10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	39600	39600
Nombre de bits reçus	1178064	1178064
Nombre de bits erroné	316490	232927
Taux d'erreur	26%	19%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

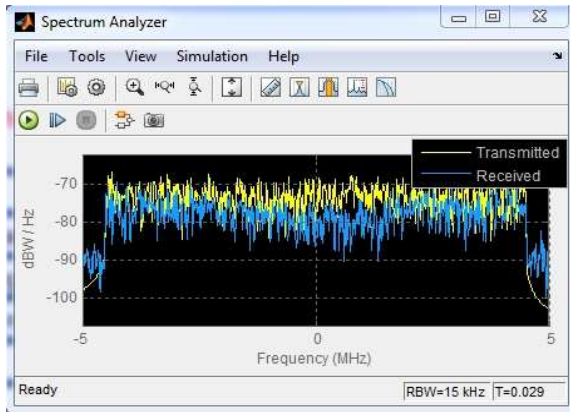


Figure 4.34

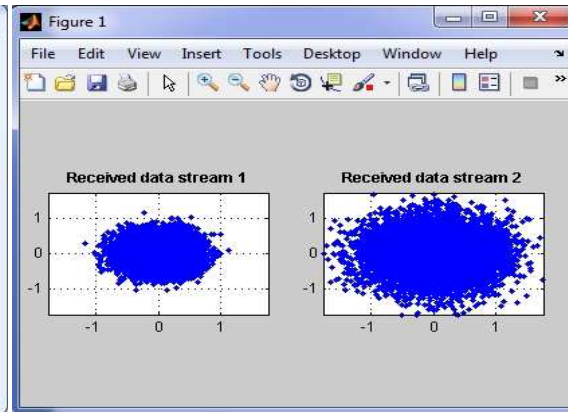


Figure 4.35

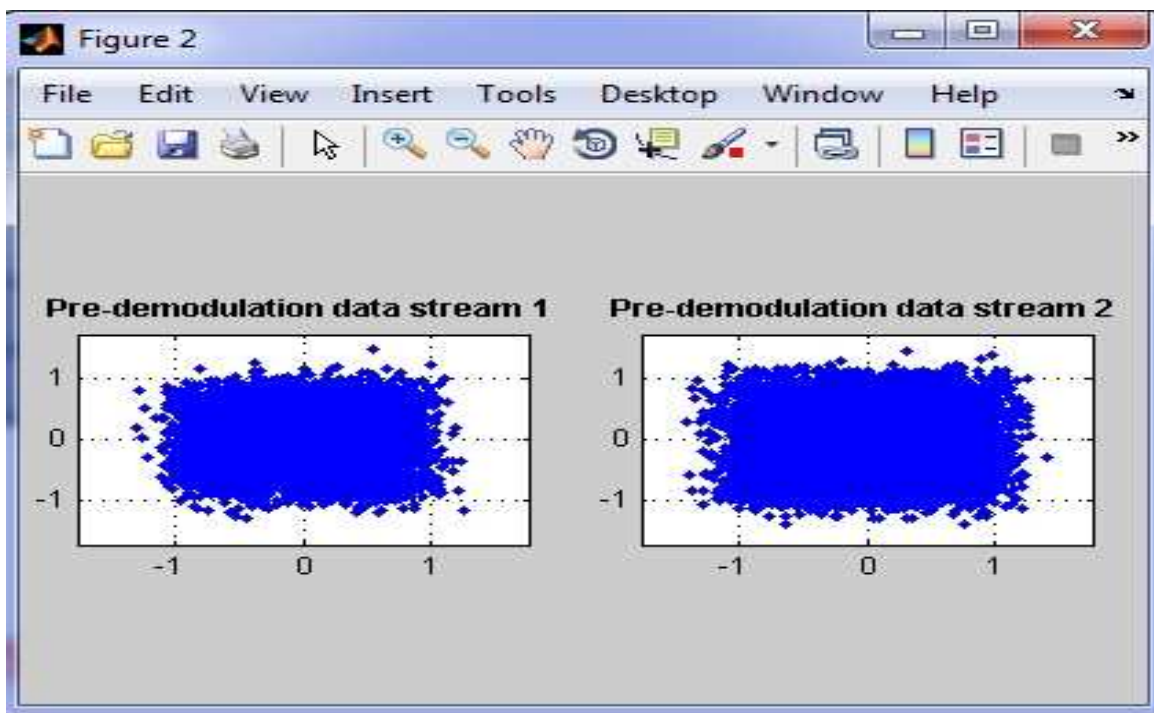


Figure 4.36

2-2-2 Utilisation de la modulation QPSK

2-2-2-1 Résultat obtenue : SNR =18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	13200	13200
Nombre de bits reçus	392688	396288
Nombre de bits erroné	0	0
Taux d'erreur	0%	0%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

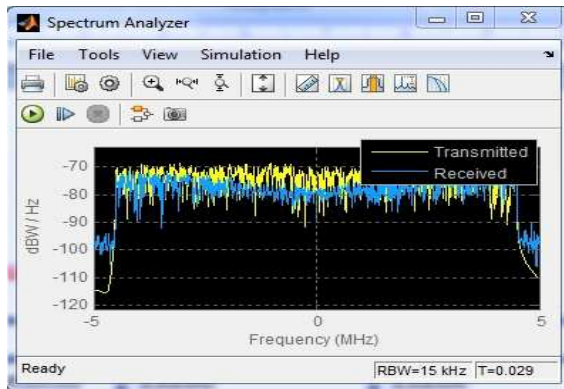


Figure 4.37

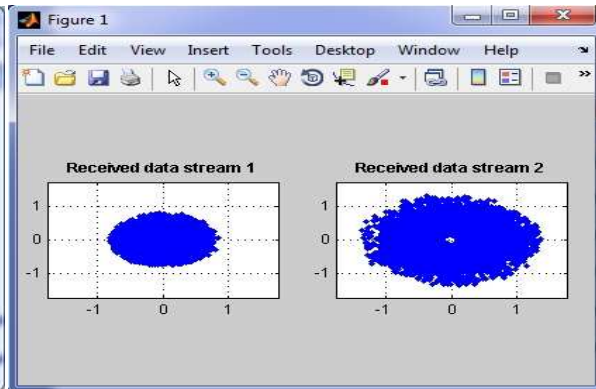


Figure 4.38

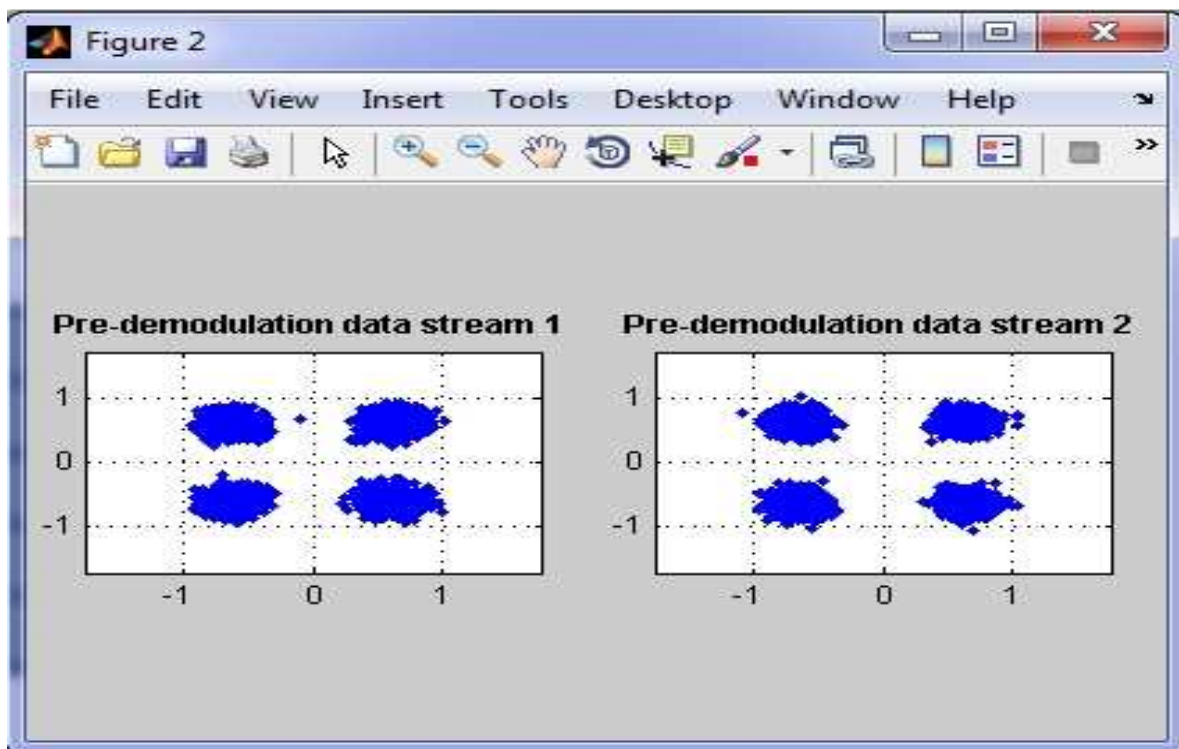


Figure 4.39

2-2-2-2 Résultat obtenue : SNR =10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	13200	13200
Nombre de bits reçus	392688	396288
Nombre de bits erroné	0	0
Taux d'erreur	0%	0%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

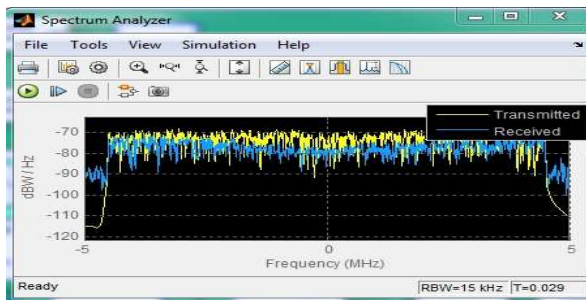


Figure 4.40

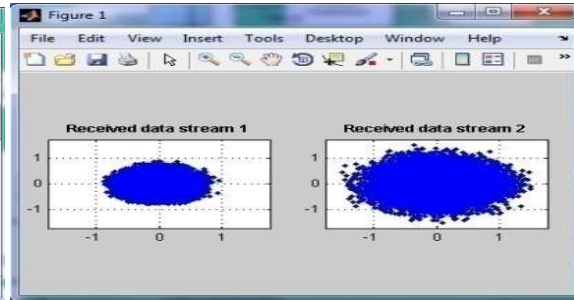


Figure 4.41

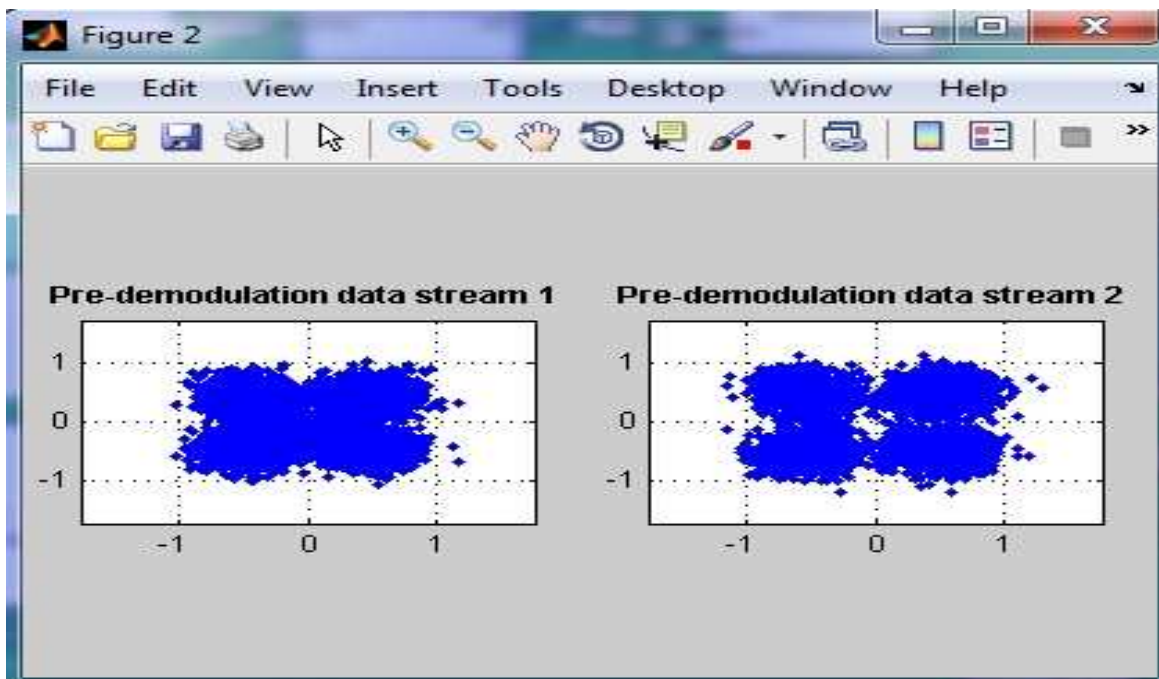


Figure 4.42

2-3 La 3^{eme} simulation : Bande passante 20 Mhz

- Dans cette simulation on fixe
- 1) la bande passante a 20 MHz
 - 2) type de modulation 16 QAM
 - 3) fading chanel model = EPA 0Hz

Et on fixe le SNR=18

2-3-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis		
Nombre de bits reçus	1577376	1577376
Nombre de bits erroné	11157	3036
Taux d'erreur	0.7%	0.2%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

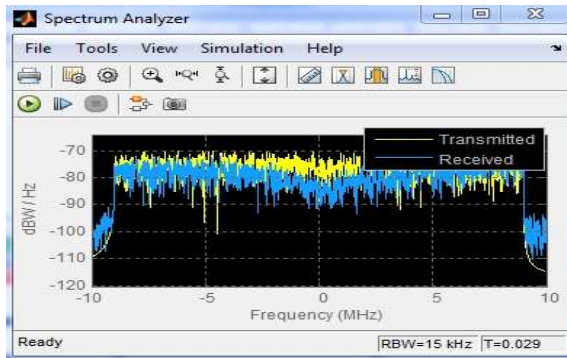


Figure 4.43

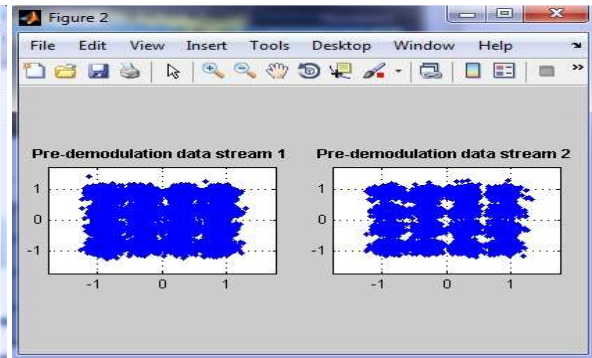


Figure 4.44

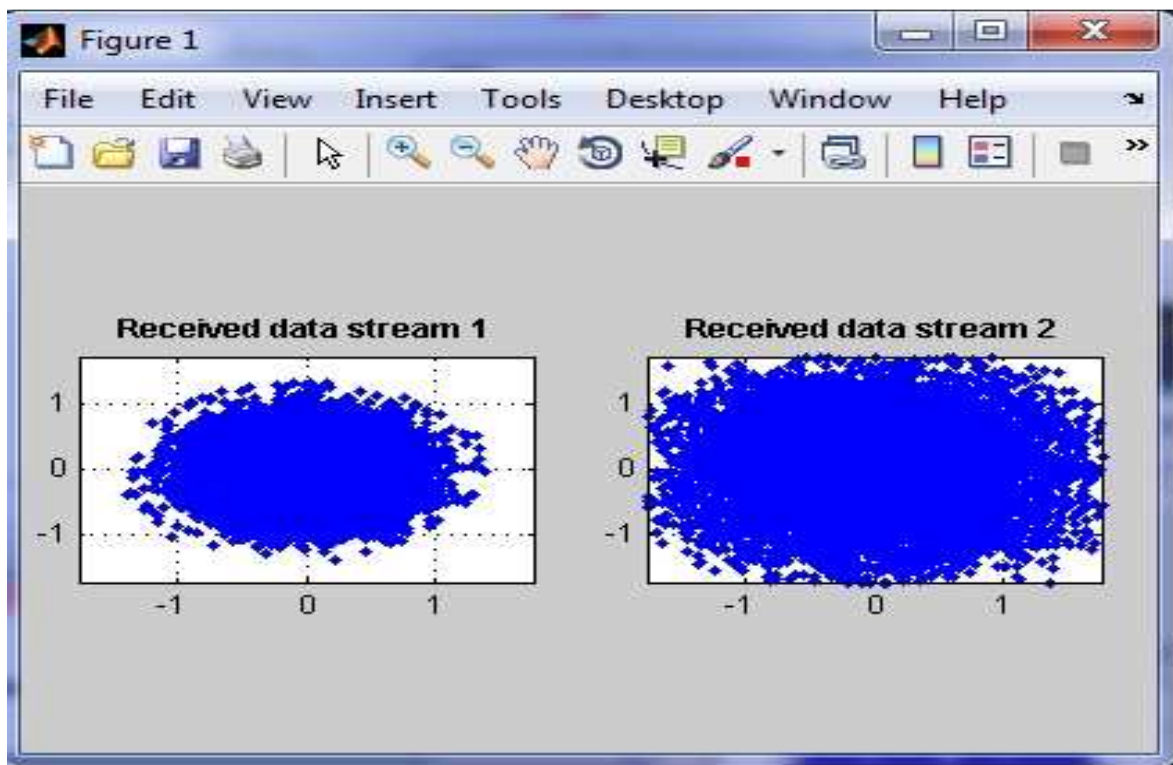


Figure 4.45

Interprétations :

Nous constatons dans la simulation de cette 2^{ème} sous partie que les résultats sont pratiquement les mêmes avec les résultats de la 1^{ère} sous partie, ce qui nous permet de dire que le nombre de symbole par sous trame n'a aucun effet sur la transmission.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

4-3-2 Transmissions LTE/OFDM MIMO 4* 4 :

Dans cette partie nous allons utiliser un canal MIMO 4*4 avec la possibilité de changer à chaque fois les paramètres indiqués dans le tableau des paramètres cette partie est subdivisée en deux sous-parties :

La 1^{ère} sous-partie :

Consiste à utiliser un canal MIMO 4*4 en utilisant la modulation OFDM avec un **seul symbole** par sous-trame avec la possibilité de changer les autres paramètres indiqués dans le tableau des paramètres

La 2^{ème} sous-partie :

Consiste à utiliser le canal MIMO 2*2 en utilisant la modulation OFDM avec deux symboles par sous-trame avec la possibilité de changer à chaque fois les paramètres indiqués dans le tableau des paramètres.

Nous allons commencer notre simulation par la 1^{ère} sous-partie et on va faire varier tous les paramètres indiqués dans le tableau des paramètres.

à chaque simulation on va extraire grâce à l'appareil de mesure **BIT ERROR RATE** :

- le nombre de bits envoyés
- le nombre de bits reçus
- le nombre de bits erronés
- le taux d'erreur

Ainsi nous allons extraire trois figures grâce aux appareils de visualisation, les trois figures indiquent

- **la 1^{ère} figure** : montre la constellation après la réception :
- la 2^{ème} figure** : montre la constellation après la pré-démodulation
- la 3^{ème} figure** : montre le signal émis en jaune et le signal reçu en bleu

Tableau des paramètres

- 7) Bande passante du signal = **XX Mhz**
- 8) MIMO= **4*4**
- 9) Type de modulation = **16 QAM-64 QAM-QPSK**
- 10) Fading chanel model= **EPA 0Hz-EPA 5Hz**
- 11) Nombre de symbole par sous trame = **1 ou 2**
- 12) SNR= **en db**

4-3-2-1 La 1^{ère} sous-partie

1-Utilisation de la modulation OFDM avec un seul symbole par sous-trame

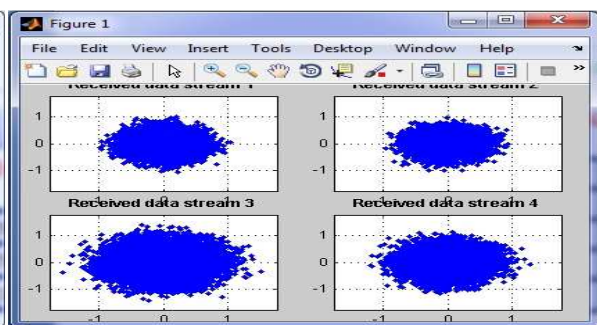
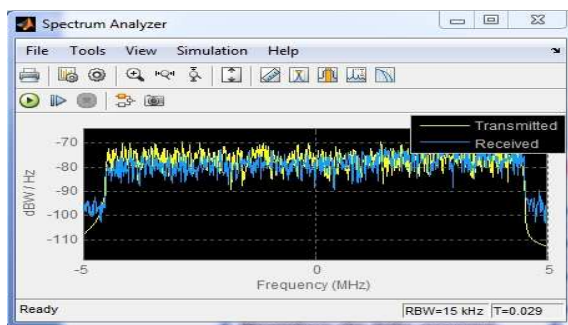
1-1 La 1^{ème} simulation: fading chanel model = EPA 5Hz

- Dans cette simulation on fixe
- 1) la bande passante a 10 MHz
 - 2) type de modulation 16 QAM
 - 3) fading chanel model = **EPA 5Hz**

Et on fait varier le SNR deux fois SNR=18 et SNR=10

1-1-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	54400	54400
Nombre de bits reçus	1619328	1619328
Nombre de bits erroné	137054	65076
Taux d'erreur	8%	4%



Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Figure 4.46

figure 4.47

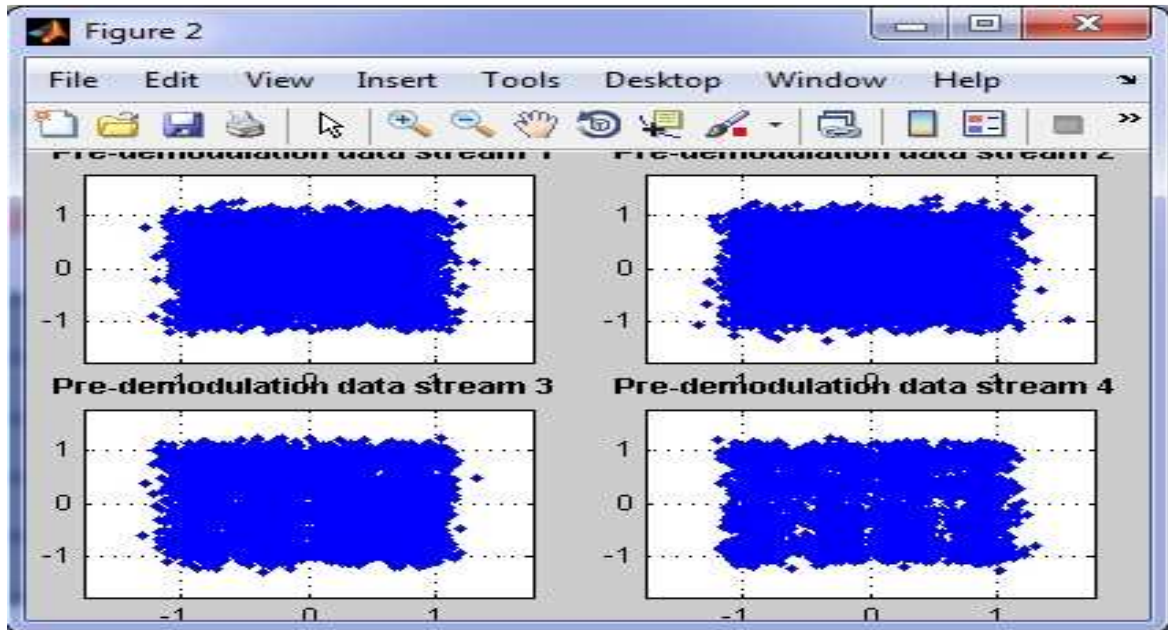


Figure 4.48

1-1-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	54400	54400
Nombre de bits reçus	1619328	1619328
Nombre de bits erroné	424722	334855
Taux d'erreur	26%	20%

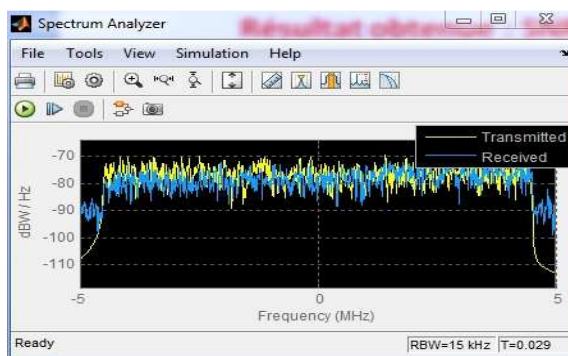


Figure 4.49

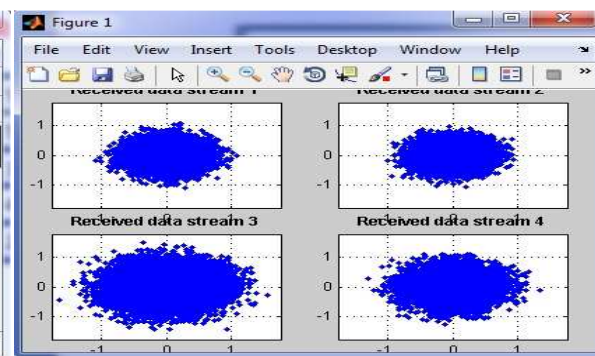


figure 4.50

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

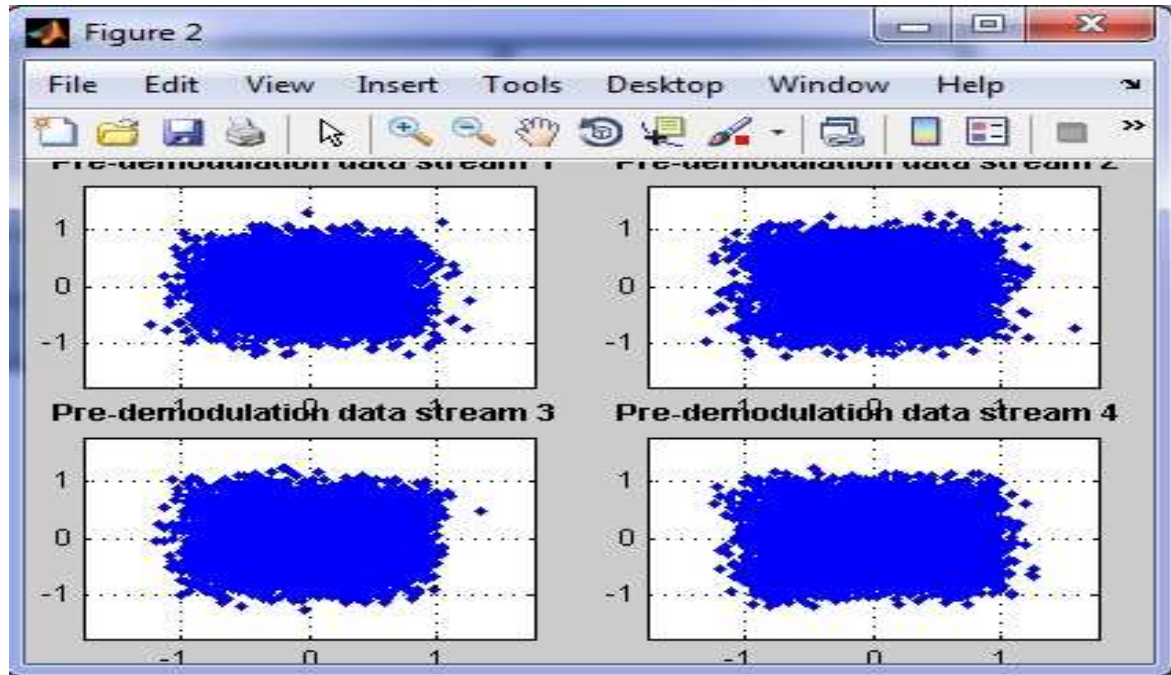


Figure 4.51

Interprétation :

Dans cette simulation on constate que l'utilisation d'un SNR =18 nous a permis d'avoir une bonne transmission malgré que le phénomène d'évanouissement marque sa présence (EPA = 5Hz) , le taux d'erreur est inférieur à 10.

Sur la figure de constellation (figure 4.48) on peut dire que les points sont séparés (16 points) ce qui nous permet de dire que la résolution est bonne.

La figure 4.46 montre aussi que le degré de ressemblance entre le signal d'émission et de réception est pratiquement identique.

Par contre l'utilisation d'un SNR=10 a augmenté le taux d'erreur d'une façon exponentielle 26% pour la 1^{ère} source et 20% pour la 2^{ème} source

On peut dire que avec un phénomène d'évanouissement plus un SNR petit, notre système devient incapable de transmettre d'une façon correcte c'est ce que nous constatons dans la figure de constellation (4.50) tous les points sont fusionnés entre elles et pratiquement impossible de les séparer.

1-2 La 2^{ème} simulation : type de la modulation 64QAM-QPSK

Dans cette simulation on fixe 1) la bande passante à 10 MHz

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

2) type de modulation 64 QAM -QPSK

3) fading channel model = EPA 0Hz

Et on fait varier le SNR deux fois SNR=18 et SNR=10

1-2-1 Utilisation de la modulation 64QAM

1-2-1-1 Résultat obtenue : 64 QAM –SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	81600	81600
Nombre de bits reçus	2428992	2428992
Nombre de bits erroné	447571	477873
Taux d'erreur	18%	19%

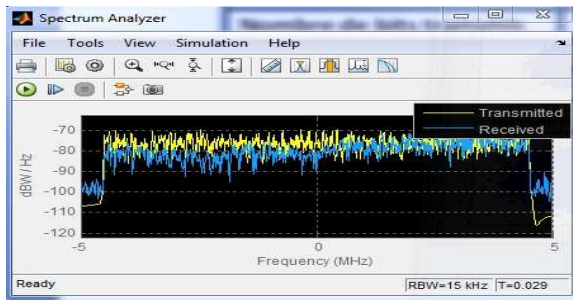


Figure 4.52

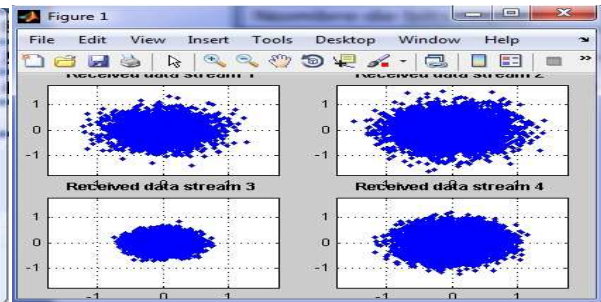


figure 4.53

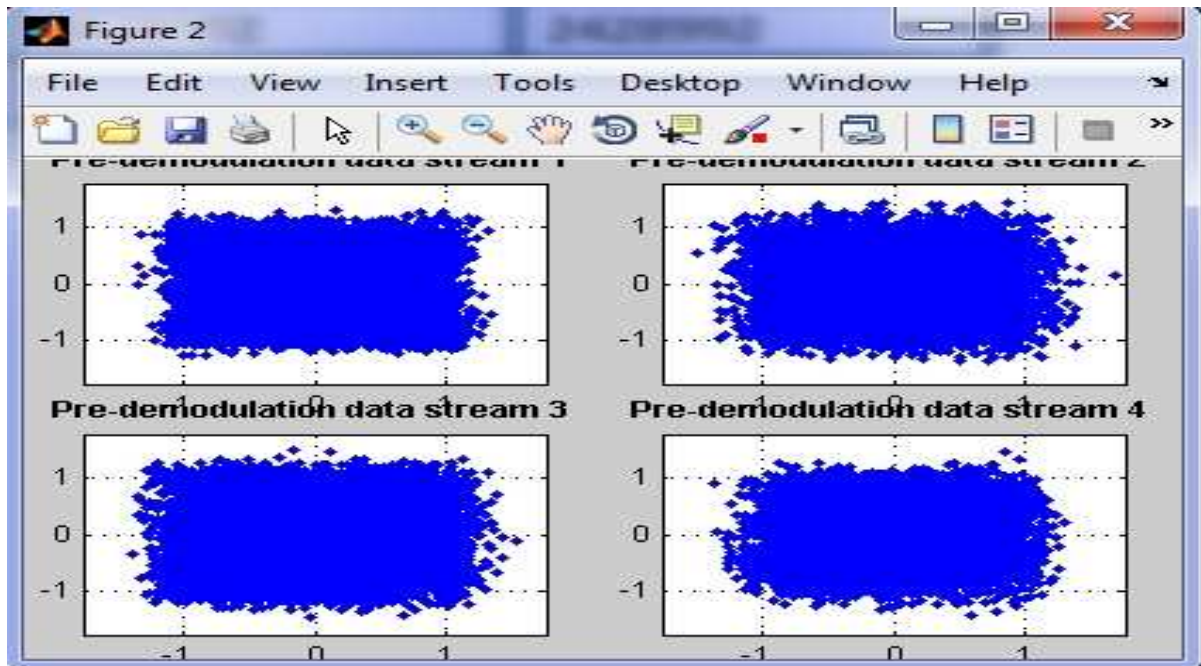


Figure 4.54

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

1-2-1-2 Résultat obtenue : 64 QAM –SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	81600	81600
Nombre de bits reçus	2428992	2428992
Nombre de bits erroné	843843	797153
Taux d'erreur	34%	32%

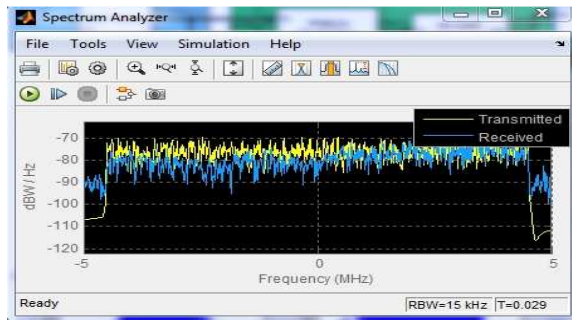


Figure 4.55

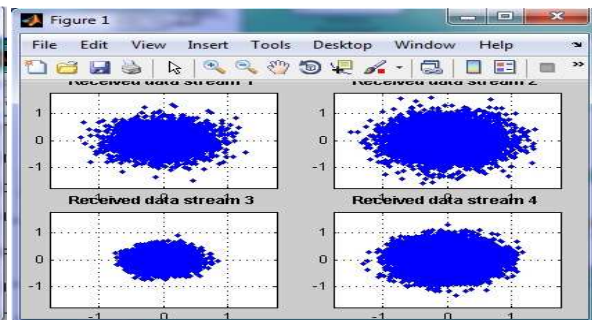


figure 4.56

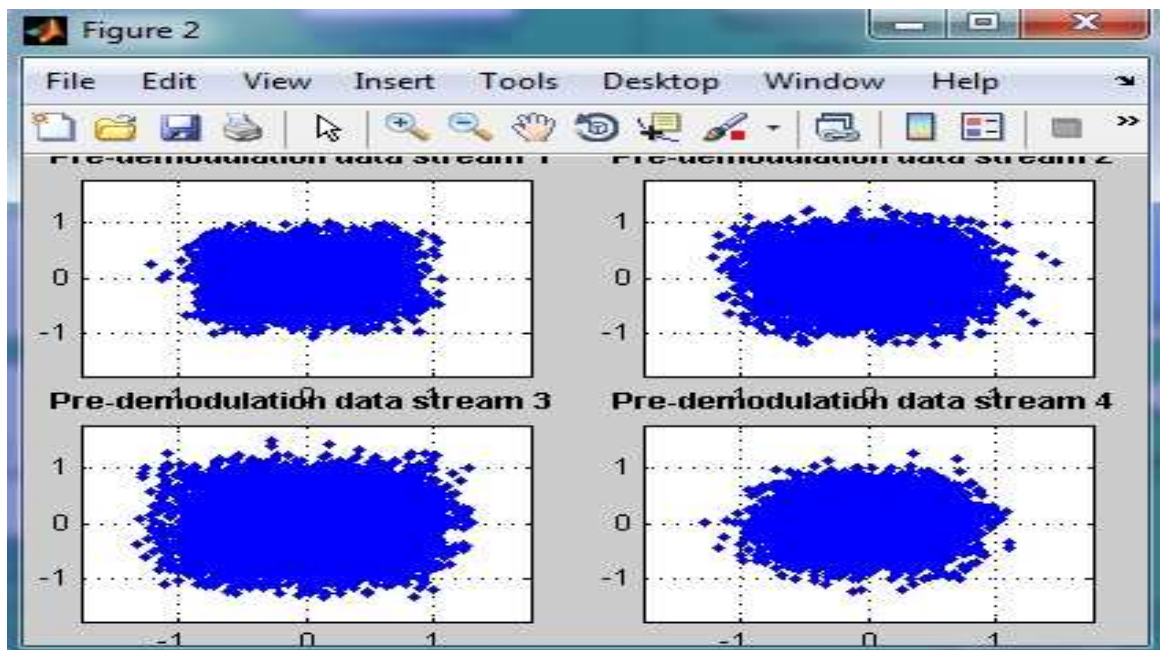


Figure 4.57

Interprétation :

Dans cette simulation l'utilisation de la modulation 64 QAM plus un SNR=18 nous a donné des mauvaises résultats, le taux d'erreur est entre 18% et 19% dans les deux sources malgré que le SNR n'es pas vraiment petit (SNR=18).

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

La constellation (figure 4.54) nous montre que c'est impossible de faire séparé les 64 points on peut dire qu'on les distingue même pas, et aussi la figure (4.52) nous montre que le signal reçu est différent du signal émis.

Même chose si on utilise un SNR=10, et d'après les valeurs relevé on constate que le taux d'erreur a dépassé les 30% et d'après la figure de constellation (4.57) on peut dire que la modulation 64QAM ne convient pas avec ce type de transmission

1-2-2 Utilisation de la modulation QPSK

1-2-2-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	27200	27200
Nombre de bits reçus	809664	809664
Nombre de bits erroné	2167	9324
Taux d'erreur	0.2%	1%

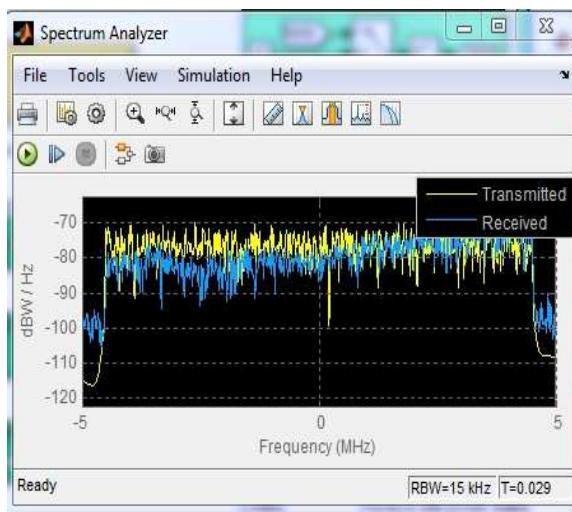


Figure 4.58

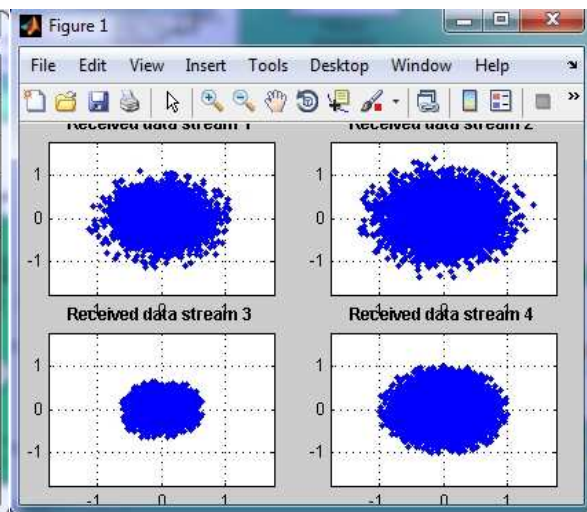


figure 4.59

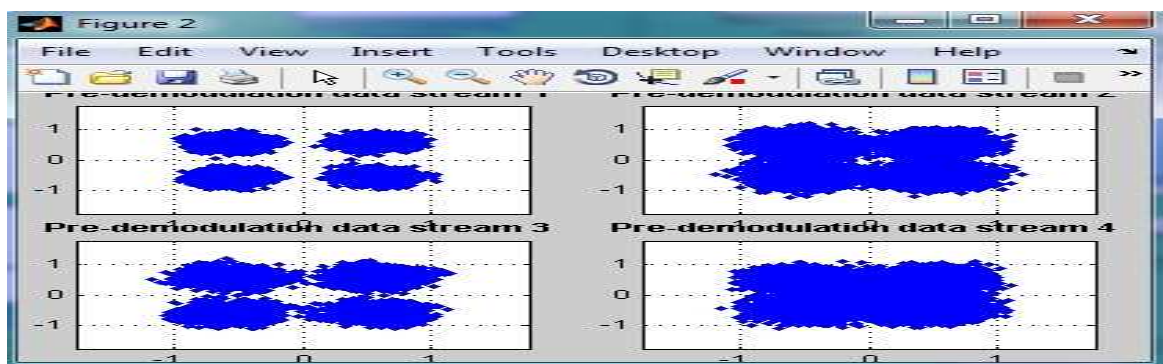


Figure 4.60

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

1-2-2-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	27200	27200
Nombre de bits reçus	809664	809664
Nombre de bits erroné	46244	60708
Taux d'erreur	5%	7%

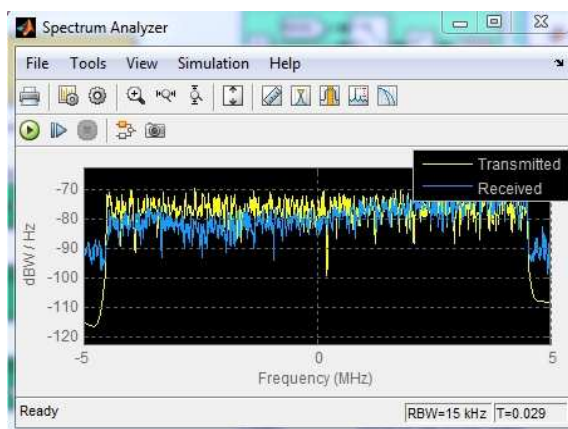


Figure 4.61

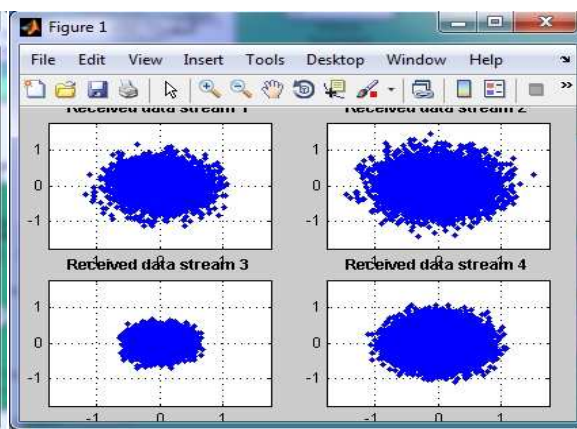


figure 4.62

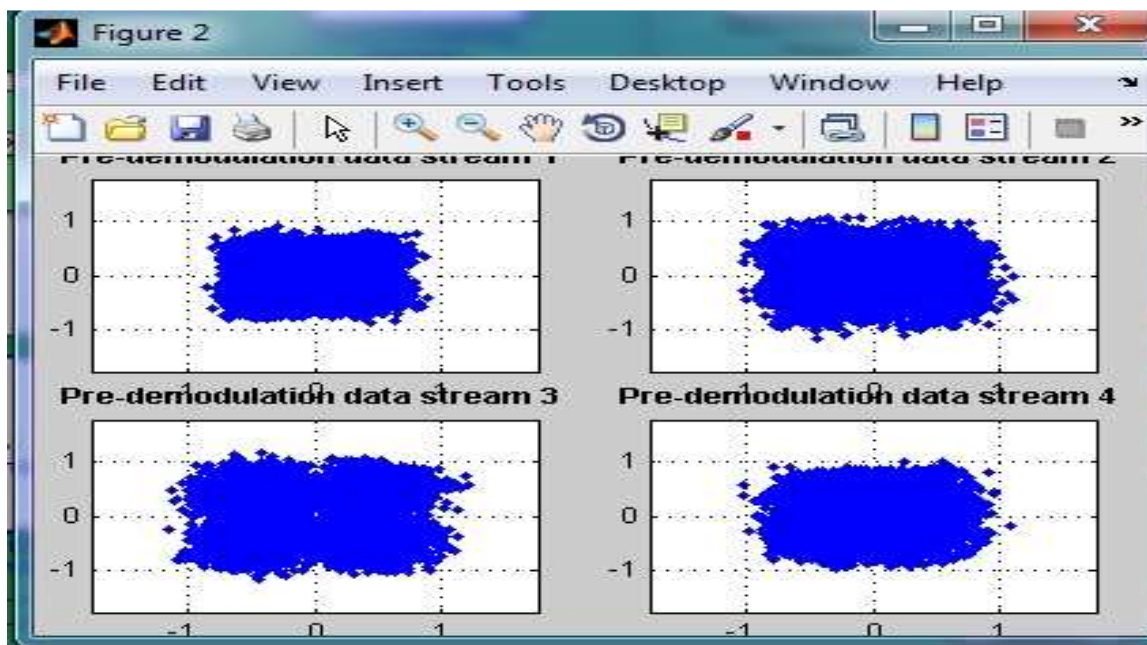


Figure 4.63

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Interprétation :

L'utilisation de la modulation QPSK nous donne de très bon résultats par exemple pour un SNR=18 le taux d'erreur est presque nulle 0.2% et 1% dans les deux sources la qualité du signal reçu est de même que celle du signal émis (figure 4.58), et on constat aussi dans la figure (4.60) que la séparation des points est vraiment parfaite.

L'utilisation d'un SNR=10 rend le système un peut moins fiable est c une chose normale puisque le SNR joue un rôle très important dans le système de transmission mais les résultats de cette simulation restent toujours acceptable puisque le taux d'erreur ne dépasse pas les 10% environs 5% pour la 1^{er} source et 7% pour la 2eme source.

On peut dire que la modulation QPSK marche très bien avec ce système de communication.

1-3 La 3^{eme} simulation : Bande passante 20Mhz

- Dans cette simulation on fixe
- 1) la bande passante a 20 MHZ
 - 2) type de modulation 16QAM
 - 3) fading chanel model = EPA 0Hz

Et on fait varie le SNR deux fois SNR=18 et SNR=10

1-3-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	108800	108800
Nombre de bits reçus	3251328	3251328
Nombre de bits erroné	302171	371102
Taux d'erreur	9%	11%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

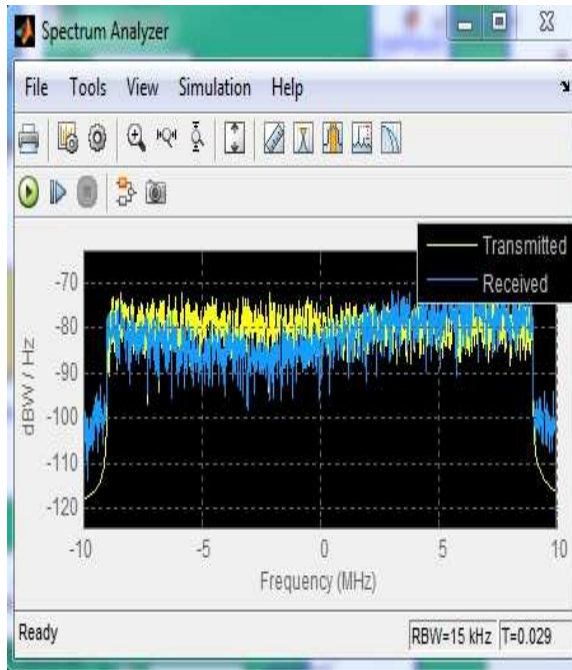


Figure 4.64

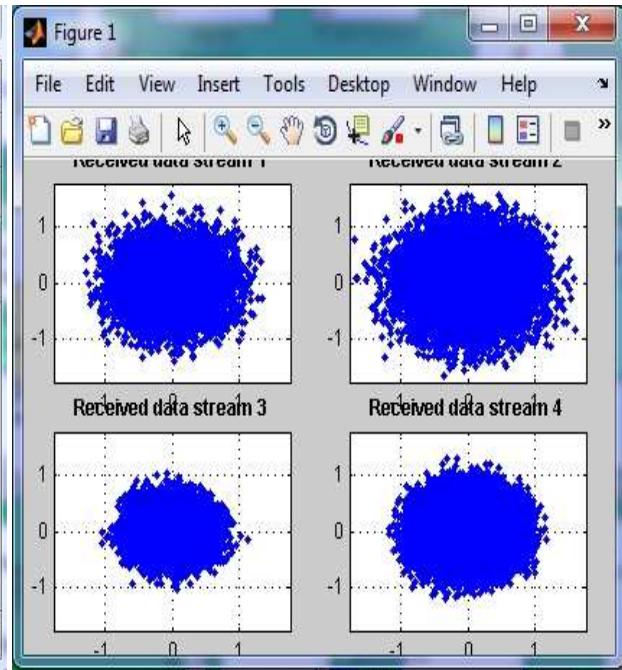


figure 4.65

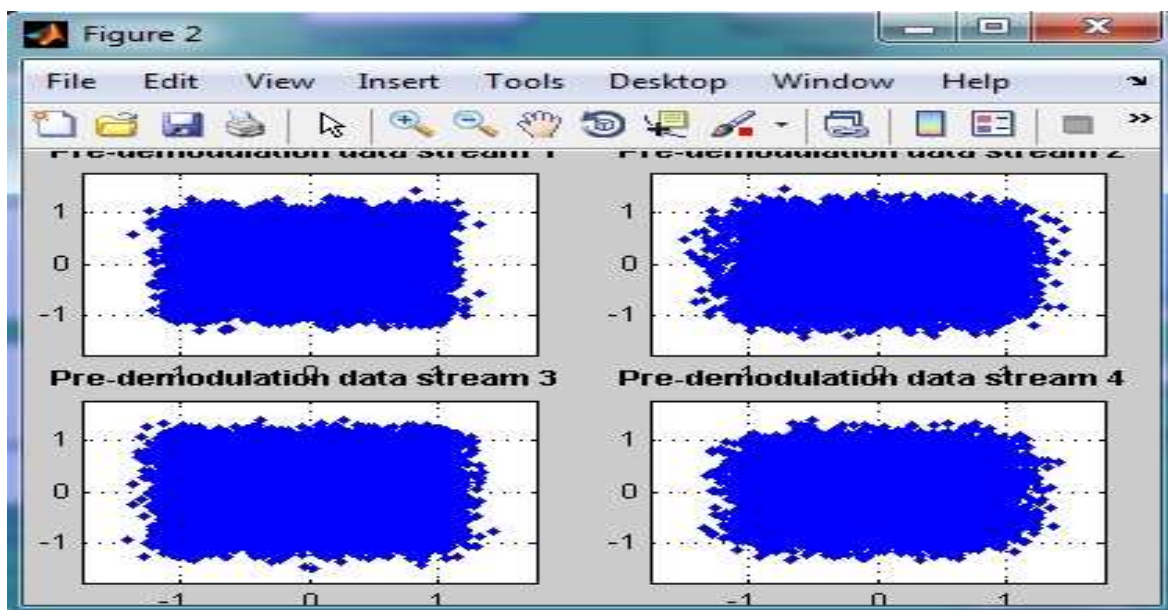


Figure 4.66

1-3-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	108800	108800
Nombre de bits reçus	3251328	3251328
Nombre de bits erroné	817495	762230
Taux d'erreur	25%	23%

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

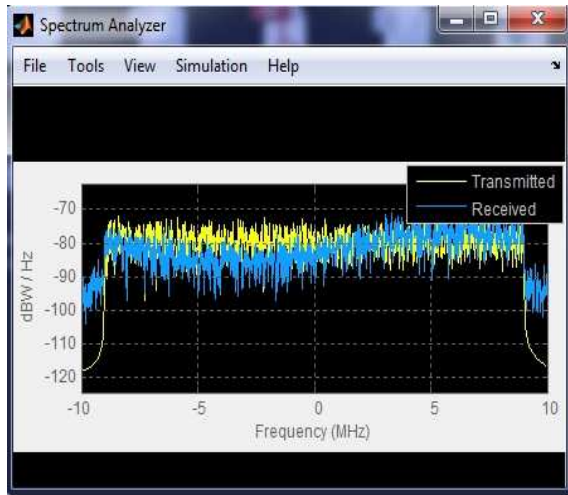


Figure 4.67

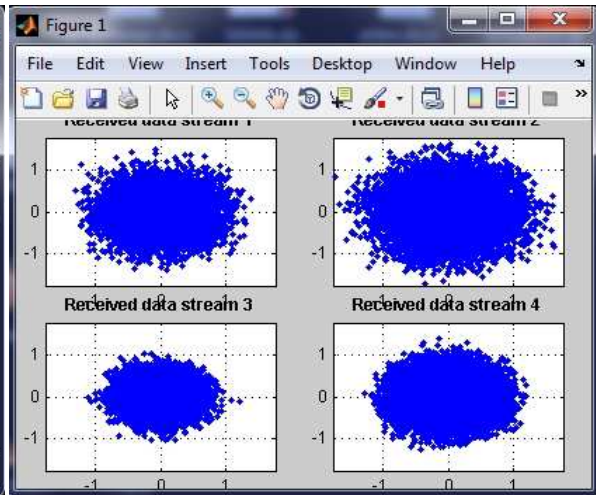


figure 4.68

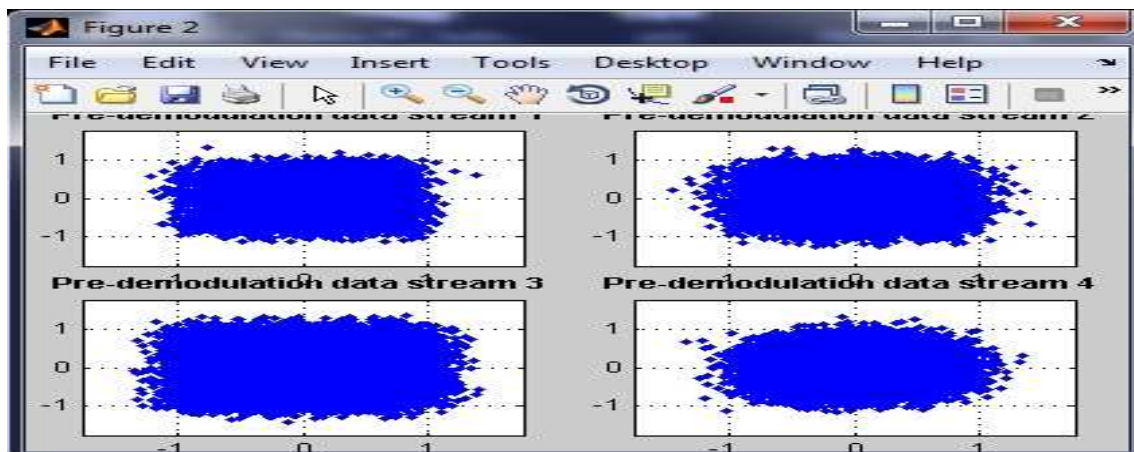


Figure 4.69

Interprétation

Dans cette simulation l'utilisation d'un SNR faible (SNR=18) nous donne de bon résultats, le taux d'erreur est pratiquement plus ou moins de 10%, 9% pour la 1^{er} source et 11% pour la 2eme source, la figure de constellation (4.66) nous montre des points qui sont chevauchés mais pratiquement ce sont des points séparables.

Par contre l'utilisation d'un SNR=10 nous a donné de mauvais résultats, d'où on peut dire que la largeur de la bande passante n'a aucun effet sur la qualité du signal, la largeur de la bande passante nous donne juste une bonne résolution spectrale elle n'a aucun effet sur la qualité du signal.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

4-3-2-2 La 2eme sous-partie

2-utilisation de la modulation OFDM avec 2 symboles par sous-trame

2-1 La 1er simulation: fading chanel model = EPA 5Hz

2-1-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	51200	51200
Nombre de bits reçus	1523328	1523328
Nombre de bits erroné	127041	59797
Taux d'erreur	8%	3%

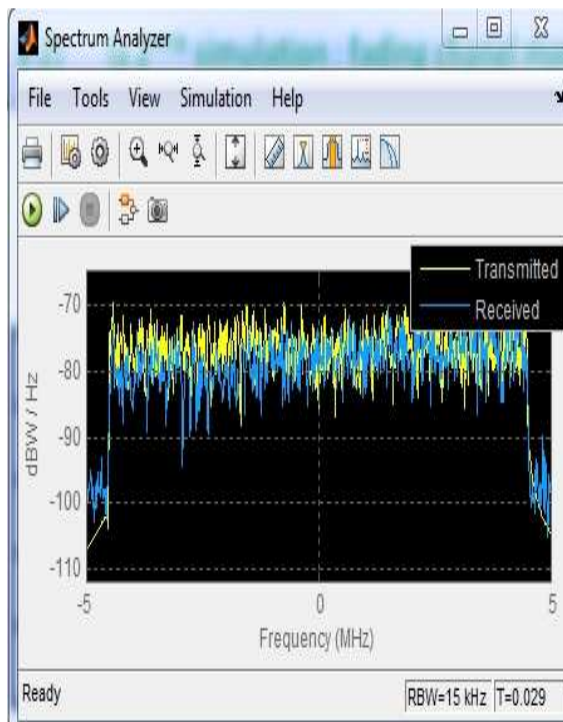


Figure 4.70

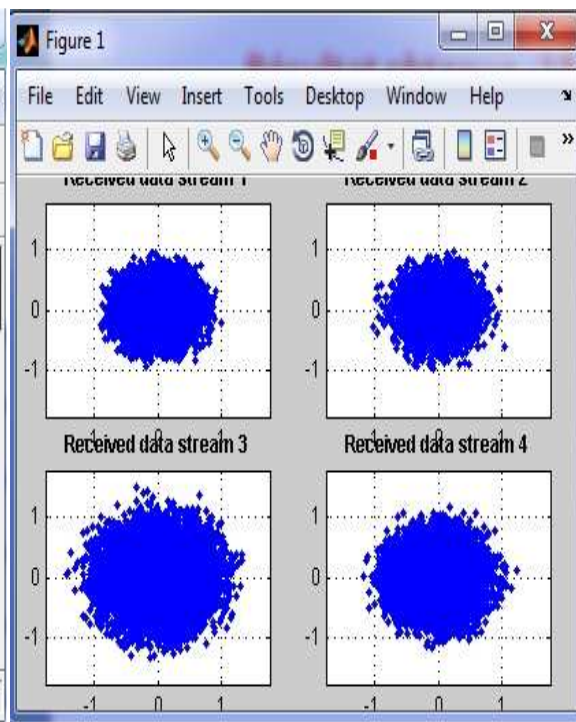


figure 4.71

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

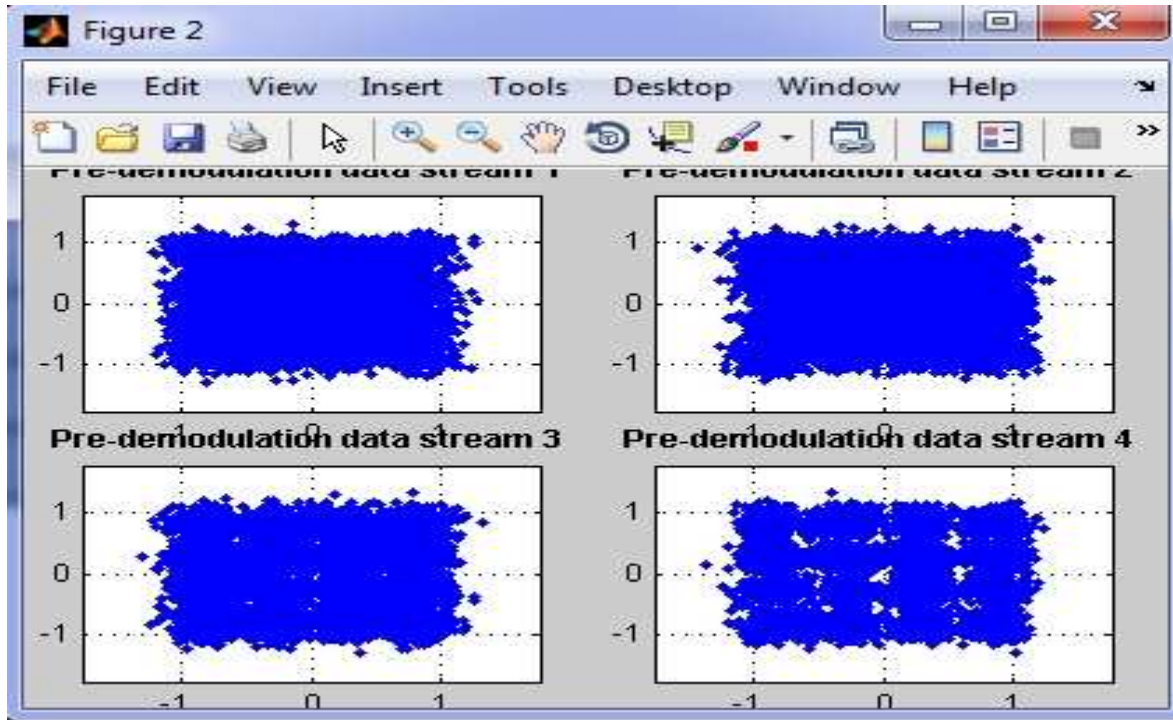


Figure 4.72

2-1-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	51200	51200
Nombre de bits reçus	1523328	1523328
Nombre de bits erroné	198768	89240
Taux d'erreur	26%	20%

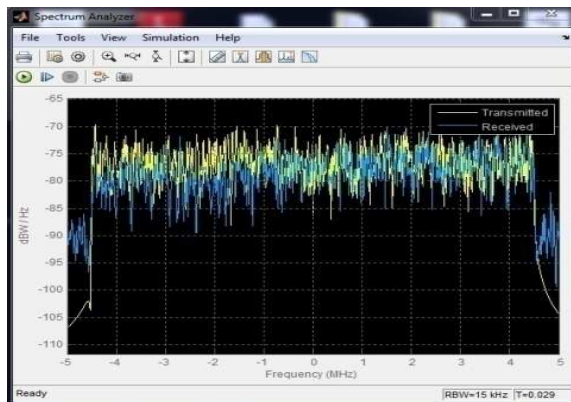


Figure 4.73

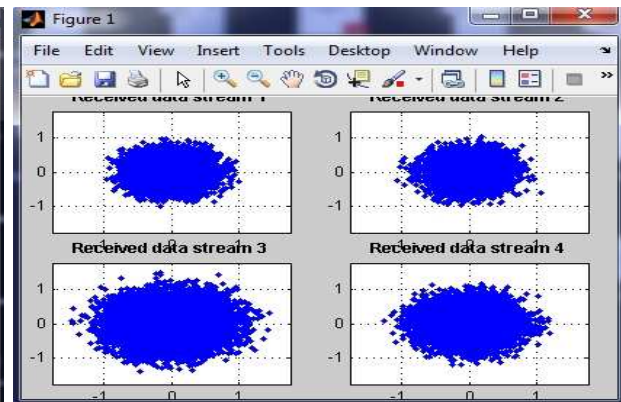


figure 4.74

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

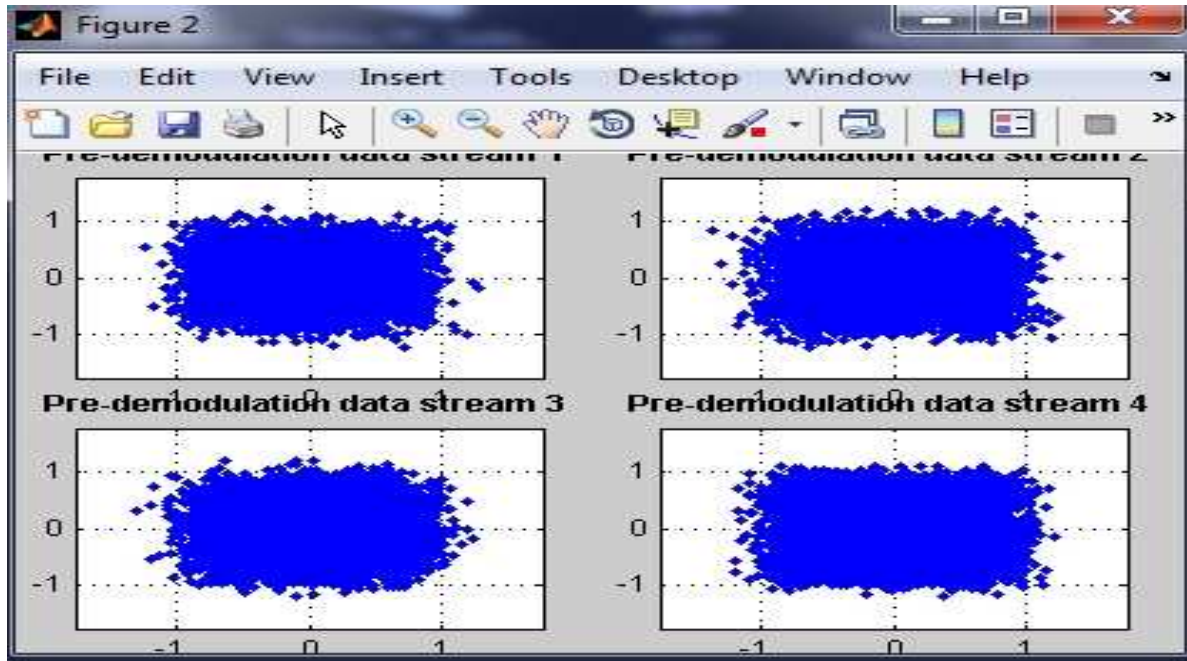


Figure 4.75

2-2 La 2^{eme} simulation : type de la modulation 64QAM-QPSK

2-2-1 Utilisation de la modulation 64QAM

2-2-1-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	76800	76800
Nombre de bits reçus	2284992	2284992
Nombre de bits erroné	420206	447236
Taux d'erreur	18%	19%

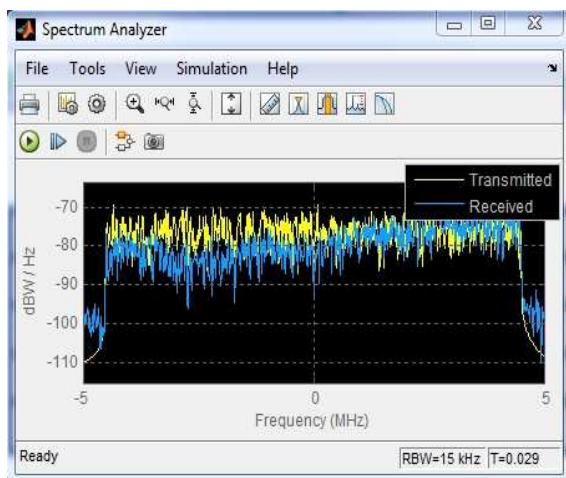


Figure 4.76

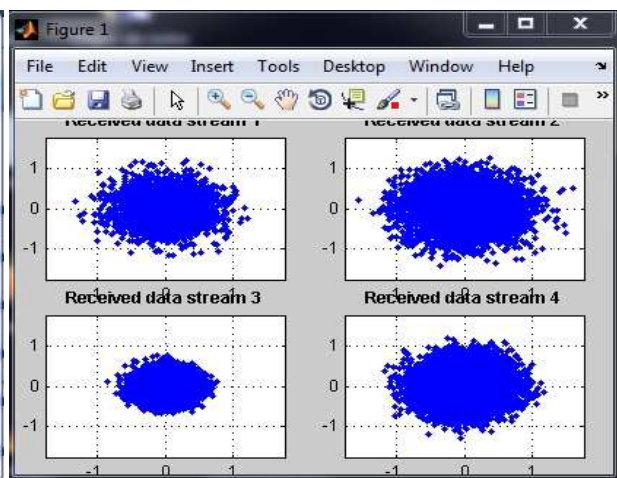


figure 4.77

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

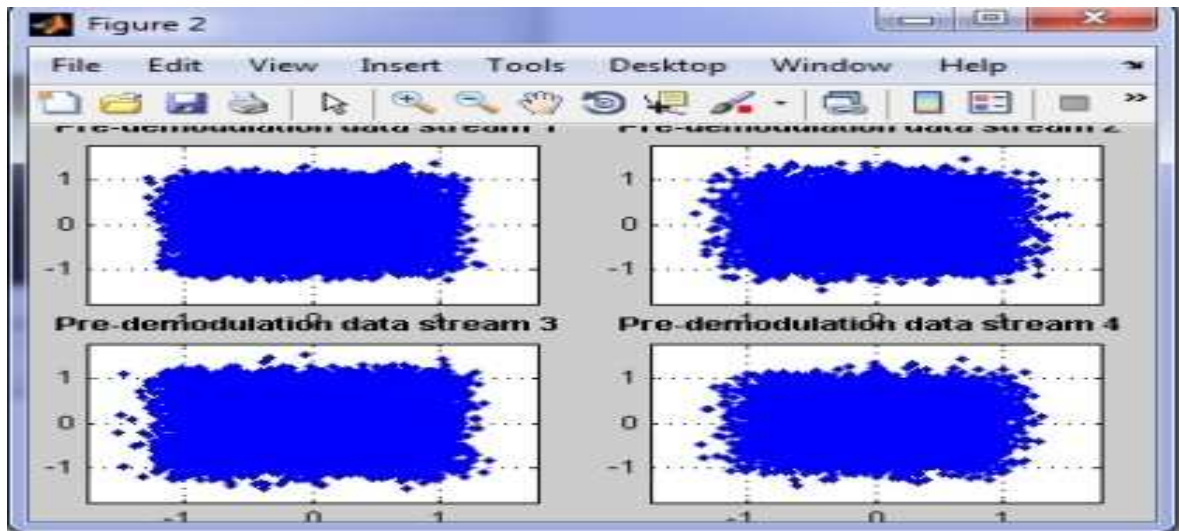


Figure 4.78

2-2-1-2 Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	76800	76800
Nombre de bit reçu	2284992	2284992
Nombre de bits erroné	794017	788742
Taux d'erreur	34%	32%

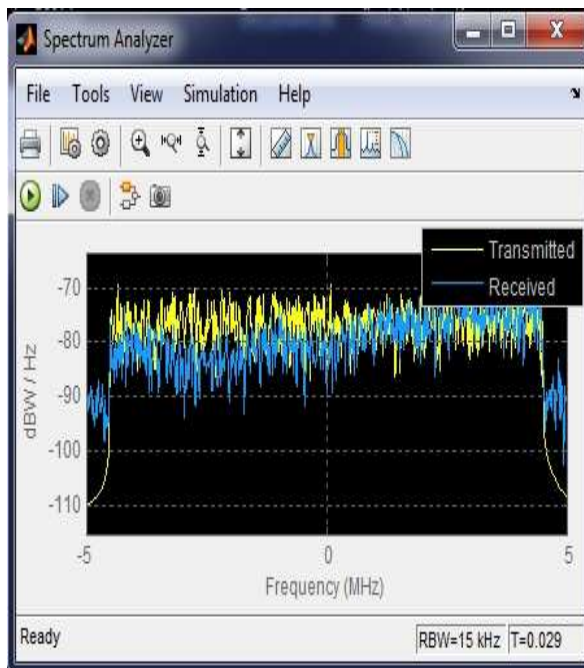


Figure 4.79

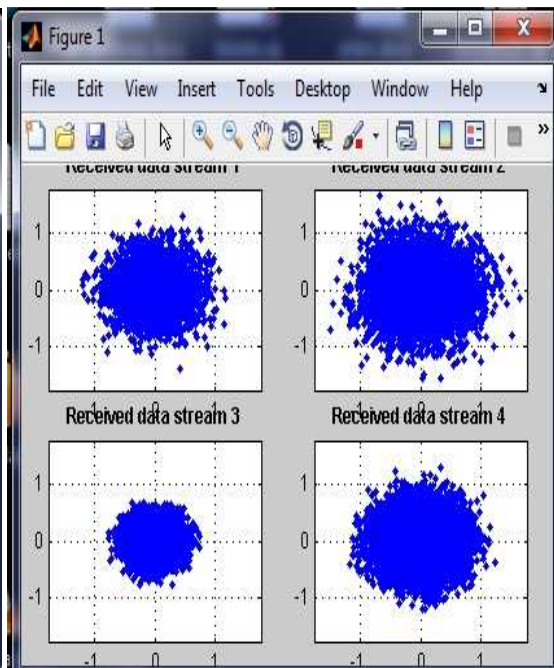


figure 4.80

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

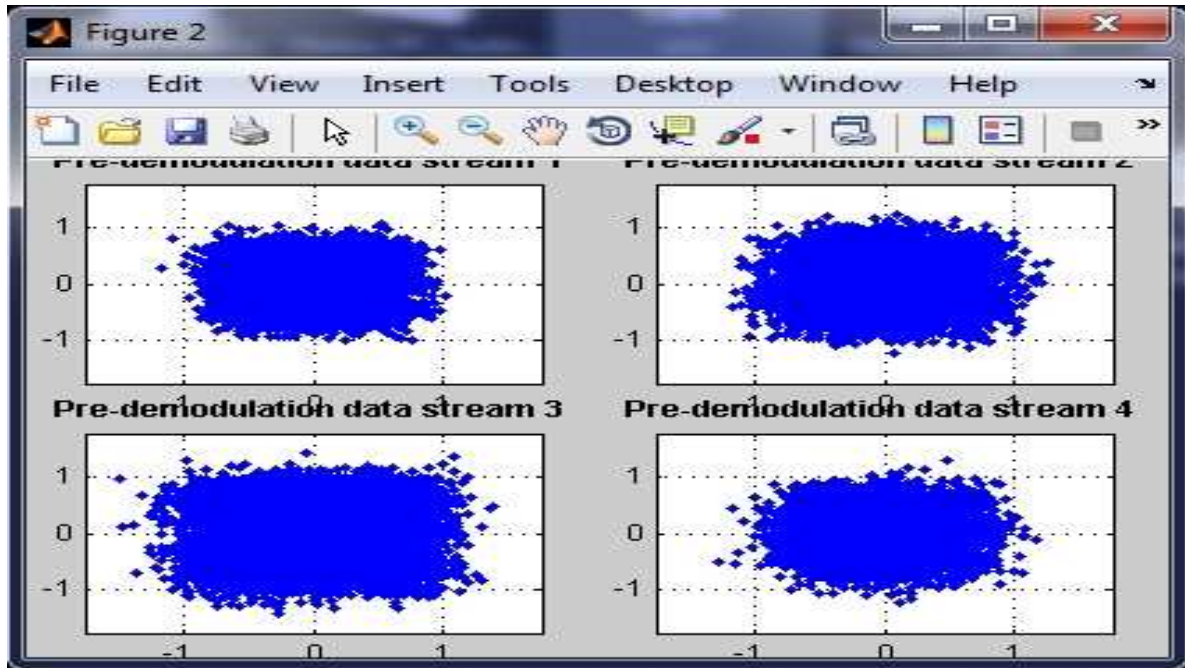


Figure 4.81

2-2-2 Utilisations de la modulation QPSK

2-2-2-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	25600	25600
Nombre de bits reçus	761664	761664
Nombre de bits erroné	1898	8545
Taux d'erreur	0.2%	1%

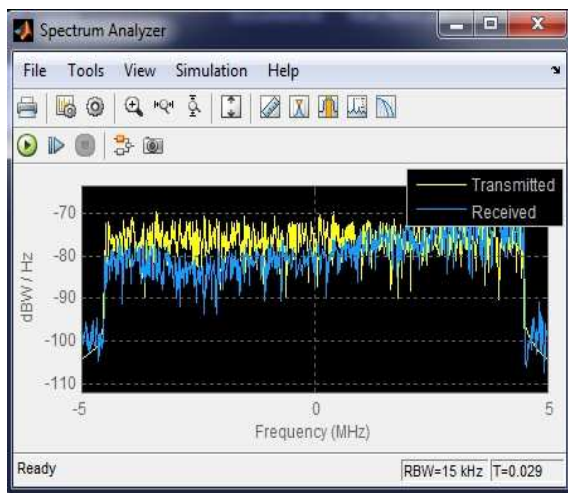


Figure 4.82

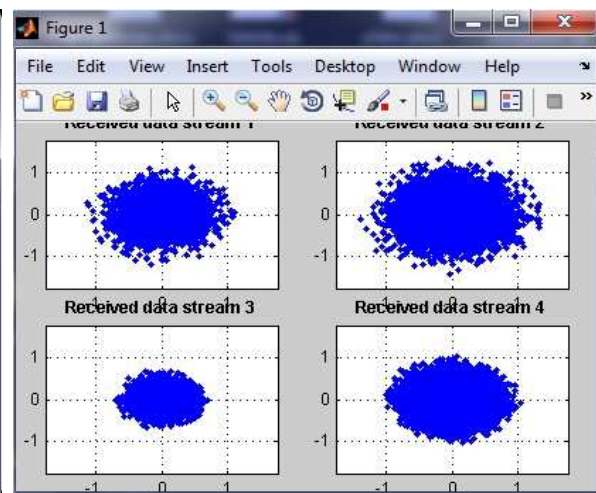


figure 4.83

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

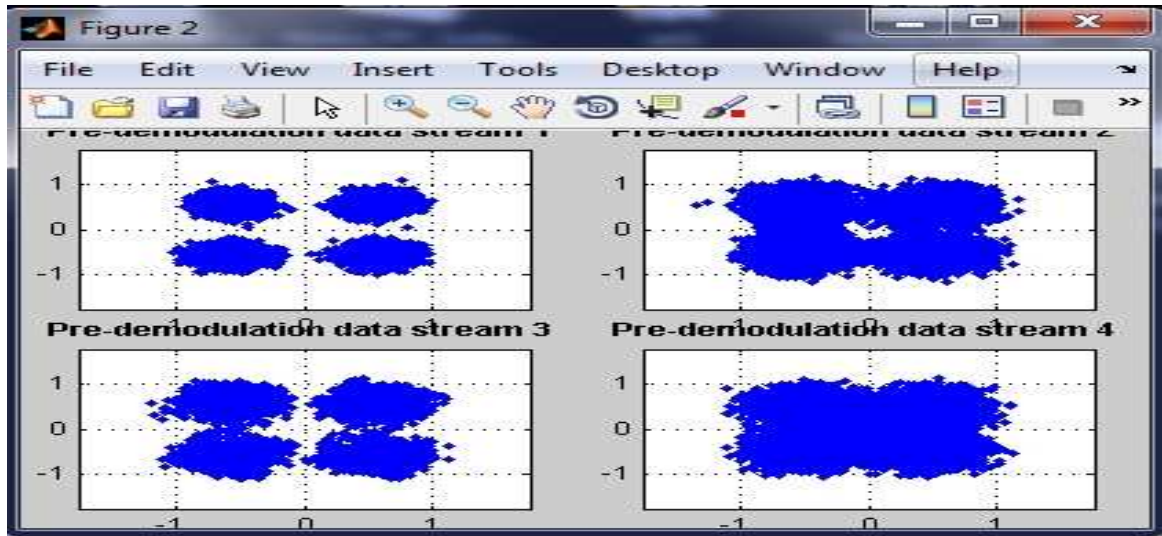


Figure 4.84

2-2-2- Résultat obtenue : SNR=10

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	25600	25600
Nombre de bits reçue	761664	761664
Nombre de bits erroné	42611	56202
Taux d'erreur	5%	7%

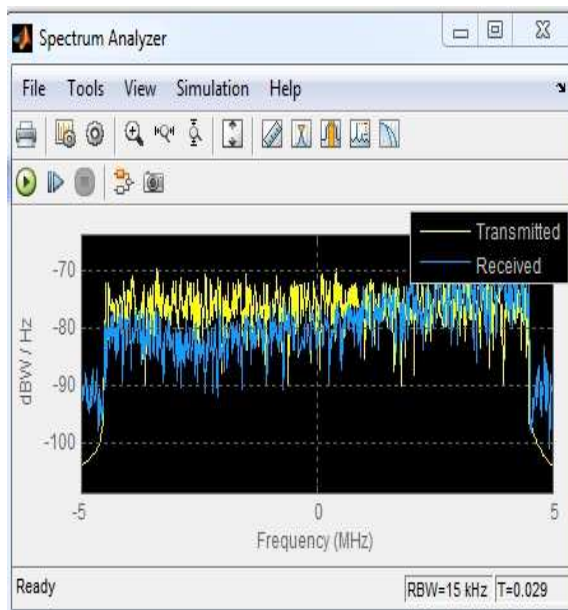


Figure 4.85

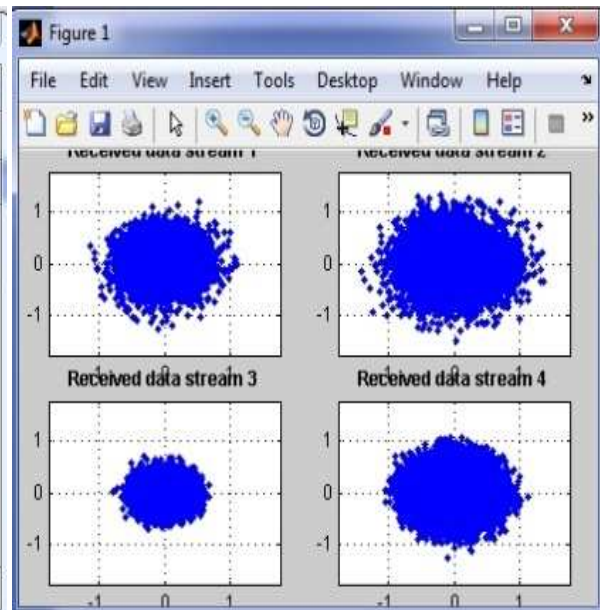


figure 4.86

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

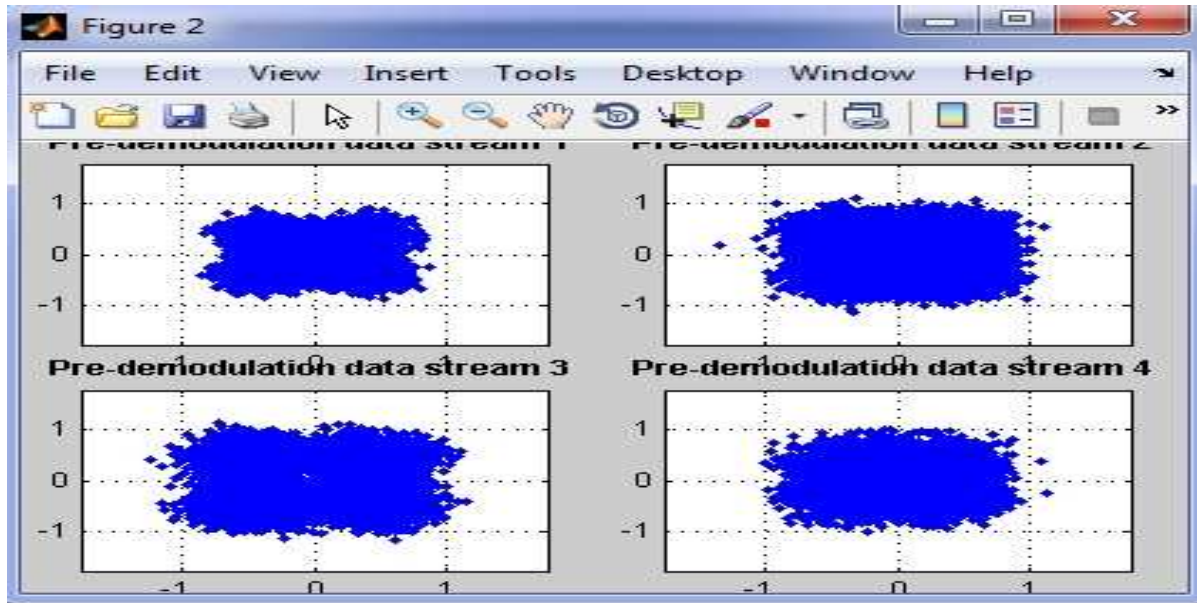


Figure 4.87

2-3 La 3^{eme} simulation : Bande passante 20 Mhz

2-3-1 Résultat obtenue : SNR=18

	Source 1	Source 2
Nombre de bits transmis	102400	102400
Nombre de bits reçus	3059328	3059328
Nombre de bits erroné	282484	344946
Taux d'erreur	9%	11%

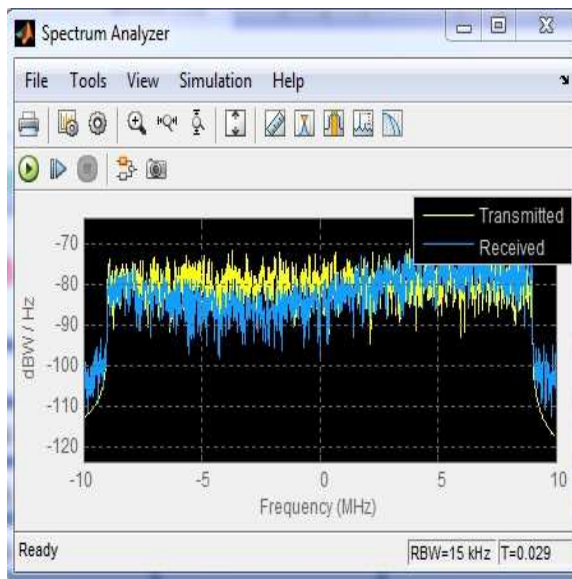


Figure 4.88

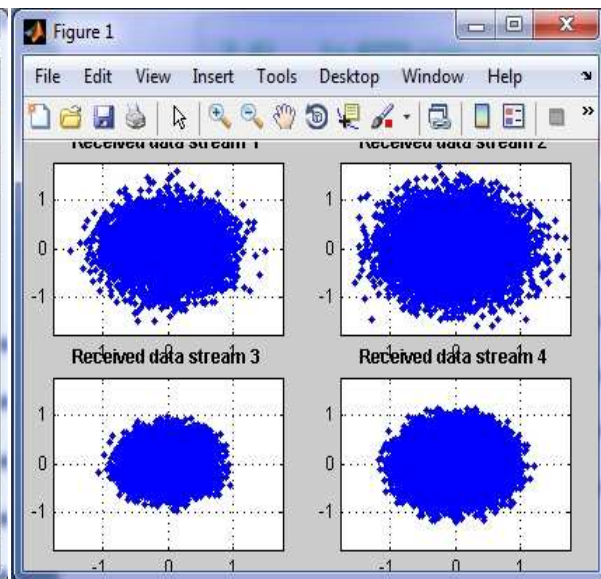


figure 4.89

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

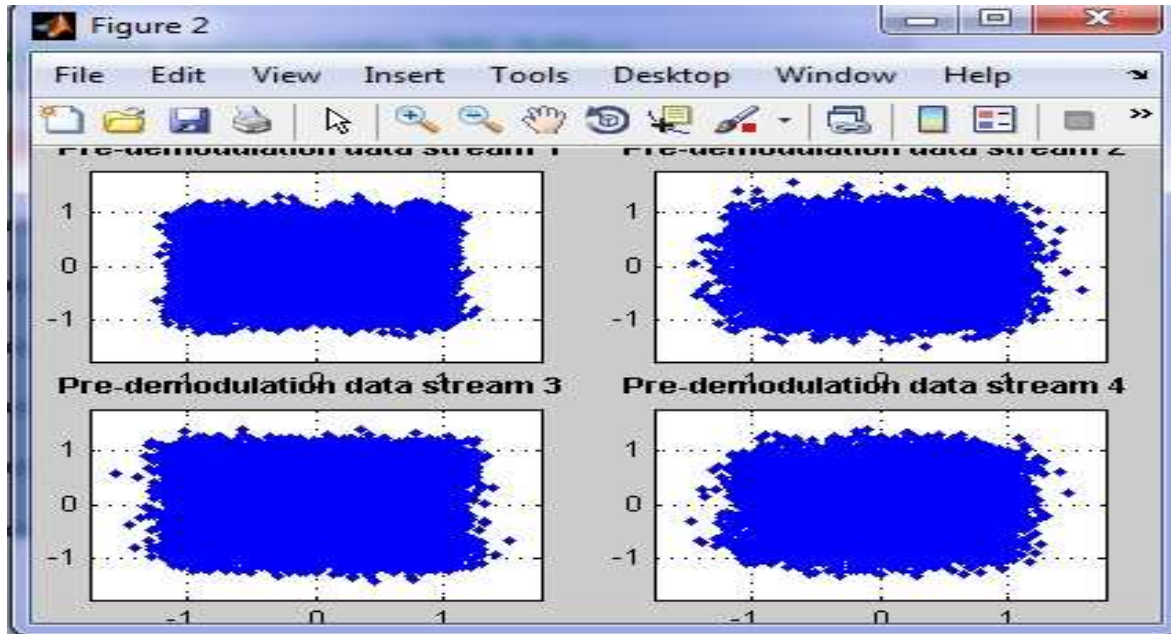


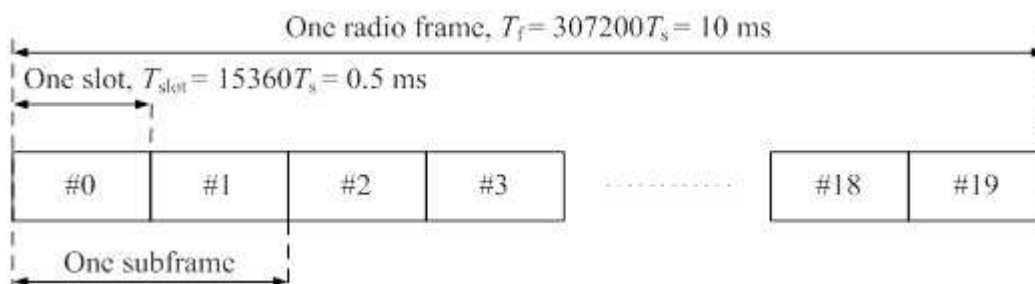
Figure 4.90

Dans cette 2eme sous partie on constate que tous nos résultats prélevé de différents simulation sont identique aux résultats prélevé dans la 1^{er} sous-partie

D'ou on peut dire que le nombre de symbole par sous-trame ne joue aucun rôle sur la transmission d'un signal.

Une trame de la 4G-LTE d'une duré de 10ms est subdivisée en sous-trames, chaque sous-trame peut avoir un symbole (slot) ou deux symboles (deux slots)

Comme indiqué dans la figure c contre



Donc on peut dire que dans cette deuxième simulation on a changé juste la taille de la sous-trame, et cette taille na aucun effet sur le taux d'erreur

Remarque : Matlabç nous permet aussi une simulation avec 3 symbole par sous-trame mais tjrs les résultats reste inchangé identique a la 1^{er} et la 2eme sous-partie de ce travail.

Chapitre IV : Simulation d'une transmission LTE/OFDM (4G) sous Matlab.

Conclusion :

Dans la 1^{er} et la 2eme partie on a constaté que la modulation QPSK fonctionne tres bien avec le MIMO 2*2. Le taux d'erreur est presque nul par rapport à l'autre modulation utilisé, et ce que on constate aussi avec l'utilisation d'un MIMO 4*4 la seule différence c'est que le taux d'erreur est plus élevé que MIMO 2*2 mais les résultats reste toujours acceptable L'utilisation dune modulation 16 QAM donne aussi des résultats acceptable mais pas meilleur que celle de QPSK.

La modulation 64 QAM est pratiquement rejeté car on a fait des simulations sur la liaison descendante cette liaison tolère juste deux type de modulation la 16 QAM et la QPSK.

Par contre la modulation 64 QAM est utilisable juste pour la liaison montante .

On a constaté encor que la modulation (16 QAM) est utilisable sauf dans la présence d'un **SNR>15** et un **EPA=0hz** (l'évanouissement presque nulle).

Par contre pour un SNR petit $SNR < 15$ la solution est d'utiliser une modulation QPSK

Donc on peut dire que le choix d'une modulation revient à l'étude des endroits ou on a placé nos antennes (les endroits qui présentent des perturbations pendant la transmission) et aussi le type de la liaison (montante ou descendante).

Conclusion :

Notre travail nous a permis de comprendre le fonctionnement de la technologie 4G LTE et d'évaluer ses performances en utilisant la partie Simulink de Matlab R2014(8.3.0.532).

Dans le premier temps, les caractéristiques des différentes générations de la téléphonie mobile ont été rappelées. Cela nous a menés à la présentation d'une des techniques de modulations multi porteuses (l'OFDM) permettant, d'un côté de lutter contre les évanouissements qu'entraînent un canal multi-trajets et, d'un autre côté d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes de communications. Toujours dans le contexte des techniques améliorant les performances, nous avons présenté la technique de transmission MIMO, qui permet d'augmenter la fiabilité de la transmission en utilisant les techniques de diversité, et d'augmenter la capacité des systèmes de communications en utilisant la technique de multiplexage spatial. Ensuite, nous avons présenté le système MIMO-OFDM qui permet d'exploiter encore mieux la diversité qu'offre le système MIMO.

Dans le deuxième temps, nous avons simulé à l'aide de Simulink MATLAB R2014a la liaison descendant downlink du standard 4G LTE avec le système MIMO-OFDM en utilisant la configuration MIMO2*2-OFDM et MIMO4*4 – OFDM dans le but de confirmer ce qu'on a vu dans la théorie. Ensuite, nous avons modifié les paramètres qui jouent un grand rôle dans la transmission qui utilise l'air comme un canal de transmission dans le but de constater le système le plus performant pour différentes configurations effectuées pour remédier au problème des multi-trajets.

Nous avons obtenu plusieurs résultats satisfaisants de ces simulations, à savoir

-Le système MIMO 2*2 -OFDM présente des performances meilleures (BER faible) comparées aux systèmes MIMO 4*4-OFDM pour les différentes configurations.

- La modulation qui offre des bons résultats c'est la modulation QPSK elle gère des signaux compatibles avec la modulation OFDM,
- La modulation 16 QAM offre des résultats bons mais juste à la présence d'un SNR petit, la présence des phénomènes d'évanouissement rend cette modulation inutilisable
- La modulation 64 QAM est rejetée carrément on peut dire que la liaison descendante ne tolère pas cette modulation elle est utilisable juste pour la liaison montante.

Perspectives :

-Notant aussi que notre travail traite juste une des chaînes de transmission utilisées dans le standard 4G LTE (la liaison descendante), et nous souhaitons qu'il soit amélioré par les promotions à venir car tout travail n'est pas parfait et la technologie ne cesse d'évoluer.

- il serait intéressant aussi que les operateurs qui utilisent la 4G LTE soulève la problématique lié a l'utilisation de la 4G et d'ouvrir les portes aux étudiants de faire des formations.

Bibliographie:

- [1] C. DEMOULIN, M. VAN DROOGENBROECK. Principes de base du fonctionnement du réseau GSM. Revue de l'AIM, pages 3?18, N04, 2004.
- [2] X. Lagrange, P. Godlewski, et S. Tabbane. Réseaux GSM-DCS. Hermès, troisième édition, 1997.
- [3] G. Heine. GSM networks : protocols, terminology, and implementation. Artech House, 1999.
- [4] J. Tisal. Le réseau GSM. L'évolution GPRS : une étape vers UMTS. Dunod, troisième édition, 1999.
- [5] 3GPP TS 23.002 V3.6.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and Systems Aspects; Network architecture (Release 4), Septembre 2002.
- [6] Heikki Kaaranen et al. "UMTS Networks : Architecture, Mobility and Services", Editions Wiley, 2001.
- [7] www.univsavoie.fr/enseignement/sfa/desstr/download/umts_interface_radio.pdf
- [8] www.univsavoie.fr/enseignement/sfa/desstr/download/umts_architecture.pdf
- [9] www.humanite.presse.fr/journal/19930427/19930427675815
- [10] : GHASSEN.A.A, MAHAMOD.I et KASMIRAN.J, "Modeling and Performance Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants", Académie mondiale des sciences, 2011.
- [11] : URDAREANU.A, « Réseau de 4ème Génération », Rapport bibliographique, Université de RENNES, 2007.
- [12] : SEIDE.G, « Planification d'un réseau de quatrième génération à Partir D'un Réseau De Troisième Génération », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées (génie informatique), Université de MONTREAL, 2011.
- [13] : YOES.H et ALWIS, « Evaluation des Performances Des Techniques D'Accès OFDMA et SC-FDMA Dans La Technologie LTE », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en télécommunication, Université de Tlemcen, 2012.
- [14] : « <http://sensitive-home.googlecode.com/svn/trunk/Documentation/modulation%20numerique%20QPSK.doc> », Date de consultation juin 2013.

[15] : « <http://www.wireless-techbook.com/blocs-de-systeme-de-liaison-montante-lte/213-1single-transporteur-fdma.html> », Date de consultation juin 2013

[16] : « <http://www.wireless-techbook.com/blocs-de-systeme-de-liaison-montante-lte/215-la-difference-entre-ofdma-et-sc-fdma.html> », Date de consultation juin 2013.

[17] : « <http://www.telecom-paristech.fr/formation-lte-long-term-evolution.html> », Date de consultation juin 2013.

[18] : « <http://www.urec.cnrs.fr/IMG/pdf/cours.sf.pdf> » , Date de consultation juin 2013.

[19] : « <http://www.commentcamarche.net/contents/wireless/wlintro.php3> », Date de consultation juin 2013.

[20] : « [http://wapiti.telecom-lille1.eu/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2002ttnfa03/NatchiaKoua o-Benlahcen/index.htm](http://wapiti.telecom-lille1.eu/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2002ttnfa03/NatchiaKoua%20Benlahcen/index.htm) », Date de consultation juin 2013.

[21] : COUZINET.H, NANFACK.J et NJOUDJI.R, « Analyse et suivi de la QoS dans le système LTE », Rapport de Stage, Université Telecom Bretagne, 2009.

[22]. J. P. Castro, *The UMTS Network and Radio Access Technology*, John Wiley & Sons, 2001

[23]. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Elsevier, 2007*20+ M.Lindström, *LTE-Advanced Radio Layer 2 and RRC aspects*, 3GPP TSG-RAN WG2

[24] : **Olivier BERDBER**, “Optimisation et stratégies d’allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes”, Université de Bretagne Occidentale, 20 Décembre 2002.

[25] : **Adrien Renault**, “Analyse des performances d’un système multi- utilisateurs OFDM codé sans accès orthogonal”, Université de Cergy-Pontoise, 1 décembre 2005

[26] **Lang, S.; Rao R.; Daneshrad, B** "Design and development of a 5.25 GHz software defined wireless OFDM communication platform," IEEE Commun. Mag.,

vol. 42, no. 6, pp. 6-12, June 2004

[27] : **A.B. Ben Jemâa**, « etude comparative des estimators du canal WSSUS en standard DVB-T », rapport de mémoire de master, Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis, 2004.

[28] : **Jean-Louis GUILHEM** et **Jean-Claude REBEYROLE**, “La pratique de la transformée de Fourier rapide”, Vol.98, Mai 2004

[29] : **Jonathan Duplicy**, “Étude d'un réseau WLAN à base de MIMO-OFDM et de beamforming adaptatif conjoint”, Université de Louvain, Juin 2003.

[30] : **Youssef ACHOURI**, “Implémentation efficace de la FFT pour des communications OFDM”, Université du QUÉBEC à TROIS-RIVIERES, Décembre 2010.

[31] : **Patrice KADIONIK**, “BASES DE TRANSMISSIONS NUMERIQUES Les modulations numériques”, Ecole Nationale supérieure Electronique, Informatique & Radiocommunications, Bordeaux, 2000.

[32] : **Andreas F. Molisch**, “Wireless communications”, deuxième édition, Wiley, G Bretagne, 2011

[33] **Samuel C. K. Ko and Ross D. Murch**, "Compact integrated diversity antennas for wireless communications", IEEE Antennas and Propagation, Vol. 49, No. 6, June 2001.

[34] **Plicanic V.**, “Antenna Diversity Studies and Evaluation” Master of science Thesis, Lund University Sweden May 2004,

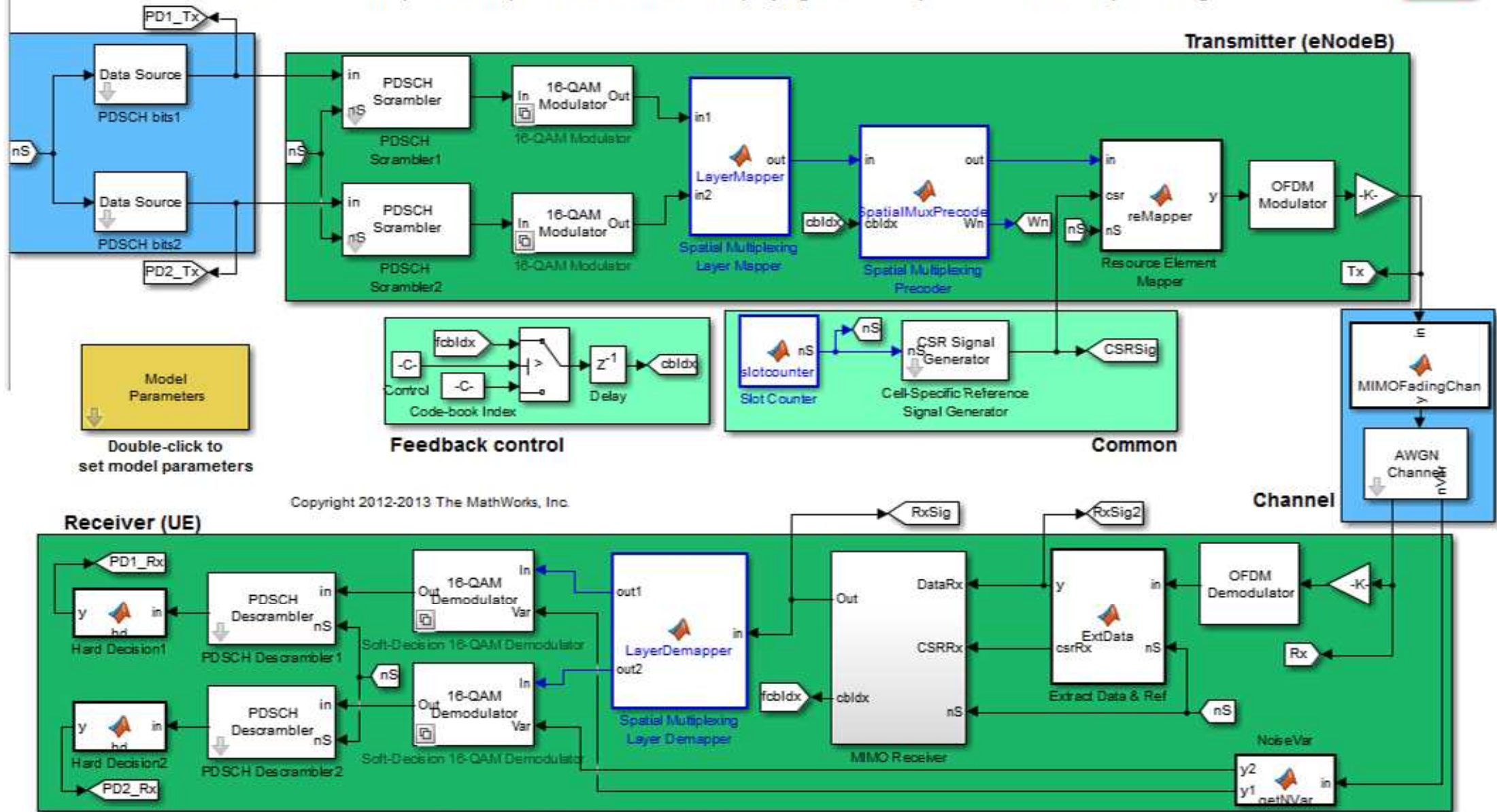
[35] **Samuel C. K. Ko and Ross D. Murch**, "Compact integrated diversity antennas for wireless communications", IEEE Antennas and Propagation, Vol. 49, No. 6, June 2001

[36] **Samuel C. K. Ko and Ross D. Murch**, "Compact integrated diversity antennas for wireless communications", IEEE Antennas and Propagation, Vol. 49, No. 6, June 2001

LTE Downlink Physical Channel (PDSCH) Processing

Info

Multi-codeword spatial-multiplexed transmission employing closed-loop codebook-based precoding



Copyright 2012-2013 The MathWorks, Inc.

Model Parameters
Double-click to set model parameters

Feedback control

Common

Channel

Receiver (UE)

CW#1

CW#2

PDSCH Bit Error Rate

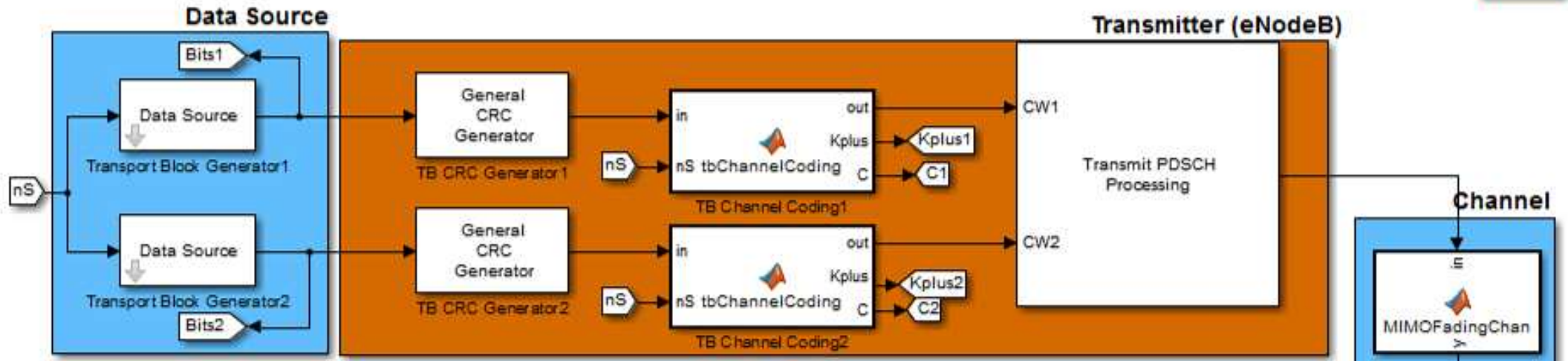
Visualization



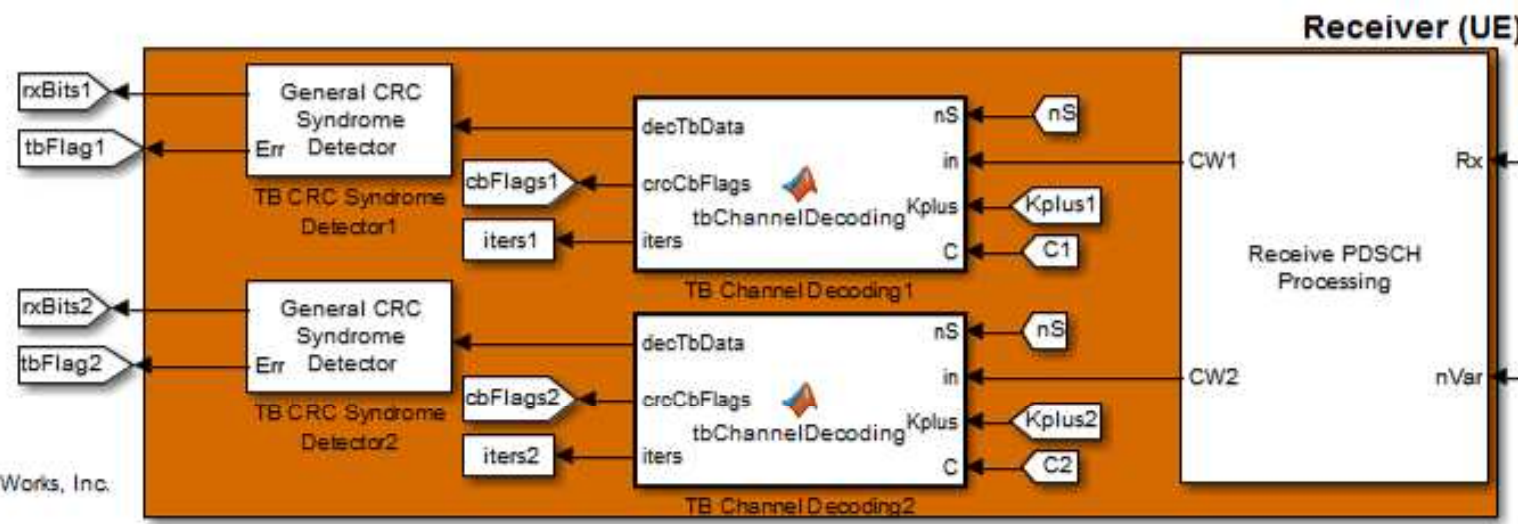
LTE PHY Downlink with Spatial Multiplexing

Info

Multi-codeword spatial-multiplexed transmission employing closed-loop codebook-based precoding



Model Parameters
 Double-click to set model parameters



Copyright 2012-2013 The MathWorks, Inc.

Visualization

<p>Double-click to close/open</p> <p>Post-OFDM Rx Scatter Plots</p>	<p>Double-click to close/open</p> <p>Pre-Demodulation Scatter Plots</p>	<p>Tx and Rx Spectrum</p> <p>Spectrum</p>	<p>cbIdx</p> <p>CodeBook Index</p>	<p>Mbps</p> <p>Max. Rate /CW (Mbps)</p>	<p>ErrorRates</p> <p>Error meters</p>	<p>BLER CBER PBER</p> <p>Error Rates Display</p>	<p>CW#1</p> <p>CW#2</p>
---	---	---	------------------------------------	---	---------------------------------------	--	-------------------------