

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté par
Hamani Othmane
Bekouche Lotfi

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Télécommunications
Option : Réseaux et Télécommunications

Thème

*Modélisation et simulation des performances de
réseaux 4G /LTE*

Soutenu en public en date du : 22 /11/2020

Devant le jury :

Mr A.KHIERREDINE

Mme BENDJELLOUL

Encadreur :

Mr M.TOUNSI

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé santé, volonté, courage et patience tout le long de notre parcours.

Nous tenons à remercier Mr M.TOUNSI pour son encadrement, pour sa disponibilité, ses orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Merci à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Mes frères et sœurs,

*Tous mes amis, en particuliers Bounnif Lakhthar (hp), Syphax el akh,
Brahim, Jonas, Yacine l'ancien.*

ATHMANE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

*Mes très chers parents, pour leurs soutient moral et financier en leurs
espérant une longue vie et que Dieu les garde.*

Je dédie aussi ce travail à mes sœurs et frères

Et à tous mes amis.

LOTFI

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I. Généralités sur les systèmes LTE	
I.1. Introduction	3
I.2. L'évolution des réseaux mobiles	3
I.3. La technologie LTE (4G).....	5
I.3.1. Exigences LTE	5
I.3.2. Architecture du système LTE	6
I.3.2.1. Équipement Utilisateur (UE)	6
I.3.2.2. Réseau cœur 4G/LTE (EPC)	6
I.3.2.3. L'E-UTRAN	8
I.3.2.4. Les Interfaces	8
I.3.3. Les caractéristiques fondamentales de réseau 4G	9
I.3.3.1. La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés	9
I.3.3.2. Les débits	9
I.3.3.3. La latence	9
I.3.3.4. L'agilité en fréquence	10
I.3.3.5. La mobilité	10
I.3.3.6. Codage et sécurité	10
I.3.3.7. Duplexage	10
I.3.3.8. Les types de transmission utilisée dans la 4G	10
I.3.4. OFDM	11
I.3.5. Chaîne de transmission OFDM	12
I.3.6. SC-FDMA	14

I.3.7.	La structure des trames en LTE	15
I.3.7.1.	Structure de type 1: FDD	16
I.3.7.2.	Structure de type 2 : TDD	16
I.4.	Conclusion	17

Chapitre II. Interface radio LTE

II.1.	Introduction	18
II.2.	Interface radio LTE	18
II.3.	Bandes de fréquences	18
II.4.	Allocation de bande passante	19
II.5.	Cadrage temporel	19
II.6.	Représentation temps-fréquence	20
II.7.	Transmission multi-porteuse OFDM	21
II.7.1.	Préfixe cyclique	22
II.7.2.	Autres paramètres OFDM	23
II.7.3.	Opérations typiques du récepteur	23
II.8.	Multiplexage par répartition de fréquence à porteuse unique	24
II.9.	Contenu de la grille de ressources	24
II.10.	Canaux physiques	25
II.10.1.	Canaux physiques de liaison descendante	26
II.10.2.	Fonction des canaux de liaison descendante	27
II.10.3.	Canaux physiques de liaison montante	29
II.10.4.	Fonction des canaux de liaison montante	29
II.11.	Signaux physiques	30
II.11.1.	Signaux de référence	30

II.11.1.1.	Signaux de référence de liaison descendante	31
II.11.1.2.	Signaux de référence de liaison montante	31
II.11.2.	Signaux de synchronisation	32
II.12.	Structures de trame de liaison descendante	32
II.13.	Structure de trame de liaison montante	33
II.14.	MIMO	33
II.14.1.	Diversité de réception	33
II.14.2.	Diversité de transmission	34
II.14.3.	Multiplexage spatial	35
II.14.4.	Formation de faisceaux	35
II.14.5.	Diversité des délais cycliques	36
II.14.6.	Modes MIMO	36
II.15.	Traitement PHY	37
II.15.1.	Traitement de la liaison descendante	38
II.15.2.	Traitement de la liaison montante	39
II.16.	Conclusion	40

Chapitre III. Modélisation Simulink de la chaîne de transmission LTE

III.1.	Introduction	41
III.2.	Modélisation d'une chaîne de transmission LTE	41
III.2.1.	Modèle Simulink de la chaîne d'émission LTE	43
III.2.2.	Modèle de Canal de transmission	49
III.2.3.	Modèle Simulink de la chaîne de réception	51
III.3.	Simulations du modèle Simulink	57
III.3.1.	Spectre du signal	57

III.3.2.	Constellations des symboles QAM	58
III.3.3.	Estimation du BER	60
III.4.	Conclusion	60
Chapitre IV. Simulation Matlab de systèmes LTE		
IV.1.	Introduction	61
IV.2.	Traitements de la couche physique LTE	61
IV.3.	Simulation de la transmission DL en Mode 1	62
IV.3.1.	Vérification des performances de l'émetteur-récepteur (cas SISO)	62
IV.3.1.1.	Comparaison des constellations de symboles (cas SISO)	63
IV.3.1.2.	Comparaison des densités spectrales de puissance (cas SISO)	65
IV.3.1.3.	Mesures de BER et de débits	67
IV.3.2.	Vérification des performances de l'émetteur-récepteur (cas SIMO)	69
IV.3.2.1.	Comparaison des constellations de symboles (cas SIMO)	69
IV.3.2.2.	Comparaison des densités spectrales de puissance (cas SIMO)	70
IV.3.2.3.	Mesures du BER et du débit	71
IV.4.	Simulation de la transmission DL en Mode 4	72
IV.4.1.	Comparaison des constellations de symboles (cas MIMO)	73
IV.4.2.	Comparaison des densités spectrales de puissance (cas MIMO)	74
IV.5.	Conclusion	76
Conclusion générale		77

Nomenclature

Equations

(2,1)	équation de sous-porteuse
(2,2)	équation de La sortie modulée OFDM
(2,3)	équation de la représentation en temps discret du modulateur OFDM

Symboles

BW	Bande passante totale
N	Nombre de sous-porteuses
Δf	Espacement des sous-porteuses
f_k	sous-porteuse
a_k	symbole modulé
F_s	fréquence d'échantillonnage de canal
T_s	Temps d'échantillonnage de canal

Liste des Abréviations et Acronymes

Chapitre I

LTE	Long Term Evolution
1G	1ère Génération
2G	2ème Génération
3G	3ème Génération
4G	4ème Génération
3GPP	3rd Generation Partnership Project
UMTS	Universal Mobile Terrestrial System
IP	Internet Protocol
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HSPA+	High Speed Packet Access Evolution
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
E-UTRAN	evolved UTRAN
EPC	Evolved Packet Core
Wifi	Wireless Fidelity
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
UE	équipement utilisateur
PHY	Couche physique

MAC	Medium Access Control
RLC	Radio Link Control
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
NAS	Non Access Stratum
RRC	Radio Resource Control
SAE	System Architecture Evolution
MME	Mobility Management Entity
Serving GW	Serving Gateway
UPE	User Plane Entity
P-GW	PacketData Network Gateway
IASA	Inter-Access System Anchor
HSS	Home Subscriber Server
HLR	Home Location Register
PCRF	Policy & Charging Rules Function
ePDG	Evolved Packet Data Gateway
WLAN	Worldwide Local Area Network
RRM	Radio Ressource Management
CAC	Call Admission Control
WCDMA	Wide Coding Division Multiple Access
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
MIMO	Multi Input Multi Output
FDD	Frequency Division Duplexing
TDD	Time Division Duplexing
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
OFDM	Orthogonal Frequency division Modulation
FDM	Frequency Division Multiplexing
ICI	Inter-Carrier Interference
CP	Cyclic Prefix
SISO	Single Input Single Output
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
PSK	Phase Shift Keying
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
GP	Guard period
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
IDATE	Institut De L'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe
SIM	Sucrber Identity Module

Chapitre II

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
SC-FDM	Single-Carrier Frequency Division Multiplexing
ITU	International Telecommunications Union
IMT	International Mobile Telecommunication
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Services
MBSFN	Multimedia Broadcast Single-Frequency Network
CSR	cell-specific reference
DFTS-OFDM Multiplexing)	Discrete Fourier Transform-Spread Orthogonal Frequency Division
3GPP	Third Generation Partnership Project
MAC	Medium Access Control
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
RLC	radio link control
DL-SCH	Downlink Shared Channel
UL-SCH	Uplink Shared Channel
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
DCI	downlink control information
UCI	uplink control information
PMCH	Physical Multicast Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PHICH	Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PBCH	Physical Broadcast Channel
CFI	Control Format Information
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
UCI	Uplink Control Information
SR	Scheduling requests
PMI	Precoding Matrix Information

RI	Rank Indication
CQI	Channel Quality Indicator
CSI	Channel State Information
DM-RS	Demodulation Reference Signal
CSI-RS	Channel-State Information Reference Signal
SRS	Sounding Reference Signal
PSS	Primary Synchronization Signal
SSS	Secondary Synchronization Signal
SIMO	Single Input Multiple Output
MRC	Maximum-Ratio Combining
SNR	Signal-to-Noise Ratio
STBC	Space–Time Block Coding
SFBC	Space–Frequency Block Coding
FSTD	Frequency-Switched Transmit Diversity
SU-MIMO	Single-User Multiple Input Multiple Output
MU-MIMO	Multiple -User Multiple Input Multiple Output
CDD	Cyclic Delay Diversity
CRC	Cyclic Redundancy Check
UIT	Union internationale des télécommunications

Durant ces dernières années, les opérateurs de télécommunication à travers le monde, ont vu une croissance exponentielle d'abonnés mobiles. En même temps, le volume du trafic par abonné a été aussi en augmentation rapide ; particulièrement, avec l'introduction de plus en plus de dispositifs mobiles plus avancés et des services en temps réel tel que les services multimédias. L'introduction de ces nouveaux services tels que l'accès rapide à internet, la visioconférence, la vidéo en streaming, le commerce électronique a attiré l'attention sur le problème de limitation de la capacité ainsi que la dégradation de la QoS offerte aux utilisateurs.

En réponse à ces limitations, le groupe spécial 3GPP a introduit le LTE, déployé dans un premier temps en Europe, aux USA, puis à travers le monde. Aujourd'hui, le réseau 4G est la technologie la plus utilisée dans le monde et cela grâce à ses spécifications techniques qui le différencient des anciennes générations, dont l'utilisation de l'accès multiple en fréquences orthogonales (OFDMA), le Turbo codage, ainsi que des techniques antennaires avancées telles que la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Pour cela, nous avons choisi d'étudier cette technologie afin de comprendre les techniques qui font d'elle une technologie très performante. Nous nous sommes orientées vers la modélisation et simulation sous Simulink et Matlab de la chaîne de transmission de divers systèmes LTE : SISO (Sigle Input Single Output), SIMO (Sigle Input Multiple Output), MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Notre travail est organisé comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques générales des réseaux 4G/LTE ;
- Le deuxième chapitre décrit les caractéristiques l'interface radio LTE. Nous y décrivons les différents traitements effectués sur la liaison descendante pour nos besoins de simulation dans les chapitres suivants ;
- Le troisième chapitre donne une modélisation sous Simulink d'une chaîne de transmission LTE complète avec une évaluation de ses performances ;

Introduction Générale

- Dans le dernier chapitre, nous donnons une modélisation sous Matlab de la même couche physique pour divers systèmes LTE/SISO, LTE/SIMO et LTE/MIMO avec une évaluation de leurs performances.
- Nous terminons par une conclusion générale suivie des références bibliographiques utilisées.

I.1 Introduction

Nous vivons à l'ère de la révolution des données mobiles. Avec l'expansion sur le marché des Smartphones, tablettes et ordinateurs portables, les utilisateurs exigent des services et des applications de systèmes de communication mobiles qui vont bien au-delà de la simple voix et de la téléphonie. La croissance des services et applications mobiles à haute intensité de données telles que la navigation sur le Web, les réseaux sociaux et la diffusion de musique et de vidéo est devenue un moteur du développement de la prochaine génération de normes sans fil. En conséquence, de nouvelles normes sont en cours d'élaboration pour fournir les débits de données et la capacité réseaux nécessaires pour prendre en charge la distribution mondiale de ces types d'applications multimédias riches. LTE (Long Term Evolution) et LTE-Advanced ont été développés pour répondre aux exigences de cette ère et pour atteindre l'objectif de réaliser des communications mobiles à large bande à l'échelle mondiale [1].

L'idée d'une nouvelle technologie mobile, plus performante que la 3G et ses évolutions, a vu le jour au milieu des années 2000, au sein du groupe 3GPP, l'organisme de normalisation des systèmes mobiles 3G UMTS. Poussé par les opérateurs qui pressentaient le besoin à venir d'un système mobile conçu autour des services de donnée très haut débits, avec plus de capacité plus de vitesse, plus facile à déployer et exploiter, le groupe 3GPP a commencé des études sur ce qui a alors été appelé LTE (Long Term Evolution) [2].

I.2 L'EVOLUSION DES RESEAUX MOBILES

Au cours des deux dernières décennies, nous avons assisté à l'introduction de diverses normes mobiles, de la 2G à la 3G jusqu'à la 4G actuelle, et nous prévoyons que la tendance se poursuivra. Le mandat principal des normes 2G était le support des applications de téléphonie mobile et de voix. Les normes 3G ont marqué le début de la révolution des données par paquets et la prise en charge des applications Internet telles que la messagerie électronique, la navigation Web, la messagerie texte et d'autres services client-serveur. Les normes 4G comporteront des réseaux tout IP basés sur des paquets et prendront en charge la demande explosive d'applications gourmandes en bande passante telles que les services mobiles de vidéo à la demande [1].

La 1ère génération des téléphones mobiles a débuté dans le début des années 80 en offrant un service médiocre de communication mobile, médiocre mais très coûteux.

La 1G avait beaucoup de défauts : Des normes incompatibles d'une région à une autre, une transmission analogique non sécurisée (on pouvait écouter les appels), pas de roaming vers

l'international (roaming est la possibilité de conserver son numéro sur un réseau autre que celui de son opérateur) [3].

Dans les années 90, le GSM est apparu. Il s'agit de la norme 2G, s'appuyant sur les transmissions numériques permettant une sécurisation des données (avec cryptage). C'est une norme mondiale, qui permet le roaming entre pays exploitant ce type de réseau. Le GSM permettait aussi l'émission de SMS (limités à 80 caractères), comme il a suscité le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des minimessages. Devant ce succès, il a fallu proposer de nouvelles fréquences aux opérateurs pour acheminer toutes les communications. Le débit de 9.6 kbps proposé par le GSM était insuffisant, cela a poussé le développement de nouvelles techniques de modulations et de codages et d'accroître le débit. Comme résultat de développement de la téléphonie mobile, la 3G a été impulsée par les exigences de l'IMT-2000 pour permettre des applications vidéo sur le mobile (le minimum requis pour une application vidéo est de 384 kbps). 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). Cette génération a commencé à s'introduire sur le marché à partir de la version 3.5 (2005.c), celle-ci, nommée HSDPA a permis d'augmenter le débit descendant. Puis est arrivé le HSUPA pour augmenter le débit montant et enfin le HSPA et HSPA+. De ce fait, l'accès aux services de connexions à internet et surtout de messagerie s'est peu à peu installé dans les habitudes des utilisateurs et les terminaux se sont améliorés (Smartphone...) permettant un usage plus confortable de la connexion haut débit. Succédant à la 3G (l'expérience de ces 20 années de téléphonie) et aux évolutions de cette norme (HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+), le LTE apparaît avant tout comme une rupture technique par rapport aux générations précédentes :

- Nouvelle Interface radio basée sur un multiplexage d'accès OFDMA
- Modification de l'Architecture réseau existant afin de fournir une connexion tout IP [2]

Le tableau suivant résume l'évolution des réseaux mobiles de la première génération à la quatrième génération :

<i>Génération</i>	<i>Déploiement</i>	<i>Technologie</i>	<i>Transmissions</i>	<i>Services</i>
<i>1G</i>	<i>1980</i>	<i>R2000, NMT...</i>	<i>Analogique</i>	<i>Voix</i>
<i>2G</i>	<i>1990</i>	<i>GSM</i>	<i>Numérique</i>	<i>Voix/SMS/Data</i>
<i>3G</i>	<i>2000</i>	<i>UMTS</i>	<i>Numérique</i>	<i>Voix/ Data</i>
<i>4G</i>	<i>2010</i>	<i>LTE, LTE-Advanced</i>	<i>Numérique</i>	<i>Data</i>

Tableau I.1. Évolution des réseaux mobiles

I.3 LA TECHNOLOGIE LTE (4G)

L'idée de projet pour développer la technologie LTE est menée par l'organisme de standardisation 3GPP visant à rédiger les normes techniques de la future quatrième génération en téléphonie mobile. Cette technologie a comme but de permettre le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule supérieur (zone dans laquelle un émetteur mobile peut entrer en relation avec des terminaux) et un temps de latence plus faible. En théorie, elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de 50 Mb/s en lien ascendant et de 100 Mb/s en lien descendant, partagé entre les utilisateurs mobiles à l'intérieure d'une même cellule. Pour les opérateurs (qui ont la partie la plus importante pour supporter cette technologie), le LTE implique de modifier le cœur du réseau et les émetteurs radio. Il faut également développer des terminaux mobiles adaptés [4].

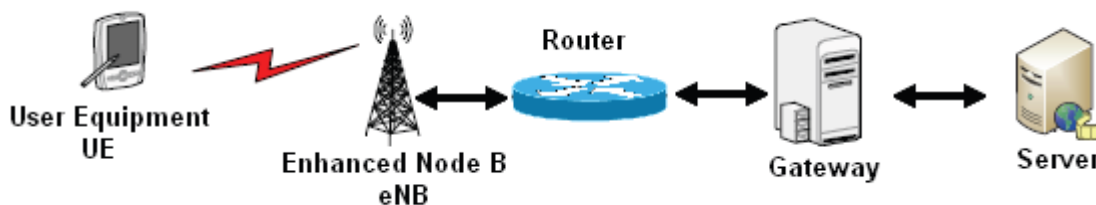


Figure I.1. Présentation générale sur le système LTE.

1.3.1 Exigences LTE

Les exigences LTE couvrent deux composants fondamentaux de l'architecture évoluée du système UMTS: le réseau évolué universel d'accès radio terrestre (E-UTRAN) et le noyau évolué de paquets (EPC).

Les objectifs du système global sont les suivants:

- Amélioration de la capacité et de la couverture du système
- Débits de données de pointe élevés
- Faible latence (plan utilisateur et plan de contrôle)
- Coûts d'exploitation réduits
- Prise en charge de plusieurs antennes
- Opérations de bande passante flexible
- Intégration transparente avec les systèmes existants (UMTS, Wifi, etc.).

Étant donné que l'augmentation substantielle des débits de données mobiles est l'un des principaux mandats des normes LTE, il est utile de passer en revue certaines des avancées

récentes dans la recherche sur les communications ainsi que les considérations théoriques liées aux débits de données maximaux réalisables dans une liaison de communications mobiles [1].

I.3.2 Architecture du système LTE

Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences Hertziennes grâce aux codages radio OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) dans le sens descendant Downlink, et le SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*) dans le sens montant Uplink ».

La Figure I.2 présente l'architecture globale du réseau 4G LTE [5].

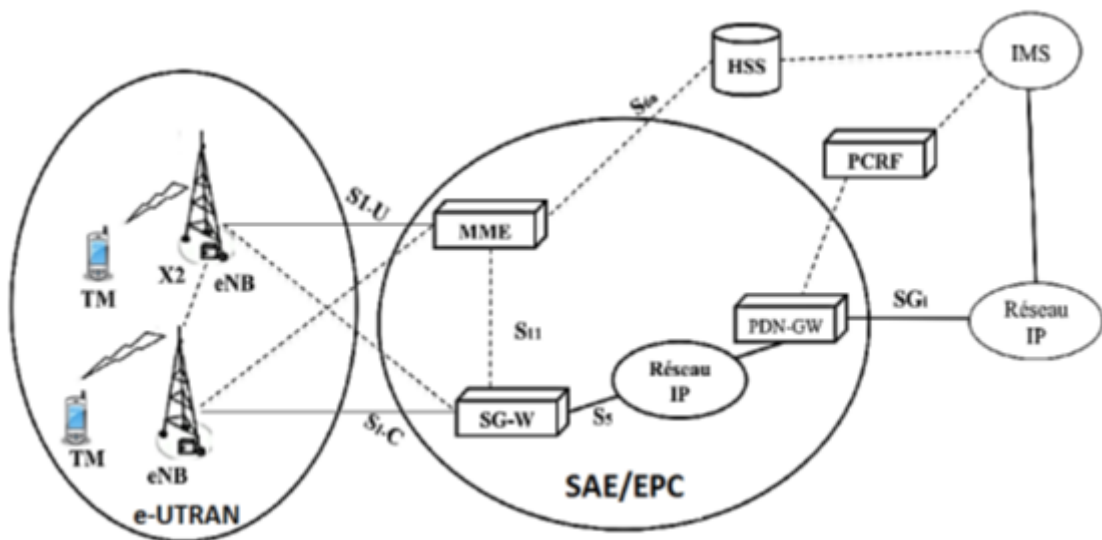


Figure I.2: Architecture du réseau 4G LTE [5]

I.3.2.1 Équipement Utilisateur (UE)

Il est présenté sous deux plans :

- **Le plan utilisateur :** Il contient les couches PHY (physique), MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control) et PDCP (Packet Data Convergence Protocol).
- **Le plan de contrôle :** Il contient le NAS (Non Access Stratum) et le RRC (Radio, Resource Control), avec le plan utilisateur [6].

I.3.2.2 Réseau cœur 4G/LTE (EPC)

Connu aussi sous le nom de SAE (System Architecture Evolution), l'EPC représente le réseau cœur de LTE. Il se compose d'équipements devant supporter la connectivité toute-IP entre les domaines multi-technologiques dans l'architecture 4G. Il assure la gestion des utilisateurs, la gestion de la mobilité, la gestion de la qualité de service et la gestion de la sécurité. Il est composé de [6]:

- **MME (Mobility Management Entity)** : Cette entité est responsable de la gestion de la mobilité et l'authentification des utilisateurs. Elle est responsable aussi du Paging lorsque l'utilisateur est en état inactif. Il fait la mise à jour des paramètres de localisation de l'UE se retrouvant dans une zone qui n'est pas prise en charge par le MME
- **Serving GW (Serving Gateway) ou UPE (User Plane Entity)**: Est défini pour gérer les "données utilisateur" et il est impliqué dans le routage et la transmission de paquets de données entre les eUTRAN et le réseau cœur. L'échange des paquets est acheminé par le SGW au PDN-GW par l'interface S5. Le SGW est connecté à l'eUTRAN via l'interface S1-U qui sert de relai entre l'utilisateur et l'EPC
- **P-GW (PacketData Network Gateway) ou IASA (Inter-Access System Anchor)** : Est l'entrée et le point de sortie pour le trafic de données dans l'EPC. Il exécute l'application de la politique et de filtrage de paquets pour chaque flux de données de chaque abonné.
- **HSS (Home Subscriber Server)** : Base de données, évolution du HLR de la 3G. Elle contient les informations de souscriptions pour les réseaux GSM, GPRS, 3G et LTE...
- **PCRF (Policy & Charging Rules Function)** : fournit les règles de la taxation. ePDG (Evolved Packet Data Gateway) : un élément réseau qui permet l'interopérabilité avec le réseau WLAN en fournissant des fonctions de routage des paquets, de Tunneling, d'authentification, d'autorisation et d'encapsulation / décapsulation des paquets [6].

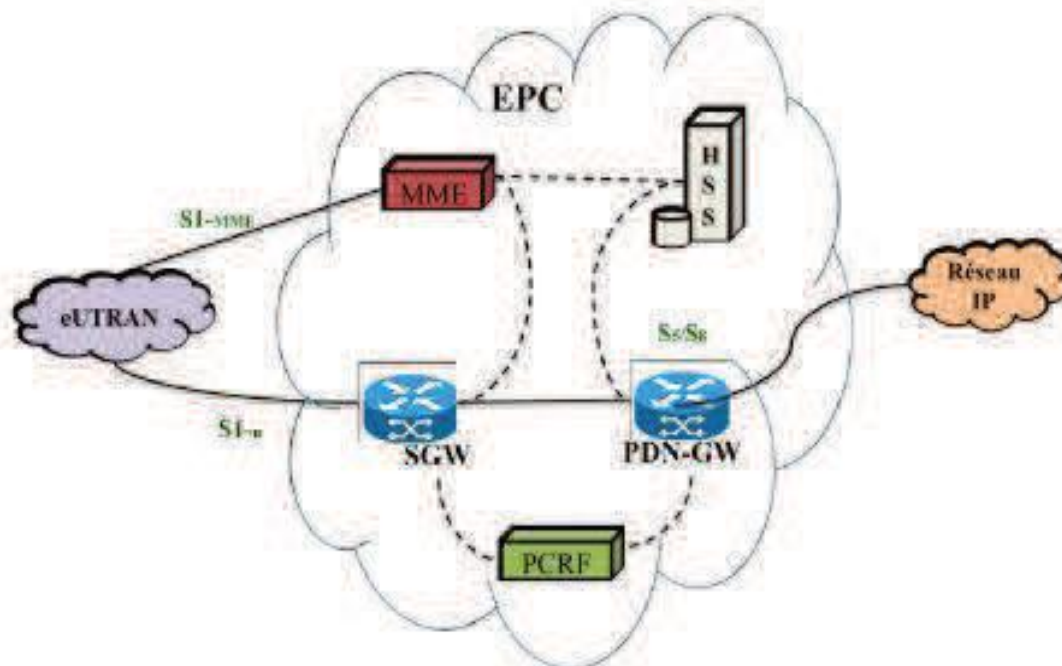


Figure I.3 : Architecture EPC. [6]

I.3.2.3 L'E-UTRAN

La partie radio du réseau, appelé « eUTRAN » est la partie responsable du management des ressources radio, la compression, la sécurité et la connectivité vers le réseau cœur évolué.

- **Enode-B** : La principale fonction de l'eNode B est d'acheminer les flux de données de l'UE vers l'EPC (Evolved PacketCore Network) au moyen des fonctions comme le RRM (Radio Ressource Management) et le CAC (Call Admission Control).

Les eNodeB sont normalement interconnectés l'un avec l'autre au moyen d'une interface «X2» et à l'EPC au moyen de l'interface S1 plus précisément, au MME au moyen de l'interface S1-MME et du S-GW par l'interface S1-U. [6]

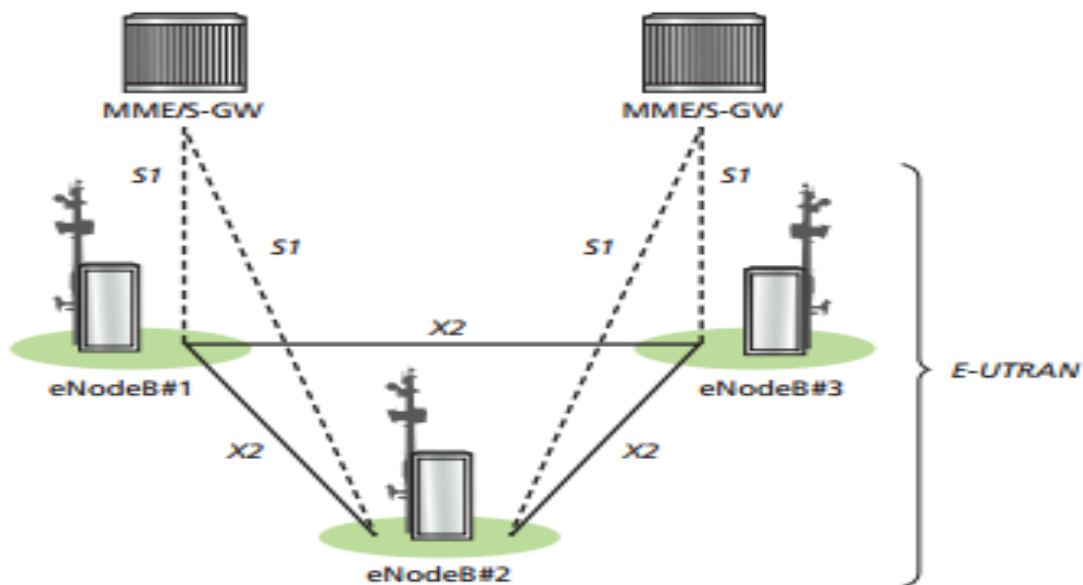


Figure I.4 : Architecture E-UTRAN. [6]

I.3.2.4 Les Interfaces

Le système LTE/SAE consiste en plusieurs interfaces internes et externes.

- **Interface Uu** : définie entre L'eNodeB et le UE [2].
- **Interface X2** : définie la connexion entre les éléments eNodeB. Il est destiné pour les procédures de Handover inter-eNodeB, aussi bien que pour la gestion de la signalisation des ressources radio inter-cellules et la signalisation de la gestion de l'interface [2].
- **Interface S1** : divisée en S1-MME et S1-U. S1-MME. Elle connecte les éléments eNodeB et MME, alors que S1-U est utilisée entre l'eNodeB et le S-GW. L'interface S1-MME est conçue pour la signalisation du plan contrôle entre l'eNodeB et le MME, alors que l'interface S1-U est conçue pour transporter les données du plan utilisateur entre l'eNodeB et le S-GW. Les données sont transférées à travers le GTP [2].

I.3.3 Les caractéristiques fondamentales de réseau 4G

L'objectif majeur du LTE est d'améliorer le support des services de données via une capacité accrue, une augmentation des débits et une réduction de la latence.

I.3.3.1 La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés

Avec l'explosion des services nécessitant une connexion continue, la contrainte appliquée sur la capacité en nombre d'utilisateurs simultanés devient forte. Le système doit supporter simultanément un large nombre d'utilisateurs par cellule. Il est attendu qu'au moins 25 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour une largeur de bande de 5 MHz, et au moins 100 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures. Un nombre largement supérieur d'utilisateurs devra être possible à l'état de veille [7].

I.3.3.2. Les débits

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

- 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 [7].

I.3.3.3 La latence

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

- **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.
- **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 nœud du réseau d'accès ou inversement. En d'autres termes, la latence du plan usager correspond au délai de transmission d'un paquet IP au sein du réseau d'accès.

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 [7].

I.3.3.4 L'agilité en fréquence

Le LTE doit pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande initialement requises ont par la suite été modifiées pour devenir : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20MHz [2].

I.3.3.5 La mobilité

La mobilité est une fonction clé pour un réseau mobile. Le LTE vise à rester fonctionnel pour des UE se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'UE faibles (entre 0 et 15 km/h) [7].

I.3.3.6 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 [8].

I.3.3.7 Duplexage

Les spécifications LTE prévoient le fonctionnement en mode dual : duplexage de fréquences (FDD) et duplexage 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 est souvent mis en œuvre dans les équipements télécoms et déployé dans la plupart des premiers réseaux 4G LTE. Le deuxième mode (TDD) fonctionne sur des bandes de fréquences distinctes qui feront l'objet d'attributions ultérieures [3].

I.3.3.8. Les types de transmission utilisée dans la 4G

L'accès multiple pour la technologie LTE est différent de celui de WCDMA, en effet en lien descendant, il est basé sur l'OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Acces*) et

dans le sens montant, il est basé sur le SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Acces*) [2].

L'OFDMA offre une bonne protection contre les conditions radio qui varient rapidement, incluant l'évanouissement rapide et les composants radio qui ont une propagation multi-trajet. Cependant, ce n'est pas une solution très efficace, comme le comportement du rapport de puissance du pic-à-moyenne (PAPR) cause des difficultés dans la conception des équipements. C'est pour cette raison que le SC-FDMA a été choisi dans le sens montant (UL) pour que l'UE puisse surmonter cette contrainte [9].

I.3.4. OFDM

Le LTE utilise l'OFDM (Orthogonal Frequency division Multiplexing) dans le sens descendant (DL), qui est la direction de l'eNodeB vers l'UE.

L'OFDM est conforme aux exigences du système LTE au regard à la flexibilité du spectre, et permet d'établir une base à coûts efficaces pour de larges bandes de fréquence qui offrent des pics de débits de données très élevés. La ressource physique du LTE peut être vue comme une grille de temps-fréquence. Dans le domaine fréquentiel, l'espacement entre les sous-porteuses adjacentes est de 15 KHz. L'OFDM consiste à fragmenter les flux de données pour qu'elles soient transmises sur plusieurs sous porteuses, permettant d'augmenter la période du symbole. Vu que les techniques de modulations à faibles débits sont plus robustes aux multi-trajets, il est plus commode de transmettre plusieurs flux de données à bas débits en parallèle plutôt qu'un flux de données à haut débits. Le but d'utiliser plusieurs sous porteuses est d'obtenir un canal qui soit presque constant (plat) sur chaque sous bande donnée, ce qui rend l'égalisation plus simple au niveau du récepteur. En outre, l'OFDM permet l'utilisation des techniques MIMO à complexité réduite.

Finalement l'OFDM permet une utilisation flexible de la bande de fréquence et peut réaliser des débits de données très élevés. Il repose sur la fameuse technique de multiplexage à division de fréquence FDM qui mappe différents flux d'informations sur des canaux de fréquences séparés parallèles. L'OFDM diffère de la traditionnelle FDM:

- Le même flux d'informations est mappés à un grand nombre de sous porteuses étroites ce qui induit une augmentation de la période du symbole en comparaison aux techniques à un seul canal.
- Les sous porteuses sont orthogonales mutuellement en vue de réduire l'interférence inter-porteuses (ICI). De plus, l'entrelacement entre les sous porteuses est toléré pour réaliser une haute efficacité spectrale.

- Un intervalle de Garde, souvent appelée préfix cyclique (CP), est ajouté au début de chaque symbole OFDM pour préserver l'orthogonalité entre les sous porteuse et éliminer l'interférence inter-symbole (ISI) et l'ICI [9].

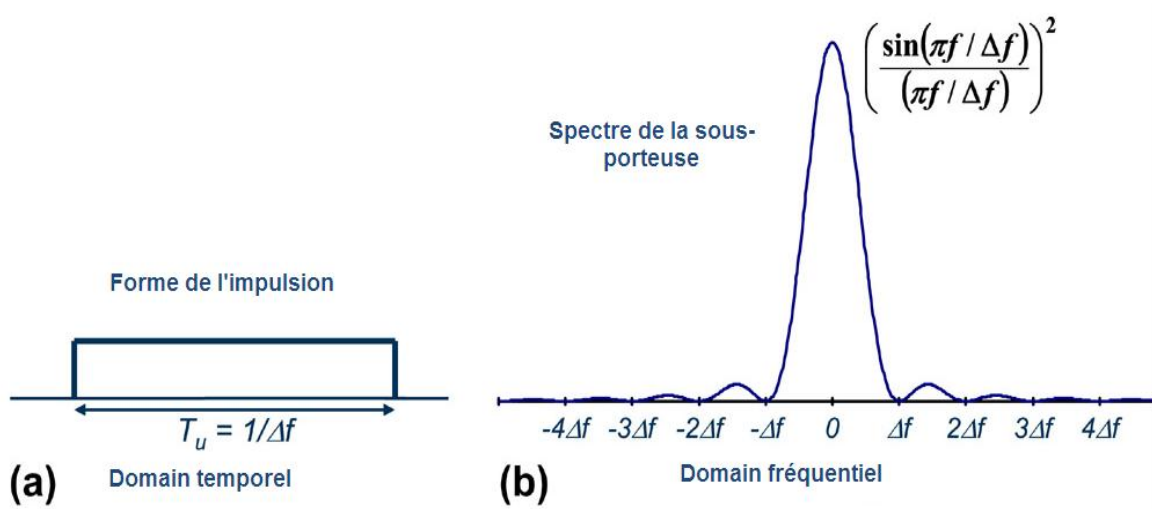


Figure I.5 : (a) Forme d'impulsion par sous-porteuse (b) Spectre de transmission OFDM de base [9].

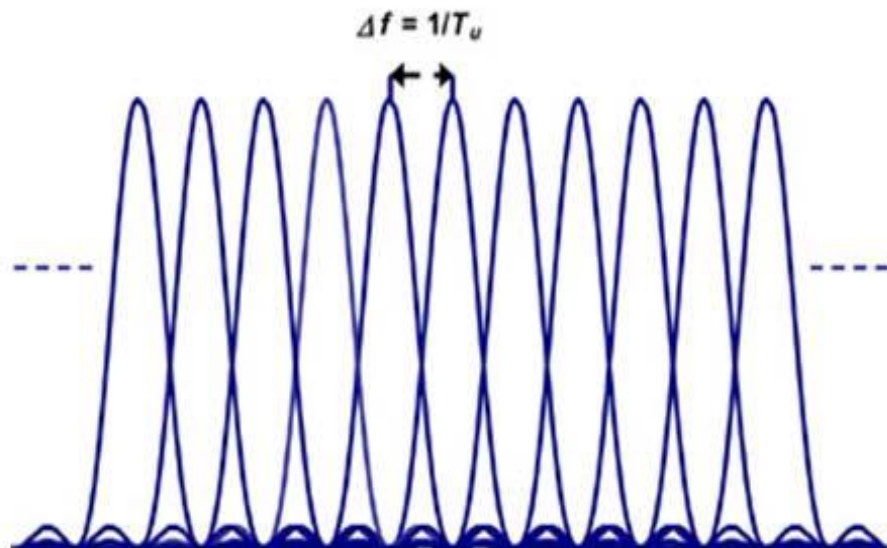


Figure I.6. : Illustration de l'espacement entre sous porteuse [9].

I. 3.5. Chaîne de transmission OFDM

La figure I.7 représente un schéma bloc simplifié d'un système OFDM à une seule entrée et une seule sortie (SISO). Sur le côté de l'émetteur, les symboles (QAM/PSK) modulés sont mappés à N sous porteuses orthogonales. Ceci est effectué à l'aide d'une opération de transformée de Fourier discrète inverse (IDFT). Souvent, l>IDFT est effectuée avec un algorithme de transformée de Fourier rapide inverse (IFFT), qui est efficace du point de vue

calcul. Ensuite, le CP est inséré et une conversion parallèle-série est effectuée préalablement à la transmission sur l'interface air [9].

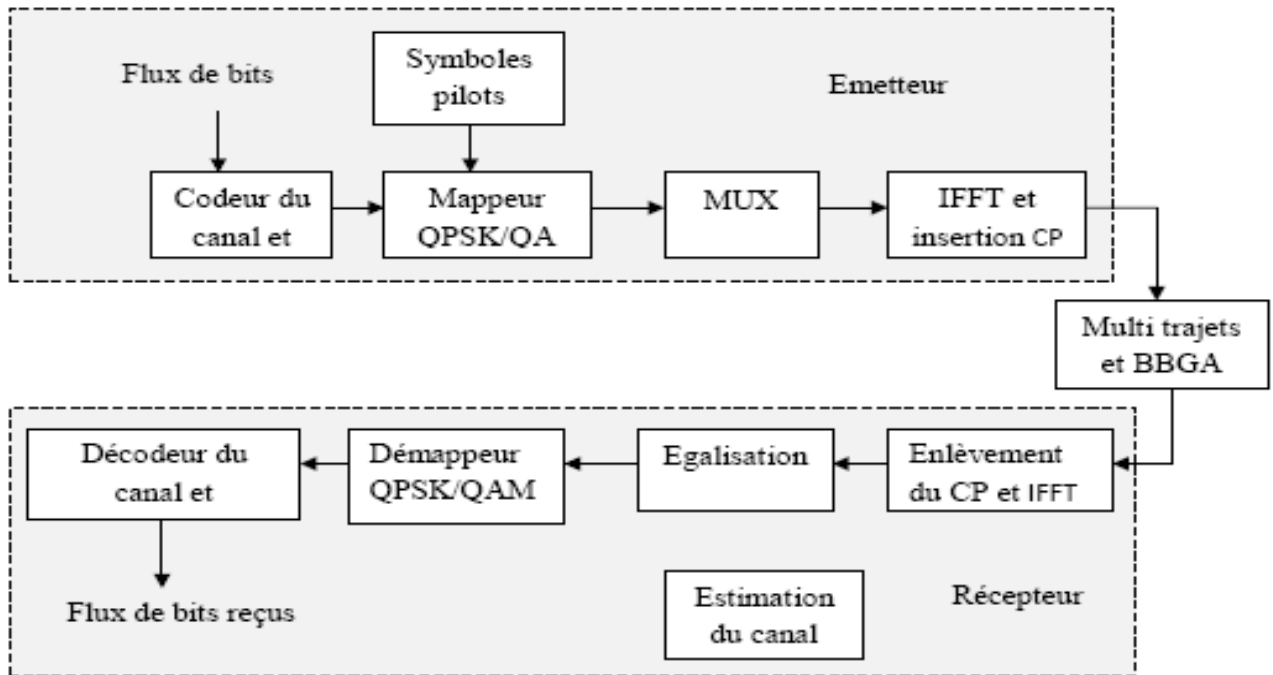


Figure I.7 : Chaine de transmission OFDM [9].

Au niveau du récepteur, les opérations inverses sont effectuées. Une fois le signal est au niveau du récepteur, le CP, qui aurait subit des interférences de la part des symboles OFDM précédents, est enlevé. Puis, une opération de transformé de Fourier rapide (FFT) amène les données au domaine fréquentiel. De cette manière, l'estimation du canal et l'égalisation est simplifiée [9].

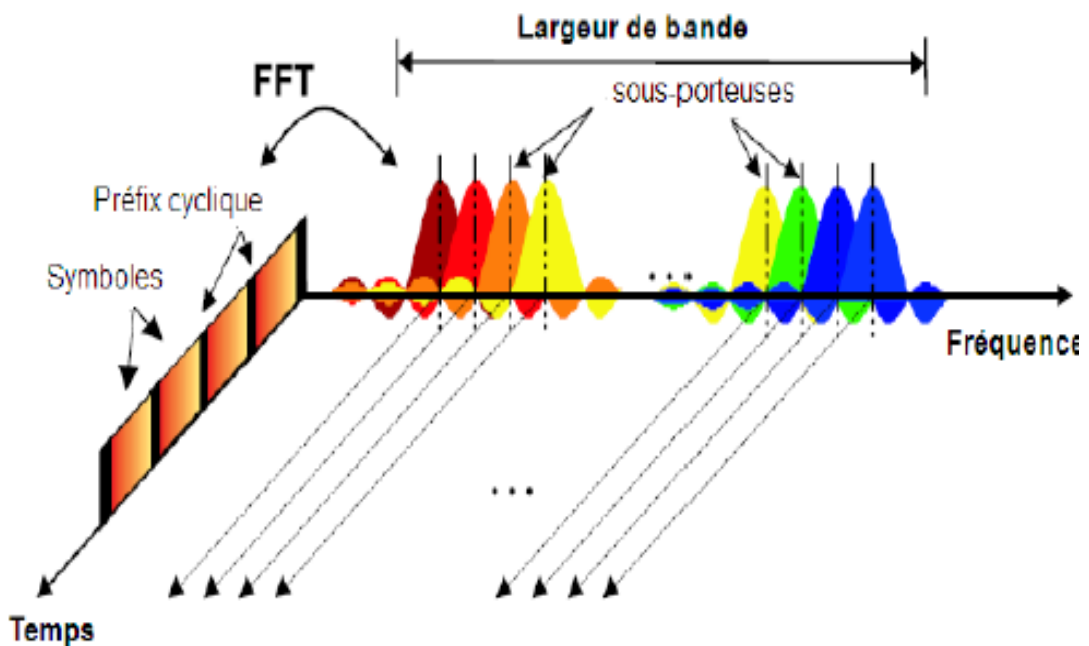


Figure I.8 : Interprétation temps-fréquence d'un signal OFDM [9].

I. 3.6 SC-FDMA

La technique d'accès multiple à division de fréquence et à canal unique (SC-FDMA) est adoptée à la place de l'OFDMA pour la liaison montante du système LTE. Le principe de base du SC-FDMA est identique à l'OFDMA à la différence qu'une DFT est appliquée avant la modulation OFDM, ce qui permet de disperser les symboles de données sur l'ensemble de sous porteuses transportant l'information et permet ainsi de produire une structure à une seule porteuse. Le SC-FDMA présente un PAPR réduit par rapport à l'OFDM, ce qui la rendue attractive pour la transmission en sens montant du fait que l'UE en bénéficie en terme d'efficacité de la puissance transmise [9].

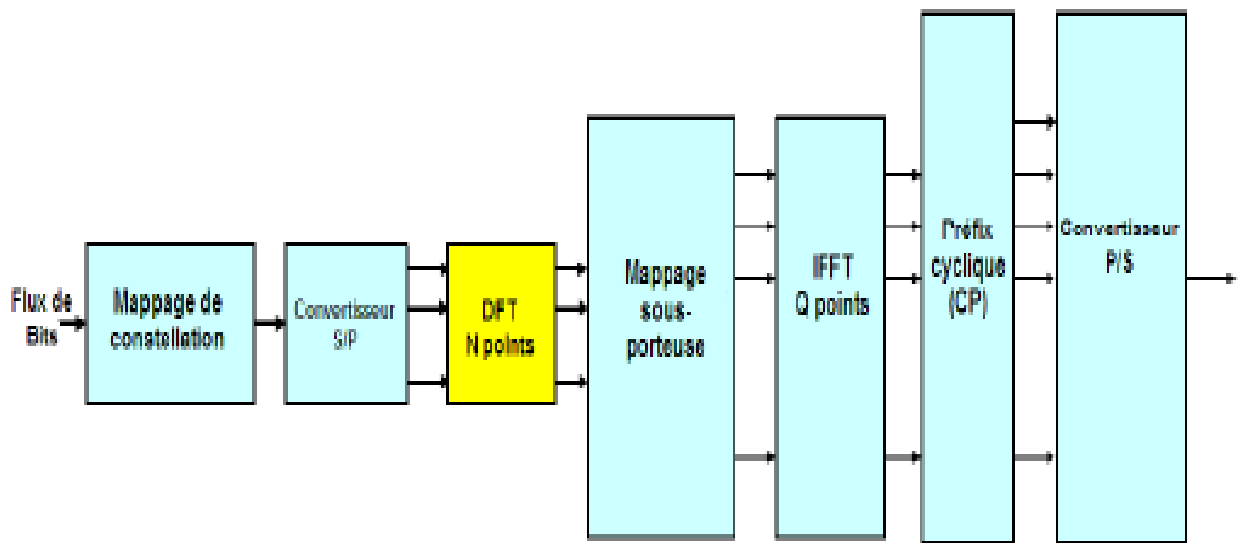


Figure I.9 : Schéma bloc du SC-FDMA [9].

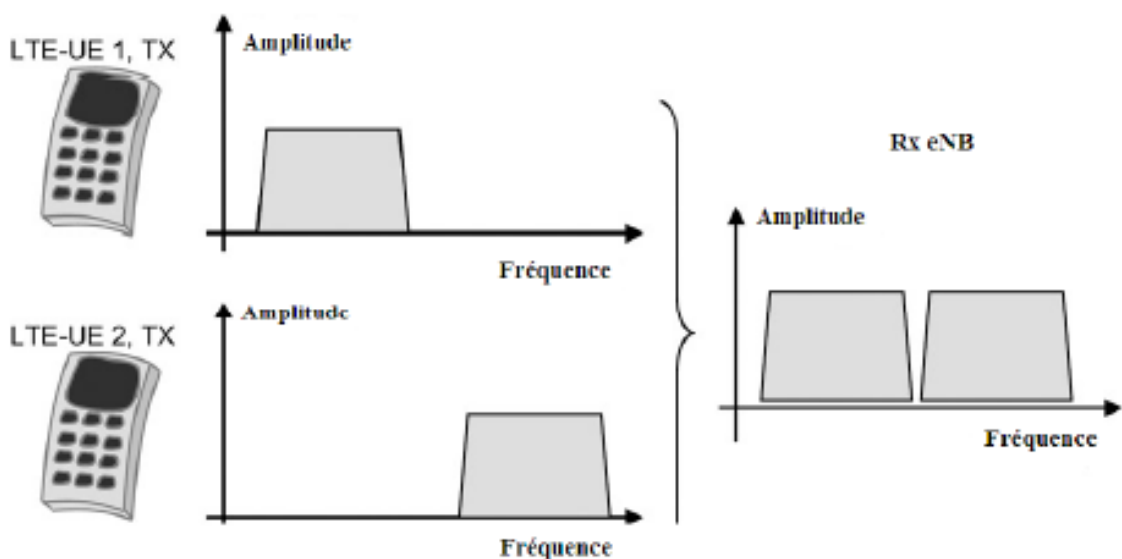


Figure I.10 : Principe de la transmission SC-FDMA [9].

I.3.7 La structure des trames en LTE

Les trames génériques du LTE ont une durée de 10 ms. Elles sont divisées en 10 sous-trames de 1,0 ms, chacune est divisée en deux slots. Une trame LTE comprend donc 20 slots de 0,5 ms chacun, numérotés de 0 à 19. Un slot est composé de 6 ou 7 symboles OFDM, selon que le préfixe cyclique employé est normal ou étendu [5].

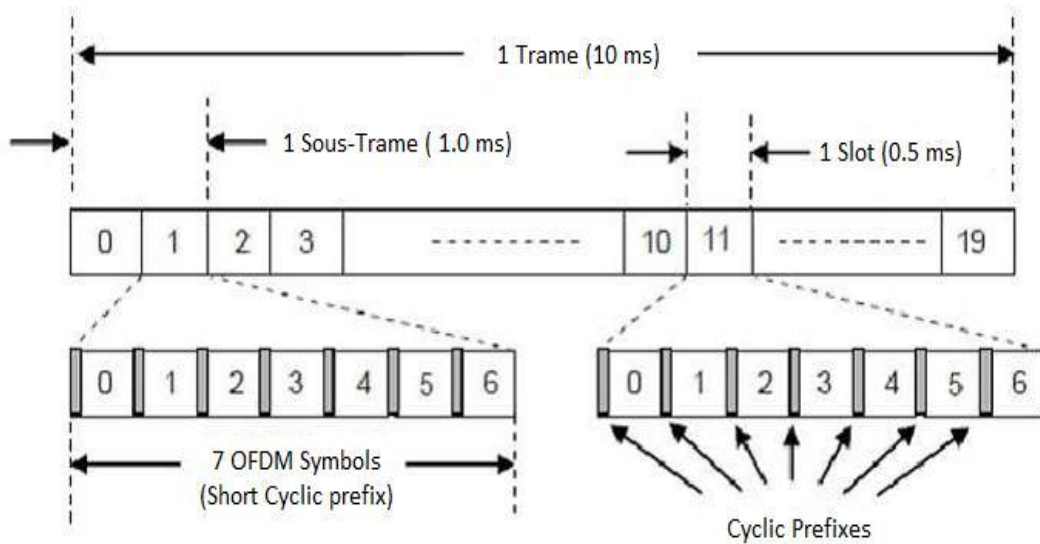


Figure I.11: Structure générique de la trame LTE [5].

Un Time Slot dans la (**Release 8**) de la **3GPP** a une durée de 0.5 ms, alors selon le choix du préfixe cyclique **CP** (**Cyclic Prefix**) on peut avoir soit 7 symboles **OFDM** pour un **CP** court, soit 6 symboles **OFDM** pour un **CP** long.

Rappelons qu'un symbole **OFDM** a une durée de 66.66 μ s. Deux tailles de **CP** sont permises : un court ou normal (5,21 μ s/4,69 μ s), et un long (16,67 μ s). Le choix dépend du type de cellule et du temps de propagation : pour les macrocellules on utilise le **CP** long, tandis que pour les microcellules, le court. Le Choix du **CP** influence le débit global.

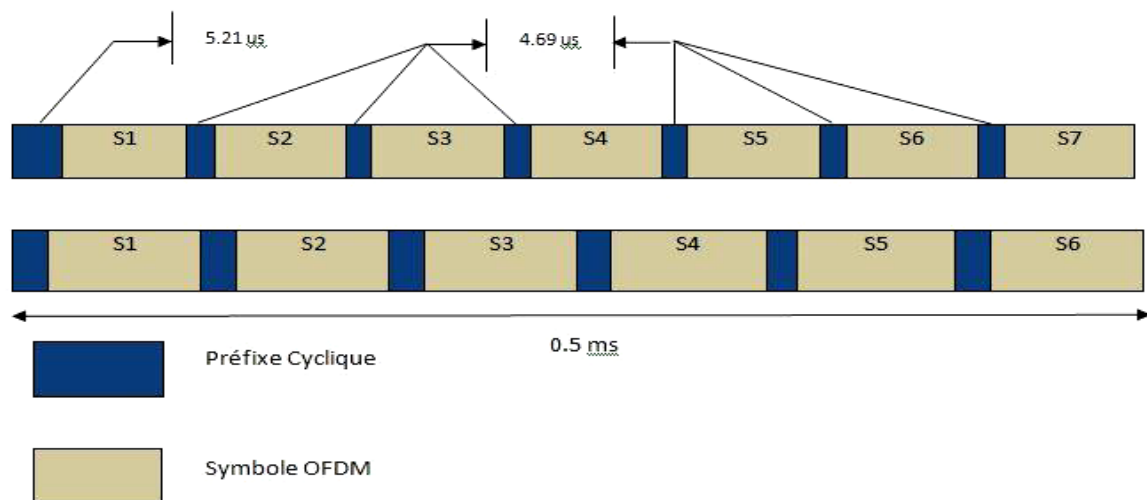


Figure I.12: Les types du préfixe cyclique [5].

Les transmissions « Downlink » et « Uplink » sont organisés en deux types de structures qui sont :

- Structure de type 1 : duplexage de fréquence division FDD.
- Structure de type 2 : duplexage par séparation temporelle TDD [5].

I. 3.7.1 Structure de type 1: FDD

L'émission et la réception des données se font à des fréquences différentes c.à.d. que la fréquence porteuse du signal est différente suivant le sens de la liaison (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 **TDD**. La Figure I.13 présente la trame **FDD**.

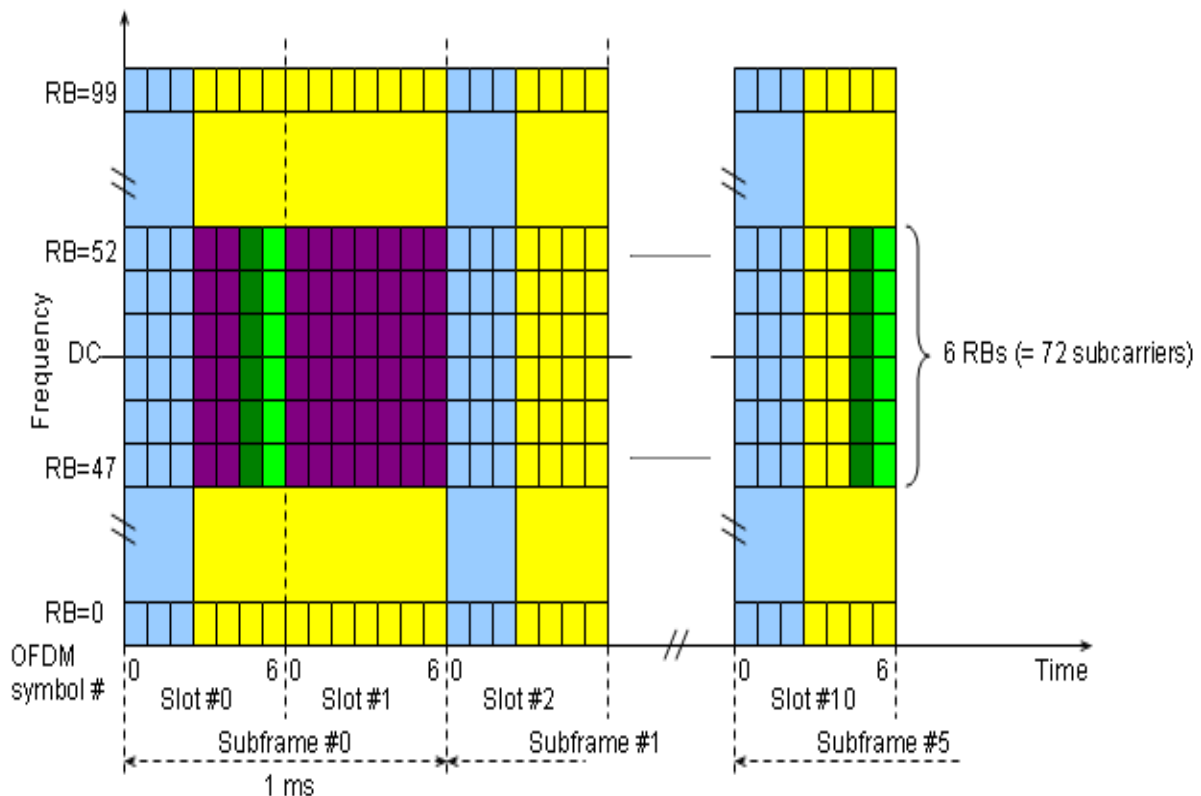


Figure I.13 : Structure de la trame radio FDD [5].

Avec le **FDD**, la trame entière est alternativement dédiée à la réception et l'émission. La trame radio **FDD** offre un logement composé de 7 symboles **OFDM**.

I. 3.7.2 Structure de type 2 : TDD

Le Duplex par séparation temporelle **TDD** est une technique permettant à un canal 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, La **Figure I.14** présente la trame **TDD** [5].

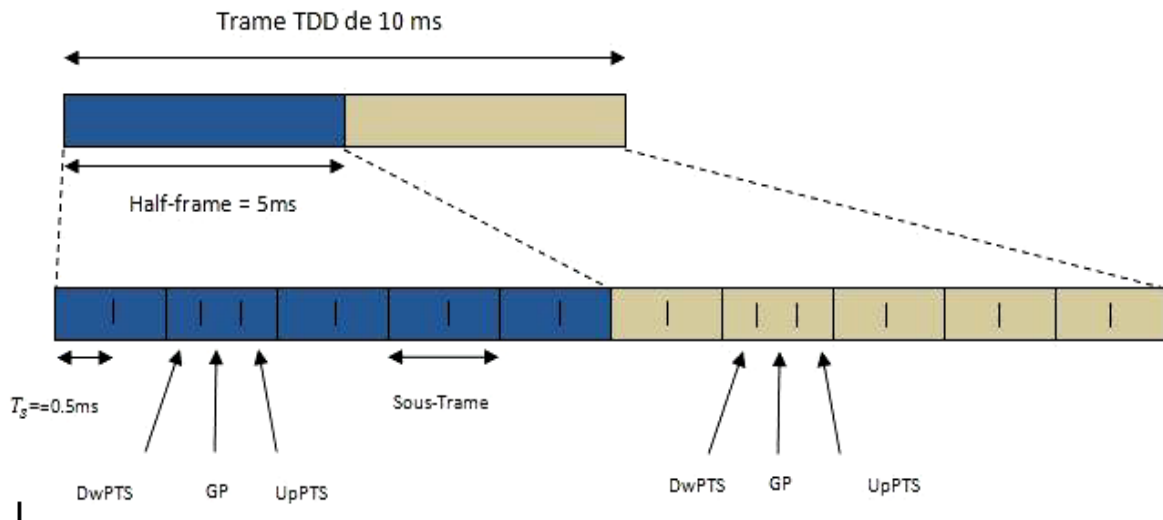


Figure I.14 : Format de la trame **TDD** [5].

Elle a la même durée de la trame **LTE** en mode **FDD**, c'est-à-dire 10 ms avec 10 sous-trames de 1 ms, la différence réside dans les sous-trames (1) et sous-trame (2) qui contiennent des données de signalisation et qui sont :

- **GP (Guardperiod)** : Le temps de garde GP nécessaire au basculement de l'eNodeB entre la réception d'une sous-trame montante et l'émission d'une sous-trame descendante. L'UE est informé de ce décalage par la commande d'avance de temps, qui lui indique de démarrer sa transmission un peu plutôt (ou un peu plus tard). Une avance par défaut de 20 μ s est ainsi spécifiée en **TDD** (durée nécessaire aux équipements pour basculer de réception à émission).
- **DwPTS et UpPTS** : Outre le temps de garde, la sous-trame spéciale porte les champs **DwPTS (Downlink Pilot Time Slot)** et **UpPTS (Uplink Pilot Time Slot)**, réservés pour les transmissions respectivement en voie descendante et en voie montante [5].

I.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté un bref aperçu sur les composantes et les caractéristiques fondamentales des systèmes 4G/LTE. Nous y avons décrit aussi les types de transmission et la structure des ressources de transmission utilisée dans cette technologie.

II.1. INTRODUCTION

La norme LTE spécifie des protocoles de communication de données pour les communications sur les liaisons montante et descendante. Dans ce chapitre nous mettons en évidence les principaux concepts liés à la compréhension des choix technologiques effectués dans la conception de l'interface radio LTE c.à.d. la couche physique LTE PHY. Nous allons aborder des aspects liés à la communication de données et aux protocoles de transmission LTE. Nous donnerons un aperçu sur les bandes de fréquences utilisées, les méthodologies de duplexage FDD et TDD, la flexibilité d'allocation de bande passante, la représentation des ressources temps-fréquence de la norme LTE, les phases de traitement sur les liens montant et descendant, les schémas de transmission multi-porteuses, les protocoles multi-antennes ainsi que les schémas de modulation et de codage adaptatifs.

II.2 INTERFACE RADIO LTE

L'interface radio LTE est basée sur la technologie d'accès multiple OFDM dans la liaison descendante et une technologie étroitement liée connue sous le nom de multiplexage par répartition en fréquence à porteuse unique SC-FDM dans la liaison montante. L'utilisation de l'OFDM offre des avantages significatifs par rapport aux technologies alternatives d'accès multiple. Parmi les avantages figurent une efficacité spectrale élevée et une adaptabilité pour la transmission de données à large bande, la résistance aux interférences inter symboles causées par l'évanouissement par trajets multiples, une prise en charge naturelle des schémas MIMO et la prise en charge des techniques du domaine fréquentiel telles que l'ordonnement sélectif en fréquence [10].

II.3 Bandes de fréquences

L'intégration avec les systèmes mobiles précédents est l'un des objectifs des normes LTE, celles-ci spécifient les spectres radio disponibles dans différentes bandes de fréquences. Les bandes de fréquences des normes 3GPP précédentes sont disponibles pour le déploiement LTE. De nouvelles bandes de fréquences sont également introduites. Les modes FDD et TDD sont autorisés sur des bandes de fréquences spécifiées, appariées et non appariées, respectivement. Les bandes FDD sont appariées pour une transmission simultanée, l'une pour la liaison descendante et l'autre pour la liaison montante. Les bandes TDD ne sont pas appariées, car les

transmissions des deux liaisons partagent le même canal et la même fréquence porteuse. Les transmissions dans les directions montante et descendante sont multiplexées dans le temps.

La version 11 des spécifications 3GPP pour LTE montre la liste complète des bandes de fréquences ITU IMT Advanced [11]. Elle comprend 25 bandes de fréquences, numérotées de 1 à 25, pour FDD et 11, numérotées de 33 à 43, pour TDD. Les tableaux suivants donnent quelques-unes de ces bandes.

<i>Indice de bande de fonctionnement</i>	<i>Plage de fréquences de la bande de fonctionnement de liaison montante (UL) (MHz)</i>	<i>Bande de fréquences de fonctionnement de la liaison descendante (DL) (MHz)</i>	<i>Mode duplex</i>
<i>1</i>	<i>1 920-1 980</i>	<i>2 110-2 170</i>	<i>FDD</i>
<i>2</i>	<i>1 850-1 910</i>	<i>1 930-1 990</i>	<i>FDD</i>
<i>3</i>	<i>1 710-1 785</i>	<i>1 805-1 880</i>	<i>FDD</i>
<i>25</i>	<i>1850 – 1915</i>	<i>1930 – 1995</i>	<i>FDD</i>

Tableau II.1 Quelques bandes de fréquences appariées définies pour E-UTRA

<i>Indice de bande de fonctionnement</i>	<i>Gamme de fréquences de bande de fonctionnement de liaison montante et de liaison descendante (MHz)</i>	<i>Mode duplex</i>
<i>33</i>	<i>1 900-1 920</i>	<i>TDD</i>
<i>34</i>	<i>2 010-2 025</i>	<i>TDD</i>
<i>43</i>	<i>3600 –3800</i>	<i>TDD</i>

Tableau II.2 Quelques bandes de fréquences non appariées définies pour E-UTRA

II.4 Allocation de bande passante

Les spectres de fréquence dans LTE sont formés comme des concaténations de blocs de ressources, Chaque bloc de ressources est composé de (12) sous-porteuses séparées par (15 KHz) ou un total de 180 KHz de bande passante. Différentes configurations de bande passante sont permises 1,4, 3, 5, 10, 15 et 20 MHz, correspondant respectivement à un nombre de 6, 15, 25, 50, 75 et 100 blocs de ressources par fréquence porteuse.

II.5 Cadrage temporel

La structure dans le domaine temporel du LTE est illustrée à la figure II.1. LTE organise la transmission comme une séquence de trames radio d'une longueur de 10 ms. Chaque trame est ensuite subdivisée en 10 sous-trames d'une longueur de 1 ms. Chaque sous-trame est composée

de deux intervalles de 0,5 ms chacun. Enfin, chaque créneau se compose d'un certain nombre de symboles OFDM, sept ou six selon que l'on utilise un préfixe cyclique normal ou étendu. [1]

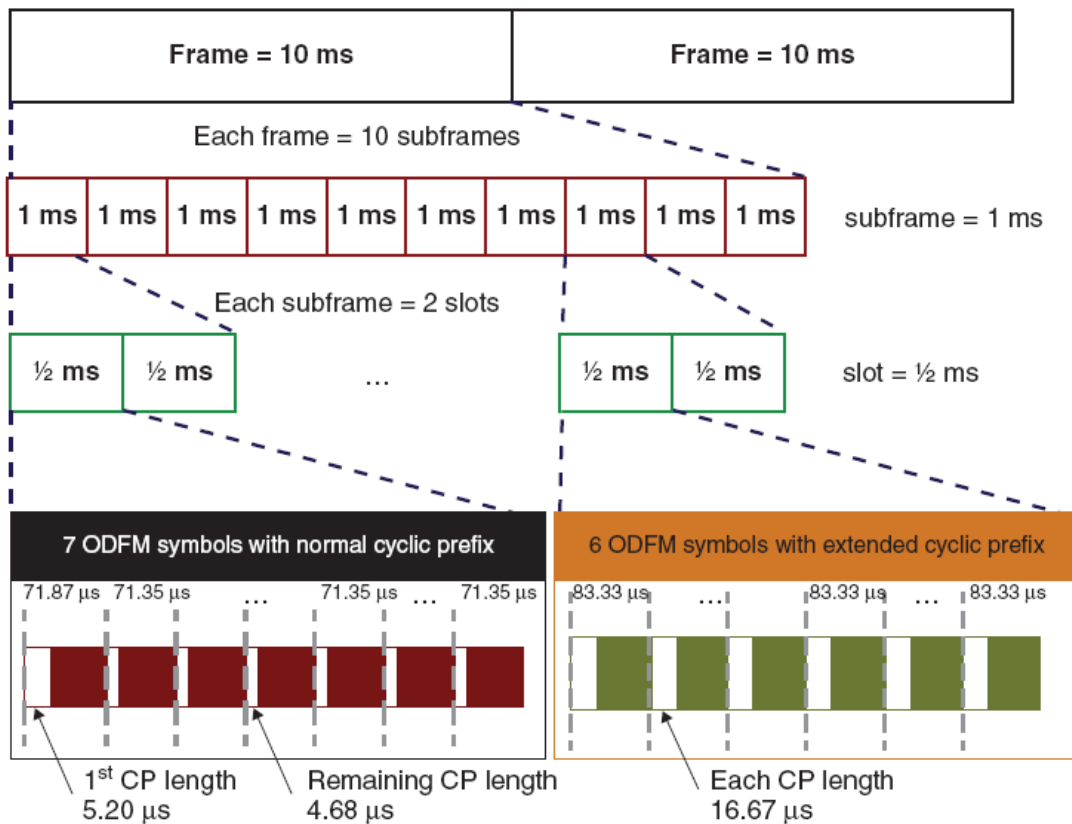


Figure II.1 Structure du domaine temporel LTE

II.6. Représentation temps-fréquence

Le système de coordonnées temps-fréquence est représenté à l'aide de la grille de ressources.

La grille de ressources au temps sur l'axe des x et la fréquence sur l'axe des y. Dans le cas d'un préfixe cyclique normal avec sept symboles OFDM par slot, chaque bloc de ressources est constitué de 84 éléments de ressources et Dans le cas d'un préfixe cyclique étendu avec six symboles OFDM par créneau, le bloc de ressources contient 72 éléments de ressources.

Le bloc de ressources représente la plus petite unité de transmission soumise à une planification dans le domaine fréquentiel.

Différence mineure entre l'emplacement de la liaison montante et de la liaison descendante de la fréquence centrale de la porteuse par rapport aux sous-porteuses (liaison montante, entre 2 sous-porteuses. En liaison descendante, DC non utilisé (vide)) [1].

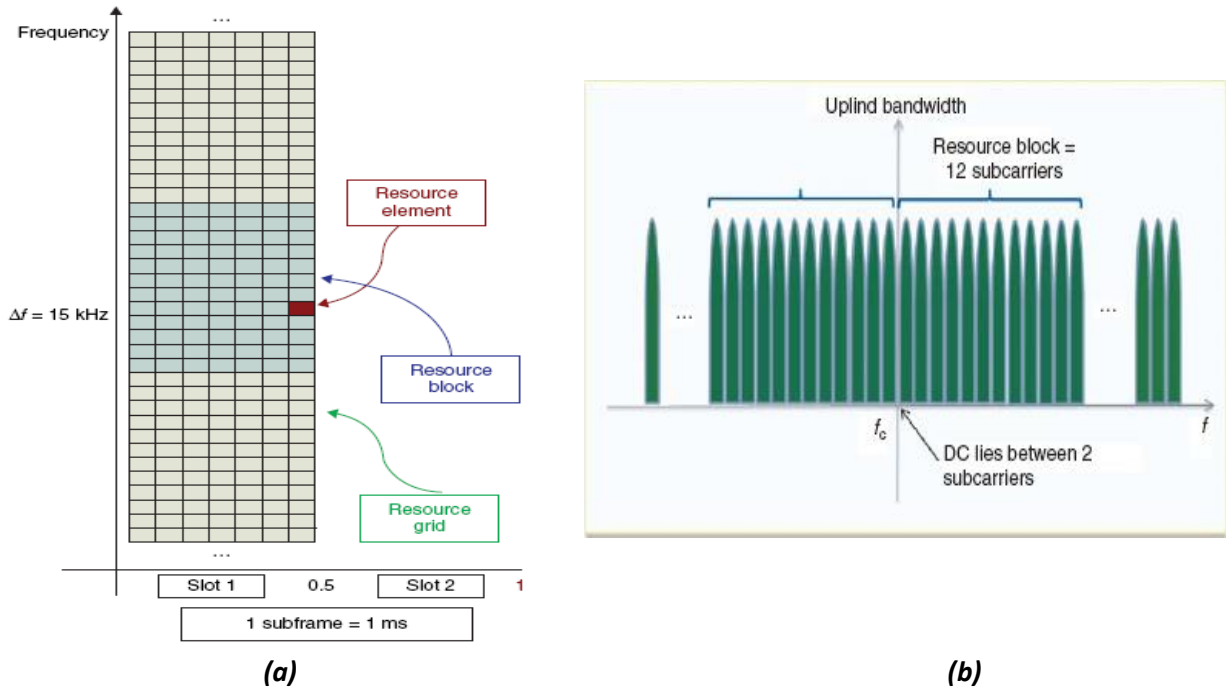


Figure II.2. (a) Éléments de ressource, blocs et grille, (b) Blocs de ressources et composantes DC de la fréquence en transmission montante

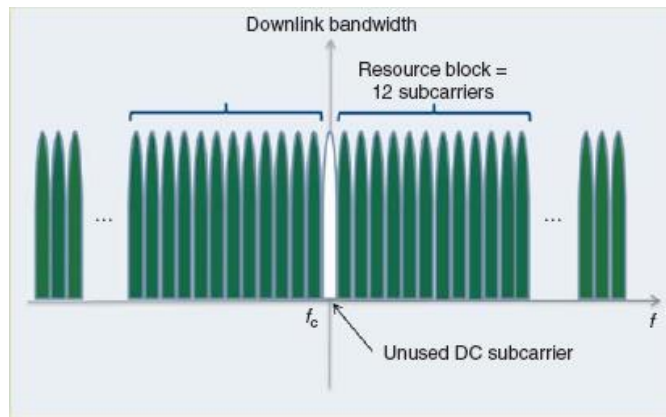


Figure II.3. Blocs de ressources et composantes DC de la fréquence en transmission descendante

II.7. Transmission multi-porteuse OFDM

La génération de signaux OFDM comprend : les données modulées sont mappées sur la grille de ressources. Chaque symbole modulé a_k est affecté à une seule sous-porteuse sur l'axe des fréquences

Bande passante totale (BW) = Nombre de sous-porteuses (N) * Espacement des sous-porteuses (Δf).

Chaque sous-porteuse f_k est un multiple entier de l'espacement des sous-porteuses :

$$f_k = k\Delta f \tag{II.1}$$

La sortie modulée OFDM $x(t)$ est exprimée comme suit :

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi f_k t} = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (\text{II.2})$$

Si la fréquence d'échantillonnage de canal est F_s et que le temps d'échantillonnage de canal est $T_s = \frac{1}{F_s}$ la représentation en temps discret du modulateur OFDM est exprimée comme suit :

$$x(n) = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi k \Delta f n / N} \quad (\text{II.3})$$

II.7.1. Préfixe cyclique

La transmission OFDM nécessite l'insertion d'un préfixe cyclique à chaque symbole OFDM. Le principe est de recopier la fin du symbole en début de transmission. La durée du préfixe cyclique doit être supérieure à l'étalement (dans le temps) maximal des retards. Dans les milieux les plus courants (urbains, semi-urbains), les retards sont de quelques microsecondes. En revanche, dans des milieux montagneux, on peut constater des retards supérieurs à 5 μs .

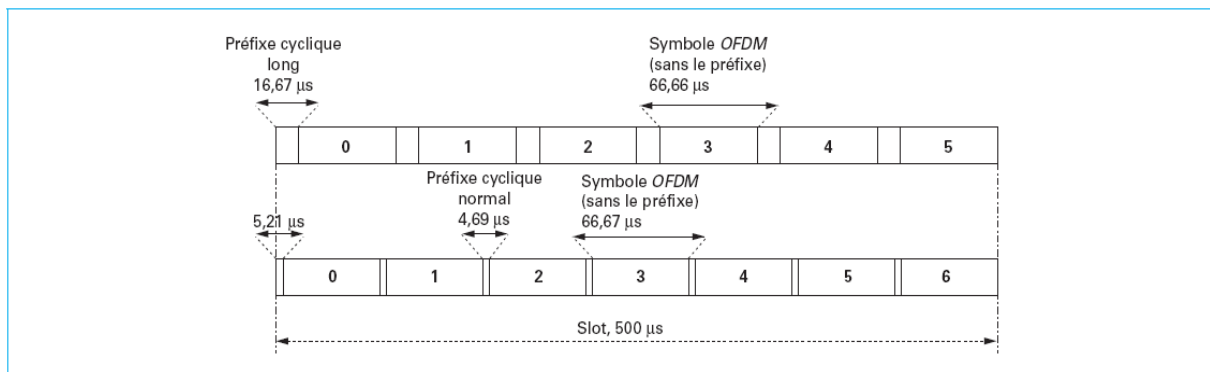


Figure II.4. Préfixe cyclique normal et préfixe cyclique long en LTE.

Il existe deux types de préfixe cyclique :

- a) **Préfixe cyclique normal** : qui dure 5,21 μs pour le premier symbole d'un slot et 4,69 μs pour les symboles suivants.
- b) **Le préfixe étendu** : qui dure 16,67 μs pour chaque symbole (figure II.4).

Le préfixe du premier symbole est légèrement plus long, car il permet d'absorber de légers décalages de synchronisation sur la voie montante non compensés par le mécanisme d'avance en temps. Les deux configurations de préfixe conduisent à des tailles de blocs différentes. Avec le préfixe normal, il est possible de transmettre 7 symboles dans un slot alors que le préfixe étendu réduit ce nombre à 6. Le préfixe étendu a surtout été conçu pour permettre la transmission simultanée par plusieurs stations de base d'un même signal (simulcast) pour le service MBMS (Multimedia Broadcast Multicast System). En effet, le récepteur est alors à des distances

différentes de chaque émetteur, et le signal reçu est équivalent à celui émis par un même émetteur mais subissant des trajets multiples très étalés [15].

II.7.2 Autres paramètres OFDM

L'espacement des sous-porteuses est réglé sur 15 KHz pour minimiser les dégradations causées par le bruit de phase et le décalage Doppler. La taille du bloc de ressources est définie sur 180 kHz (12 sous-porteuses) pour garantir une faible latence, et une Planification dans le domaine fréquentiel : maintenir la durée du symbole OFDM constante à une valeur fixe de 66,7 µs permet d'utiliser la même sous-porteuse de 15 kHz pour toutes les bandes passantes [1].

Paramètres OFDM pour la durée de sous-trame de transmission en liaison descendante (1 ms) espacement des sous-porteuses (15 kHz)

<i>Bande passante (MHz)</i>	1.4	3	5	10	15	20
<i>Fréquence d'échantillonnage (MHz)</i>	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
<i>Taille FFT</i>	128	256	512	1024	1536	2048
<i>Nombre de blocs de ressources</i>	6	15	25	50	75	100
<i>Symboles OFDM</i>			14/12		(Normal / étendu)	
<i>Longueur CP</i>			4.7/5.6		(Normal / étendu)	

Tableau II.3. Blocs de ressources, FFT et tailles de préfixes cycliques pour chaque bande passante LTE

II.7.3. Opérations typiques du récepteur

Dans le récepteur, nous effectuons les inverses des opérations de l'émetteur :

- Les échantillons de préfixe cyclique sont supprimés du début du symbole OFDM reçu.
- Une opération FFT (Fast Fourier Transform) est effectuée pour calculer les éléments de grille de ressources reçus d'un symbole OFDM particulier.
- Effectuer une opération d'égalisation sur les éléments de ressource reçus pour annuler les effets du brouillage de canal et inter symbole.
- La réponse en fréquence du canal doit être estimée pour toute la bande passante à l'aide de pilotes ou de signaux de référence spécifiques à la cellule CSR (cell-specific reference).

Après avoir estimé la réponse de canal, nous récupérons les meilleures estimations des éléments de ressource transmis par multiplication des éléments de ressource reçus par les valeurs réciproques des réponses de canal estimées.

II.8. Multiplexage par répartition de fréquence à porteuse unique

La façon dont SC-FDM est implémenté dans la norme LTE est essentiellement précédant le modulateur OFDM avec un précodeur DFT (Discrete Fourier Transform). Cette technique est connue sous le nom de Multiplexage par Division de Fréquence Orthogonale Transformée de Fourier Discrète DFTS-OFDM (Discrete Fourier Transform-Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing), La particularité de la transmission SC-FDM est que chaque symbole de données est essentiellement réparti sur toute la bande passante allouée. SC-FDM offre les mêmes avantages offerts par l'OFDM, notamment : maintien de l'orthogonalité entre plusieurs utilisateurs de liaison montante, récupération des données à l'aide d'une égalisation dans le domaine fréquentiel, lutte contre la décoloration par trajets multiples.

II.9. Contenu de la grille de ressources

Le schéma de transmission LTE fournit une résolution temporelle de 12 ou 14 symboles OFDM pour chaque sous-trame de 1 ms, en fonction de la longueur du préfixe cyclique OFDM. En ce qui concerne la résolution en fréquence, elle prévoit un nombre de blocs de ressources allant de 6 à 100, selon la largeur de bande, contenant chacun 12 sous-porteuses espacées de 15 kHz. Il existe essentiellement trois types d'informations contenues dans la grille des ressources physiques. Chaque élément de ressource contient le symbole modulé soit des données d'utilisateur, soit d'un signal de référence ou de synchronisation ou des informations de commande provenant de divers canaux de couches supérieures. La figure II.5 montre les emplacements relatifs des données d'utilisateur, des informations de commande et du signal de référence dans une grille de ressources comme défini pour un mode de fonctionnement monodiffusion. En mode monodiffusion, les données utilisateur portent les informations que chaque utilisateur souhaite communiquer et sont délivrées de la couche MAC (Medium Access Control) au PHY en tant que bloc de transport. Différents types de signaux de référence et de synchronisation sont générés de manière prévisible par la station de base et le poste mobile. Ces signaux sont utilisés à des fins telles que l'estimation de canal, la mesure de canal et la synchronisation. Enfin, nous avons différents types d'informations de contrôle, qui sont obtenues via les canaux de contrôle et transportent les informations dont le récepteur a besoin pour décoder correctement le signal. Ensuite, nous décrivons les canaux physiques utilisés dans la transmission descendante et montante et leurs relations avec les canaux de couche supérieure, c'est-à-dire des canaux de transport et des canaux logiques. Par rapport à l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) et à d'autres normes 3GPP, LTE a considérablement réduit

son utilisation de canaux dédiés et s'appuie davantage sur des canaux partagés. Cela explique la convergence de nombreux types de canaux logiques et de transport sur les canaux physiques partagés. Outre les canaux physiques, deux types de signaux physiques - les signaux de référence et les signaux de synchronisation - sont également transmis dans le canal physique partagé [1].

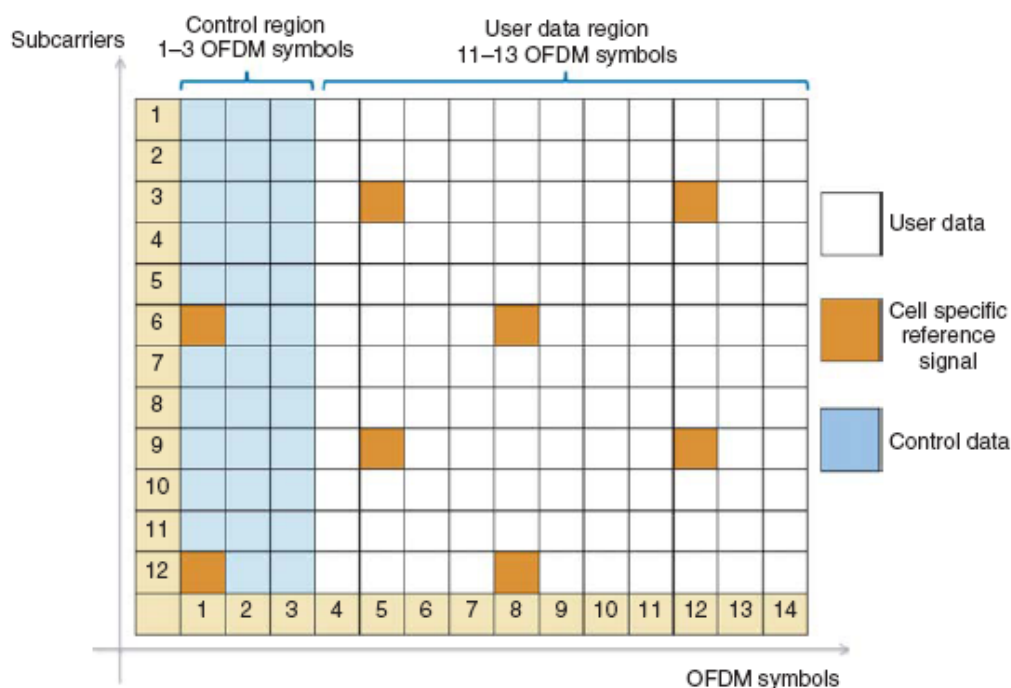


Figure II.5. Canal physique et contenu du signal de sous-trame DL en mode monodiffusion

II.10. Canaux physiques

Les canaux logiques représentent les transferts de données et les connexions entre la couche de commande de liaison radio RLC (radio link control) et la couche MAC. LTE définit deux types de canal logique : un canal de trafic et un canal de contrôle. Le canal logique de trafic transfère les données du plan utilisateur et les canaux logiques de contrôle transfèrent les informations du plan de commande. Les canaux de transport connectent la couche MAC au PHY et les canaux physiques sont traités par l'émetteur-récepteur au PHY.

La transmission de données en liaison descendante et en liaison montante utilise respectivement les types de canaux de transport DL-SCH (Downlink Shared Channel) et UL-SCH (Uplink Shared Channel). Chaque canal de transport est mappé sur un canal physique correspondant. Les canaux physiques sans canaux de transport correspondants sont appelés canaux de commande L1/L2, utilisés pour les informations de commande de liaison descendante (DCI), fournissant au terminal les informations nécessaires pour une réception et un décodage corrects des données de transmission de liaison descendante, et pour les informations de contrôle de liaison montante

(UCI), utilisées pour fournir le planificateur et le Protocole HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) avec des informations sur la situation le terminal.

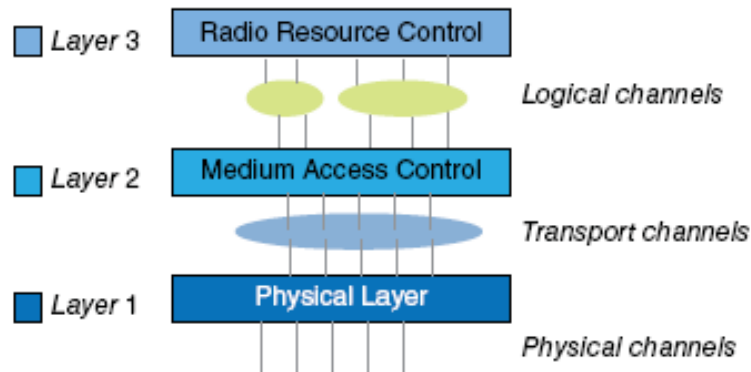


Figure II.6. Architecture de couche dans un réseau d'accès radio LTE

II.10.1 Canaux physiques de liaison descendante

Le tableau II.4 résume les canaux physiques de liaison descendante LTE. Le canal de multidiffusion physique PMCH (Physical Multicast Channel) est utilisé aux fins du MBMS. Le reste des canaux physiques est utilisé dans le mode de transmission monodiffusion traditionnel.

<i>Canal physique de liaison descendante</i>	<i>Fonction</i>
<i>Canal partagé de liaison descendante physique (PDSCH)</i>	<i>Trafic de données utilisateur unicast et informations de pagination</i>
<i>Canal de contrôle de liaison descendante physique (PDCCH)</i>	<i>Informations de contrôle de liaison descendante (DCI)</i>
<i>Canal d'indicateur hybride-ARQ physique (PHICH)</i>	<i>Indicateur HARQ (HI) et ACK / NACK pour les paquets de liaison montante</i>
<i>Canal d'indicateur de format de contrôle physique (PCFICH)</i>	<i>Informations sur le format de contrôle (CFI) contenant les informations nécessaires pour décoder les informations PDCCH</i>
<i>Canal de multidiffusion physique (PMCH)</i>	<i>Fonctionnement du réseau monofréquence de diffusion multimédia (MBSFN)</i>
<i>Canal de diffusion physique (PBCH)</i>	<i>Informations système requises par le terminal pour accéder au réseau lors de la recherche de cellules</i>

Tableau II.4. Canaux physiques de liaison descendante LTE [1].

La Figure II.7 illustre la relation entre divers canaux logiques, de transport et physiques dans l'architecture de liaison descendante LTE.

- Canal de trafic dédié (DTCH).

- Canal de contrôle de diffusion (BCCH). Canal de contrôle de radiomessagerie (PCCH).
- Canal de contrôle commun (CCCH).
- Canal de contrôle dédié (DCCH).
- Canal de contrôle de radiomessagerie (PCCH).
- Canal de recherche de personne (PCH).
- Canal partagé de liaison descendante physique (PDSCH).
- Canal de trafic multicast (MTCH).
- Canal de contrôle de multidiffusion (MCCH).
- Canal de multidiffusion (MCH).
- Canal de multidiffusion physique (PMCH).

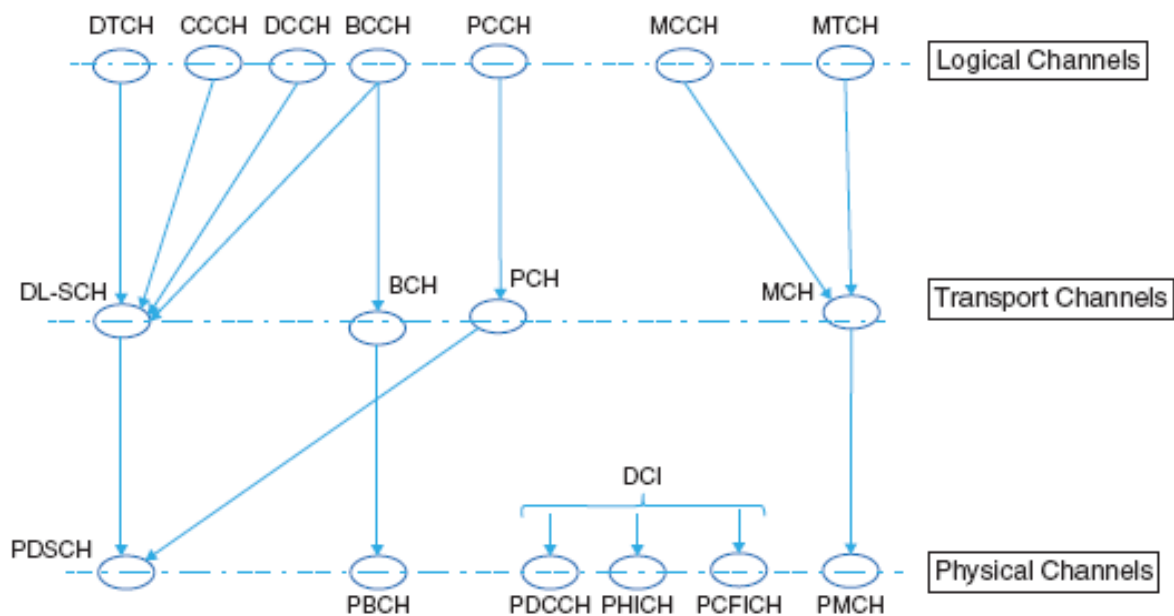


Figure II.7. Mappage des canaux logiques, de transport et physiques de liaison descendante LTE.

II.10.2 Fonction des canaux de liaison descendante

Le PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) transporte les données d'utilisateur de liaison descendante sous forme de blocs de transport qui sont transmis de la couche MAC au PHY. L'utilisation de la modulation adaptative, du codage et du MIMO dans la norme LTE implique que dans chaque sous-trame, en fonction de la qualité du canal observée au terminal mobile, la station de base doit prendre des décisions sur le type de schéma de modulation, le taux de codage et Mode MIMO. PDCCH (Physical Downlink Control Channel) est défini pour chaque canal PDSCH pour favoriser la communication entre la station de base et le terminal

mobile, PDCCH occupe (1, 2, 3 ou 4) symboles OFDM au début de chaque sous-trame de liaison descendante en fonction de la bande passante, de l'index de sous-trame et de l'utilisation du type de service monodiffusion par rapport au type de service multicast [1].

Les informations de contrôle transportées sur le PDCCH sont connues sous le nom de DCI, et il existe 10 formats différents possibles d'un tel DCI. Chaque format DCI contient : l'allocation des ressources, des informations telles que la taille du bloc de ressources et la durée de l'attribution des ressources, les informations de transport, la configuration multi-antennes, le type de modulation, le taux de codage et la taille de la charge utile du bloc de transport, ainsi que les informations HARQ, y compris son numéro de processus, la version de redondance et l'indicateur signalant la disponibilité de nouvelles données.

<i>Format DCI</i>	<i>Utilisation</i>
0	Affectation de planification de liaison montante
1	Planification de liaison descendante pour un mot de code PDSCH en modes SISO et SIMO
1A	Version compacte de la planification au format 1 pour un mot de code PDSCH ou affectation de préambule dédiée pour déclencher un accès aléatoire
1B	Planification de liaison descendante très compacte pour un mot de code PDSCH utilisé dans le mode MIMO numéro 6
1C	Planification de liaison descendante très compacte pour la pagination ou les informations système
1D	Programmation de liaison descendante compacte pour un mot de code PDSCH avec précodage MIMO et informations de décalage de puissance nécessaires pour MIMO multi-utilisateurs
2	Affectation de planification de liaison descendante pour MIMO avec multiplexage spatial en boucle fermée
2A	Affectation de planification de liaison descendante pour MIMO avec multiplexage spatial en boucle ouverte
3	Informations de contrôle de la puissance de transmission (TPC) pour PUCCH et PUSCH avec réglage de la puissance 2 bits
3A	Informations de contrôle de la puissance d'émission (TPC) pour PUCCH et PUSCH avec réglage de la puissance 1 bit

Tableau II.5. *Formats des informations de contrôle (DCI) en DL/LTE et leurs cas d'utilisation*

II.10.3 Canaux physiques de liaison montante

Le tableau II.6 résume les canaux physiques de liaison montante LTE. Le canal partagé de la liaison montante physique (PUSCH) transporte les données utilisateurs transmis depuis le terminal utilisateur. Le canal d'accès aléatoire physique (PRACH) est utilisé pour l'accès initial d'un UE au réseau via transmission de préambules à accès aléatoire. Le canal de contrôle de liaison montante physique (PUCCH) transporte l'UCI, y compris les demandes d'ordonnancement (SR), les accusés de réception de transmission succès ou échec (ACK / NACK), et rapports de mesures de canal de liaison descendante, y compris l'indicateur de qualité de canal (CQI), les informations de matrice de précodage (PMI) et le rang Indication (RI).

La Figure II.8 illustre la relation entre les canaux logiques, de transport et physiques dans l'architecture de liaison montante LTE. En commençant par les canaux logiques, nous avons un canal de trafic dédié (DTCH) et deux canaux de commande logiques, un canal de commande commun (CCCH) et un canal de commande dédié (DCCH). Ces trois canaux sont combinés pour former le canal de transport connu sous le nom de canal partagé de liaison montante (UL-SCH). Enfin, le canal partagé de liaison montante physique (PUSCH) et le canal de commande de liaison montante physique (PUCCH) sont formés en tant que canaux physiques. Le canal de transport connu sous le nom de Random Access Channel (RACH) est également mappé au canal d'accès aléatoire physique (PRACH).

II.10.4 Fonction des canaux de liaison montante

Le PUCCH transporte trois types d'informations de signalisation de commande : Signaux ACK / NACK pour transmission de liaison descendante, indicateurs de demandes de planification (SR) et retour d'information de la liaison descendante de canal, y compris le CQI, le PMI et le RI. La rétroaction des informations de canal de liaison descendante concerne les modes MIMO en liaison descendante.

Afin de garantir que les schémas de transmission MIMO fonctionnent correctement en liaison descendante, chaque le terminal doit effectuer des mesures sur la qualité de la liaison radio et signaler le canal caractéristique de la station de base. Ceci décrit essentiellement les fonctions de qualité de canal de l'UCI figurant dans le PUCCH.

<i>Canal physique de liaison montante</i>	<i>Fonction</i>
<i>Canal partagé de liaison montante physique (PUSCH)</i>	<i>Trafic de données utilisateur en liaison montante</i>
<i>Canal de contrôle de liaison montante physique (PUCCH)</i>	<i>Informations de contrôle de liaison montante (UCI)</i>
<i>Canal d'accès aléatoire physique (PRACH)</i>	<i>Accès initial au réseau via des préambules d'accès aléatoire</i>

Tableau II.6 Canaux physiques de liaison montante LTE

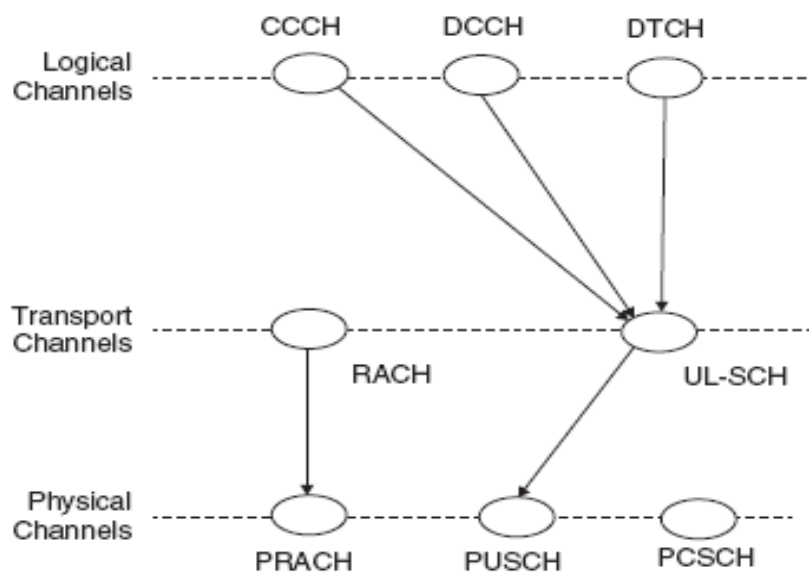


Figure II.8. Mappage des canaux logiques, de transport et physiques de liaison montante LTE [1].

II.11 Signaux physiques

Une variété de signaux physiques, y compris des signaux de référence et de synchronisation, sont transmis dans le canal physique partagé. Les signaux physiques correspondent à un élément de ressource spécifique utilisé par le PHY mais ne portent pas d'informations provenant de couches supérieures. Les détails de LTE les signaux sont présentés ensuite.

II.11.1 Signaux de référence

L'ordonnement dépendant du canal dans le domaine fréquentiel est l'une des fonctionnalités les plus intéressantes de la norme LTE. Par exemple, pour effectuer une planification de liaison descendante consciente la qualité réelle du canal, le terminal mobile doit

fournir à la station de base les informations sur l'état du canal (CSI). Le CSI peut être obtenu en mesurant les signaux de référence transmis dans la liaison descendante. Les signaux de référence sont des signaux transmis qui sont générés avec générateurs de séquence dans l'émetteur et le récepteur. Ces signaux sont placés dans des éléments de ressource dans la grille temps-fréquence.

II.11.1.1 Signaux de référence de liaison descendante

- **Signaux de référence spécifiques à la cellule** : transmis dans chaque sous-trame de liaison descendante et dans chaque bloc de ressources, utilisés par les terminaux pour l'estimation de canal et pour acquérir le CSI (Channel-State Information), aide à la sélection des cellules et aux décisions de transfert intercellulaire.
- **Signaux de référence spécifiques à l'UE** : utilisés uniquement dans les modes de transmission descendante 7, 8 ou 9, un ou deux de ces signaux peuvent être utilisés, dans le cas de 2 DM-SR utilisés avec 2 antennes, les interférences peuvent être atténuées par des motifs orthogonaux pour chaque paire de symboles de référence consécutifs.
- **Signaux de référence CSI-RS (Channel-State Information Reference Signal)** : utilisés uniquement dans les cas où nous avons entre quatre et huit antennes (qui n'est actif que dans les scénarios de faible mobilité).
- **Signaux de référence MBSFN (Multimedia Broadcast Single-Frequency Network)**: utilisés dans la démodulation des services de multidiffusion / diffusion.
- **Signaux de référence de positionnement** : prise en charge des mesures sur plusieurs cellules afin d'estimer la position d'un terminal donné.

II.11.1.2 Signaux de référence de liaison montante

- **Signaux de référence de démodulation (DM-RS)** : transmis par l'UE dans le cadre de la grille de ressources de liaison montante, utilisés par le récepteur BS pour égaliser et démoduler les informations de commande de liaison montante PUCCH (Physical Uplink Control Channel) et de données PUSCH (Physical Uplink Shared Channel).
- **Signaux de référence de sondage (SRS)** : transmis pour permettre à la BS d'estimer la réponse du canal de liaison montante à différentes fréquences, leurs autres applications comprennent l'estimation de la synchronisation et le contrôle des conditions du canal de liaison descendante en cas de mode TDD [1].

II.11.2 Signaux de synchronisation

Utilisés pour la détection des limites de trame, la détermination du nombre d'antennes, la recherche initiale de cellules, la recherche de cellules voisines et le transfert intercellulaire.

Il existe deux types : le signal de synchronisation primaire PSS (Primary Synchronization Signal) et le signal de synchronisation secondaire SSS (Secondary Synchronization Signal). Le PSS et le SSS sont tous deux transmis en tant que 72 sous-porteuses situées autour de la sous-porteuse DC. Dans une trame FDD, ils sont positionnés dans les sous-trames 0 et 5, côte à côte. Dans un cadre TDD, ils ne sont pas placés à proximité.

Les signaux de synchronisation sont liés à l'identité de la cellule PHY, Il existe 504 identités de cellule définies dans le LTE, organisées en 168 groupes, chacun contenant trois identités uniques. Le PSS porte une identité unique 0, 1 ou 2, tandis que le SSS porte l'identité de groupe avec les valeurs 0 à 167.

II.12. Structures de trame de liaison descendante

La figure II.9 montre la structure de la trame radio de type 1. La durée de chaque trame est de 10 ms, composé de dix sous-trames de 1 ms désignées par des indices allant de 0 à 9. Le PBCH contenant le MIB est situé dans la sous-trame 0 et le PSS et le SSS sont situés dans les sous-trames 0 et 5. Le canal PBCH et les signaux PSS et SSS sont placés dans les six blocs de ressources centrés sur la sous-porteuse DC. De plus, les CSR sont placés dans chaque bloc de ressources dans chaque sous-trame avec un modèle spécifique de temps et de fréquence séparations. Le modèle de placement des signaux CSR dépend du mode MIMO et le nombre d'antennes utilisées, comme cela sera discuté sous peu. Le reste des éléments de ressources dans chaque sous-trame sont allouées aux données de trafic utilisateur.

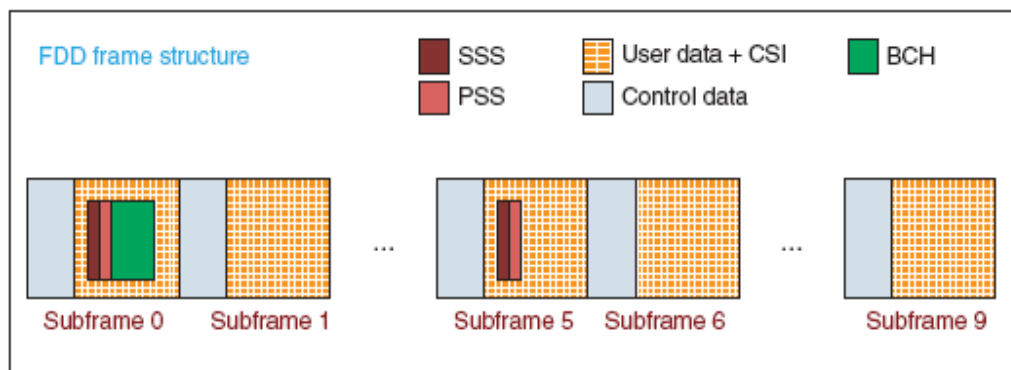


Figure II.9. Structure de sous-trame FDD de liaison descendante [1].

II.13 Structure de trame de liaison montante

La structure de sous-trame de liaison montante est à certains égards similaires à celle de la liaison descendante. Il est composé de sous-trames de 1 ms divisées en deux créneaux de 0,5 ms. Chaque emplacement est composé de sept ou six symboles SC-FDM, selon que l'on utilise un préfixe cyclique normal ou étendu.

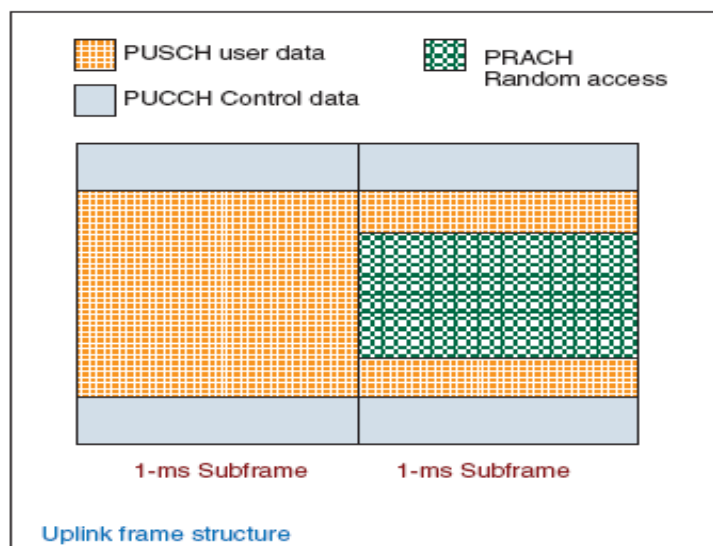


Figure II.10. Structure de trame de liaison montante.

II.14 MIMO

Les normes LTE et LTE-Advanced atteignent leurs débits de données maximaux en partie grâce à leur intégration de nombreuses techniques multi-antennes ou MIMO. Dans un système MIMO-OFDM, ce processus de (construction de la grille de ressources, génération des symboles OFDM et émission) est répété pour plusieurs antennes d'émission. Au niveau de chaque antenne Rx, les symboles OFDM de toutes les antennes Tx sont combinés. L'objectif d'un récepteur MIMO est donc de séparer les signaux combinés. MIMO peut être utilisé de différentes manières pour atteindre différents objectifs (diversité de réception, diversité de transmission, formation de faisceaux, multiplexage spatial ou diversité de délai cyclique).

II.14.1 Diversité de réception

C'est La configuration multi-antenne la plus simple et la plus courante côté récepteur. Ce type de MIMO peut être utilisé dans SISO (Single Input Single Output) ou SIMO (Single Input Multiple Output). Deux types de méthode de combinaison peuvent être utilisés au niveau du récepteur : la combinaison de rapport maximum (MRC) et la combinaison de sélection (SC).

MRC : combinez les multiples signaux reçus en les moyennant pour trouver l'estimation la plus probable du signal transmis. En SC : seul le signal reçu avec le SNR (rapport signal sur bruit) le plus élevé est utilisé pour estimer le signal transmis [11].

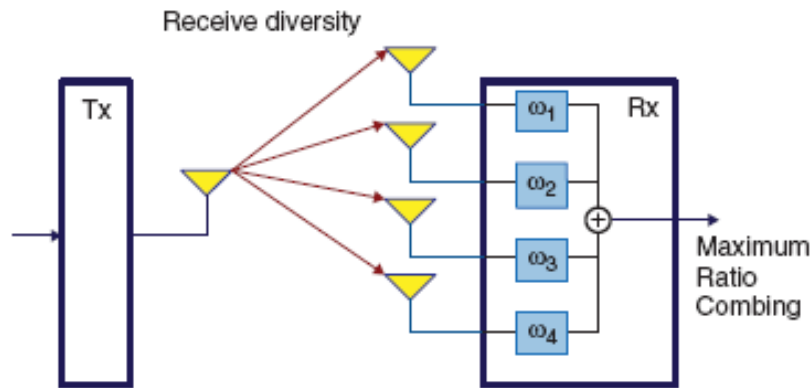


Figure II.11. Diversité de réception MIMO

II.14.2 Diversité de transmission

La diversité de transmission exploite plusieurs antennes côté émetteur pour introduire la diversité en transmettant des versions redondantes du même signal sur plusieurs antennes. Ce type de technique MIMO est généralement appelée codage par blocs spatio-temporels (STBC). En modulation STBC, les symboles sont mappés dans les domaines du temps et de l'espace (antenne d'émission) pour capturer la diversité offerte par l'utilisation de plusieurs antennes. Le codage par blocs espace-fréquence (SFBC) est une technique étroitement liée au STBC qui est sélectionnée comme technique de diversité de transmission dans la norme LTE. La principale différence entre ces deux techniques est que dans SFBC le codage se fait dans l'antenne (espace) et les domaines fréquentiels plutôt que dans l'antenne (espace) et les domaines temporels, comme c'est le cas pour STBC. Un bloc de diagramme de SFBC est donné à la figure II.12.

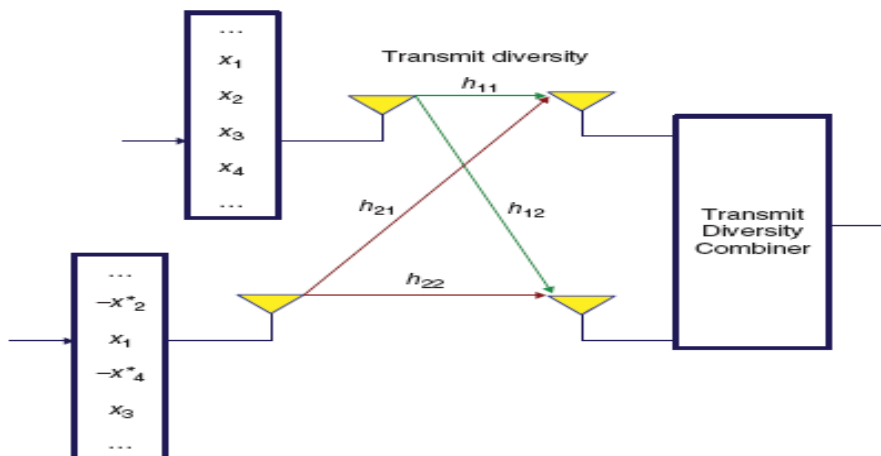


Figure II.12. Codage du bloc espace-fréquence MIMO.

II.14.3 Multiplexage spatial

Dans le multiplexage spatial, des flux de données totalement indépendants sont transmis simultanément sur chaque antenne d'émission. L'utilisation du multiplexage spatial permet à un système d'augmenter ses données proportionnellement au nombre de ports d'antenne d'émission. En même temps, et à la même sous-porteuse en fréquence, différents symboles modulés sont transmis sur différentes antennes. Ce signifie que le multiplexage spatial peut directement augmenter l'efficacité de la bande passante et aboutir à un système à utilisation élevée de la bande passante. Les avantages du multiplexage spatial ne peuvent être réalisés que si les transmissions sur différentes antennes ne sont pas corrélées. C'est là que l'évanouissement par trajets multiples la nature d'un lien de communication contribue réellement à la performance. Puisque l'évanouissement par trajets multiples peut décorréliser les signaux reçus à chaque port d'antenne de réception, multiplexage spatial transmis sur un canal à évanouissement par trajets multiples peut en fait améliorer les performances [1].

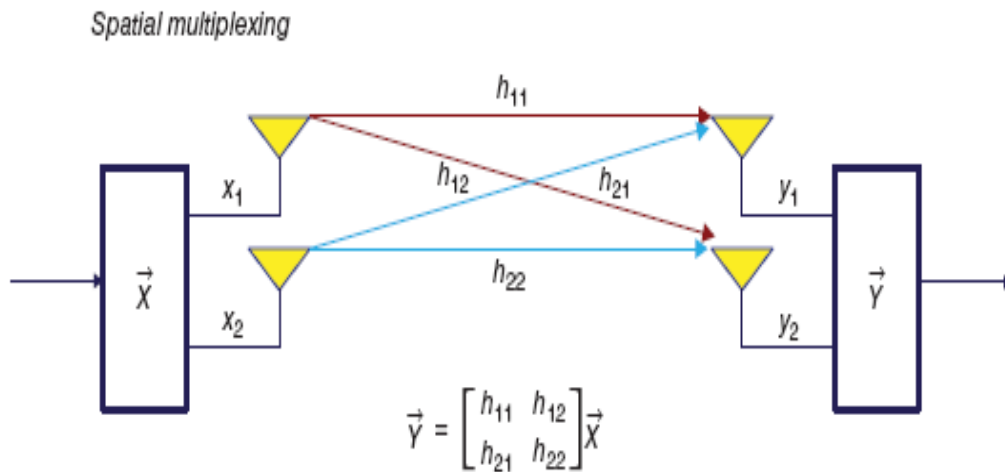


Figure II.13. Multiplexage spatial MIMO

II.14.4 Formation de faisceaux

Dans la formation de faisceau, plusieurs antennes d'émission peuvent être utilisées pour façonner le diagramme de rayonnement global de l'antenne (ou le faisceau) afin de maximiser le gain d'antenne global dans la direction du terminal mobile. Ce type de formation de faisceau constitue la base de la liaison descendante MIMO mode de transmission 7 [12].

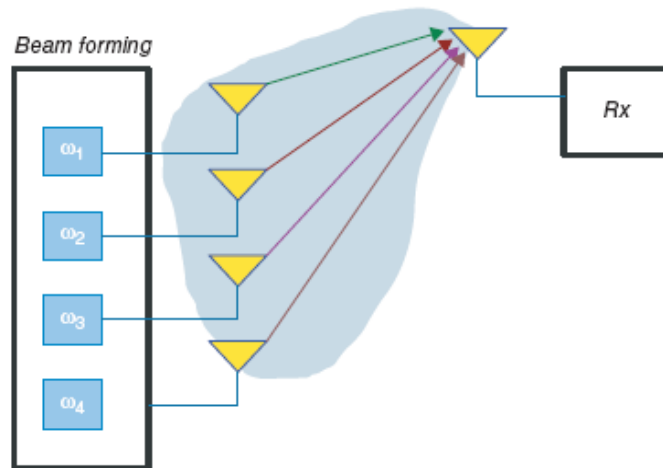


Figure II.14. Formation de faisceaux MIMO

II.14.5 Diversité des délais cycliques

Une autre forme de diversité qui est utilisée côte à côte avec le multiplexage spatial en boucle ouverte. Il applique des décalages cycliques à des vecteurs ou des blocs de signal transmis à un instant donné sur différentes antennes, En émission OFDM, un décalage cyclique du domaine temporel correspond à un déphasage dépendant de la fréquence dans le domaine fréquentiel. La diversité de délai cyclique (CDD) est utilisée dans le multiplexage spatial en boucle ouverte et dans les scénarios à mobilité élevée où la rétroaction en boucle fermée d'une matrice de précodage optimale n'est pas souhaitable.

II.14.6 Modes MIMO

Le tableau II.7 résume les modes de transmission LTE et les schémas de transmission multi-antennes associés. Le mode 1 utilise la diversité de réception et le mode 2 est basé sur la diversité de transmission. Les modes 3 et 4 sont des implémentations mono-utilisateur de multiplexage spatial basées respectivement sur un précodage en boucle ouverte et en boucle fermée. Le mode 3 utilise également CDD. Le mode LTE 5 spécifie une implémentation très simple de MIMO multi-utilisateurs basée sur le mode 4 avec le nombre maximum de couches fixé à un. Le mode 6 présente la formation de faisceaux et un cas particulier du mode 4 où le nombre de couches est fixé à deux. Les modes LTE 7–9 implémentent des versions de multiplexage spatial sans l'utilisation de livres de codes, avec un nombre de couches de 1, jusqu'à 2 et 4–8, respectivement. Le LTE-Advanced (version 10) a apporté des améliorations majeures à la liaison descendante MU-MIMO en introduisant les modes 8 et 9. Par exemple, le mode 9 prend en charge huit antennes de transmission pour des transmissions jusqu'à huit couches. Ces

avancées résultent directement de l'introduction de nouveaux signaux de référence (CSI-RS et DM-RS), permettant un précodage non basé sur un livre de codes et adoptant ainsi une structure de double livre de codes à faible surcoût [13].

Mode 1	<i>Transmission à antenne unique</i>
Mode 2	<i>Transmettre la diversité</i>
Mode 3	<i>Précodage basé sur un livre de codes en boucle ouverte</i>
Mode 4	<i>Précodage basé sur un livre de codes en boucle fermée</i>
Mode 5	<i>Versions MIMO multi-utilisateurs du mode de transmission 4</i>
Mode 6	<i>Cas particulier monocouche de précodage basé sur un livre de codes en boucle fermée</i>
Mode 7	<i>Précodage non basé sur un livre de codes version 8 prenant en charge une seule couche, basé sur la formation de poutres</i>
Mode 8	<i>Précodage non basé sur un livre de codes, prenant en charge jusqu'à deux couches</i>
Mode 9	<i>Version 10 du précodage non basé sur un livre de codes prenant en charge jusqu'à huit couches</i>

Tableau II.7. Modes de transmission LTE et leurs schémas de transmission multi-antennes associés

II.15. Traitement PHY

Afin de comprendre le LTE PHY, nous devons spécifier la séquence d'opérations suivante. Tout d'abord, décrivez le codage, le brouillage et la modulation de canal résultant en des symboles modulés, puis décrivez les étapes de mappage des signaux modulés sur la grille de ressources, y compris le mappage des données utilisateur, des signaux de référence et des données de commande. Ensuite, spécifiez les modes MIMO qui permettent les transmissions d'antennes multiples. Les différents algorithmes MIMO impliquent de spécifier le mappage de couche, qui décrit le nombre d'antennes de transmission utilisées dans chaque trame et la transformation de précodage appliquée aux bits modulés avant qu'ils ne soient mappés sur les grilles de ressources de toutes les antennes de transmission [1].

II.15.1. Traitement de la liaison descendante

La chaîne des opérations de traitement du signal effectuées dans l'émetteur peut être résumée comme la combinaison du traitement des blocs de transport et du traitement des canaux physiques. Le traitement la pile est complètement spécifiée dans les documents 3GPP décrivant le multiplexage et le canal codage et canaux physiques et modulation [12]. La chaîne de traitement du signal en bande de base appliqué à la combinaison de DL-SCH et PDSCH peut être résumée comme suit :

- Attachement CRC (Cyclic Redundancy Check) du bloc de transport
- Segmentation de bloc de code et attachement CRC de bloc de code
- Codage turbo basé sur un taux d'un tiers
- Correspondance de taux pour gérer les taux de codage demandés
- Concaténation de blocs de code pour générer des mots de code
- Brouillage des bits codés dans chacun des mots de code à transmettre sur un canal physique
- Modulation des bits brouillés pour générer des symboles de modulation à valeurs complexes
- Mappage des symboles de modulation à valeurs complexes sur une ou plusieurs couches de transmission
- Précodage des symboles de modulation à valeurs complexes sur chaque couche pour transmission sur les ports d'antenne
- Mappage des symboles de modulation à valeurs complexes pour chaque port d'antenne aux éléments de ressource
- Génération d'un signal OFDM dans le domaine temporel à valeurs complexes pour chaque port d'antenne.

La figure II.15 illustre la combinaison du traitement du signal appliqué aux blocs de transport fournis au PHY à partir de la couche MAC jusqu'à ce que le signal OFDM soit transféré aux antennes pour transmission.

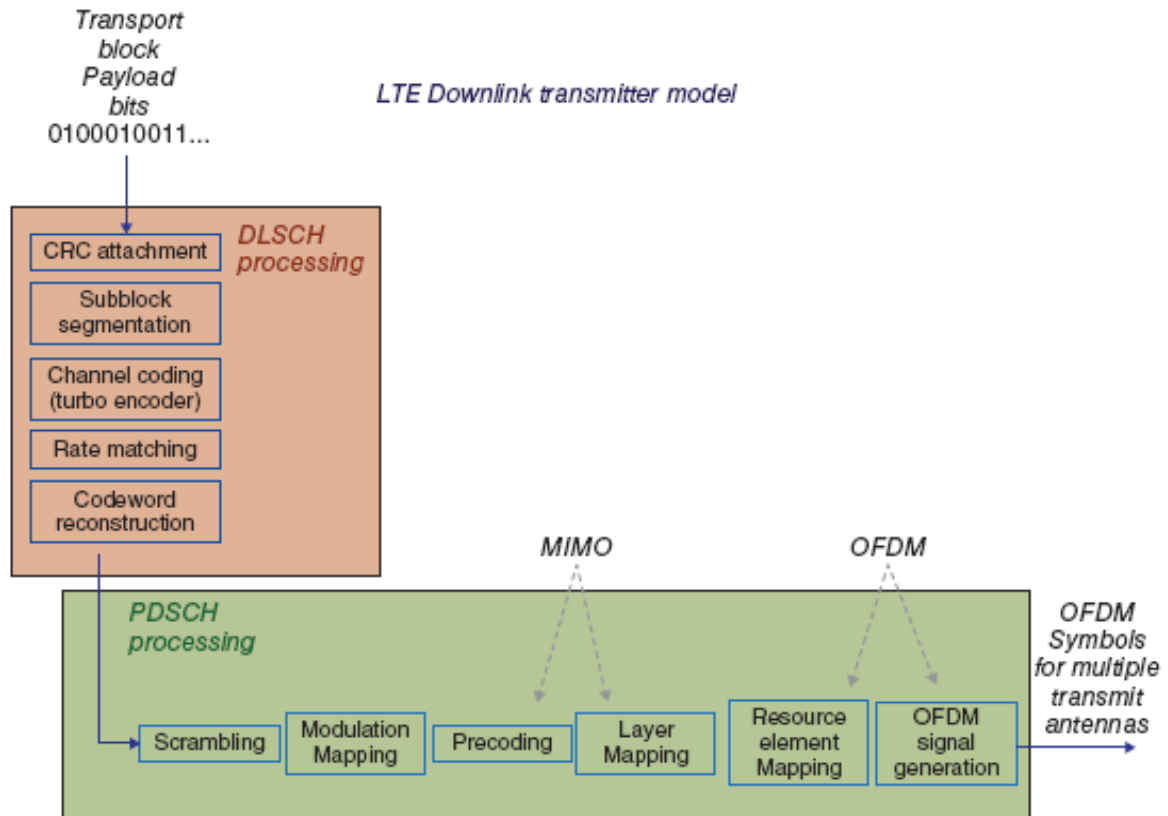


Figure II.15. Chaîne de traitement du signal des liaisons descendantes DL-SCH et PDSCH

II.15.2. Traitement de la liaison montante

La chaîne d'opérations de traitement du signal appliquée à la combinaison de UL-SCH et PUSCH se résume comme suit :

- Fixation CRC du bloc de transport
- Segmentation de bloc de code et attachement CRC de bloc de code
- Codage turbo basé sur un taux d'un tiers
- Correspondance de taux pour gérer les taux de codage demandés
- Concaténation de blocs de code pour générer des mots de code
- Brouillage
- Modulation des bits brouillés pour générer des symboles à valeurs complexes
- Mappage des symboles de modulation sur une ou plusieurs couches de transmission
- Précodage de transformation DCT pour générer des symboles à valeurs complexes
- Précodage des symboles à valeurs complexes

- Mappage des symboles précodés aux éléments de ressources
- Génération d'un signal SC-FDM dans le domaine temporel pour chaque port d'antenne.

La figure II.16 illustre la combinaison du traitement du signal appliqué aux blocs de transport fournis au PHY jusqu'à ce que le signal SC-FDM soit transféré aux antennes pour transmission. La pile de traitement est également entièrement spécifiée dans les documents 3GPP décrivant le multiplexage et le codage de canal [15] et les canaux physiques et la modulation [12].

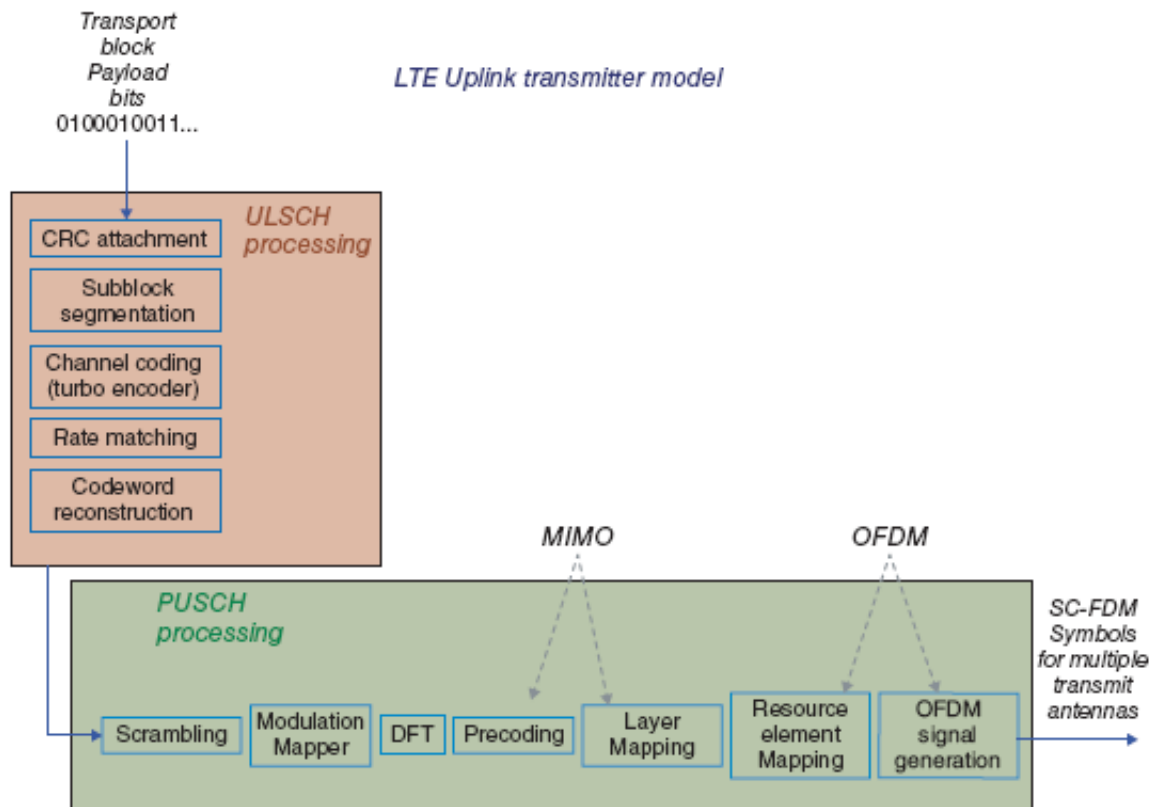


Figure II.16. Chaîne de traitement du signal des liaisons descendantes ULSCH et PUSCH

II.16. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les spécifications PHY des normes LTE, nous avons examiné l'interface radio de la norme, en détaillant ses bandes de fréquences, ses largeurs de bande, son cadrage temporel et sa structure temps-fréquence. Nous avons aussi décrit les différents canaux et signaux physiques utilisés dans les transmissions en liaisons montante et descendante, ainsi qu'une introduction aux schémas MIMO utilisés dans la norme, qui spécifient différents modes de transmission.

III.1 INTRODUCTION

Pour pouvoir évaluer les performances d'un réseau ou d'une technologie, il est coûteux de déployer toute leur infrastructure afin de vérifier et de valider leurs fonctionnalités. Pour remédier à cela, nous avons recours à la simulation qui met à la disposition de l'utilisateur un environnement d'expérimentation.

Simuler, c'est modéliser un système complexe, afin de prévoir son comportement dans le monde réel. Il s'agit d'une approche permettant de représenter le fonctionnement d'un système réel formé de plusieurs entités, de modéliser les différentes interactions entre elles et enfin évaluer le comportement global du système et son évolution dans le temps.

Dans ce chapitre nous allons modéliser et simuler la liaison descendante de bout en bout de la couche physique dans LTE en utilisant un modèle Simulink et aussi des fonctionnalités Matlab.

III.2 MODELISATION D'UNE CHAINE DE TRANSMISSION LTE

La figure III.1 représente notre modèle Simulink d'une chaîne de transmission LTE. Il est composé d'un modèle de chaîne d'émission OFDM, d'un modèle de canal de transmission, d'un modèle de réception et de modules de mesure et d'affichage pour nos besoins de simulation.

Certains paramètres globaux sont configurés pour le code Turbo, nous devons donc d'abord exécuter le fichier de configuration dans Matlab, afin de les charger.

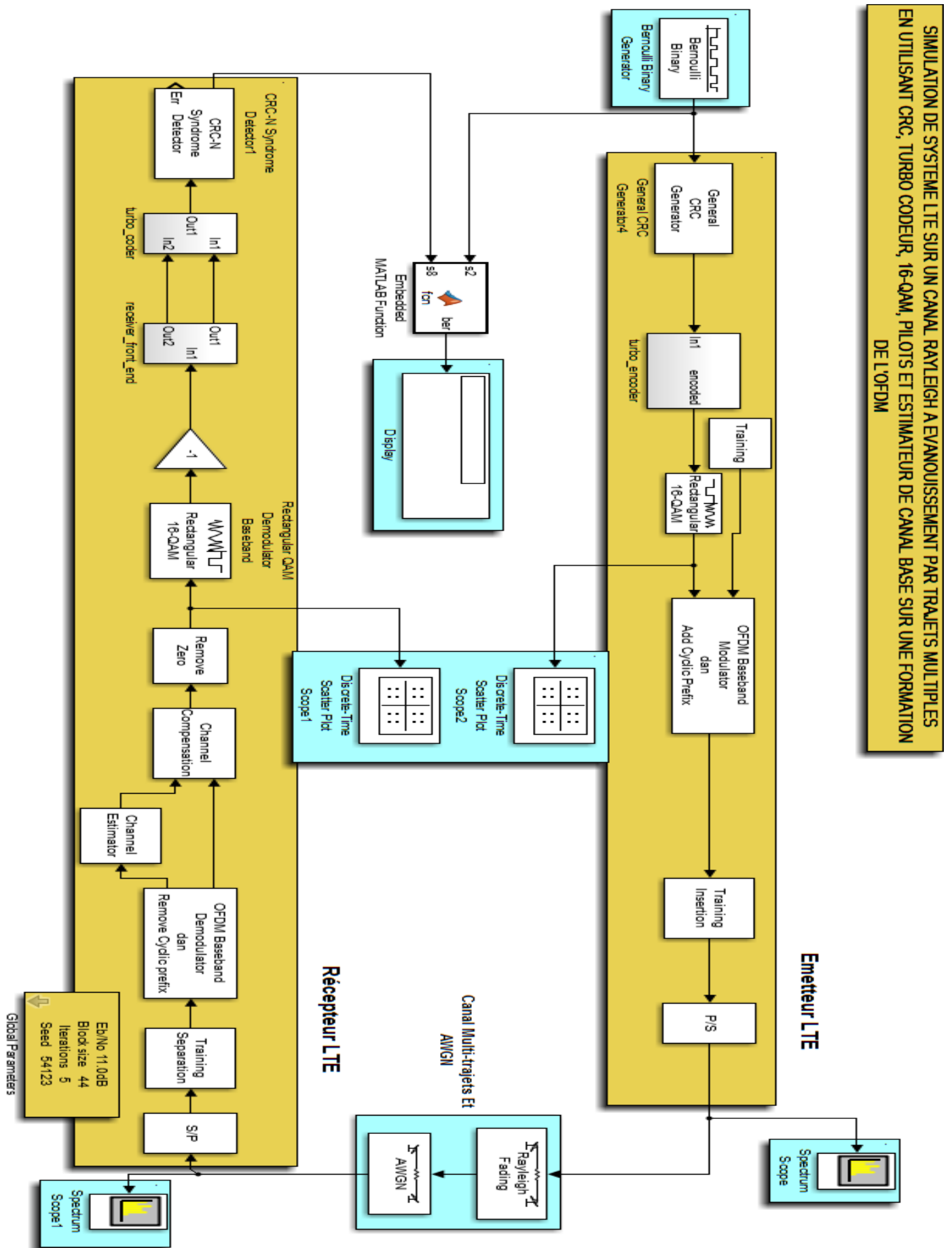


Figure III.1: Modèle Simulink d'un Système LTE_16QAM

III.2.1 Modèle Simulink de la chaîne d'émission LTE

La figure ci-dessous présente la chaîne d'émission d'un système LTE. Elle est composée essentiellement d'un codeur de canal CRC, turbocodeur, d'un modulateur 16 QAM et d'un modulateur OFDM.

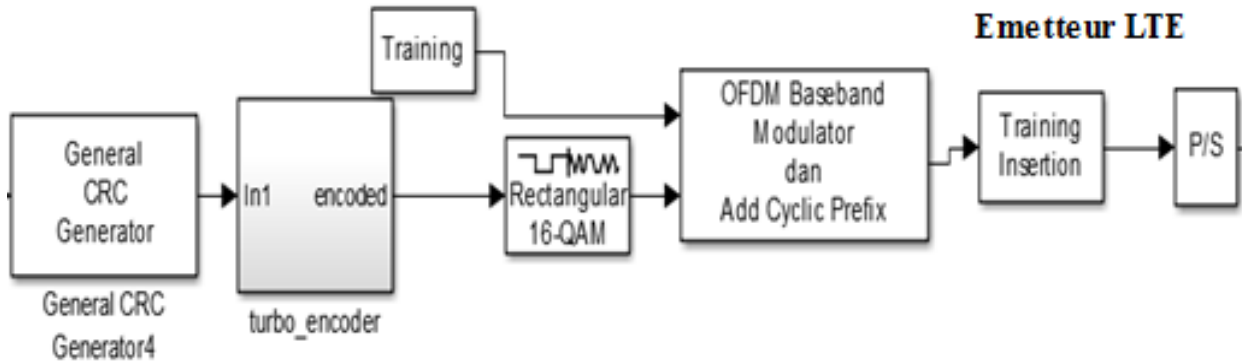


Figure III.2 : Modèle Simulink d'une chaîne d'émission du système LTE.

- Bernoulli BinaryGenerator:** Le premier bloc de notre modèle Simulink (Figure III.1) est la source de notre système, à savoir un générateur binaire Bernoulli qui fournit des impulsions binaires aléatoires en utilisant une distribution de Bernoulli. Ce générateur produit un « 0 » avec une probabilité p et un « 1 » avec la probabilité $(1-p)$, la valeur moyenne de la distribution de Bernoulli est $(1-p)$ et sa variance $p(1-p)$.

Afin de générer une sortie vectorielle, nous devons spécifier la probabilité p en tant que vecteur. Dans notre cas, cette probabilité p est de 0,5 et la longueur du code de sortie est de 20 échantillons.

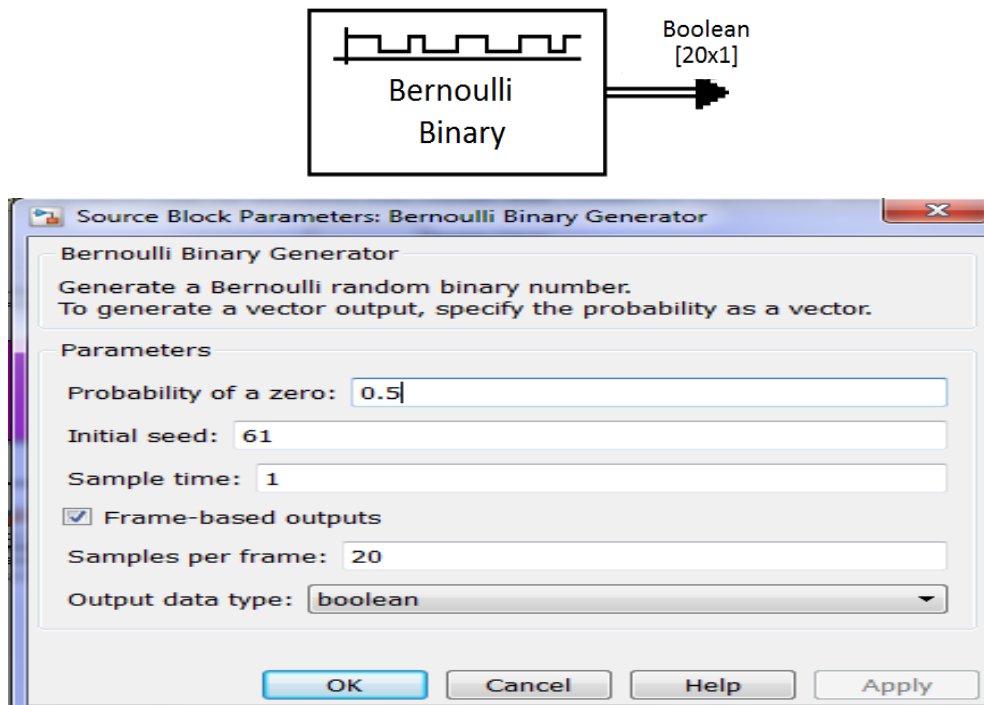
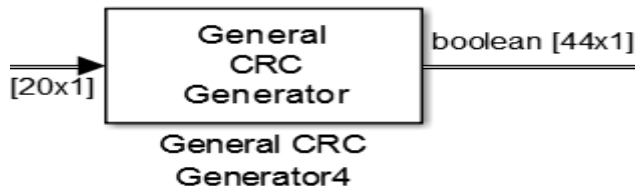


Figure III.3 : Modèle Simulink d'un générateur binaire de Bernoulli avec son bloc de paramétrage

- Générateur CRC :** Selon les spécifications du 3GPP, le codage de canal consiste en deux codeurs CRC, le premier correspond au schéma «gCRC24A» et le second au schéma «gCRC24B». Étant donné que nos données ont une entrée de 20 bits, ce qui est beaucoup plus petit que le maximum autorisé (6144 bits), nous n'avons pas besoin d'implémenter l'algorithme de segmentation. Malheureusement, si nous ajoutons le deuxième générateur CRC, le temps d'échantillonnage passe en continu, ce qui ne convient pas aux autres blocs du modèle, en particulier, le bloc P/S qui n'accepte pas ce type de données. Nous utiliserons ainsi donc un seul générateur CRC avec une sortie sur 44 bits suivi d'un turbo-codeur.



Le polynôme est [24,23,18,17,14,11,10,7,6,5,4,3,1,0] comme il est spécifié dans la norme. Ce polynôme a une longueur de 24 bits de parité. Rappelons que si nous exprimons le message sous forme de polynôme, le codeur CRC divise ce polynôme entre le polynôme générateur et prend le reste comme un autre mot de code.

- Turbo-codeur :** Le turbo-code peut être considéré comme un raffinement de la structure de codage concaténée plus un algorithme itératif pour décoder la séquence de code associée.

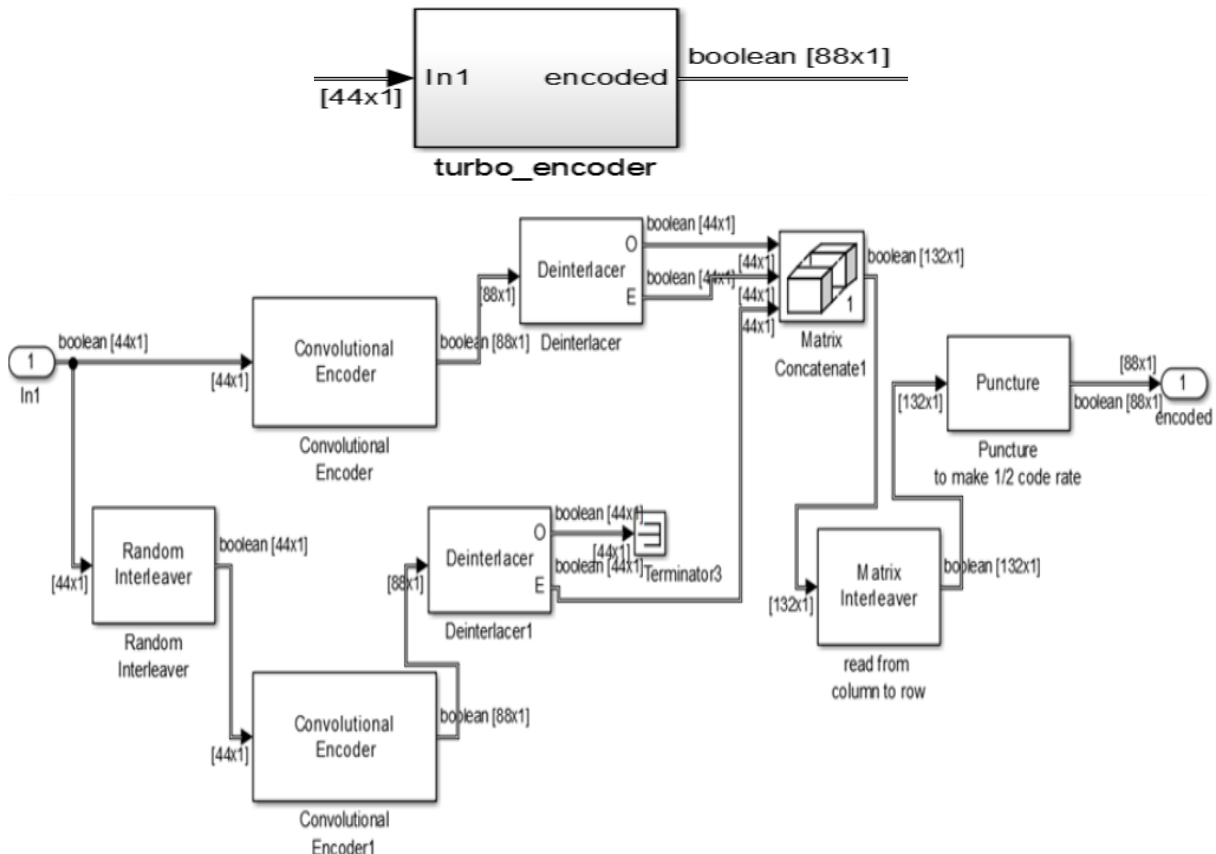


Figure III.4 : Bloc Turbo Encoder

Un codeur convolutif accepte des messages de longueur de k bits et génère des mots de code de n bits. Généralement, il est constitué d'un registre à décalage de L segments où L rétrograde la longueur de contrainte.

Dans la branche supérieure, le codeur convolutif utilise la fonction «poly2trellis» pour créer un treillis en utilisant la longueur de contrainte, générateur de code (octal) et connexion de rétroaction (octal). La structure en treillis est celle spécifiée dans la norme: poly2trellis (5, [37 21], 37); ') pour un taux de code de 1/2.

Ensuite, cette sortie de 88 échantillons est traitée par le bloc Deinterlacer qui sépare les éléments du signal d'entrée pour générer les signaux de sortie. Les éléments impairs du signal d'entrée deviennent le premier signal de sortie, tandis que les éléments pairs du signal d'entrée deviennent le second signal de sortie. Par conséquent, il y a deux signaux de 44 échantillons.

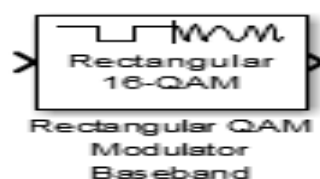
Dans la branche inférieure, nous avons un entrelaceur aléatoire qui entrelace les éléments du vecteur d'entrée à l'aide d'une permutation aléatoire. Nous sélectionnons une sortie de 44 échantillons et une graine, définie comme une variable, de 54123. Plus tard, ces 44 échantillons sont traités par un encodeur convolutif et un désentrelaceur.

À ce stade, nous avons quatre signaux de sortie au milieu de l'encodeur Turbo. De ces quatre flux de bits, nous en prenons trois: le flux de bits systématique, le flux de bits de parité et le flux de parité entrelacée. Ensuite, l'entrelaceur matriciel réorganise le vecteur d'entrée en écrivant les éléments dans une matrice ligne par ligne et en les lisant colonne par colonne.

Enfin, le bloc Puncture sort les éléments qui correspondent à 1s dans le vecteur binaire Puncture, [1 1 0 1 0 1] pour obtenir un taux de code 3/4. Notez que la norme suggère un taux de code de 1/3, mais en raison de problèmes pratiques de Simulink (tailles des signaux et correspondance de tous les types de temps d'échantillonnage), nous avons dû implémenter le taux de code 3/4.

- **16 QAM ModulatorBaseband :**

La modulation 16QAM implique l'utilisation de 16 choix de signalisation différents et utilise ainsi 4 bits d'information pour coder chaque symbole de modulation. Dans ce modèle 16QAM avec une cartographie Gray a été utilisé:



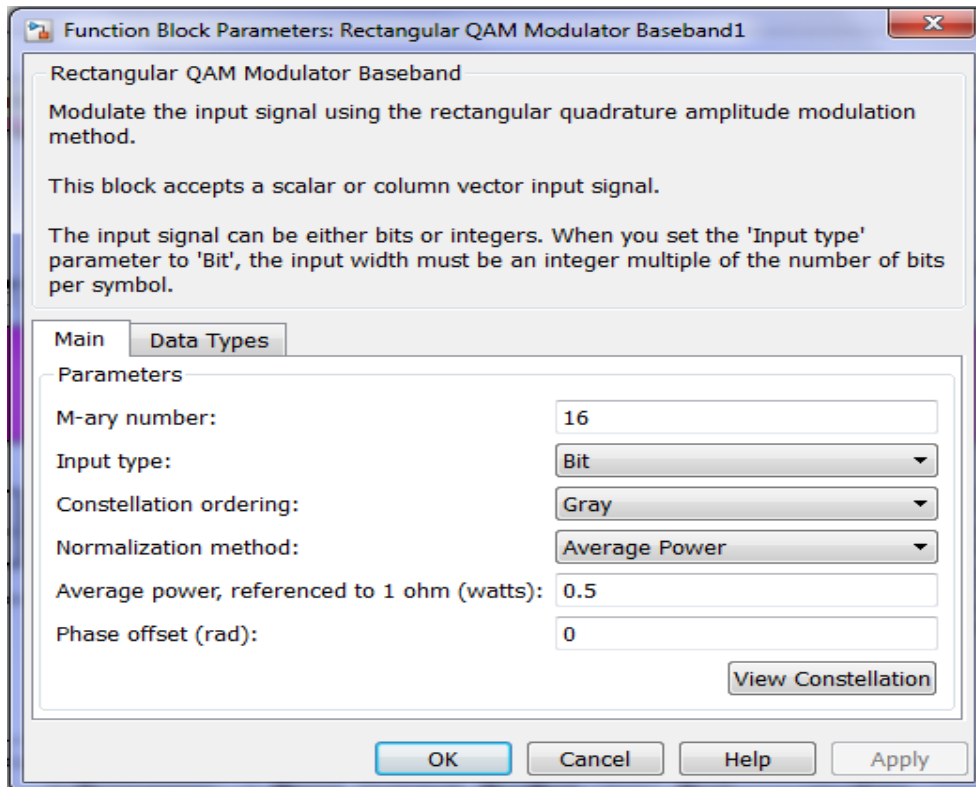


Figure III.5 : Modulateur QAM en bande de base avec sa fenêtre de paramétrage.

• **Le Modulateur OFDM :**

Puisque l'entrée a 88 bits exprimés en booléens, la sortie est un tiers: 22 bits représentés en double. Notez que ce paramètre est dû au type de données requis pour le Turbo Decoder et parce qu'il était nécessaire de la double entrée de données pour le bloc OFDM. Après cela, le bloc COFDM a été implémenté.

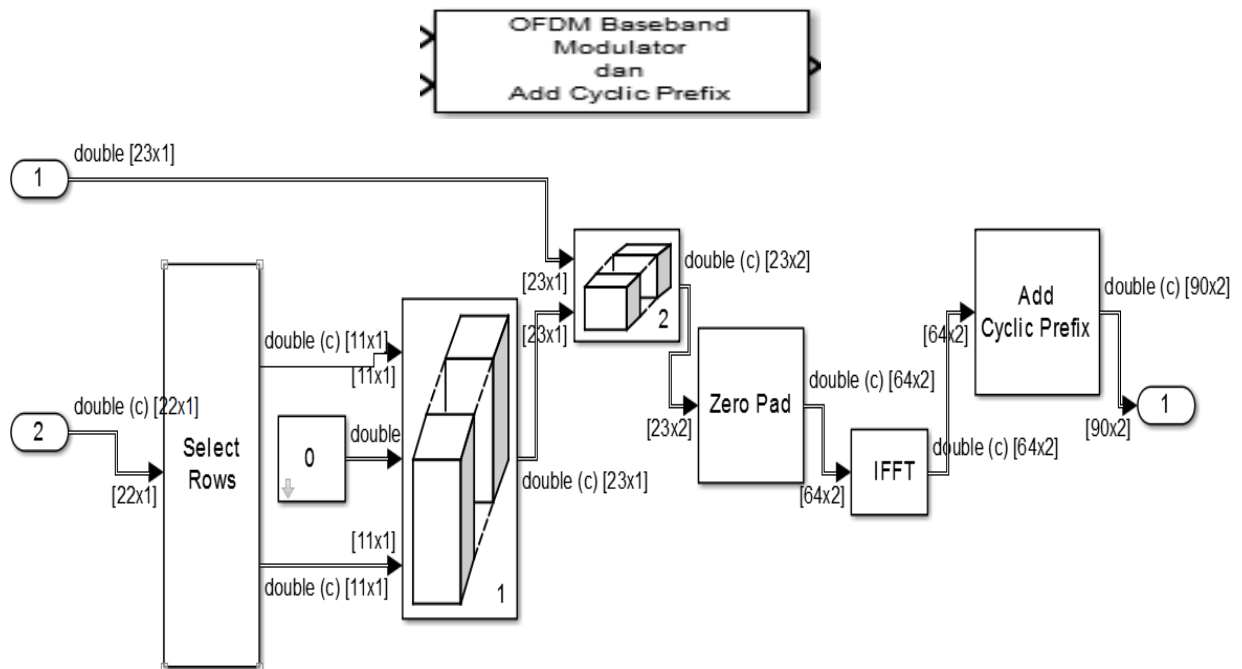


Figure III.6 : Bloc modulateur OFDM

• **Insertion des sous-porteuses pilotes et DC :**

Les sous-porteuses disponibles dans une bande ne sont pas toutes attribuées aux données des utilisateurs, quelques-unes sont utilisées pour d'autres raisons telles que :

- DC Sub-carrier : La porteuse centrale, pour marquer le centre de la bande OFDM.
- Pilot Sub-Carriers : utilisées pour transporter des séquences PILOTE bien utiles pour connaître le canal de propagation.

Le rôle du bloc suivant est d'intégrer ces différentes sous-porteuses :

• **bloc Multiport Selector :**

Ce bloc distribue des sous-ensembles arbitraires de lignes d'entrée ou de colonnes à plusieurs ports de sortie. Le bloc Multiport sélecteur extrait plusieurs sous-ensembles de lignes ou les colonnes de M par N de la matrice d'entrée u, pour découper les 22 symboles reçus à son entrée par 2, en rangeant chaque ensemble dans une sortie. Entre les 2 ensembles on va intégrer nos Pilot Sub-Carriers et au milieu la porteuse centrale.

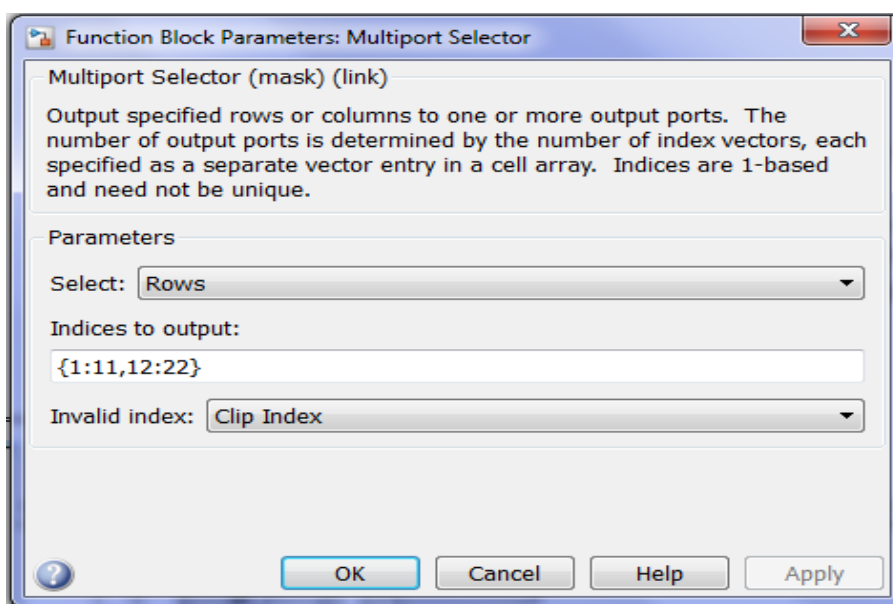
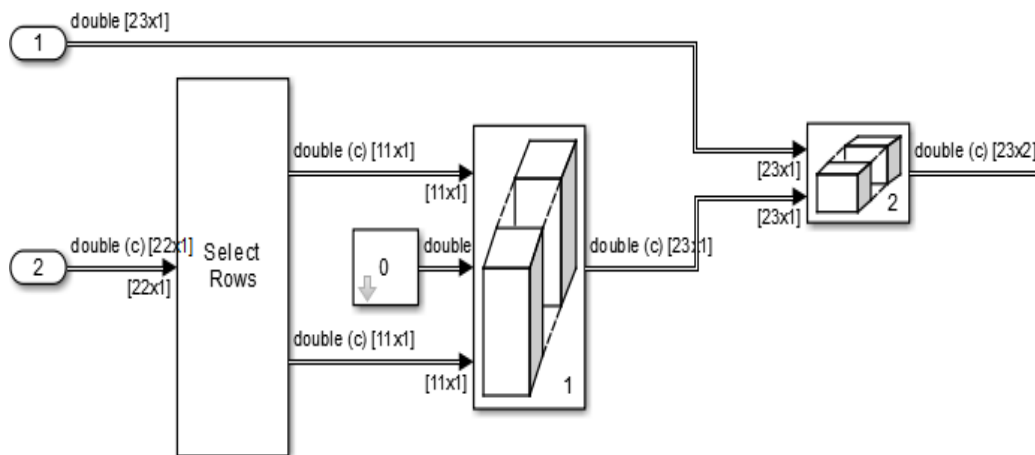


Figure III.6. : Paramètres du bloc Multiport Selector

- **Bloc IFFT :**

Ce bloc est le plus important dans la chaîne de modulation OFDM. L'IFFT sert à transformer les données du domaine fréquentiel au domaine temporel, et fournit un moyen simple pour moduler des données sur N sous-porteuses orthogonales. La sortie IFFT est essentiellement le résumé de toutes les sinusoïdes orthogonales entre elles. La taille de l'IFFT choisie est de 64.

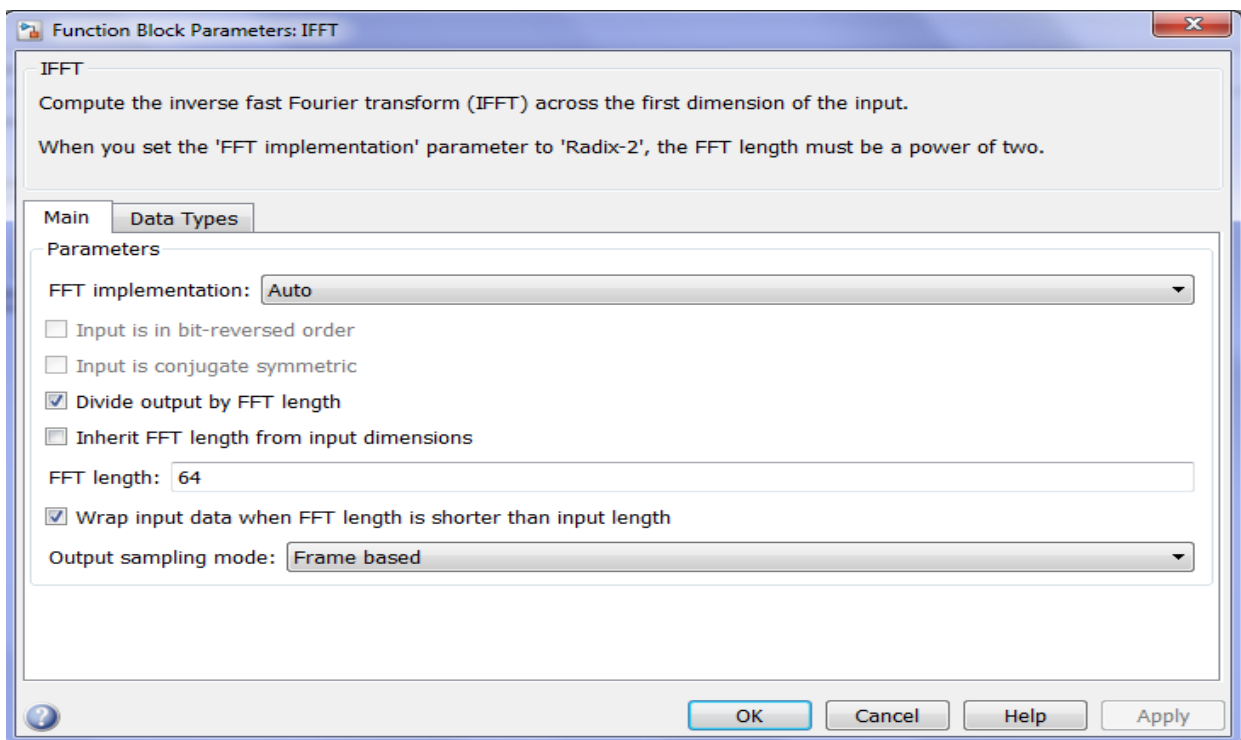
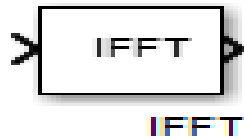


Figure III.7: Paramètres du bloc IFFT

- **AddingCyclicPrefix:**

Le préfixe cyclique utilisé dans Orthogonal Frequency Division Multiplexing fournit un élément essentiel du signal global agissant comme une bande de garde entre chaque symbole OFDM. Ceci est ajouté pour garantir la propriété d'orthogonalité sur la durée de la partie utile du signal.



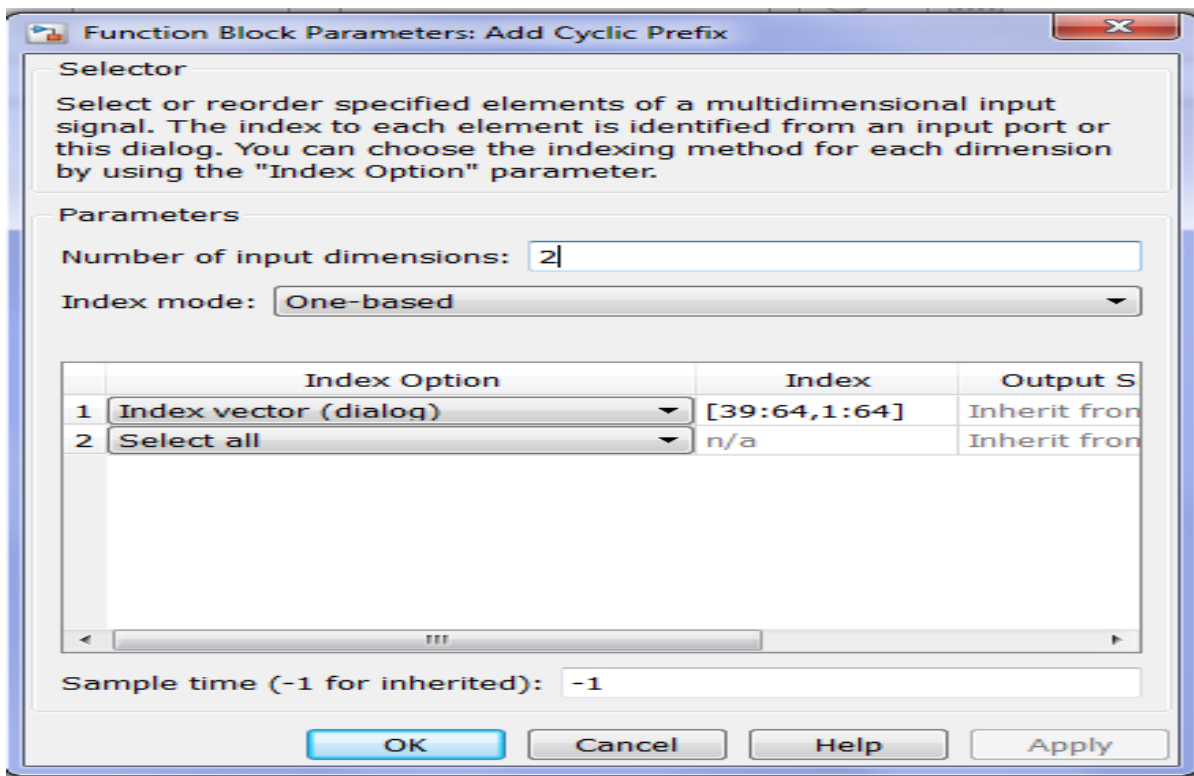


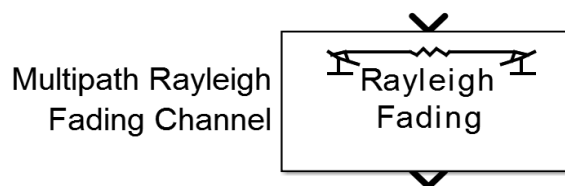
Figure III.8 : Paramètres du bloc Add Cyclic Prefix.

III.2.2 Modèle de Canal de transmission

Dans nos simulations, nous avons choisi un modèle de Rayleigh du canal de transmission puisque c'est ce modèle qui prend en compte les évanouissements dus aux trajets multiples présents dans les systèmes LTE. Nous y rajoutons un bruit AWGN pour prendre en compte le bruit thermique dans de tels systèmes.

- **Canal Rayleigh :**

Le bloc de canal met en œuvre une simulation de bande de base d'un canal de propagation de Rayleigh Fading. Ce bloc accepte uniquement les signaux complexes à base de trames à son entrée. Le bloc hérite échantillon de temps à partir du signal d'entrée. L'entrée doit avoir un temps d'échantillonnage discret supérieur à 0.



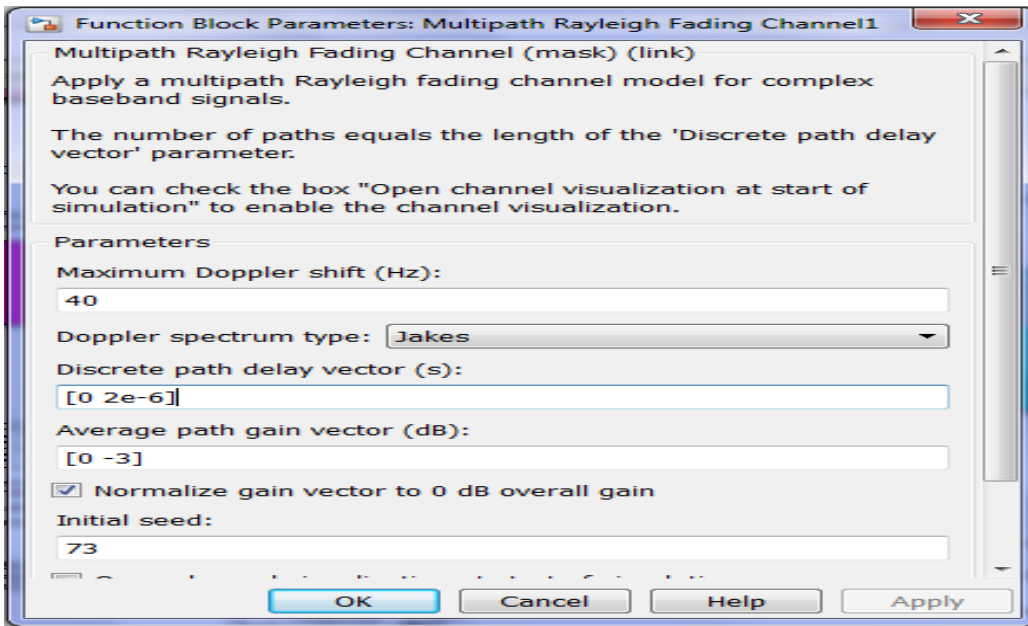


Figure III.9 : Paramètres du bloc Multipath Rayleigh Fading

- **Canal AWGN :**

Le bloc Channel AWGN ajoute un bruit blanc gaussien à un signal d'entrée réel ou complexe. Lorsque le signal d'entrée est réel, ce bloc ajoute du bruit gaussien réel et produit un signal réel de sortie. Lorsque le signal d'entrée est complexe, ce bloc ajoute un bruit gaussien complexe et génère un signal de sortie complexe. Ce bloc accepte des valeurs scalaires, vectorielles ou matricielles du signal d'entrée avec un format de données simple ou double.

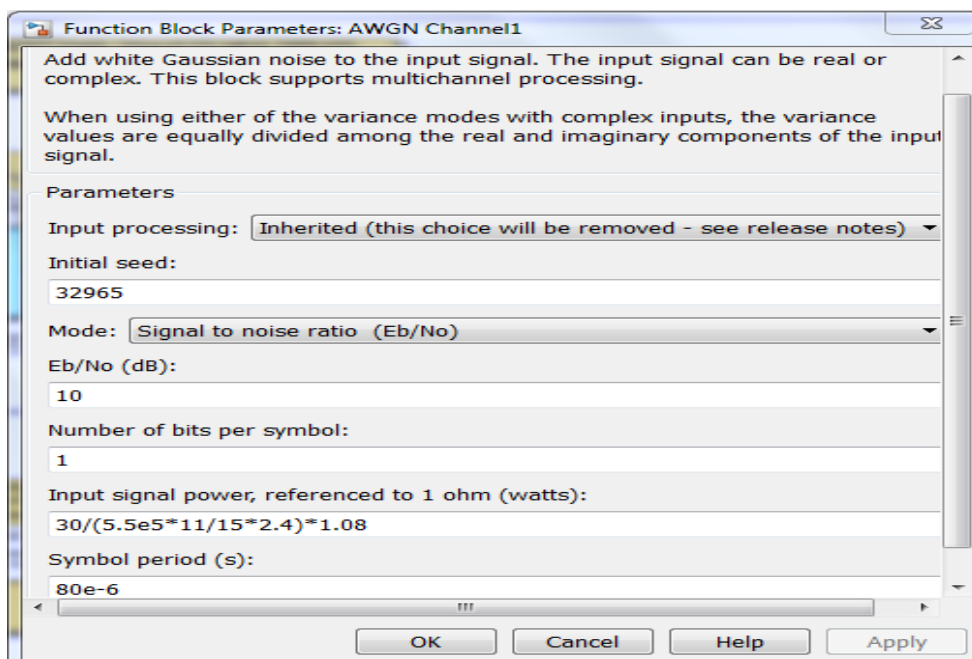
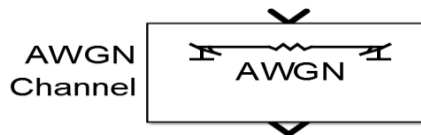


Figure III.10 : Paramètres du bloc AWGN

III.2.3 Modèle Simulink de la chaîne de réception

La figure ci-dessous illustre notre modèle de récepteur d'un système LTE :

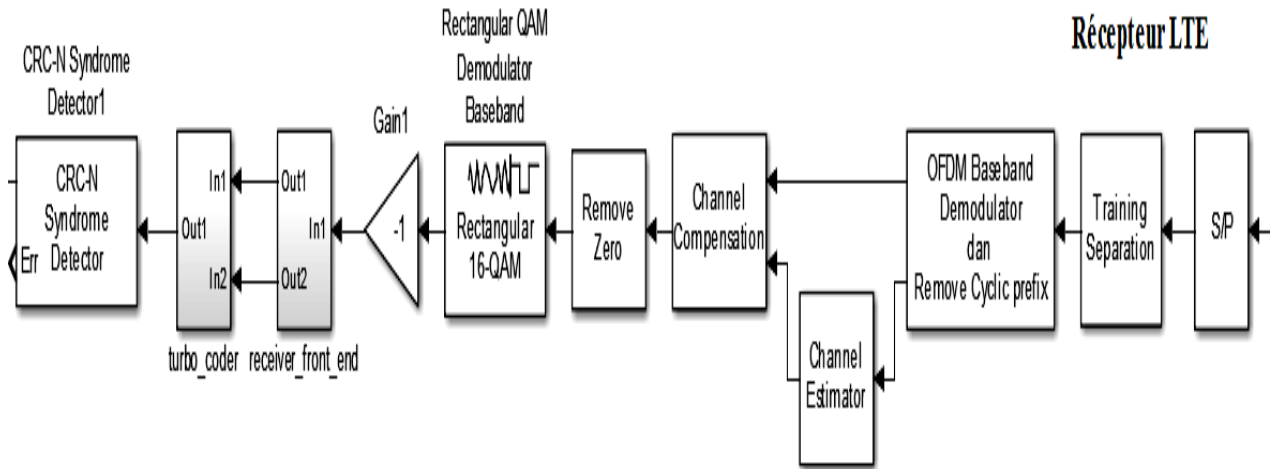


Figure III.11 : Chaîne de réception du système.

Le récepteur effectue l'opération inverse de l'émetteur, le signal OFDM est converti en signal numérique à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique rapide. La Transformée de Fourier rapide est prélevée dans le démodulateur OFDM pour analyser le signal dans le domaine fréquentiel. Les données sont par la suite démodulées avec un démodulateur QAM en bande de base. On obtient à la sortie de la chaîne de réception un train d'informations dont la vraisemblance avec le signal original transmis dépend des perturbations introduites par le canal et les erreurs de traitement.

- **Démodulateur OFDM**

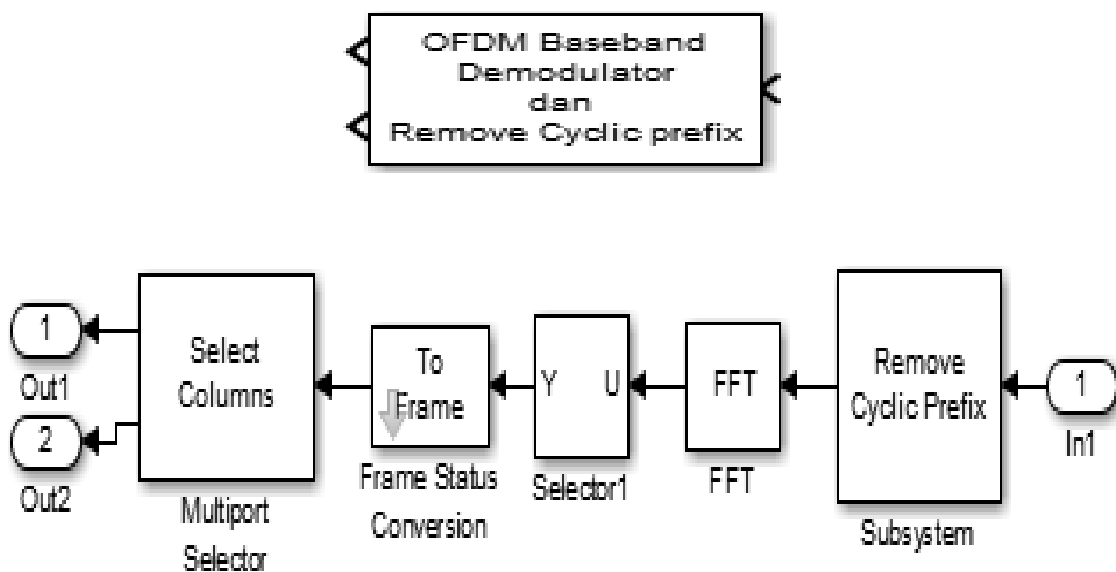


Figure III.12 : Structure du Démodulateur OFDM

- **RemoveCyclicPrefix :**

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

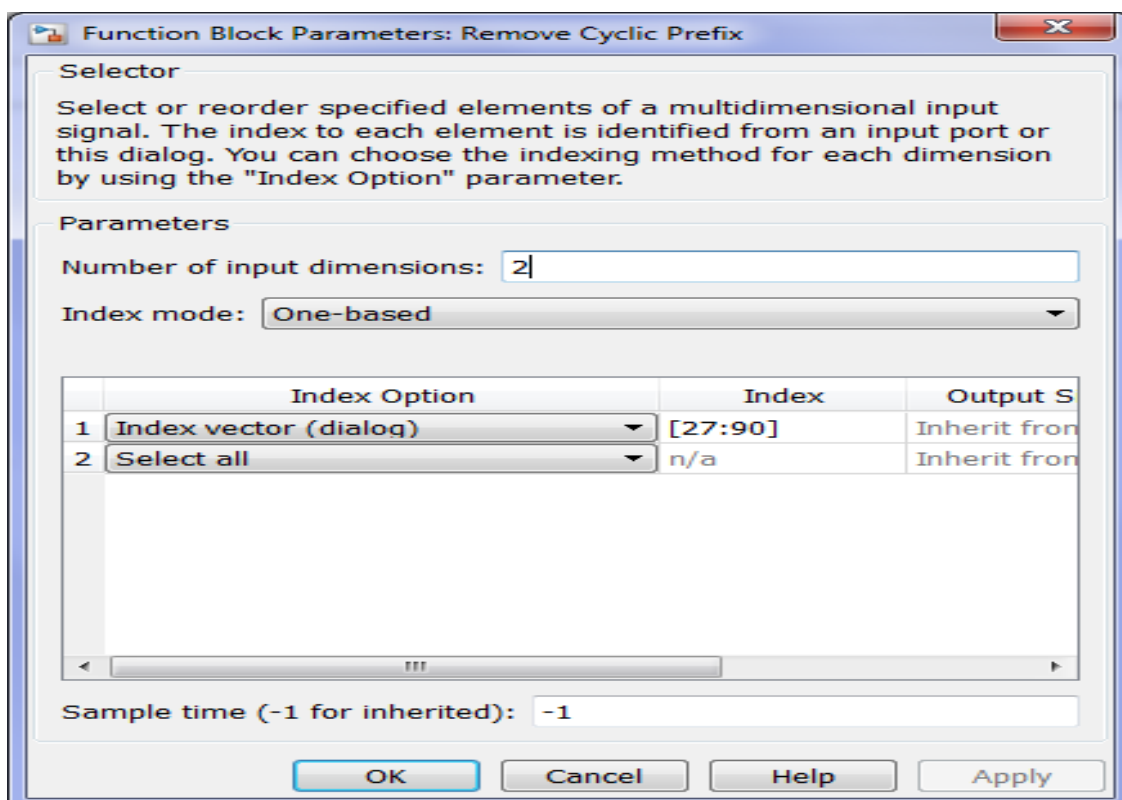
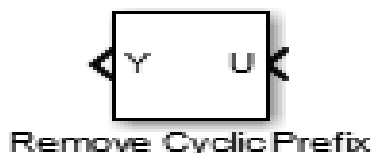


Figure III.13 : Paramètres du bloc RemoveCyclicPrefix

- **Bloc FFT :**

A la sortie du bloc Removecyclicprefix, la taille du vecteur est 64 symboles, qui seront directement utilisés par le bloc FFT pour traiter le signal reçu dans le domaine fréquentiel. Idéalement, la sortie du bloc FFT donnera les symboles d'origine fournis comme entrées au bloc IFFT de l'émetteur.



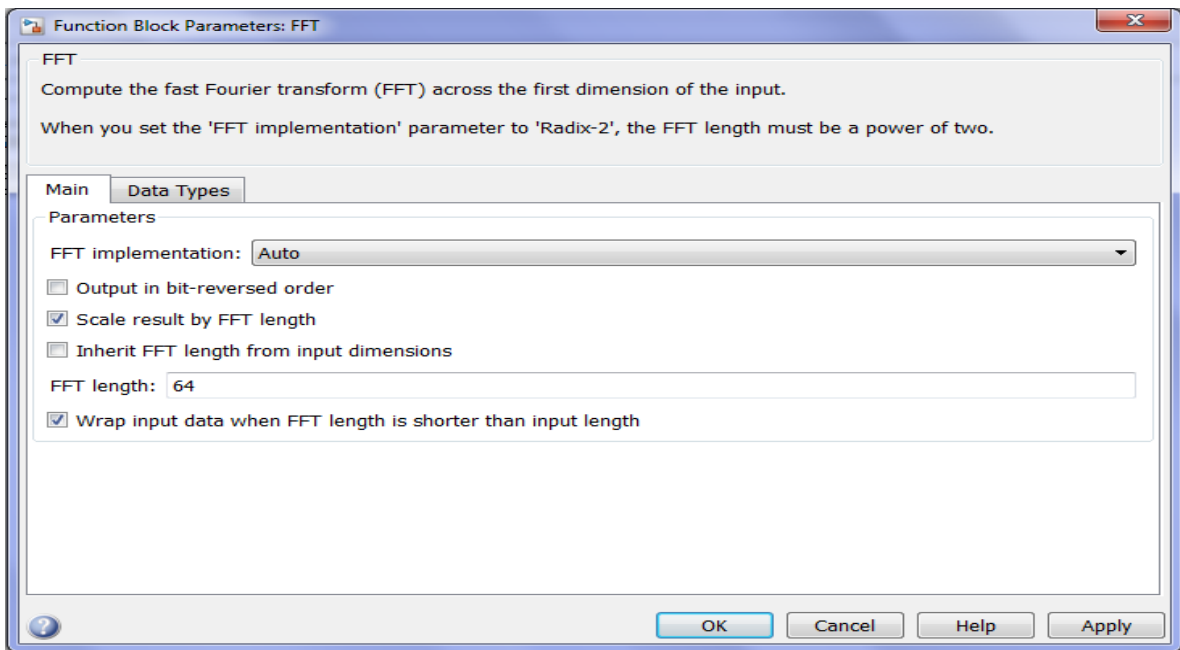


Figure III.14 : Paramètres du bloc FFT

- **Frame Conversion :**

Ce Bloc permet de convertir les symboles les données en trames.

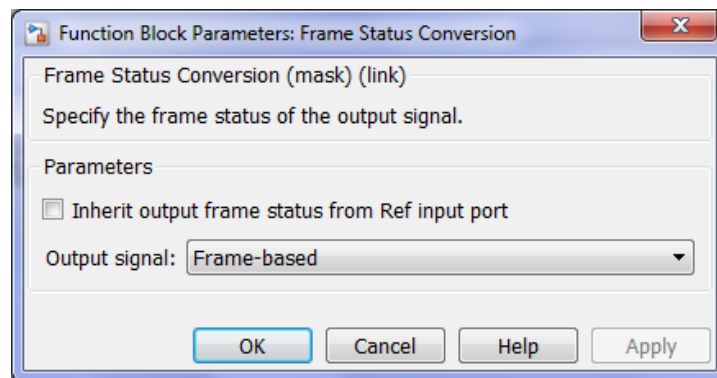


Figure III.15 : Paramètres du bloc Frame conversion

- **RemoveZero :**

Pour éliminer les zéros de bourrage qui a été introduit dans la transmission OFDM. On a utilisé les paramètres suivant :



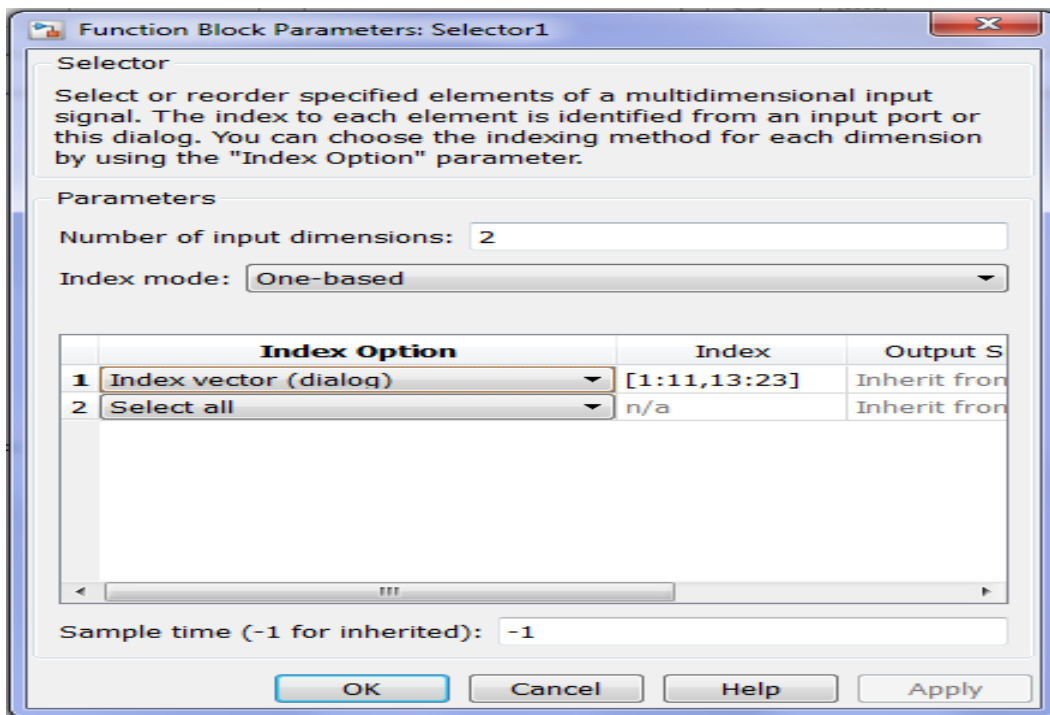


Figure III.16: Paramètres du bloc Removezero

- **Select Rows**

Ce bloc sert à éliminer la séquence pilote à partir de la matrice de données.

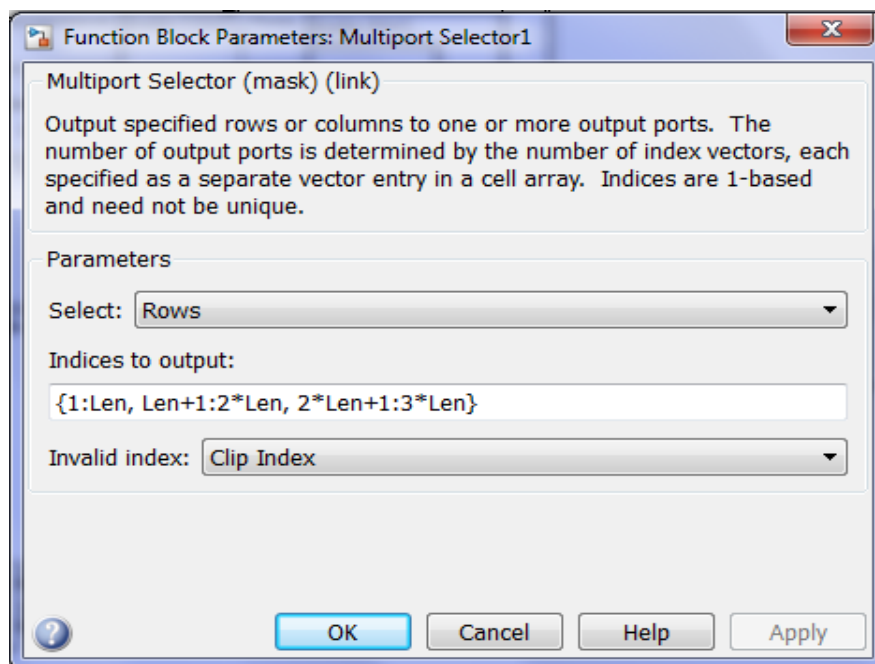
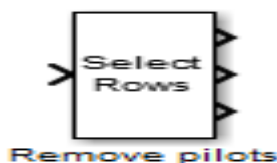
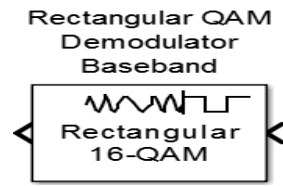


Figure III.17: Paramètres du bloc Remove Pilots

- **Bloc Démodulateur 16 QAM**

Ce Bloc sert à démoduler les symboles QAM pour restituer les données initiales.



- **Turbo décodeur**

Le Turbo Décodeur permet de décoder nos symboles.

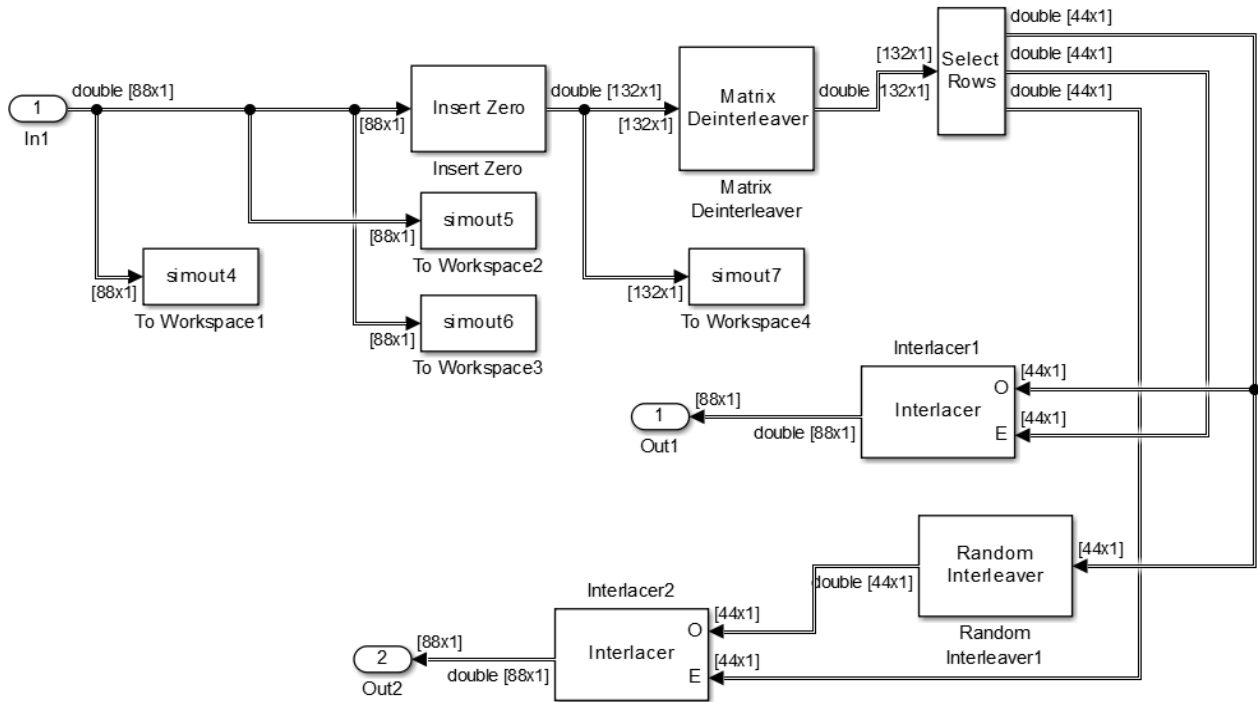
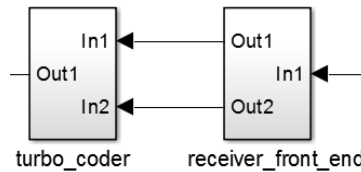


Figure III.18 : Bloc Receiver_front_end

En premier lieu, les données sont multipliées par un gain égal à « $2 / \text{Variance}$ ». La variable «Variance» est calculée dans le fichier de configuration comme multiplicateur $P_s * / E_s N_0$ où P_s est la puissance du signal (1 W, dans notre cas.), le multiplicateur est la période symbole entre le débit de code, ce qui donne 2 et E_s / N_0 sont 28 dB, spécifié dans le canal AWGN.

Ensuite, le bloc Zero-Order Hold échantillonne et conserve l'entrée pour la période spécifiée de l'échantillon, ce cas, donné par la variable «Iter» qui a une valeur de 5 (la valeur maximale pour l'itérateur LTE Turbo Decoder est 8). Le bloc Insert Zero distribue les éléments d'entrée dans le

vecteur de sortie. Le vecteur d'insertion zéro binaire indique le placement des «0» et des éléments d'entrée. Ce vecteur est $[1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]'$, le même que nous avons utilisé dans l'émetteur, à l'intérieur du codeur Turbo dans la fonction Puncture. Rappelons que dans ce cas, nous avons sélectionné les éléments qui correspondent aux «1» dans le vecteur binaire de Ponction.

Le bloc Matrix Interleaver divise les 132 colonnes en trois vecteurs de 44 échantillons. Les premier et deuxième vecteurs sont traités par le bloc Interlacer qui combine les éléments des signaux d'entrée: les éléments du premier signal d'entrée deviennent les éléments impairs du signal de sortie, tandis que les éléments du deuxième signal d'entrée deviennent les éléments pairs. -éléments numérotés du signal de sortie. Le résultat est un signal de 88 échantillons (deux fois la longueur de chaque entrée). Il s'agit de la première sortie du bloc receiver_front_end.

La deuxième sortie consiste en un autre entrelaceur qui reçoit comme entrées, les 44 premiers échantillons traités par un entrelaceur aléatoire qui entrelace les éléments du vecteur d'entrée à l'aide d'une permutation aléatoire. La graine est une variable et elle a une valeur de 54123 (la même que celle utilisée dans la transmission). L'autre entrée pour l'Interlacer est la troisième colonne extraite du bloc Select Rows. Comme nous l'avons mentionné, cet ensemble est la deuxième sortie du bloc entier.

Après cela, le bloc Turbo_decodeur est implémenté :

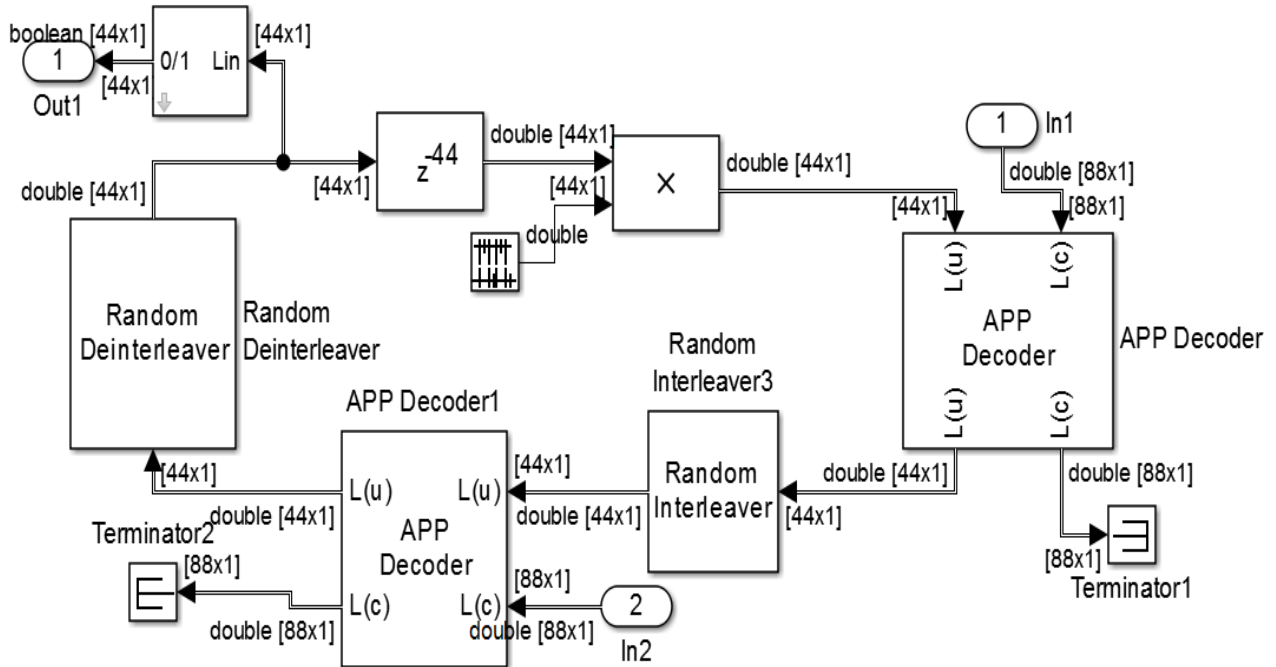
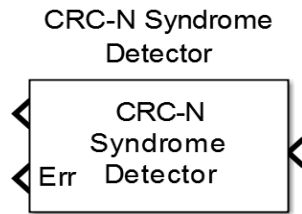


Figure III.19 : Bloc Turbo décodeur

- **CRC-N Syndrome detector :**

Il y a un retard dans le signal d'entrée qui est rempli de «1». Dans la sortie du Turbo Decodeur, le retard est réduit de moitié. Nous ne sélectionnons qu'une partie des signaux afin de les analyser clairement.

Cette sortie correspond au signal entre le générateur CRC et le codeur Turbo de l'émetteur. La prochaine étape consiste donc à appliquer le détecteur de syndrome CRC:



III.3 Simulations du modèle Simulink

Les résultats de simulation de notre chaîne de transmission LTE sont présentés dans les sections ci-dessous.

III.3.1 Spectre du signal

Nous évaluons dans ce qui suit, les effets du bruit additif et des évanouissements multi-trajets causés par le canal de Rayleigh sur le spectre du signal émis. Les figures suivantes (III.20 à III.22) donnent les spectres émis et reçus respectivement pour un RSB de -6 dB, +10 dB et +20 dB. Nous remarquons que la réduction du bruit (c.à.d. l'amélioration du RSB), se répercute par une moindre déformation du spectre du signal par rapport à sa forme à l'émission.

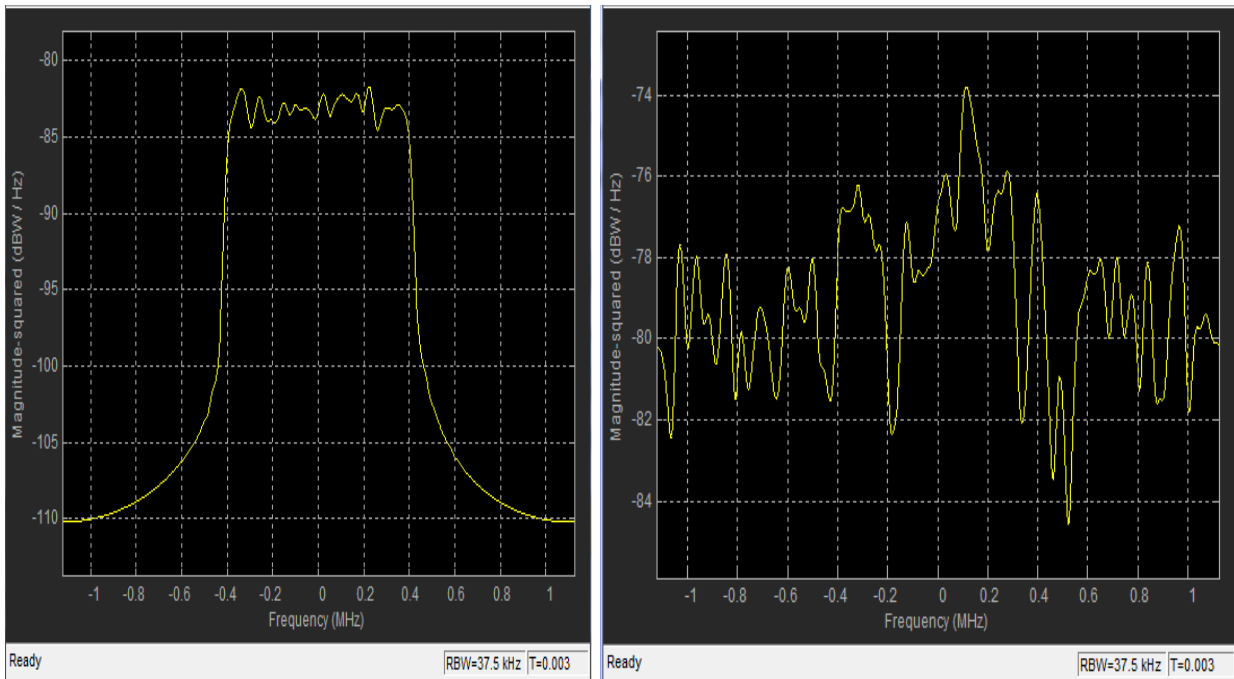


Figure III.20 : Le spectre du signal émis (côté gauche) et reçu (côté droit) avec un RSB de -6dB.

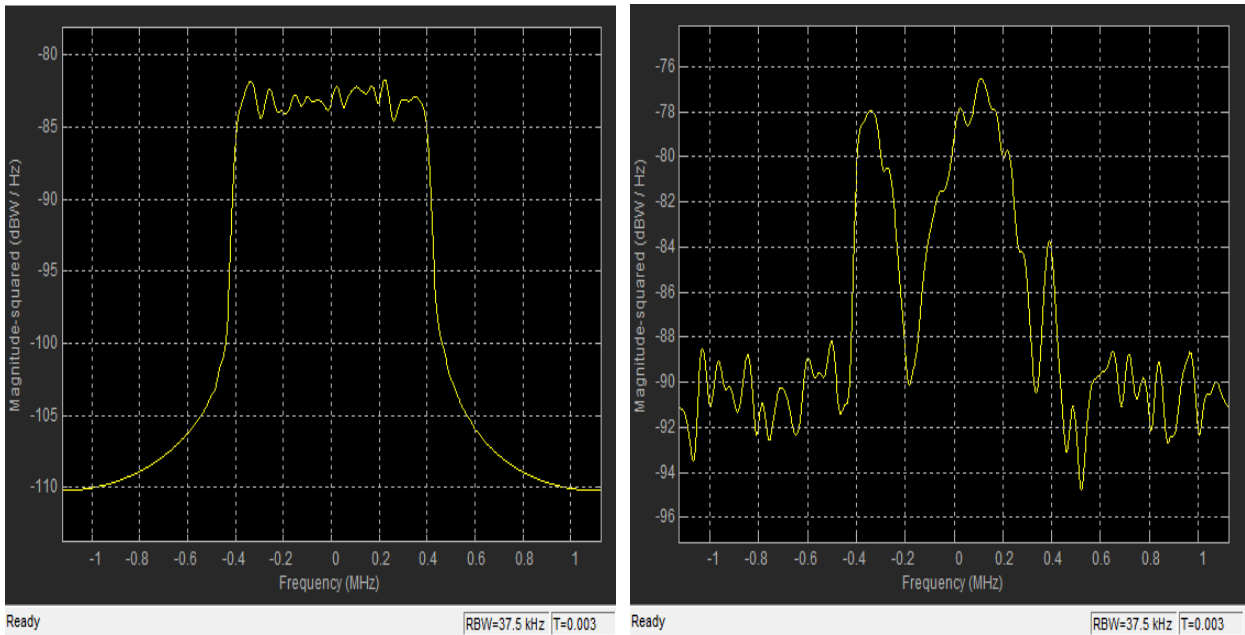


Figure III.21 : Le spectre du signal émis (côté gauche) et reçu (côté droit) avec un RSB de 10 dB.

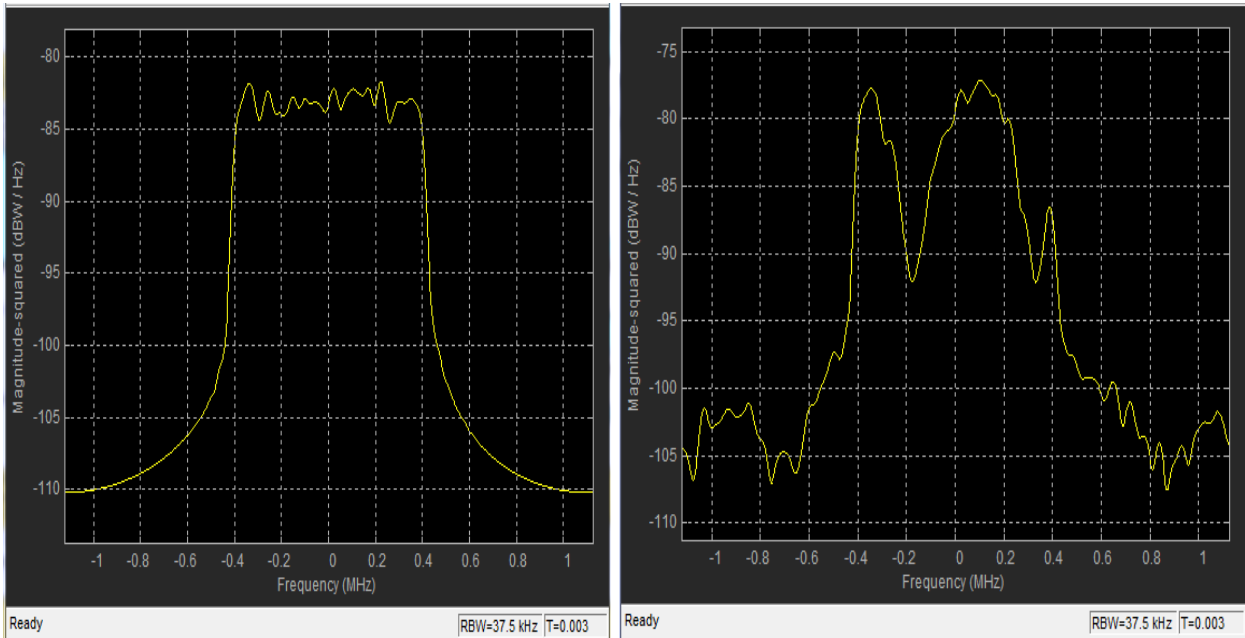


Figure III.22 : Le spectre du signal émis (côté gauche) et reçu (côté droit) avec un RSB de 20dB.

III.3.2 Constellations des symboles QAM

A présent, nous dressons le diagramme de constellation des symboles QAM de données utilisateurs pour voir s'ils ont été perturbés lors de la transmission. Les figures III.23 à III.25 montrent les symboles QAM reçus à l'entrée du démodulateur QAM (partie (b)) du récepteur. Nous remarquons que par rapport à leurs positions initiales dans le diagramme de constellation en sortie du modulateur QAM à l'émission (partie (a)), ces symboles sont distribués de façon désordonnée au point que certains sont plus rapprochés à même de conduire à des erreurs de détection. Cette perturbation est causée par les traitements qu'ils ont subis à travers la chaîne de transmission. Nous remarquons que les constellations sont meilleures en augmentant le RSB.

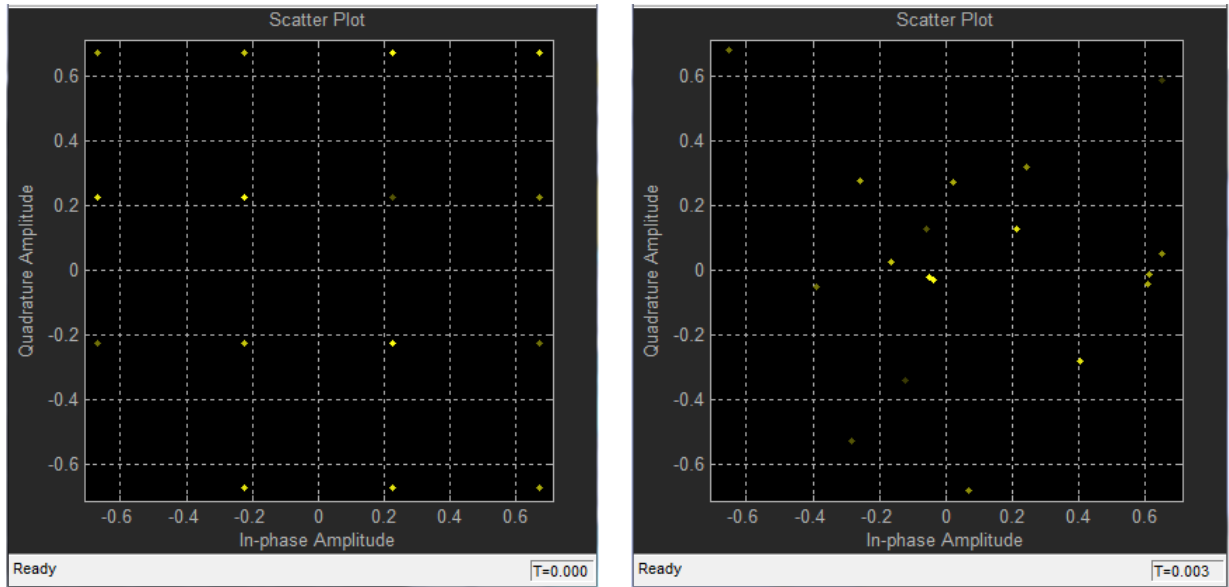


Figure III.23 : Diagramme de constellation des données utilisateur avec un RSB de - 6 dB
 (a) à la sortie du modulateur 16QAM, (b) à l'entrée du démodulateur 16QAM.

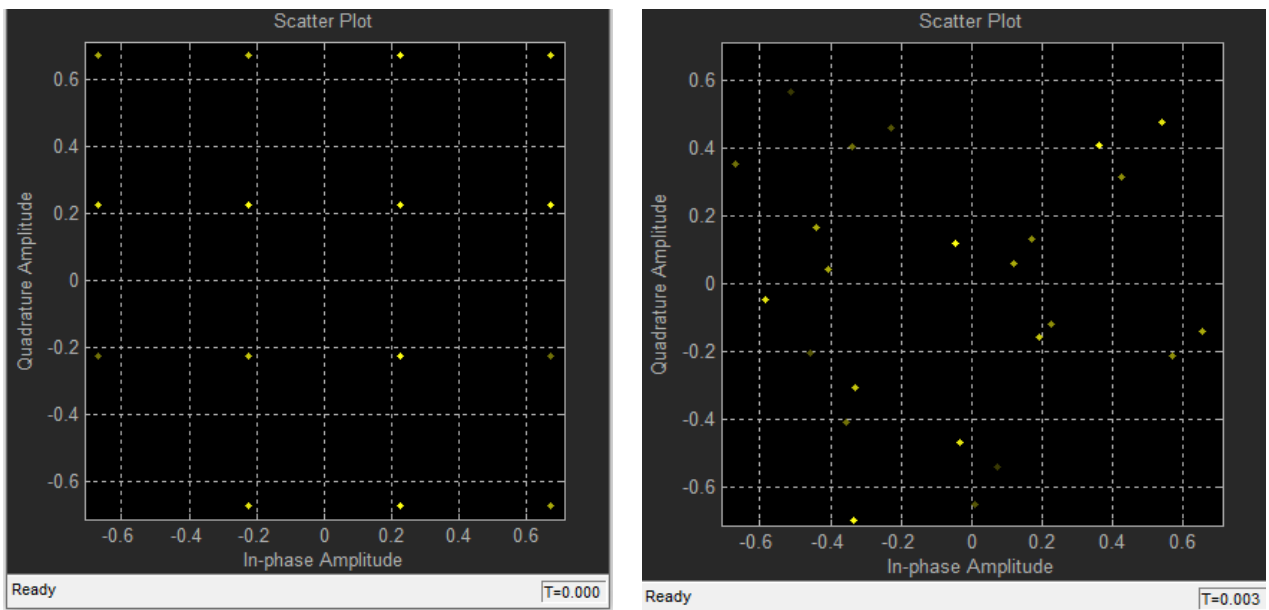


Figure III.24 : Diagramme de constellation des données utilisateur avec un RSB de +10 dB
 (a) à la sortie du modulateur 16QAM, (b) à l'entrée du démodulateur 16QAM.

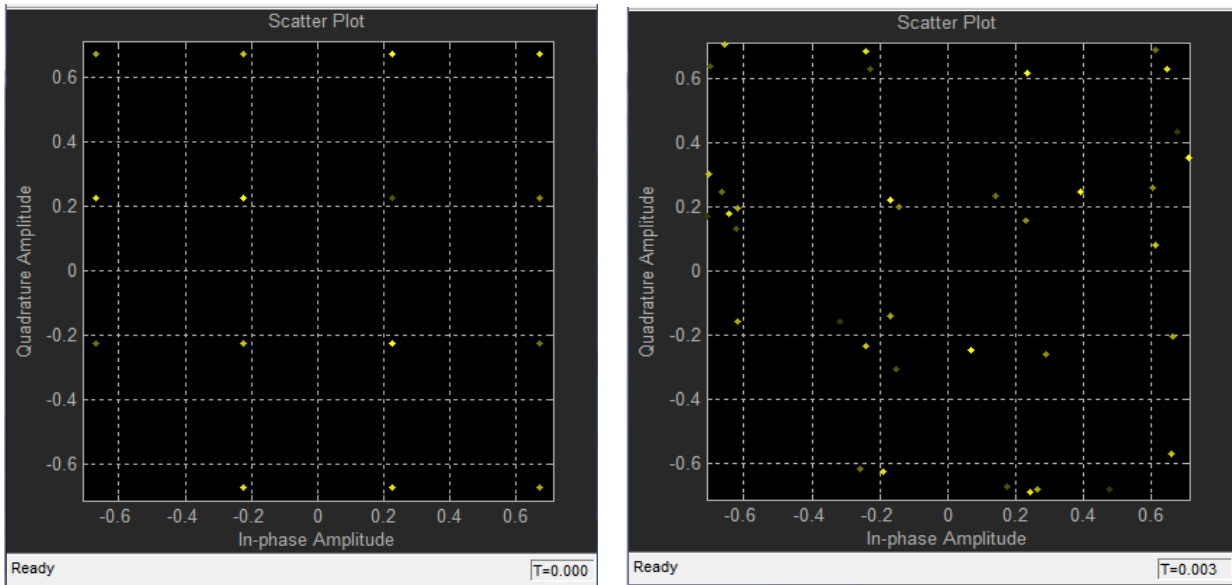


Figure III.25 : Diagramme de constellation des données utilisateur avec un RSB de +20 dB
 (a) à la sortie du modulateur 16QAM, (b) à l'entrée du démodulateur 16QAM.

III.3.3 Estimation du BER

La figure suivante donne le taux d'erreurs binaires obtenu par notre chaîne de transmission pour différentes valeurs du RSB (-6dB, +6 dB, +20 dB). Le BER est d'autant plus amélioré que le bruit est réduit. Ce qui dénote que le bruit AWGN introduit dans le canal et les effets des multi trajets considérés dans notre modèle sont importants.

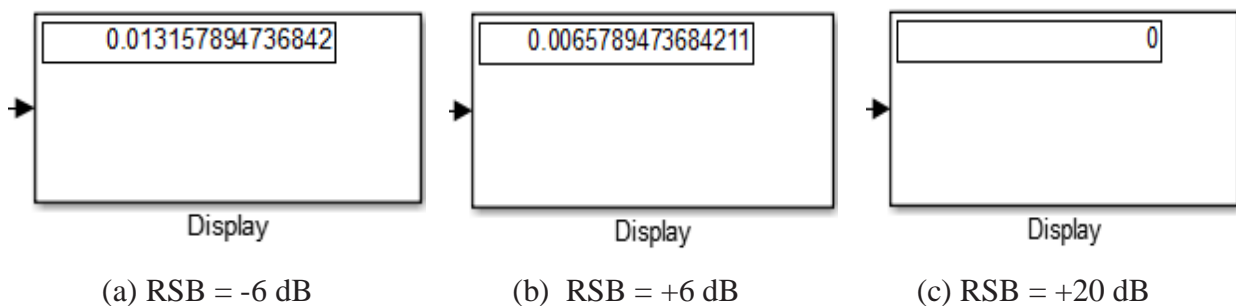


Figure III.26 : Taux d'erreurs binaires avec différents RSB.

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons implémenté un modèle Simulink d'une chaîne de transmission LTE avec une modulation 16-QAM des données utilisateurs, du turbo codage, des multi trajets et du bruit additif lors de la transmission.

Nous avons pu valider notre modèle malgré la complexité du paramétrage des différents blocs constituant les chaînes d'émission et de réception. Nous avons ainsi pu exploiter le modèle et nous avons obtenu une évaluation de ses performances.

IV.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons modélisé sous la plate-forme Simulink une chaîne de transmission LTE pour comprendre et simuler le fonctionnement global de la couche physique des systèmes LTE.

Dans ce chapitre, nous allons modéliser cette couche avec diverses fonctions Matlab pour simuler les différents traitements effectués en liaison descendante DL sous divers modes de transmission, à savoir en mode 1 (système *SISO* - *Simple Input Simple Output* - et système *SIMO* - *Simple Input Multiple Output* -) et en mode 4 (système *MIMO* - *Multiple Input Multiple Output* -).

IV.2 TRAITEMENTS DE LA COUCHE PHYSIQUE LTE

Les traitements effectués sur la couche physique LTE en liaison descendante sont ceux schématisés dans notre modèle Simulink à la différence que leur modélisation est faite ici, à l'aide de fonctions Matlab.

Les principales fonctions utilisées sont les suivantes :

- **Payload Generator** : pour la génération aléatoire de données binaire ;
- **CRC generator** : pour générer des bits de détection et correction d'éventuelles erreurs c.à.d. pour opérer un codage canal ;
- **IteTbChannelCoding** : pour opérer un Turbo codage ;
- **Scrambling (Brouillage)** : Les bits codés de canal de transport sont brouillés par une séquence de brouillage. Cette séquence dépend de l'identité de cellule de la couche physique pour assurer une randomisation des interférences entre les cellules et assurer la transmission mono-utilisateur sur la liaison descendante d'une cellule unique. Le modèle assume un identifiant ID de cellule, mais se différencie de la séquence par mot de code transmis.
- **Modulator** : La modulation des données descendantes convertit les bits brouillés en symboles complexes modulés ;
- **Layer Mapping (mappage de la couche)** : Les symboles modulés complexes sont mappés aux couches (ports d'antenne). Le nombre de couches est égal au nombre d'antennes.

- **Resource Element Mapping (Mappage des éléments de ressources)** : Les symboles pré-codés à transmettre sur chaque antenne, sont mis en correspondance avec les éléments des blocs de ressources disponibles pour la transmission ;
- **Transmission OFDM** : La génération de signaux OFDM fonctionne sur la grille de ressources. Il prend les symboles OFDM (colonnes de données dans la matrice de grille de ressources) un par un et effectue une opération IFFT suivie d'un ajout de CP pour générer le signal modulé OFDM ;
- **Modèle de Canal MIMO** : La fonction MIMO fading Channel met en œuvre les profils d'évanouissement MIMO.

IV.3. SIMULATION DE LA TRANSMISSION DL EN MODE 1

Le mode 1 inclut deux méthodes de transmission à savoir SISO et SIMO.

IV.3.1 Vérification des performances de l'émetteur-récepteur (cas SISO)

En exécutant le script MATLAB du modèle d'émetteur-récepteur SISO (commlteSISO), nous pouvons examiner divers signaux afin d'évaluer les performances du système. Pour examiner les effets de l'égalisation, nous pouvons visualiser les diagrammes de constellation des données utilisateurs récupérés au niveau du récepteur avant et après l'égalisation pour les différentes modulations (QPSK, 16-QAM, 64-QAM) et diverses bandes passante (1.4 MHz, 3 MHz, 10 MHz).

Les paramètres de simulation sont donnés ci-après :

```

% PDSCH
numTx = 1;    % Number of transmit antennas
numRx = 1;    % Number of receive antennas
chanBW = 4;   % Index to channel bandwidth used [1,...,6]
contReg = 1; % No. of OFDM symbols dedicated to control information [1,...,3]
modType = 3;  % Modulation type [1, 2, 3] for ['QPSK','16QAM','64QAM']
% DL-SCH
cRate = 1/3;  % Rate matching target coding rate
maxIter = 6;  % Maximum number of turbo decoding iterations
% Channel model
chanMdl = 'frequency-selective-high-mobility';
% Simulation parameters
Eqmode = 2;   % Type of equalizer used [1,2] for ['ZF', 'MMSE']
maxNumErrs = 1e7; % Maximum number of errors found before simulation stops
maxNumBits = 1e7; % Maximum number of bits processed before simulation stops
visualsOn = 1; % Whether to visualize channel response and constellations
snrdB = 16;   % Value of SNR used in this experiment

```

Figure IV.1 : Paramètres de simulation du mode SISO.

IV.3.1.1 Comparaison des constellations de symboles (cas SISO)

- **Modèle SISO / Bande passante : 10 MHz / Modulation QPSK, 16 QAM, 64-QAM**

Les Figures IV.2 à IV.4 suivantes, illustrent les diagrammes de constellation des données utilisateurs avant (tracé de gauche) et après égalisation (tracé de droite) avec une bande passante de 10 MHz pour laquelle nous varions le type de modulation (QPSK, 16-QAM et 64-QAM). Nous remarquons que l'augmentation de l'ordre de modulation conduit à plus grande, densité des symboles sur les constellations. Les tracés montrent que l'égaliseur peut compenser les effets d'évanouissement du canal pour aboutir à une constellation qui ressemble plus étroitement aux constellations originales. Il convient de noter que même si les symboles QPSK sont mieux disséminés, le débit sera nettement inférieur à celui des autres variantes.

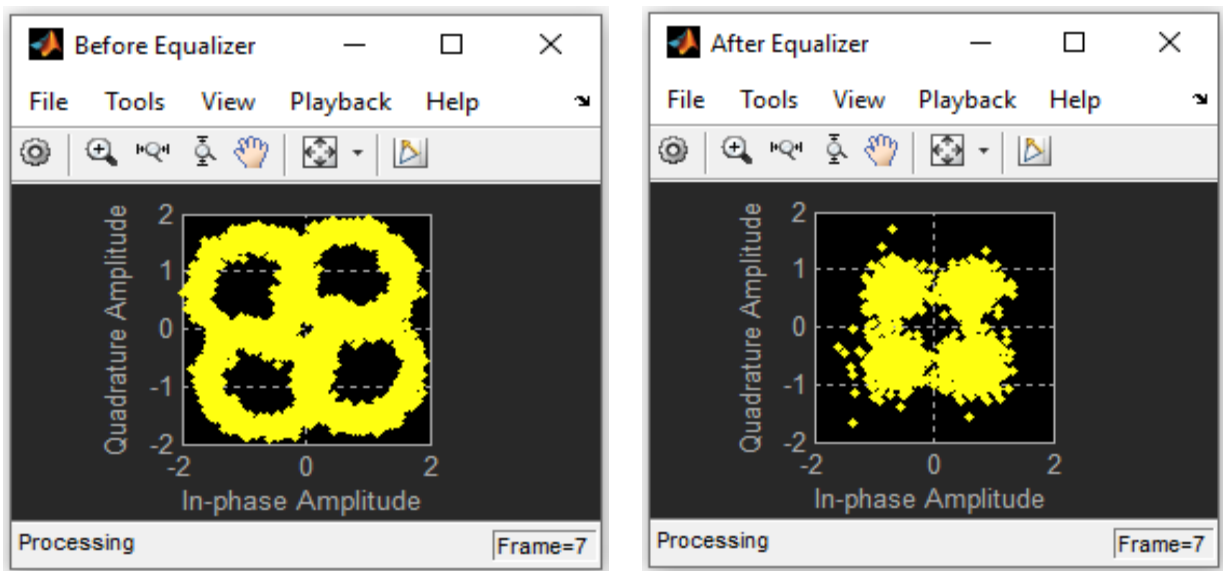


Figure IV.2 : Constellation des symboles QPSK avant et après l'égalisation (BP :10MHz).

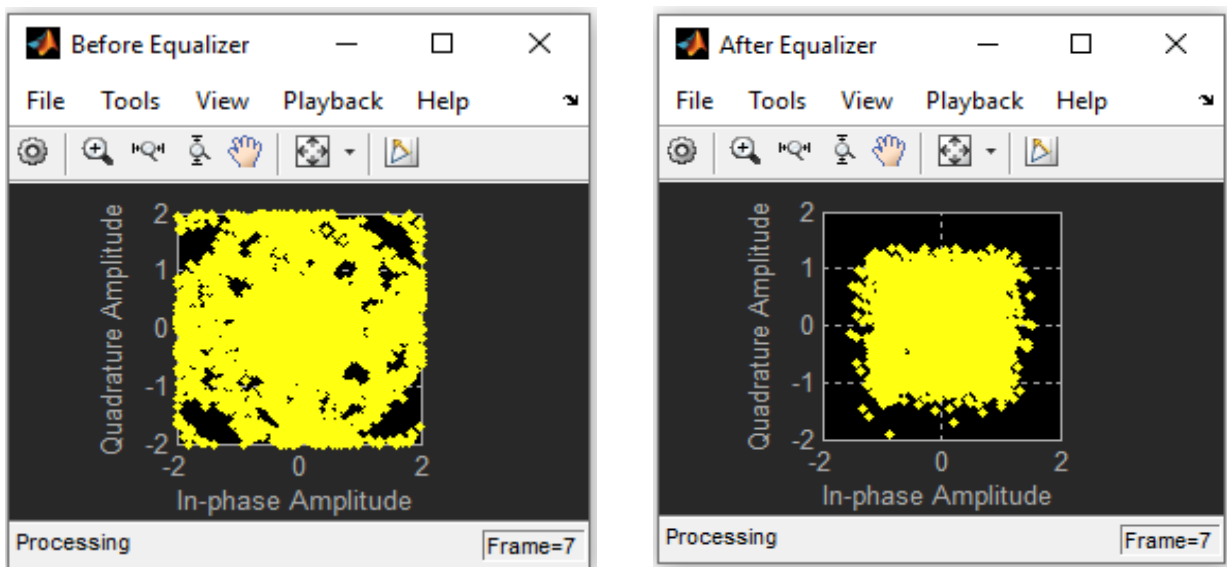


Figure IV.3 : Constellation des symboles 16 QAM avant et après l'égalisation (BP :10MHz).

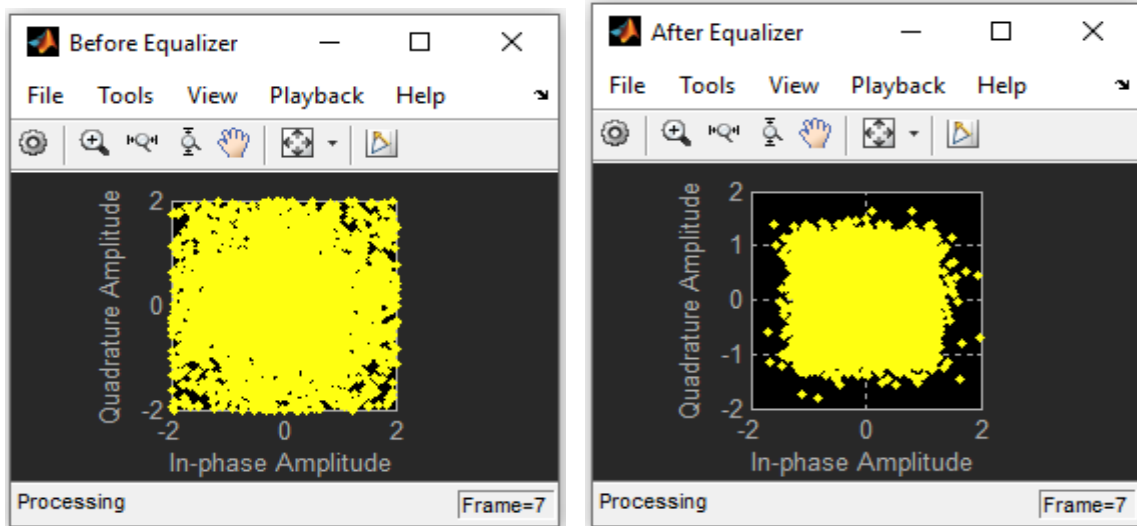


Figure IV.4 : Constellation des symboles 64-QAM avant et après l'égalisation (BP :10MHz).

- **Modèle SISO/ Modulation 16-QAM / Bande passante : 1.4 MHz, 3 MHz.**

Les Figures IV.3, IV.5 et IV.6 montrent que le nombre de symboles modulés est d'autant plus élevé que la bande passante alloué au système est plus large.

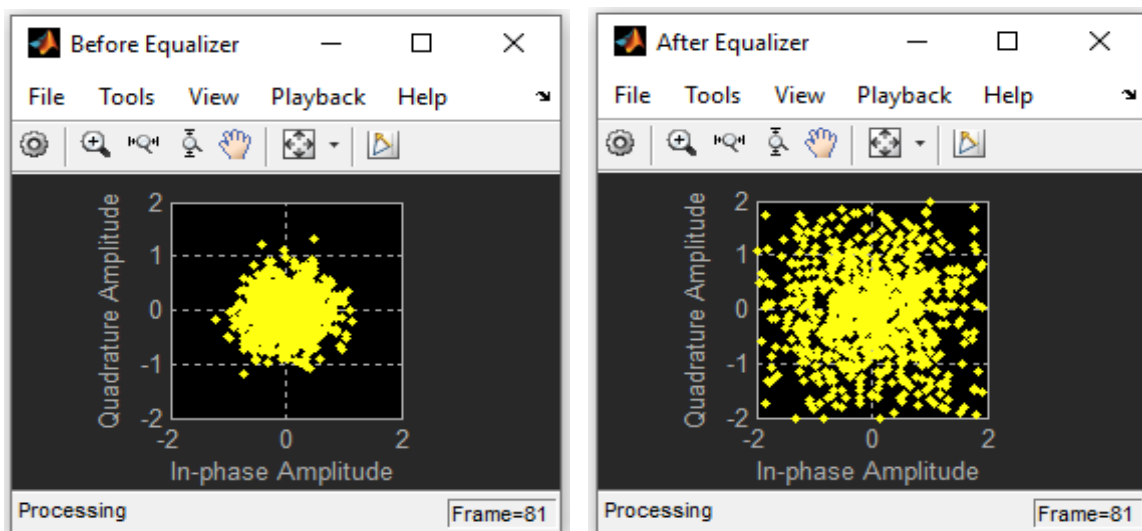


Figure IV.5 : Constellation des symboles 16-QAM avant et après l'égalisation (BP : 1,4MHz).

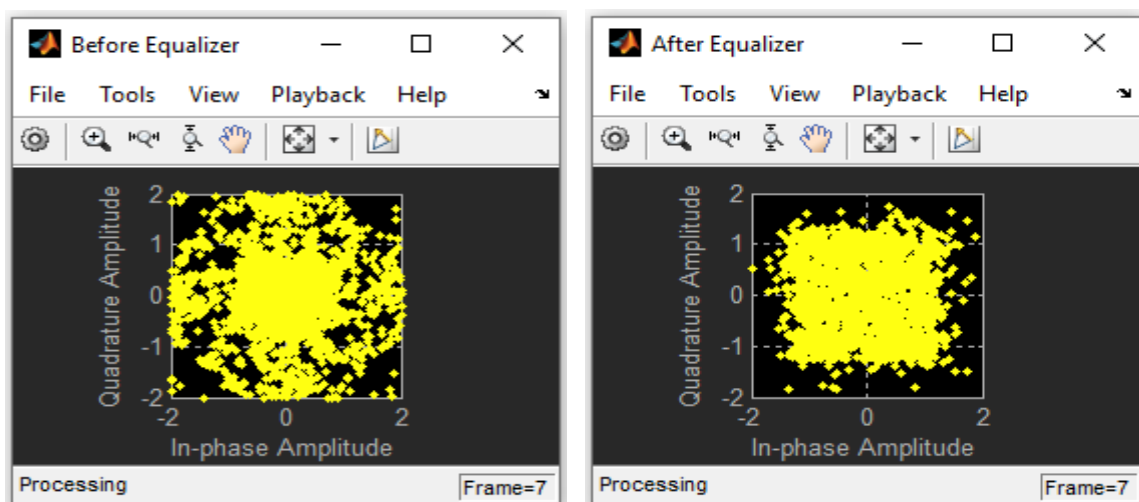


Figure IV.6 : Constellation des symboles 16-QAM avant et après l'égalisation (BP : 3 MHz).

IV.3.1.2 Comparaison des densités spectrales de puissance (cas SISO)

Pour examiner l'efficacité du récepteur dans la lutte contre les effets de l'évanouissement par trajets multiples, nous pouvons examiner la densité spectrale de puissance du signal émis (spectre jaune) et des signaux reçus avant (spectre bleu) et après l'égalisation (spectre marron).

- **Modèle SISO / Bande passante : 10 MHz / Modulation QPSK, 16 QAM, 64-QAM**

Les figures IV.7 à IV.9 montrent les résultats obtenus avec une bande passante de 10 MHz et différentes modulation (QPSK, 16-QAM, 64-QAM). Nous remarquons que même si l'ordre de modulation augmente, l'égaliseur peut compenser les effets plus importants du canal.

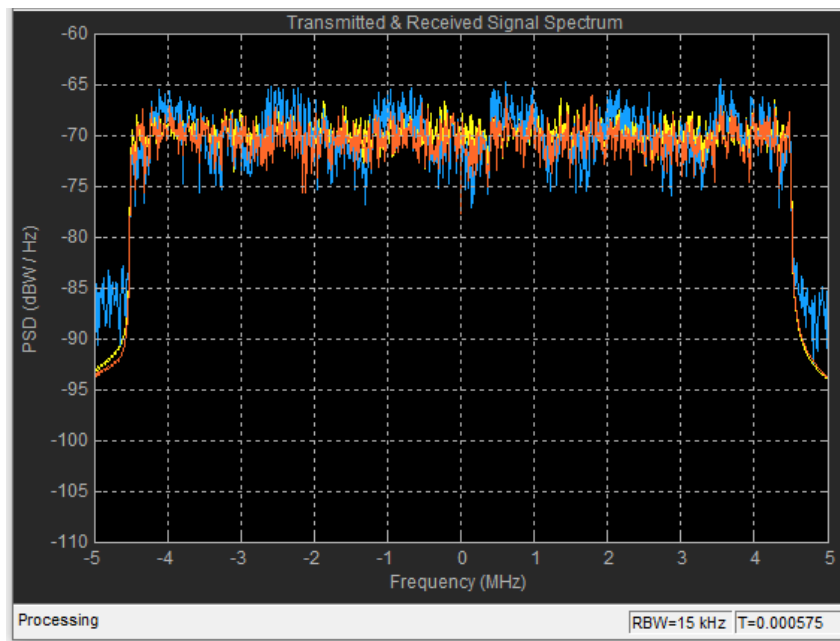


Figure IV.7 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SISO/QPSK/10MHz)

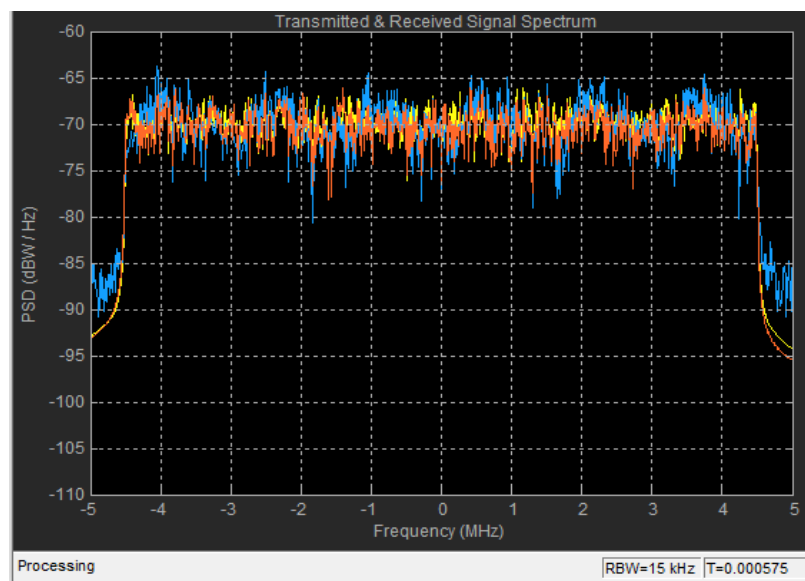


Figure IV.8 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SISO/16QAM/10MHz)

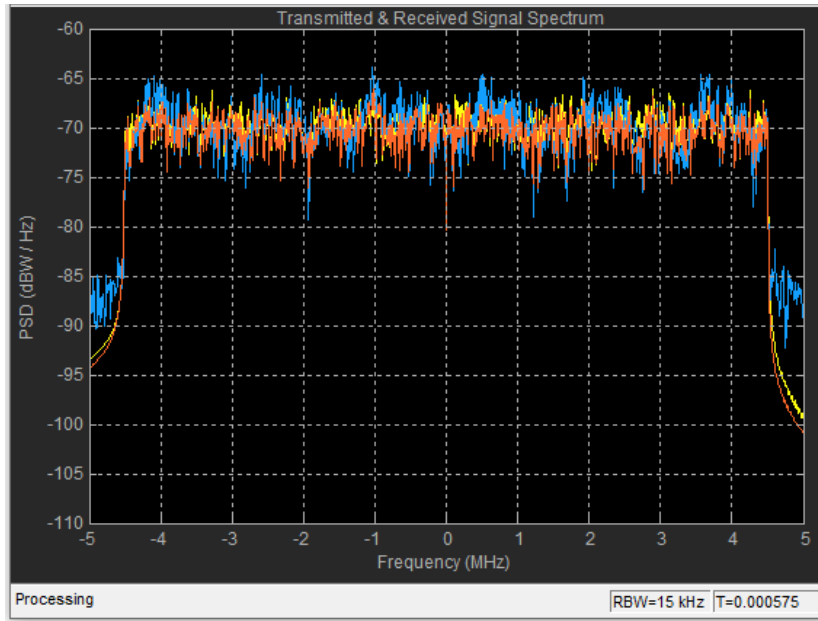


Figure IV.9 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SISO/64-QAM/10MHz)

- **Modèle SISO/ Modulation 16-QAM / Bande passante : 1.4 MHz, 3 MHz.**

Les figures IV.10, IV.11 et IV.8, montrent les résultats avec différentes bandes passantes (1.4, 3 et 10 MHz) pour un même type de modulation (16-QAM). Le signal émis a un spectre avec une réponse d'amplitude normalisée à un, le spectre d'amplitude du signal reçu reflète les effets de la réponse à l'évanouissement par trajets multiples du canal. Nous remarquons que même si on réduit la bande passante, les effets de l'évanouissement sont pour la plupart atténués et le spectre d'amplitude montre une nature plus plate en fréquence, qui ressemble étroitement au spectre transmis.

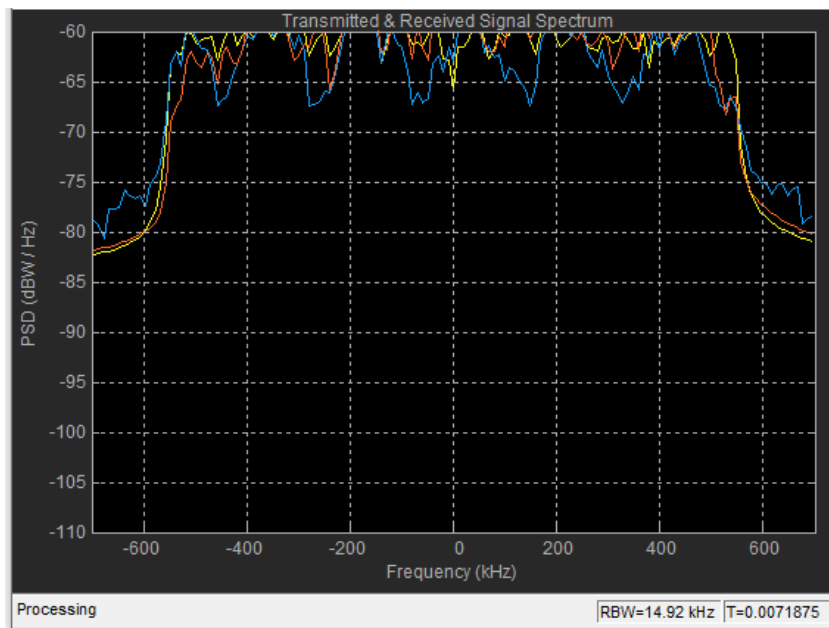


Figure IV.10 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SISO/16-QAM/1,4MHz)

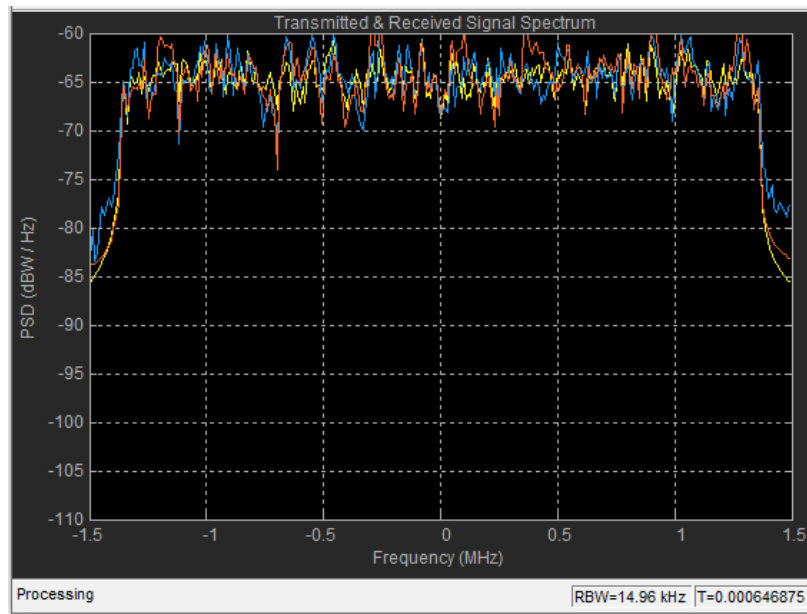


Figure IV.11 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SISO/16-QAM/3MHz)

IV.3.1.3 Mesures de BER et de débits

Afin de vérifier les performances BER et débit de l'émetteur-récepteur, nous utilisons un banc de test appelé commlteSISO_test_timing_ber.m.

```

Simulating the LTE Mode 1: Single Tx and Rx antenna
Modulation = 16QAM
Coding rate = 0.3333
Bandwidth = 10.00 MHz
MIMO Antenna = 1 x 1
Data rate = 9.91 Mbps
    
```

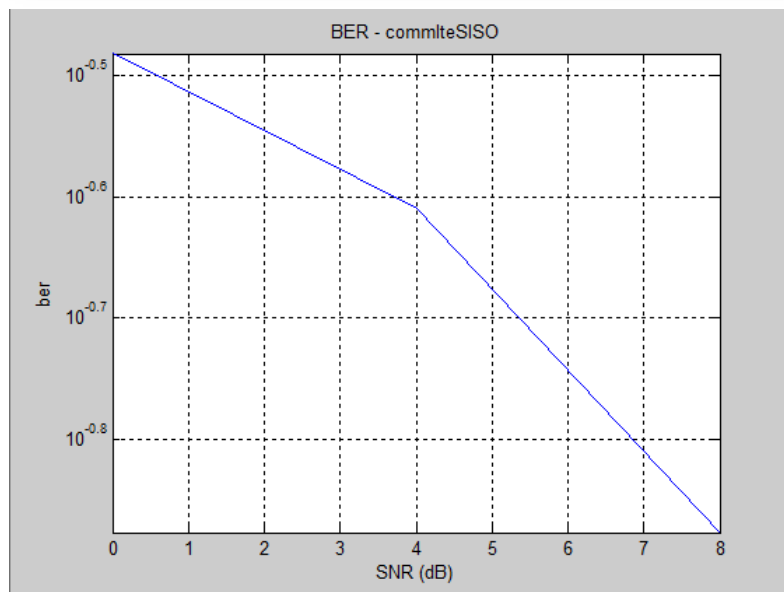


Figure IV.12 : Débit et BER du modèle SISO (16-QAM ; BP:10MHz)


```

Simulating the LTE Mode 1: Single Tx and Rx antenna
Modulation = 64QAM
Coding rate = 0.3333
Bandwidth = 10.00 MHz
MIMO Antenna = 1 x 1
Data rate = 15.26 Mbps
    
```

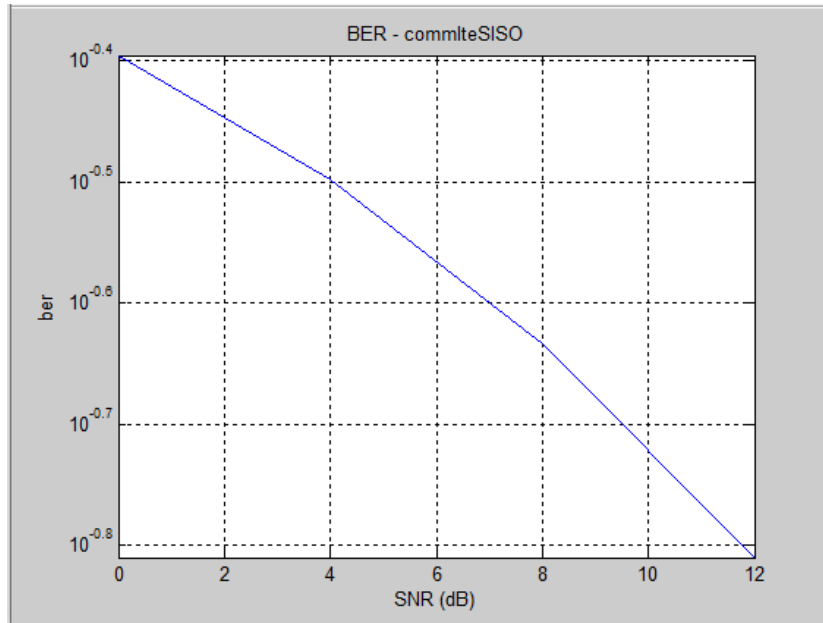


Figure IV.13 : Débit et BER du modèle SISO (64-QAM ; BP:10MHz)

```

Simulating the LTE Mode 1: Single Tx and Rx antenna
Modulation = 16QAM
Coding rate = 0.3333
Bandwidth = 1.20 MHz
MIMO Antenna = 1 x 1
Data rate = 1.14 Mbps
    
```

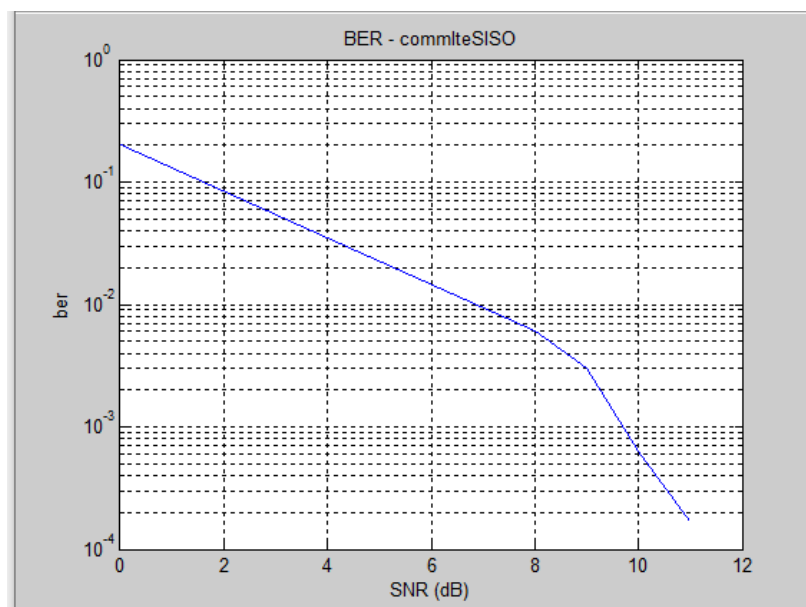


Figure IV.14 : Débit et BER du modèle SISO (16-QAM ; BP:1,4MHz)

Les Figures IV.12 et IV.14 montrent que si on réduit la bande passante pour une même modulation (16-QAM), le débit binaire diminue et le taux BER en fonction du RSB, augmente.

Les Figures IV.12 et IV.13 montrent que si on augmente l'ordre de modulation (16-QAM, 64-QAM) pour une même bande passante (10MHz), le débit binaire augmente et le taux BER diminue avec le RSB.

IV.3.2 Vérification des performances de l'émetteur-récepteur (cas SIMO)

Afin d'observer l'effet de la diversité de réception sur les performances, nous exécutons le script MATLAB du modèle d'émetteur-récepteur SIMO (commlteSIMO).

Les paramètres de simulation sont les suivants.

```

% PDSCH
numTx = 1;    % Number of transmit antennas
numRx = 4;    % Number of receive antennas
chanBW = 4;   % Index to channel bandwidth used [1,...,6]
contReg = 1; % No. of OFDM symbols dedicated to control information [1,...,3]
modType = 1; % Modulation type [1, 2, 3] for ['QPSK','16QAM','64QAM']
% DLSCH
cRate = 1/3; % Rate matching target coding rate
maxIter = 6; % Maximum number of turbo decoding iterations
% Channel model
chanMdl = 'frequency-selective-high-mobility';
% Simulation parameters
Eqmode = 2; % Type of equalizer used [1,2] for ['ZF', 'MMSE']
maxNumErrs = 1e4; % Maximum number of errors found before simulation stops
maxNumBits = 1e4; % Maximum number of bits processed before simulation stops
visualsOn = 1; % Whether to visualize channel response and constellations
snrdb = 16; % Value of SNR used in this experiment

```

Figure IV.15 : Paramètres de simulation du mode SIMO.

IV.3.2.1 Comparaison des constellations de symboles (cas SIMO)

Les Figures IV.16 et IV.17 illustrent les diagrammes de constellation pour les modulations QPSK et 16-QAM, et une bande passante de 10MHz. Nous remarquons que l'égaliseur SIMO compense l'effet d'évanouissement par trajets multiples et fait redimensionner la constellation corrompue (avant égalisation) en une constellation qui peut être correctement démodulée (après égalisation).

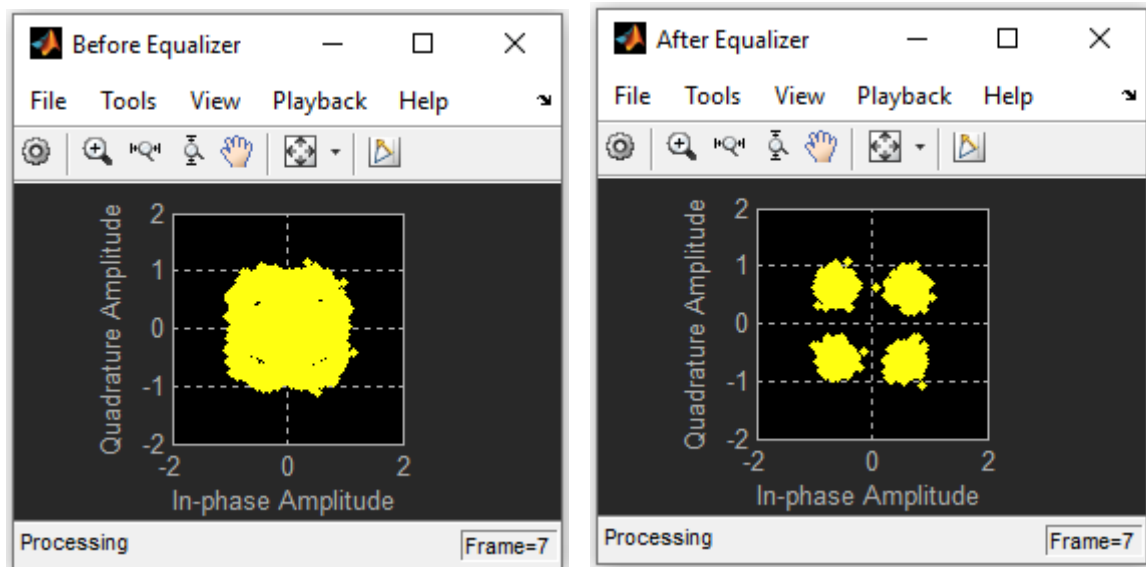


Figure IV.16 : Constellation des symboles QPSK avant et après l'égalisation (BP :10MHz).

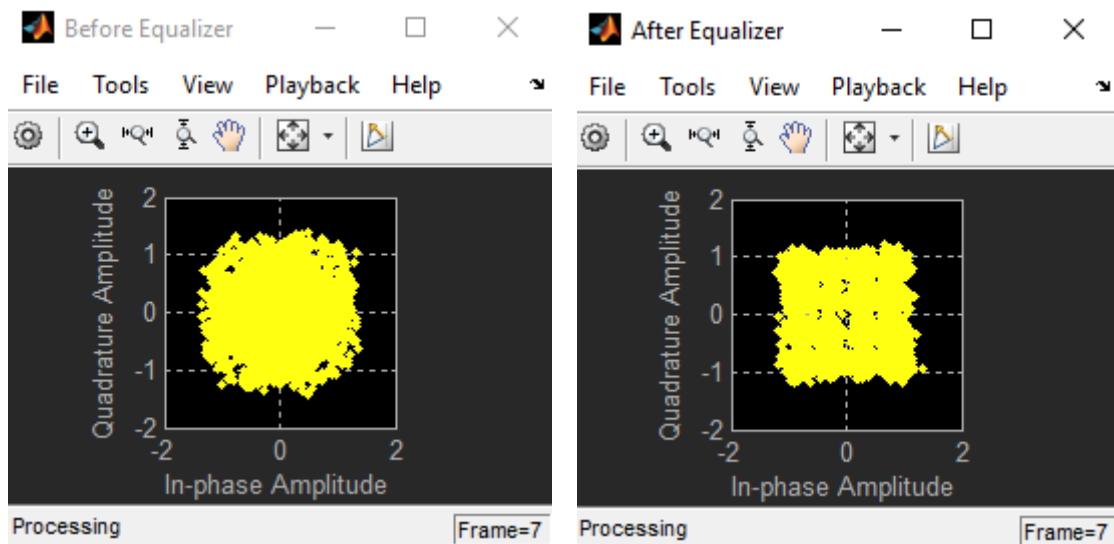


Figure IV.17 : Constellation des symboles QAM avant et après l'égalisation (BP :10MHz).

IV.3.2.2 Comparaison des densités spectrales de puissance (cas SIMO)

Les figures IV.18 et IV.19 montrent la densité spectrale de puissance des signaux émis et reçus avant et après l'égalisation pour les modulations QPSK, 16 QAM et une bande passante de 10MHz. Les résultats montrent que tandis que le signal transmis a une amplitude spectrale de puissance qui est normalisée à un, le spectre d'amplitude du signal reçu reflète les effets de la réponse à l'évanouissement par trajets multiples du canal. Après égalisation, le spectre de magnitude présente une nature plus plate en fréquence, qui ressemble étroitement au spectre transmis.

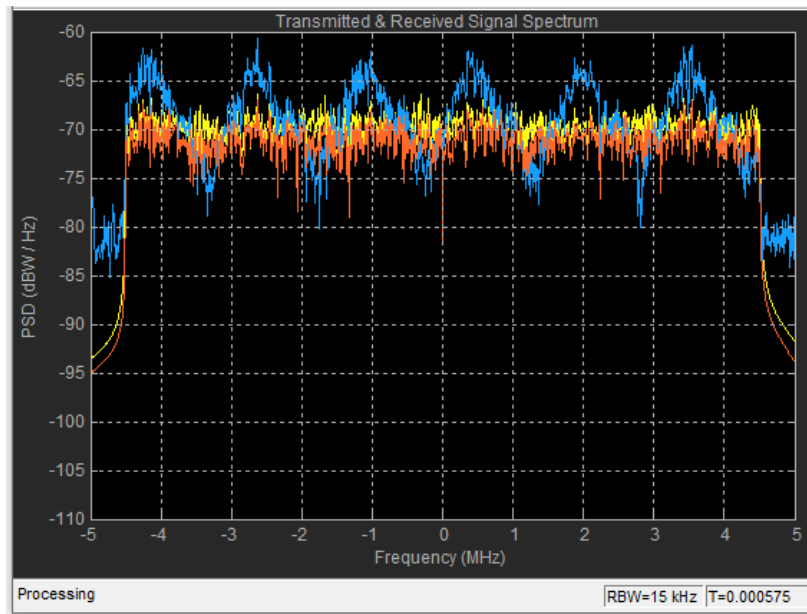


Figure IV.18 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SIMO/QPSK/10MHz)

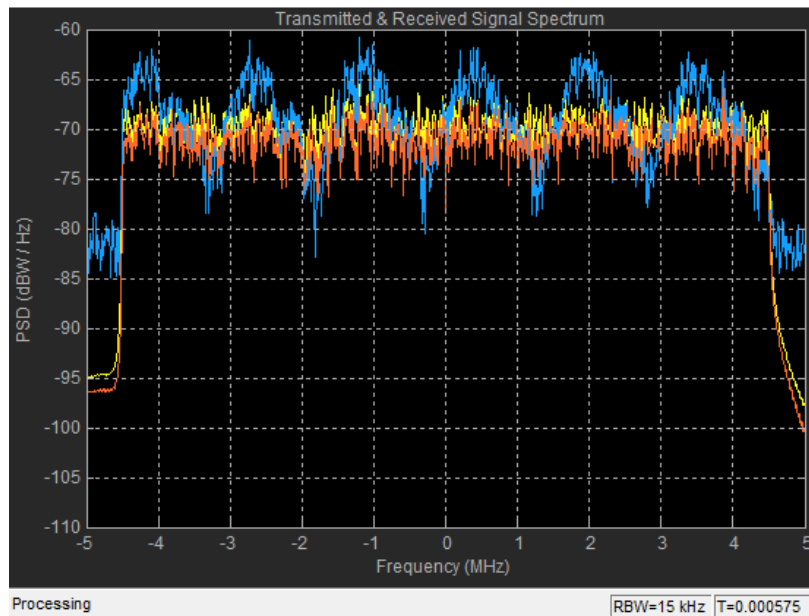


Figure IV.19 : Spectres des signaux émis et reçus avant et après égalisation (SIMO/16-QAM/10MHz)

IV.3.2.3 Mesures du BER et du débit

Afin de vérifier les performances débit et BER de l'émetteur-récepteur SIMO, nous utilisons un banc de test appelé commlteSIMO_test_timing_ber.m.

La Figure II.20 montre le BER de l'émetteur-récepteur en fonction de la valeur SNR. L'émetteur-récepteur a utilisé un schéma de modulation 16-QAM, avec un taux de codage de 1/3, une bande passante système de 10 MHz et des configurations d'antenne SIMO de 1×4 . Le choix de ce jeu de paramètres conduit à un débit de données maximal de 9,91 Mbps.

```

Simulating the LTE Mode 1: Single Tx and multiple Rx antenna
Modulation = 16QAM
Coding rate = 0.3333
Bandwidth = 10.00 MHz
MIMO Antenna = 1 x 4
Data rate = 9.91 Mbps
    
```

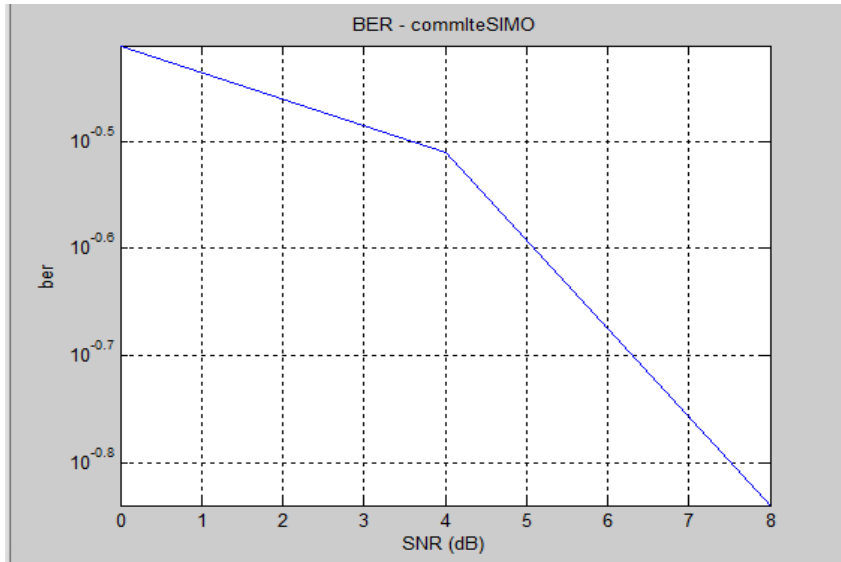


Figure IV.20 : Résultats débit et BER en mode SIMO (16-QAM /BP :10 MHz)

IV.4. SIMULATION DE LA TRANSMISSION DL EN MODE 4

En exécutant le script MATLAB du modèle d'émetteur-récepteur MIMO (commlteMIMO), nous pouvons examiner divers signaux pour évaluer les performances du système avec les modulations QPSK, 16-QAM et une bande passe de 10 MHz. Les paramètres utilisés dans les simulations sont résumés dans le script MATLAB (commlteMIMO_params).

```

% PDSCH
txMode = 4; % Transmission mode one of {1, 2, 4}
numTx = 2; % Number of transmit antennas
numRx = 2; % Number of receive antennas
chanBW = 4; % [1,2,3,4,5,6] maps to [1.4, 3, 5, 10, 15, 20]MHz
contReg = 1; % {1,2,3} for >=10MHz, {2,3,4} for <10Mhz
modType = 1; % [1,2,3] maps to ['QPSK','16QAM','64QAM']
numCodeWords = 1; % Number of codewords in PDSCH
% DLSCH
cRate = 1/3; % Rate matching target coding rate
maxIter = 6; % Maximum number of turbo decoding iterations
% Channel
chanMdl = 'EVA 5Hz';
% Simulation parametrs
Eqmode = 2; % Type of equalizer used [1,2,3] for ['ZF', 'MMSE','Sphere Decoder']
snrdb = 16; % Signal to Noise Ratio in dB
maxNumErrs = 5e7; % Maximum number of errors found before simulation stops
maxNumBits = 5e7; % Maximum number of bits processed before simulation stops
visualsOn = 1; % Whether to visualize channel response and constellations
    
```

Figure IV.21 : Paramètres de simulation du mode MIMO.

Ces paramètres reflètent l'utilisation du multiplexage spatial en mode MIMO 4 avec un seul mot de code. Dans cette simulation, le SNR du canal AWGN est réglé sur 16 dB.

IV.4.1 Comparaison des constellations de symboles (cas MIMO)

Les figures IV.22 et IV.23 montrent les diagrammes de constellation avant (partie supérieure) et après l'égalisation (partie inférieure) des données utilisateurs obtenus à partir de chacune des deux antennes de réception dans une sous-trame. Nous remarquons que l'égaliseur peut compenser l'effet d'un évanouissement de canal pour aboutir à une constellation qui ressemble plus étroitement à celles des modulateurs 16-QAM et QPSK.

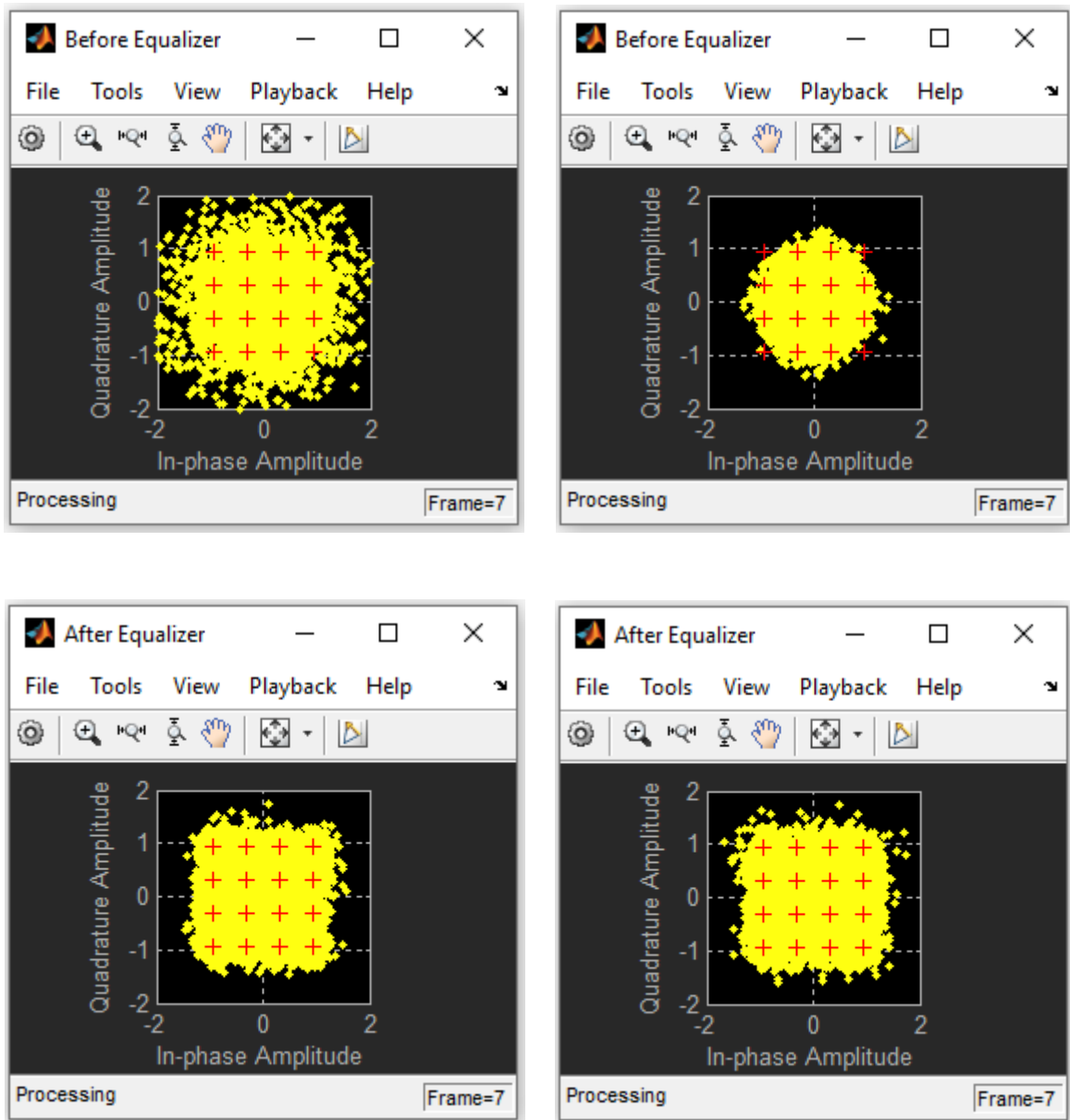


Figure IV.22: Constellation des symboles QAM/MIMO avant et après l'égalisation (antenne 1 et 2)

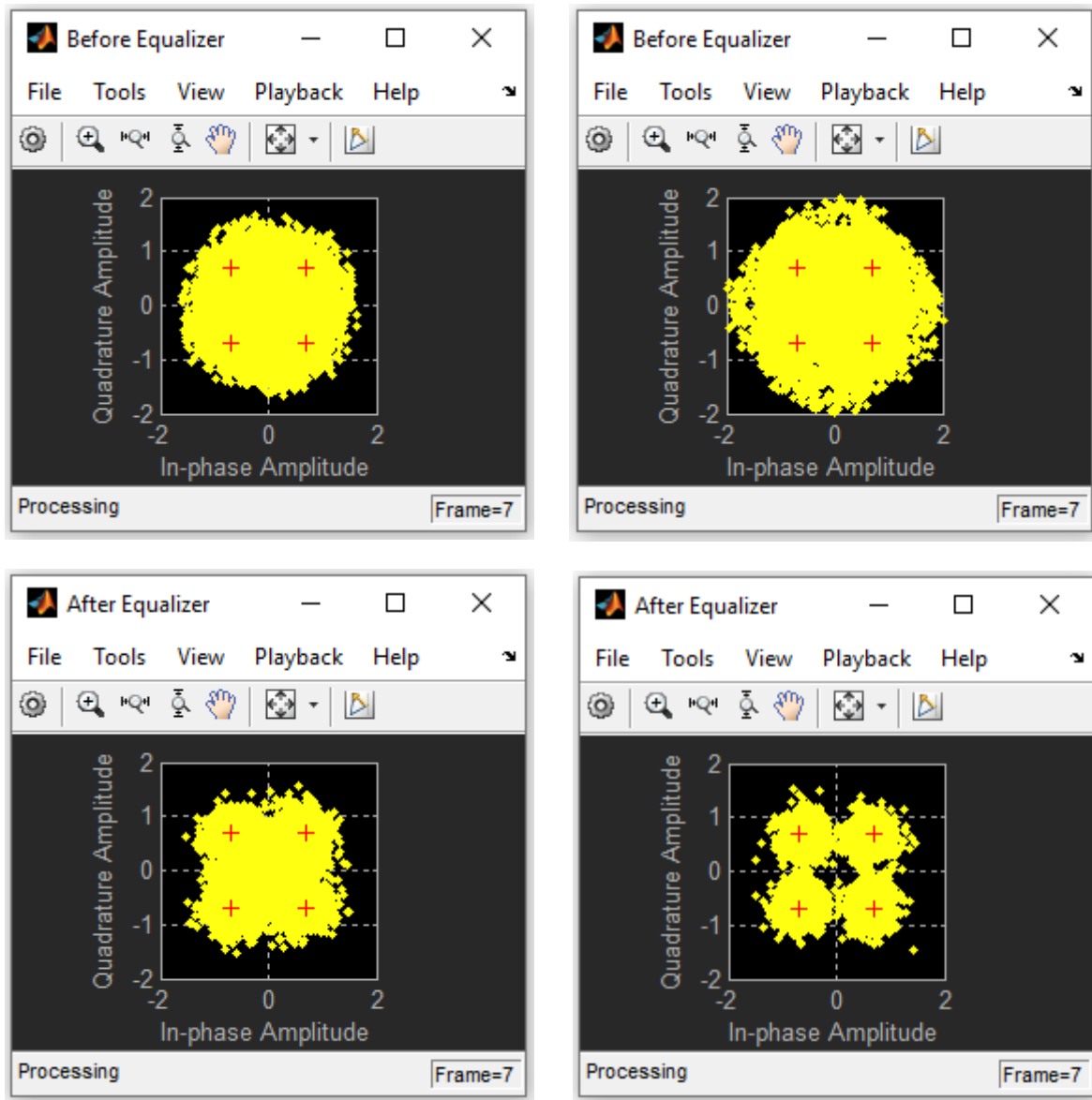


Figure IV.23: Constellation des symboles QPSK/MIMO avant et après l'égalisation (antenne 1et 2)

IV.4.2 Comparaison des densités spectrales de puissance (cas MIMO)

Les figures IV.24 à IV.27 illustrent les spectres de données utilisateurs obtenus à partir de chacune des deux antennes. Elles montrent le signal émis (courbe jaune) et le signal reçu avant et après égalisation. Le signal reçu avant égalisation (courbe bleue montrant les effets de l'évanouissement sélectif en fréquence) est effectivement égalisé par le multiplexage spatial (courbe marron montrant une nature plus plate en fréquence), qui ressemble étroitement au spectre du signal transmis.

La bande passante considérée pour ce système est de 10 MHz. Pour une modulation QPSK des données utilisateurs, nous obtenons un débit de 10,30 Mbps.

```

Simulating the LTE Mode 4: Multiple Tx & Rx antrennas with Closed Loop Spatial Multiplexing
Modulation = QPSK
Coding rate = 0.3333
Bandwidth = 10.00 MHz
MIMO Antenna = 2 x 2
Data rate = 10.30 Mbps
    
```

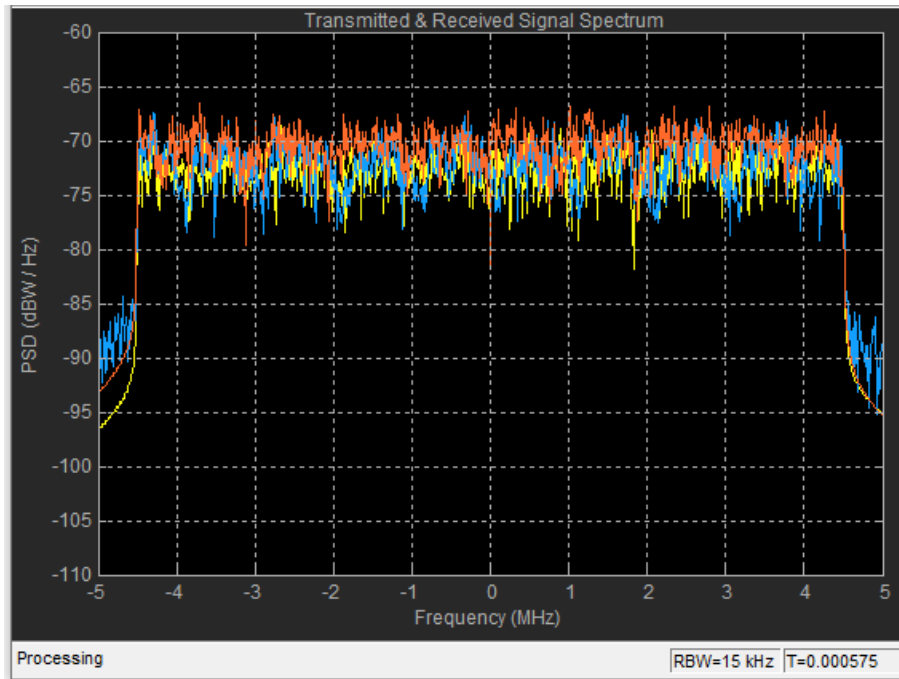


Figure IV.24 : Spectres des signaux émis et reçu avant et après l'égalisation (MIMO/QPSK/antenne 1)

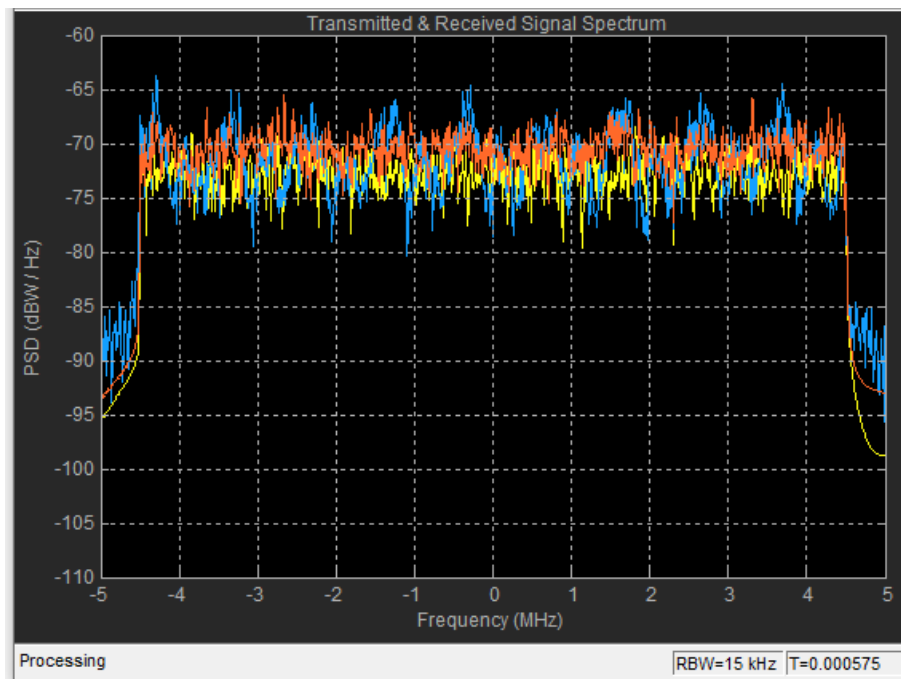


Figure IV.25 : Spectres des signaux émis et reçu avant et après l'égalisation (MIMO/QPSK/antenne 2)

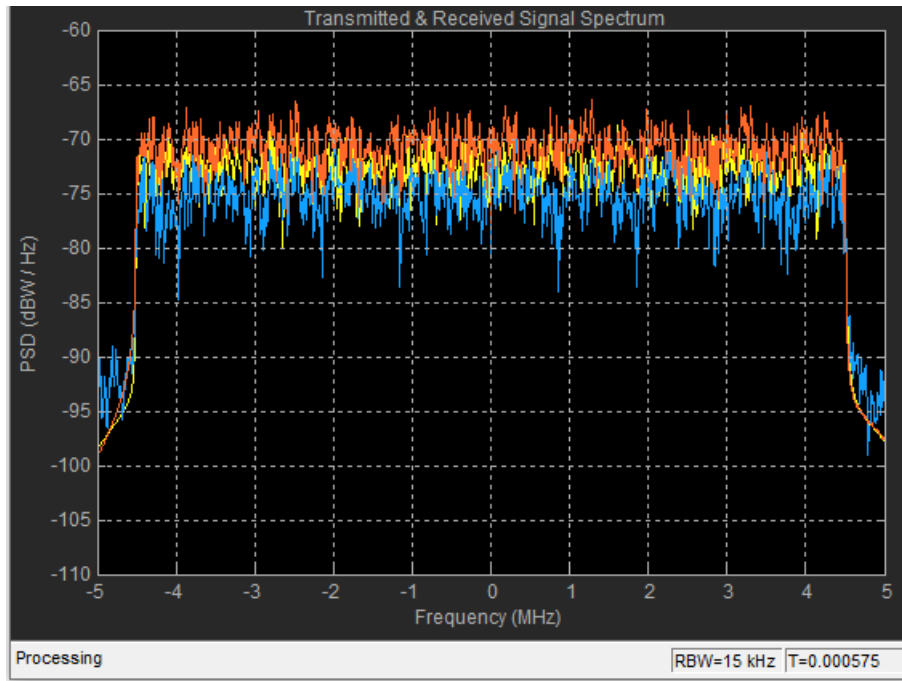


Figure IV.26: Spectres des signaux émis et reçu avant et après l'égalisation (MIMO/16-QAM/antenne 1)

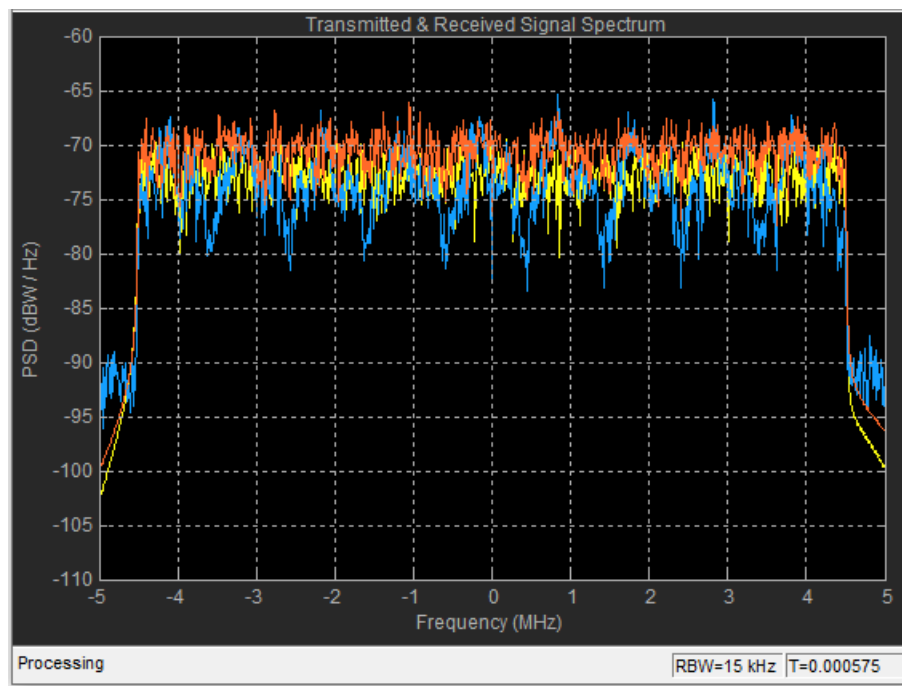


Figure IV.27: Spectres des signaux émis et reçu avant et après l'égalisation (MIMO/16-QAM/antenne 2).

IV.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons simulé les performances du canal descendant LTE à l'aide des fonctions Matlab ou nous avons vu les cas SISO, SIMO et MIMO. Dans ces trois cas nos simulations sont basées sur l'égalisation des constellations et les spectres des signaux à la réception, et le calcul des taux d'erreur binaire BER en fonction du rapport signal sur bruit RSB.

Conclusion générale

Les générations successives de téléphonie mobile ont été développées pour garantir des performances de plus en plus élevées. De nouvelles technologies ne cessent donc de se développer telles que : l'OFDM qui a suscité des intérêts croissants en raison de sa robustesse aux évanouissements par trajets multiples et sa capacité à réaliser une efficacité élevée de transmission, ainsi que 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. Les excellentes performances de l'OFDM et MIMO ont justifié leurs adoptions dans les systèmes LTE actuels.

Notre travail nous a permis de comprendre le fonctionnement de la liaison descendante LTE et d'évaluer ses performances, premièrement en utilisant un modèle Simulink Matlab et deuxièmement avec des fonctions Matlab.

En premier lieu, nous avons présenté les effets d'évanouissement par trajets-multiples de canal Rayleigh sur le spectre du signal reçu, ensuite nous avons montré le taux d'erreurs binaire de ce système.

En deuxième lieu, nous avons présenté des diagrammes de constellations des données utilisateurs et les spectres des signaux, à l'émission et à la réception pour les modes SISO, SIMO et MIMO avec différentes modulations et bandes passante. Nous avons constaté les performances de ce système dans l'égalisation et atténuation des effets d'évanouissement multi-trajets causé par le canal à la réception, sur les constellations et les spectres des signaux.

A la fin, nous avons calculé le taux d'erreurs binaire (BER) en fonction de rapport signal sur bruit SNR, ainsi le débit en Mbps pour les modes SISO et SIMO.

Références bibliographiques

- [1] Dr Houman, Zarrinkoub, 'Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation performance evaluation and implementation.USA: MathWorks', Massachusetts, 2014
- [2] Djami Schehrazed et Toulmout Chafia, « Contribution à l'optimisation d'un réseau LTE : Adaptation du HANDOVER », mémoire de Master en signal et communication, département Génie Electrique, université de M'HAMED BOUGARA, BOUMERDES, Algérie, 06/2017.
- [3] Bouchentouf Hadjer et Boudghene Stambouli Riyad, « Etude des performances des réseaux 4G (LTE) », mémoire de master en télécommunication, département de génie électrique et électronique, université de Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013.
- [4] KHELIFI Salim Et HADDAD Aissa, « Planification et dimensionnement d'un réseau mobile 4G/LTE », Mémoire de Master en Systèmes des Télécommunications, Département de Génie Électrique, université de AKLI MOHAND OULAHDJ, Bouira, Algérie, 09/2018.
- [5] Hamza YAHIAOUI et Redouane LOUNNAS, « Étude des Performances des Réseaux 4G LTE », mémoire de master académique en Télécommunications et Réseaux, département D'ÉLECTRONIQUE, université de MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 13/07/2017.
- [6] BOUGHAZI et Manal LAKHAL Asma, « Attaque de l'homme du milieu dans les réseaux sociaux 4G », mémoire de Fin d'études Master en Ingénierie des Médias, département d'Informatique, université de 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 06/2017.
- [7] MAACHE ELKhir et LOUCIF Oualid, « Étude et simulation des liaisons radiocommunication des systèmes 4G », mémoire de master en Systèmes des Télécommunications, département de Génie Électrique, université de AKLI MOHAND OULAHDJ, Bouira, Algérie, 02/06/2018.
- [8] HADDADI BRAHIM et FACI SARAH, « Etude et simulation sous MATLAB de la 4G LTE», mémoire de master Académique en Télécommunication et réseaux, département de Génie Électrique, université de MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, Algérie, 13 /07 /2015.

Références bibliographiques

- [9] MEHASSOUEL Mustapha, «APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE MIMO A LA 4G DU MOBILE », mémoire de MAGISTER en Communication, département de d'Electronique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS, SETIF, Algérie, 12/2014.
- [10] Ghosh, A. and Ratasuk, R. «Essentials of LTE and LTE-A», Cambridge University Press, Cambridge (2011).
- [11] Dahlman, E., Parkvall, S. and Sköld, J. «4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband», Elsevier (2011)
- [12] 3GPP (2011) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Channels and Modulation Version 10.0.0. TS 36.211, January 2011.
- [13] C. Lim, T. Yoo, B. Clerckx, B. Lee, B. Shim, Recent trend of multiuser MIMO in LTE-advanced, IEEE Magazine, 51, 3, 127–136, 2013.
- [14] 3GPP (2011) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Multiplexing and Channel Coding. TS 36.212.
- [15] LAGRANGE (X.) – Principes de fonctionnement de l’interface radio LTE. [TE 7 374] (2013).

Résumé

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Il s'agit d'une part du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés à la téléphonie (2ème Génération, GSM), puis plus orientés vers le multimédia (3ème Génération, UMTS), la future génération de réseaux sans fil dite de quatrièmes générations (4G) apporte un véritable tournant dans le foisonnement et la disparité des solutions existantes.

L'objectif cette fois-ci sera certes d'augmenter les débits et les applications prises en charge par ces réseaux, mais encore de construire un cadre permettant leur interopérabilité.

Notre projet de fin d'étude débute avec une étude théorique des techniques radios utilisés et adoptées dans la norme 3GPP LTE, à savoir : OFDM, MIMO et les turbos codes, En suite la familiarisation avec le Model du simulateur Matlab du système radio LTE et sa configuration. (Code source Matlab avec la documentation), puis la création d'un modèle de simulation réalisant la couche physique Downlink de LTE afin de satisfaire le besoin de simulation des différentes techniques de transmission adopté en LTE et enfin faire la comparaison des résultats et simulations.

Abstract

Mobile and wireless networks have experienced an unprecedented boom in recent years. It is on the one hand the deployment of several successive generations of telecommunications networks essentially dedicated to telephony (2nd Generation, GSM), then more oriented towards multimedia (3rd Generation, UMTS), the future generation of wireless networks. so-called fourth generation (4G) brings a real turning point in the proliferation and disparity of existing solutions.

The objective this time will certainly be to increase the speeds and the applications taken over by these networks, but also to build a framework allowing their interoperability.

Our end-of-study project begins with a theoretical study of the radio techniques used and adopted in the 3GPP LTE standard, namely: OFDM, MIMO and turbocodes, Following the familiarization with the Model of the Matlab simulator of the LTE radio system and its configuration. (Matlab source code with the documentation), then the creation of a simulation model, let us carry out the Downlink physical layer of the LTE in order to satisfy the need for simulation of the different transmission techniques adopted in LTE and finally compare the results and simulations.