

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب بلية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

HOUA HOCIN

&

ZMIT SIDALI

pour l'obtention du diplôme de master en électronique option télécoms et réseaux

Thème

Étude et Simulation d'une chaîne de transmission 3GPP-LTE

Proposé par : BEHIH MOHAMED

Année Universitaire 2011-2012

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a permis d'achever ce travail et de le présenter sous la forme de ce mémoire.

*Nos chaleureux remerciements vont à Monsieur « **Behih Mohammed** », enseignant à l'Université Saad Dahleb de Blida, pour avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire, qui nous a aidés en nous prêtant une grande attention, par son savoir, et la rigueur scientifique, pour ses remarques et suggestions qui nous ont été extrêmement précieuses, On a l'honneur d'avoir été ses étudiants et c'est l'occasion de lui exprimer tout notre respect.*

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à monsieur le président et les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les enseignants qui nous ont guidés et transmis leurs connaissances tout au long de notre vie étudiante.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

ملخص:

هذا المشروع لنهاية الدراسة بهدف دراسة ومحاكاة النموذج 3جي بي بي – أل تي ا وهذا النموذج يعتمد على الهندسة أس ا (تطور هندسة النظام) التي تمثل تطور شبكات ذات النواة الحزمة في حالة جي أس أم / جي بي أر أس و دبلوفي سي دي أم أ / أش أس بي أ الى هندسة تدعم كل اي بي و تحتوي على نواة مشتركة للحزم ا بي سي حتى توفر دعامة لتقنيات ذات المداخل المتعددة (3جي بي بي مثل أل تي ا , جي أس أم و دبلوفي سي دي أم أ / أش أس بي أ و غير 3جي بي بي) و توفر قابلية الحركة بين هذه التقنيات مع سرعة نقل عالية للبيانات تصل الى 100 ميغا بت في الثانية للإرسالات النازلة (بطريقة الولوج أو أف دي أم أ) وتصل الى 50 ميغا بت في الثانية للإرسالات الصاعدة (بطريقة الولوج أس سي- أف دي أم أ).

كلمات المفاتيح: SC-FDMA, OFDMA, EPC, SAE, LTE, 3GPP.

Résumé :

Ce projet de fin d'étude a pour objectif d'étudier et de simuler la norme 3GPP-LTE, et cette norme est basée sur l'architecteur SAE qui représente l'évolution du réseau du noyau du paquet dans le cas GSM/ GPRS et de WCDMA/ HSPA à une Architecture tout-IP et il contient un noyau commun de paquet (EPC) afin de fournir un support aux technologies d'accès multiples (3GPP Accès comme LTE, GSM et WCDMA/ HSPA et non 3GPP Accès) et fournit la mobilité entre eux avec un débit de transmission de donner élevé arrive Jusqu'à 100 Mbit/s en liaison descendante (par méthode accès OFDMA) et Jusqu'à 50 Mbit/s dans les sens montant (par méthode accès SC-FDMA).

Mots clés : 3GPP ; LTE ; SAE ; EPC ; OFDMA ; SC-FDMA.

Abstract :

This project of end of study has for objective to study and simulate the norm 3GPP-LTE , and this norm based on the architecture SAE that present the evolution of the packet core network in the case GSM/GPRS and WCDMA/HSPA to an all-IP architecture and contains a common packet core for provides support for multiple access technologies (3GPP access like LTE, GSM and WCDMA/HSPA and non-3GPP access) and provides for mobility between them with a rate of transmission to give high arrives up to 100 Mbit/s in downlink (by the method access OFDMA) and up to 50 Mbit/s in upload (by the method access SC-FDMA).

Keywords: 3GPP; LTE; SAE; EPC; OFDMA; SC-FDMA.

Listes des acronymes et abréviations

1xRTT: One time Radio Transmission Technology

1G: 1 Generation of wireless communication technology

2G: 2 Generation of wireless communication technology

3G: 3 Generation of wireless communication technology

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

4G: 4 Generation of wireless communication technology

ACK: Acknowledgement

AF: Applications Function

AMPS: Analogue Mobile Phone System

AM: Acknowledged Mode

AS: Access Stratum

ARQ: Automatic Repeat Request

ASK: Amplitude Shift Keying

AWGN: Additive White Gaussian Noise

BCCH: Broadcast Control Channel

BCH: Broadcast Channel

BER: Bit Error Rate

BPSK: Binary Phase Shift Keying

BTS: Base Transceiver Station

BSC: Base Station Controller

CEPT : Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications

CAZAC: Constant Amplitude Zéro Auto corrélation Codes

CCCH: Common Control Channel

CDMA: Code Division Multiple Access

CDS: Channel-Dependent Scheduling

CP: Cyclic Prefix

CS: Circuit Switched

CRC: Cycle de contrôle de redondance

DCCH: Dedicated control Channel

DL-SCH: Downlink Shared Channel

DFT: Discrete Fourier Transform

DTCH: Dedicated Traffic Channel

EDGE: Enhanced Data Rate for GSM Evolution

ENodeB: Enhanced Node B

EPC: Evolved Packet Core

EPS: Evolved Packet System

ETACS: Extended Total Access Communication System

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

E-UTRAN: Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

EVDO: Evolution Data Optimized

FACH: Forward Access Channel

FDD: Frequency Division Duplex

FDMA: Frequency Division Multiple Access

FOMA: Freedom of Mobile Multimedia Access

FFT: Fast Fourier Transform

GPRS: General Packet Radio Service

GMM: GPRS Mobility Management

GGSN: Gateway GPRS Support Node

GMSK: Gaussian Minimum-Shift Keying

GSM: Global System for Mobile Communications

GTP: GPRS Tunneling Protocol

GW: Gateway

HARQ: Hybrid ARQ

HLR: Home Location Register

GMM: GPRS Mobility Management

HSDPA: High Speed Downlink Packet Access

HSUPA: High Sped Uplink Packet Access

HSS: Home Subscriber Server

ICI: Inter Carrier Interferences

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

IUT: International Telecommunication Union

IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform

IFFT: Inverse Fast Fourier Transform

IES: Interferences Entre Symbols

IMT-2000: International Mobile Telecommunications 2000

IMS: IP Multimedia Subsystem

IP: Internet Protocol

ISI: Inter-Symbol Interference

PCH: Paging Channel

PDC: Personal Digital Cellular

PSK: Phase Shift Keying

LOS: Line Of Sight

LTE: Long Term Evolution

MAC: Medium Access Control

MBMS: Multimedia Broadcast/Multicast Service

MCCH: Multicast Control Channel

MCH: Multicast Channel

MME: Mobility Management Entity

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MSC: Mobile Switching Center

MTCH: MBMS point-to-multipoint Traffic Channel

MRC: Maximal Ratio Combining

NACK: Negative Acknowledgement

NAS: Non-Access Stratum

NDS/IP: Network Domain Security for IP

NLOS: Non Line Of Sight

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OSI: Open System Interconnection

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio

PBCH: Physical Broadcast Channel

PCRF: Policy and Charging Rules Function

PCCH: Paging Control Channel

PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel

PS: Packet Switched

PDCP: Packet Data Convergence Protocol

PDN: Packet Data Network Gateway

PDCCH: Physical Downlink Control Channel

PDSCH: Physical Downlink Shared Channel

PHICH: Physical Hybrid ARQ Indicator Channel

PGW: PDN Gateway

PMCH: Physical Multicast Channel

PHY: Physical

PRACH: Physical Random Access Channel

PUCCH: Physical Uplink Control Channel

PUSCH: Physical Uplink Shared Channel

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

QoS: Quality of Service

RACH: Random Access Channel

RAN: Radio Access Network

ROHC: Robust Header Compression

RLC: Radio Link Control

RNC: Radio Network Controller

RNS: Radio Network Subsystems

RRC: Radio Resource Control

RTP: Real Time Protocol

CRNC: Controlling RNC

SAE: System Architecture Evolution

SGSN: Serving GPRS Support Node

SGW: Serving Gateway

SC-FDMA: Single Carrier – Frequency Division Multiple Access

SCTP: Stream Control Transmission Protocol

S1-C: S1-Contrôle

S1-U: S1-Usager

SGSN: Serving GPRS Support Node

SMS: Short Message Service

SM: Session Management

SNR: Signal Noise Ratio

TACS: Total Access Communication System

TDMA: Time Division Multiple Access

TDD: Time Division Duplex

TDD-CDMA: Time Division Duplex-Code Division Multiple Access

TDS-CDMA: Time Division Synchronous Code Division

TEB: Taux d'Erreur Binaire

TM: Transport Mode

TTI: Transmission Time Interval

UE: User Equipment

UL-SCH: Uplink Shared Channel

UM: Unacknowledged Mode

UMB: Ultra Mobile Broadband

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

UIT: Union International Telecommunications

USIM: Universal Subscriber Identity Module

UICC: Universal Integrated Circuit Card (3GTS 22.101 / Bearer card of SIM / USIM)

UTRAN: UMTS Terrestrial Radio Access Network

WCDMA: Wide-band Code Division Multiple Access

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux cellulaires	03
1.1 Introduction	03
1.2 Télécommunications et téléphonie	03
1.3 Evolution des réseaux cellulaires	04
1.3.1 Les réseaux cellulaires de première génération (1G)	04
a) AMPS	04
b) TACS	04
c) ETACS	04
1.3.2 Les réseaux cellulaires de deuxième génération (2G)	06
a La deuxième génération	06
b Evolutions vers la 2.5G	07
c Evolutions vers la 2.75G	08
d Architecture d'un réseau GSM	09
1.3.3 Les réseaux cellulaires de troisième génération (3G)	09
a) Troisième génération (3G)	09
b) Evolutions vers la 3.5 G	10
c) Evolutions vers la 3.75 G	10
d) Caractéristique de la 3G	10
e) Architecture d'un réseau UMTS	11
1.3.4 Les réseaux cellulaires de quatrième génération (4G)	12
1.4 Quelques notions de base	13
1.4.1 Streaming	13
1.4.2 Handover	13
1.4.3 Roaming	13
1.4.4 Paging	14
1.4.5 Path Loss	14
1.4.6 Shadowing	14
1.4.7 Fast Fading	14
1.5 Conclusion	14

Chapitre 2 : Architecteur et protocole de la norme 3GPP-LTE	15
2.1 Introduction	15
2.2 Architecture générale du réseau EPS	15
2.3 Réseau d'accès (Access Network)	16
2.3.1 Les caractéristiques de réseau d'accès	16
a) Le débit de l'interface radio	16
b) La connexion permanente	16
c) Le délai pour la transmission de données	17
d) La mobilité	17
e) La coexistence et interfonctionnement avec la 3G	17
f) Flexibilité dans l'usage de la bande	18
g) Support du multicast	18
h) Couverture de la cellule	18
i) Les bandes des fréquences destinées à LTE	18
2.3.2 Les entités du réseau d'accès (E-UTRAN)	19
a L'entité UE (équipement d'utilisateur)	19
b L'entité eNodeB (evolved Node B)	20
2.3.3 Les interfaces du réseau d'accès (E-UTRAN)	20
a Interface S1	21
b Interface X2	22
2.4 Réseau cœur (Core Network)	23
2.4.1 Les caractéristiques	23
2.4.2 Les entités du réseau cœur	24
a) L'entité MME (Mobility Management Entity)	24
b) L'entité SGW (Serving Gateway)	25
c) L'entité PGW (PDN Gateway)	25
d) L'entité HSS (Home Subscriber Server)	25
e) L'entité PCRF (Policy and Charging Rules Function)	26
2.5 Les plans usager et contrôle	26
2.5.1 L'architecture du plan usager	26
2.5.2 L'architecture du plan de contrôle	27
2.6 Les protocoles de l'interface Radio	28
2.6.1 La couche 1 (la couche PHY)	29

2.6.2 La couche 2	30
a La sous couche MAC	30
b La sous couche RLC	30
c La sous couche PDCP	31
2.6.3 La couche RRC	31
2.6.4 La couche NAS	32
2.7 Les canaux radio	33
2.7.1 Les canaux logiques	34
a Les canaux logiques de contrôles	35
b Les canaux logiques de trafic	35
2.7.2 Les canaux de transport	36
a Les canaux de transport en downlink	36
b Les canaux de transport en uplink	37
2.7.3 Les canaux physiques	37
a Les canaux physiques en downlink	37
b Les canaux physiques en uplink	38
2.7.4 Mappage entre les canaux.....	39
2.8 Conclusion	39
Chapitre 3 : L'interface radio de la norme 3GPP-LTE	41
3.1 Introduction	41
3.2 Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)	41
3.2.1 Modulation single carrier et égalisation	41
a Propagation multi trajet	42
3.2.2 Principes de l'OFDM	44
3.2.3 Avantages de l'OFDM	47
3.3 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)	48
3.3.1 La structure des trames en LTE	48
3.3.2 Physical Resource Block	49
3.4 Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)	50
3.5 Multiple Input Multiple Output et Maximal Radio Combining (MIMO &MRC)	53
3.5.1 La principe du MRC	53
3.5.2 Le système MIMO	54
a Avantages de système MIMO	56

b Applications	56
c Modèles des canaux MIMO	56
3.5.3 Classification des systèmes MIMO	56
a Le multiplexage spatial MIMO	57
b Le MIMO – Beamforming	57
c La diversité spatiale MIMO	58
3.6 Conclusion	58
Chapitre 4 : Simulation et les résultats	59
4.1 Introduction	59
4.2 Chaîne de transmission	59
4.2.1 Schéma synoptique de la chaîne de transmission	59
4.2.2 Simulation de la chaîne de transmission sur l'outil SIMULINK	61
4.3 Simulation de l'émission de chaîne OFDMA et SC-FDMA	62
4.3.1 Source des données	62
4.3.2 Le codage canal	62
4.3.3 Le poinçonnage	64
4.3.4 Entrelacement (interleaving)	65
4.3.5 Modulation mono porteuse	66
4.3.6 Mode de localisation des sous porteuses	67
a) Le mode localisé	67
b) Le mode distribué	67
4.3.7 Le codage espace-temps en blocs (système MIMO)	69
4.3.8 Insertion la séquence d'apprentissage et les bandes de garde.....	70
a) La séquence d'apprentissage	70
b) Utilisation de la séquence d'apprentissage	71
c) Les bandes de garde	71
4.3.9 L'opération IFFT	72
4.3.10 Insertion du préfixe cyclique (CP)	73
a) Préfixe cyclique	73
b) Interférences entre sous-porteuses	74
c) Interférences entre symboles	74
4.3.11 La conversion parallèle/série	75
4.3.12 Canal de propagation	75

a) Canal Gaussien (AWGN) (Additive White Gaussian Noise)	76
b) Canal multi-trajets	77
c) Effet doppler	79
4.4 Simulation de la réception de chaîne OFDMA et SC-FDMA	81
4.4.1 La conversion série/parallèle et suppression du préfixe cyclique	81
4.4.2 L'opération FFT	81
4.4.3 Suppression des bandes de garde	82
4.4.4 Suppression des pilotes d'insertion (le mode de localisation des sous-porteuses)	82
4.4.5 Estimation de canal	83
a) Intérêts	83
b) Les deux types d'estimation possibles	83
c) Les deux stratégies d'estimation	83
4.4.6 Décodage espace/temps et estimation de canal	84
4.4.7 Démodulation mono porteuse	86
a) Décision matérielle	86
b) Décision logiciel	86
4.4.8 Dés-entrelacement	87
4.4.9 Décodage canal	87
4.4.10 Calcul de TEB (taux d'erreur binaire)	88
4.4.11 SC-FDMA (la liaison montante)	89
4.5 Présentation des résultats	90
4.5.1 Diagramme de constellation pour la modulation mono porteuse	91
4.5.2 Les spectres de la modulation multi porteuse	91
4.5.3 Performances des chaînes de transmission	93
a) La performance pour un canal AWGN+multi-trajet dans un système MIMO 2x2	93
b) La performance pour un canal AWGN seulement dans un système MIMO 2x2	95
4.6 Conclusion	96
Conclusion générale	97

Liste des figures

Figure 1.1. Architecture d'un réseau GSM.....	09
Figure 1.2. Architecture d'un réseau UMTS	11
Figure 2.1. Architecture général du réseau EPS	16
Figure 2.2. Latence du plan usager	17
Figure 2.3. Flexibilité dans l'usage de la bande	18
Figure 2.4. Les bandes des fréquences destinées à LTE	19
Figure 2.5. Les équipements des utilisateurs dans la norme LTE	19
Figure 2.6. L'entité eNodeB	20
Figure 2.7. Architecture de l'E-UTRAN Sans UE	21
Figure 2.8. Le réseau cœur EPC	24
Figure 2.9. La pile protocolaire du plan usager	26
Figure 2.10. La pile protocolaire du plan de contrôle	27
Figure 2.11. La pile protocolaire de l'interface radio pour UE	28
Figure 2.12. Le modèle de la couche PHY du Downlink Shared Channel	29
Figure 2.13. Le modèle Access et No-Access Stratum	32
Figure 2.14. Les canaux existents dans l'architecture d'E-UTRA	34
Figure 2.15. Les différents canaux logiques	35
Figure 2.16. Les différents canaux de transport	36
Figure 2.17. Les différents canaux physiques	37
Figure 2.18. Mappage entre les canaux de l'E-UTRAN	39
Figure 3. 1. Le multi trajets induit des retards de propagation	42
Figure 3.2. Plus les delay spreads sont plus longs plus le canal devient sélectif en fréquence	43
Figure 3.3. Le modulateur OFDM	44
Figure 3.4. La forme des impulsions et le spectre d'une sous-porteuse OFDM ...	45
Figure 3.5. L'espacement des sous porteuses OFDM	46
Figure 3.6. L'OFDM élimine l'IEDS via des périodes symbole plus longues et le préfixe cyclique.	47
Figure 3.7. La structure générique de trame LTE	48

Figure 3.8. Physical Resource Blocks	49
Figure 3.9. Répartition des ressources sur les utilisateurs	50
Figure 3.10. Chaîne de transmission SC-FDMA	50
Figure 3.11. Comparaison entre la détection en SC-FDMA et OFDMA	51
Figure 3.12. Mode localisé et mode distribué	53
Figure 3.13. La technique MRC améliore la fiabilité du lien	54
Figure 3.14. Représentation de système MIMO	55
Figure 3.15. Les modèles des canaux MIMO	56
Figure 3.16. Classification des systèmes MIMO	57
Figure 4.1. Le schéma simplifié de la liaison descendante (OFDMA)	60
Figure 4.2. Le schéma simplifié de la liaison montante (SC-FDMA)	60
Figure 4.3. Simulation de la chaîne de transmission OFDMA	61
Figure 4.4. Simulation de la chaîne de transmission SC-FDMA	61
Figure 4.5. La source de données utilisée dans les deux chaînes	62
Figure 4.6. Le schéma de principe d'un codeur convolutif	63
Figure 4.7. Le schéma du code convolutif utilisé	64
Figure 4.8. La boîte de dialogue de convolutional encoder	64
Figure 4.9. Le principe de l'opération de poinçonnage	65
Figure 4.10. La simulation et la boîte de dialogue de l'entrelacement	65
Figure 4.11. La simulation et la boîte de dialogue de modulation mono porteuse.	66
Figure 4.12. Le mode de localisation des sous porteuses	67
Figure 4.13. La simulation et la boîte de dialogue du mode distribué	68
Figure 4.14. La simulation et la boîte de dialogue pour le mode localisé	68
Figure 4.15. La représentation d'un codage espace-temps d'alamouti (système MIMO)	69
Figure 4.16. La simulation et les boîte de dialogue de codage espace-temps ...	70
Figure 4.17. La simulation et la boîte de dialogue d'insertion de la séquence d'apprentissage et les bandes de garde	72
Figure 4.18. La simulation et la boîte de dialogue d'opération IFFT	72
Figure 4.19. Le cyclique préfixe	73
Figure 4.20. La simulation et la boîte de dialogue d'insertion du préfixe cyclique.	75
Figure 4.21. La simulation et la boîte de dialogue de conversion parallèle vers	

Série	75
Figure 4.22. Le modèle de canal Gaussien	76
Figure 4.23. La simulation et la boîte de dialogue de canal AWGN	77
Figure 4.24. Canaux multi-trajets	77
Figure 4.25. La densité de probabilité de modèle de Rayleigh	78
Figure 4.26. La simulation et la boîte de dialogue du canal Rice	79
Figure 4.27. La représentation de l'effet Doppler	80
Figure 4.28. La simulation et les boîtes de dialogue de La conversion Série/Parallèle, et suppression du préfixe cyclique	81
Figure 4.29. La simulation et la boîte de dialogue de l'opération FFT	82
Figure 4.30. La simulation et la boîte de dialogue de la suppression de la bande de garde	82
Figure 4.31. La simulation et la boîte de dialogue de la suppression des pilotes d'insertion	83
Figure 4.32. La simulation de l'estimation de canal et du décodage espace/temps	85
Figure 4.33. La simulation et la boîte de dialogue de la démodulation 16-QAM	87
Figure 4.34. La simulation et la boîte de dialogue de dés-entrelacement	87
Figure 4.35. La simulation et la boîte de dialogue de décodage canal	88
Figure 4.36. La simulation et la boîte de dialogue du calcul de TEB	89
Figure 4.37. La simulation et la boîte de dialogue de l'opération DFT et IDFT.	90
Figure 4.38. Les diagrammes de constellation de la modulation 16-QAM pour les Deux méthodes d'accès (OFDMA et SC-FDMA)	91
Figure 4.39. Les spectres de modulation multi porteuse pour les deux méthodes d'accès	92
Figure 4.40. Evolution de $TEB = f(SNR)$ pour les différents types de modulation en utilisant l'OFDMA	93
Figure 4.41. Evolution du $TEB = f(SNR)$ dans le cas d'utilisation ou non de codage canal	94
Figure 4.42. L'évolution du $TEB = f(SNR)$ pour les différentes valeurs de rendements du code convolutif	94
Figure 4.43. Evolution du $TEB = f(SNR)$ pour les différentes méthodes d'accès ...	95
Figure 4.44. Evolution du $TEB = f(SNR)$ pour un canal AWGN seulement ou un	

canal AWGN+multi trajet dans le cas de système MIMO 2x2	96
---	----

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Quelques standards de 1G	06
Tableau 1.2. Les avantages et les inconvénients de la première génération	06
Tableau 1.3. Quelque réseau numérique de 2G	07
Tableau 1.4. Caractéristiques de la norme GSM et ses évolutions	08
Tableau 1.5. Les avantages et les inconvénients de la deuxième génération	08
Tableau 1.6. Caractéristiques des composantes de la norme UMTS	11
Tableau 1.7. Les avantages et les inconvénients de la troisième génération	12
 Tableau 2.1. Les différentes catégories des équipements des utilisateurs	 20
 Tableau 3.1. Le tableau récapitulatif du nombre de PRBs disponibles par bande Passante	 49
 Tableau 4.1. Les polynômes générateurs du code convolutif utilisé	 63
Tableau 4.2. Le vecteur de poinçonnage pour différents taux du codage convolutif.	65
Tableau 4.3. Les paramètres utilisés dans la simulation	90

Introduction générale

L'évolution et la progression technologiques ont connu un sommet avec la création d'Internet et sa propagation à travers les quatre coins du monde. Ce dernier joue un rôle efficace dans la distribution et le partage rapide et gratuit de l'information, toutefois, on remarque une lacune dans le mode des communications à grande échelle. Les téléphones cellulaires sont en progression constante. Ils sont utilisés non seulement pour les communications vocales, mais également, grâce aux technologies avancées, pour la partie vision comme dans (3G, 4G) dans le partage d'applications, et même comme modems sans fil ou navigateurs web.

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

Le système 4G permettait la mise à niveau des réseaux de communication. Il devrait fournir une solution *IP* complète et sécuriser pour les installations multimédias, telles que la voix et les données multimédias qui seront fournies aux utilisateurs; dans un esprit de « *Anytime, Anywhere* », avec une qualité de service beaucoup plus élevée par rapport aux générations précédentes

Notre travail se constitue de quatre chapitres dont le premier chapitre comprendra une introduction décrivant d'une façon générale l'évolution des réseaux cellulaires.

Dans le deuxième chapitre, on discutera une étude sur l'architecture et les différents protocoles de la norme *3GPP-LTE*.

Pour le troisième chapitre, on va présenter une étude sur L'Interface Radio de la norme *3GPP-LTE*

Et on finit par le quatrième chapitre en donnant les résultats de simulations des chaînes de transmission pour les deux liaisons montant (*SC-FDMA*) et descendant (*OFDMA*), et une étude comparative du point de vue de *TEB* (Taux d'Erreur Binaire) avec plusieurs paramètres comme la modulation et codage canal et canal de transmission et system *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*).

Finalement, on terminera notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1 Généralité sur les réseaux cellulaires

1.1 Introduction

Le domaine des télécommunications connaissait une évolution exponentielle avec l'apparition des systèmes numériques. Cette évolution se traduit par le développement de différents systèmes qui offrent de plus en plus de services pour l'utilisateur. Plusieurs normes ont vu le jour à travers le monde pour répondre aux besoins de grand public en qualité d'appel et de vitesse de transmission.

Dans ce chapitre, on présente une généralité sur évolution du système à téléphone mobile.

1.2 Télécommunications et téléphonie

La téléphonie est un système de télécommunications qui est pour but essentiel de transmettre le son, et en particulier la parole. Il existe la téléphonie fixe filaire et la radio téléphonie qui comprend la téléphonie fixe sans fil et la téléphonie mobile. Un réseau téléphonique est composé de 3 éléments principaux : les terminaux, les centres et les liaisons entre ces différents éléments [1].

Contrairement à la téléphonie filaire dans laquelle tous les abonnés sont reliés au central par un câble, les abonnés à la téléphonie mobile sont reliés au central par des ondes radioélectriques partout où la couverture de l'opérateur concerné est disponible, les communications d'un abonné ne sont pas gérées par un central local, mais par un centre de commutation mobile relié au téléphone via des *BSC* et des *BTS* [1].

L'idée d'un système radio mobile basé sur une structure cellulaire a été élaborée au début des années 1970, dans les laboratoires de Bell aux *USA*. Cependant, ce n'a été

qu'au cours des années 1980 après l'apparition de l'implantation et l'exploitation commerciale de réseaux de téléphones cellulaires analogiques [2].

L'histoire de la téléphonie mobile numérique a débuté réellement en 1982. En effet, à cette date, le Groupe Spécial Mobile, *GSM*, a été créé par la Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications (*CEPT*) pour élaborer les normes de communications mobiles à l'Europe dans la bande de fréquences de 890 à 915 MHz pour l'émission à partir des stations mobiles (*Uplink*) et 935 à 960 MHz pour l'émission à partir de stations fixes (*Downlink*) [3].

Les années 80 ont connu le développement du numérique au niveau de la transmission et au niveau du traitement des signaux pour concevoir des techniques de transmission fiables, grâce à un encodage particulier des signaux préalablement à l'envoi dans un canal, et l'obtention des débits de transmission raisonnables pour les signaux.

Ainsi, en 1987, le groupe *GSM* fixe les choix technologiques relatifs à l'usage des télécommunications mobiles : transmission numérique, multiplexage temporel des canaux radio, chiffrement des informations ainsi qu'un nouveau codage de la parole.

Il faut attendre 1991 pour que la première communication expérimentale par *GSM* ait eu lieu, la signification du sigle *GSM* a été changée vers *Global System for Mobile* communications et les spécifications ont été adaptées pour des systèmes fonctionnant dans la bande des 1800 MHz [3].

Aujourd'hui, avec la naissance de la quatrième génération de téléphonie mobile et grâce à la norme technique qui l'accompagne, le *LTE*, nous permet d'avoir des débits élevés jusqu'à 100 *Mbps*, soit pour les usagers des connexions trois ou quatre fois plus rapides que ceux de la *3G* ou *3G+*.

Le premier déploiement commercial a eu lieu en décembre 2010 à *Stockholm*, sur le réseau de *TeliaSonera* [3].

1.3 Evolution des réseaux cellulaires

1.3.1 Les réseaux cellulaires de première génération (1G)

Les premiers réseaux de téléphonie cellulaire étaient analogiques, c'était la première Génération. Ils étaient développés dans les années 70 – 80. Les premiers terminaux sans fil, les radiotéléphones analogiques ont été installés dans les voitures ou transportés dans des valises. Ils étaient énormes, consommaient beaucoup d'énergie et ayant une couverture limitée. La technique modulation radio utilisée au niveau de ces réseaux était proche de celle de la *FM*, ce qui ne permettait pas de garantir la confidentialité des communications.

La première génération de téléphonie cellulaire était déployée sous le nom commercial *AMPS*, et La première génération de téléphonie mobile (notée *1G*) possédait un fonctionnement analogique, et il était constituée d'appareils relativement volumineux. Il s'agissait principalement des standards suivants [2]:

a AMPS

L'*AMPS* est apparu en 1976 aux États-Unis, il constitue le premier standard de réseau cellulaire, il utilisait le multiplexage fréquentiel (*FDMA*) pour transporter les canaux vocaux dans la bande des 800 *MHz*. Ce standard a été Utilisé principalement Outre-Atlantique, en Russie et en Asie, ce réseau analogique de première génération a possédé de faibles mécanismes de sécurité ce qui permet le piratage des lignes téléphoniques.

b TACS

Le *TACS* est la version européenne du modèle *AMPS*. Cette version a Utilisé la bande de fréquence de 900 *MHz*, ce système fut notamment largement utilisé en Angleterre, puis en Asie (Hongkong et Japon).

c ETACS

L'*ETACS* est une version améliorée du standard *TACS* développé au Royaume-Uni, elle a utilisé un nombre plus important des canaux de communication.

Le tableau 1.1 résume quelques normes de 1G et ces bandes de fréquences.

Standard	Bande de fréquences DL(MHz)	Bande de fréquences UL(MHz)	Largeur de bande d'un canal (KHz)	Année
AMPS	869-894	824-849	30	1976
C450	460-465.74	450-455.74	10	1980
NMT50	463-467.5	453-457.5	25	1981
TACS	935-960	890-915	25	1983
E-TACS	917-950	872-905	25	1984
NTT	870-885	925-940	25/6.25	1985
NMT900	935-960	890-915	12.5	1986

Tableau 1.1. Quelques standards de 1G.

Le Tableau1.2 Présente les avantages et les inconvénients de la première génération

Avantages	Inconvénients
- Premiers radiotéléphones analogiques sans-fil	- La capacité de cette génération est limitée, car le système est basé sur la FDMA - La Mobilité est limitée particulièrement entre réseaux de fournisseurs différents, - Il y a risque de fraude et absence de mécanismes de sécurité fiables - Ce sont des systèmes analogiques.

Le Tableau 1.2. Les avantages et les inconvénients de la première génération.

1.3.2 les réseaux cellulaires de deuxième génération (2G)

a La deuxième génération

La deuxième génération de téléphonie mobile a apparue en 1982.Elle est basée sur le traitement numérique. Le *CDMA*, et le *GSM* sont des réseaux mobiles numériques de la deuxième génération. Parmi les avantages de la deuxième génération, on peut

citer : une meilleure qualité d'écoute, des terminaux portables et une certaine confidentialité des communications. Les progrès de la deuxième génération ont permis l'accès du grand public à la téléphonie mobile. Un débit de 9.6Kb/s était disponible pour la voix. Parallèlement au service téléphonique, la *2G* a permis le développement et le lancement du service *SMS* accessible aux abonnés *GSM* et *CDMA*. Il s'agit en fait d'un service de transmission de message textuel dont le contenu est de 160 caractères [4].

Standard	Année	Bandes de fréquences(MHz)		Méthode d'accès	Largeur d'un canal	Utilisateur par canal
		DL	UL			
GSM	1991	935-960	890-915	TDMA	200 KHz	8
IS-136	1992	869-894	824-849	TDMA	30 KHz	3
IS-95	1993	869-894	824-849	CDMA	1.25 MHz	64
iDEN	1994	851-866	806-821	TDMA	25 KHz	3/6
PDC	1995	935-960	890-915	TDMA	25 KHz	3/6

Tableau 1.3. Quelque réseau numérique de 2G.

b Evolutions vers la 2.5G

La *2G* a continué son évolution qui la conduit au mi – chemin d'une *3G* de téléphonie mobile. A ce stade, c'est la capacité de transmission de données qui se développe dans le réseau originalement qui est conçu pour le transport de la voix. Ainsi, le *GPRS* a pris naissance. Ce nouveau service exploitant la technologie de commutation de paquets permet l'accès à l'Internet à bas débit à partir d'un terminal mobile. Dans des conditions optimales, des débits maximums réels de 50Kb/s sont possibles alors que le débit théorique est de 144Kb/s . ainsi l'architecture mixte *GSM* et *GPRS* débouché sur la *2.5G*. Dans ce nouveau réseau *2.5G*, la voix continue de transiter sur le réseau *GSM*, alors que l'Internet est disponible via *GPRS* [4].

c Evolutions vers la 2.75G

L'évolution de la capacité de transmission de données continue. Une autre étape est atteinte, c'est le 2.75 G qui permet au service *EDGE* de voir le jour. L'*EDGE* permet théoriquement des débits de 384 Kb/s. grâce à un changement de modulation. Le tableau ci-dessous résume les différents standards des systèmes 2G [4]:

Technologie	GSM	GPRS	EDGE
Génération	2G	2,5G	2,75G
Fréquences (MHz) Tx : Transmission Rx : Réception	GSM 450 450,4-457,6 (Tx) 460,4-467,6 (Rx) GSM 480 478,8-486 (Tx) 488,8-496 (Rx)	GSM 900 880-915 (Tx) 925-960 (Rx) GSM 1800 (DCS) 1710-1785 (Tx) 1805-1880 (Rx)	GSM 1900 (PCS) 1850-1910 (Tx) 1930-1990 (Tx)
Mode de duplexage	FDD		
Méthode d'accès	TDMA/FDMA		
Largeur d'un canal	200 KHz		
Type de modulation	GMSK	GMSK	GMSK, 8PSK
Type de commutation	circuit	paquet	paquet
Débit maximum théorique	14,4 kbit/s	171,2 kbit/s	384 kbit/s
Débit généralement constaté	-	35 à 40 kbit/s	110 à 130 kbit/s

Tableau 1.4. Caractéristiques de la norme *GSM* et ses évolutions.

Le tableau 1.5 présente les avantages et les inconvénients de la deuxième génération

Avantages	Inconvénients
- La Capacité en voix est augmentée par rapport à la première génération - Ces systèmes sont sécurisés contre la fraude, - Les communications sont numérisées (canal de contrôle et de la voix sont numérique), - Les services sont plus évolués.	- envoi de données lentes

Le Tableau1.5. Les avantages et les inconvénients de la deuxième génération.

d Architecture d'un réseau GSM

Un réseau mobile compte une ou plusieurs stations de base par cellule. La station mobile choisit la cellule selon la puissance du signal. Une communication en cours peut passer d'une cellule à l'autre permettant ainsi la mobilité des utilisateurs.

On peut diviser le réseau en quatre (04) parties principales (la figure 1.1) [5] :

- ✓ La station mobile : *MS- Mobile Station*,
- ✓ Le sous-système radio : *BSS- Base Station Subsystem*,
- ✓ Le sous-système réseau : *NSS- Network Subsystem*,
- ✓ Le sous-système opération : *OSS- Operation Subsystem*

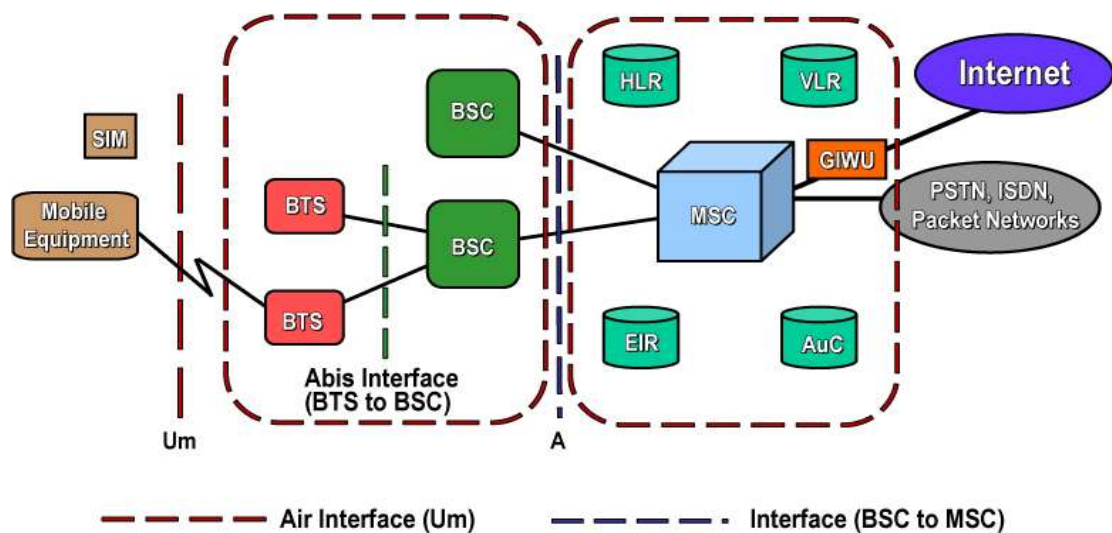


Figure 1.1. Architecture d'un réseau GSM.

1.3.3 Les réseaux cellulaires de troisième génération (3G)

a Troisième génération (3G)

La 3G correspond au standard *UMTS* de l'*ETSI*. Dans la version américaine, elle correspond au *CDMA 2000* alors qu'en Japon on parle de *FOMA*. Au niveau de la 3G, des débits jusqu'à 2 Mb/s sont offerts. Les services possibles sur un réseau 3G sont l'accès haut débit à l'Internet sans fil, visiophonie, messages vidéo, et la réception de l'émission télévisé sur le téléphone. La 3G offre un niveau de sécurité plus élevée que ses prédécesseurs de la 2G.

b Evolutions vers la 3.5 G

Le *HSDPA* est un protocole de téléphonie mobile qui offre un débit de téléchargement variant entre 8 et 10 *Mb/s* dans le sens descendant. Cette technologie est basée sur la communication *WCDMA*.

c Evolutions vers la 3.75 G

Le *HSUPA* est un autre protocole de téléphonie mobile qui permet des débits de 5.6 *Mb/s* dans le sens montant et permet de réduire la latence.

d Caractéristique de la 3G

Les spécifications *IMT-2000* de l'Union Internationale des Communications (*UIT*) définissent les caractéristiques de la *3G* suivantes [6] :

➤ Technologies pour le service terrestre

- ✓ *CDMA* à large bande (*WCDMA*),
- ✓ *CDMA2000* (évolué de *IS-95CDMA*),
- ✓ *TDD-CDMA* (répartition dans le temps) et *TD-SCDMA* (répartition dans le temps et synchrone),
- ✓ *UWC-136* (évolué de *IS-136*).

➤ Débit de transmission

- ✓ 144 *Kbps* avec une couverture totale pour une utilisation mobile,
- ✓ 384 *Kbps* avec une couverture moyenne pour une utilisation piétonne,
- ✓ 2 *Mbps* avec une zone de couverture réduite pour une utilisation fixe.

➤ Communication de données

- ✓ Internet,
- ✓ Commerce électronique,
- ✓ Communication multimédia

➤ Façon de communiquer

- ✓ courriel électronique,
- ✓ Web à l'échelle mondiale,

✓ Messagerie instantané

Le tableau 1.6 représente les caractéristiques des composantes de la norme UMTS

Technologie	W-CDMA	HSDPA	TD-CDMA	TD-SCDMA
Génération	3G	3,5G	3G	3G
Fréquences (MHz) Tx: Transmission Rx : réception	IMT-2000 : Bande 1800 : 1920-1980 (Tx) 1710-1785 (Tx) 2110-2170 (Rx) 1805-1880 (Rx) Bande 1900 : 1850-1910 (Tx) 1930-1990 (Rx)		IMT-2000 : 1900-1920 1785-1805 2010-2025 1880-1900 2300-2400	
Méthode de duplexage	FDD		TDD	
Méthode d'accès	CDMA			
Largeur d'un canal	5 MHz		5 MHz	1.6 MHz
Type de modulation	QPSK	QPSK, 16QAM	QPSK	
Type de commutation	circuit et paquet	paquet	paquet	circuit et paquet
Débit maximum théorique	384 kbits/s à 2 Mbits/s	14,4 Mbits/s	12 Mbits/s	128 kbits/s à 2 Mbits/s
Débit constaté	384 kbits/s	2 Mbits/s	128 kbits/s à 2 Mbits/s	-

Tableau1.6. Caractéristiques des composantes de la norme UMTS.

e Architecture d'un réseau UMTS

Le réseau *UMTS* contient deux principales parties (figure 1.2) : la partie équipement utilisateur *UE (User Equipment)* et la partie infrastructure. La partie infrastructure contient deux parties: le réseau d'accès (*Access Network*) et le réseau cœur *CN (Core Network)*.

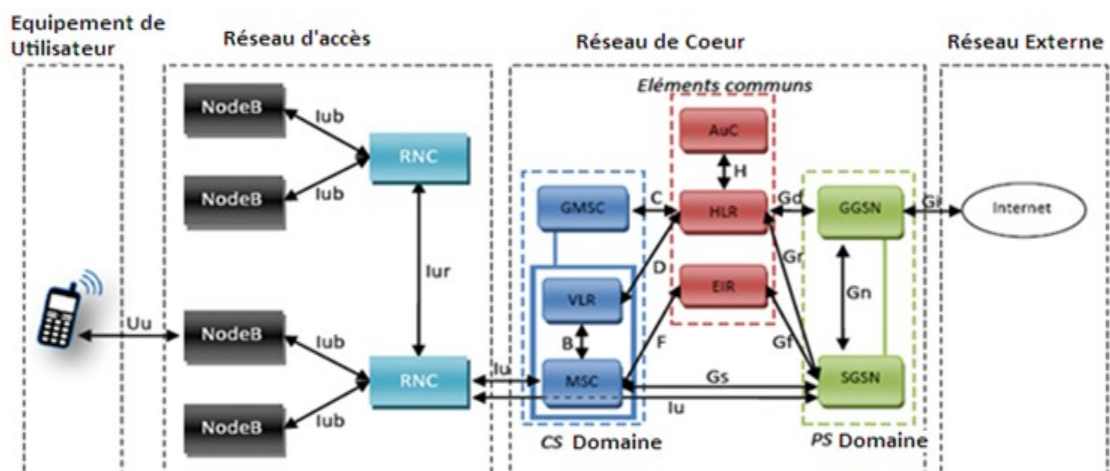


Figure1.2. Architecture d'un réseau *UMTS*.

On peut diviser le réseau en trois (03) parties principales comme l'illustration dans la figure 1.2 [7] :

- ✓ L'équipement utilisateur
- ✓ Le réseau d'accès
- ✓ Le réseau Cœur

Le tableau 1.7 présente les avantages et les inconvénients de la troisième génération

Avantages	inconvénients
- Accès Internet haut-débit depuis un équipement mobile ou un ordinateur - Visiophonie - Télévision (IP TV)	- Coût - Changement des équipements usagers

Tableau 1.7. Les avantages et les inconvénients de la troisième génération.

1.3.4 Les réseaux cellulaires de quatrième génération (4G)

La quatrième génération est déjà une réalité. Elle est développée en quelque sorte pour fournir la qualité de service, et les débits exigés par les applications existantes de la 3G.

La 4G peut fournir un débit de téléchargement de 100 Mb/s pour les communications de haute mobilité (à partir des trains et des voitures) et un débit de 1 Gb/s pour les communications de basse mobilité (piétons et utilisateurs fixes). Le système 4G doit fournir une solution à large bande tout IP sécurisée aux modems sans fil des *laptops*, aux *smartphones* et aux autres dispositifs mobiles. Des autres services seront offerts aux utilisateurs tels que : Accès à Internet à haut débit, téléphonie IP, les services de jeux, et autres services multimédias en temps réel.

LTE (3.9 G) et mobile *WiMAX* sont deux technologies proches à la 4 G devraient offrir des débits de l'ordre de 1Gb/s selon les recommandations de l'Union internationale des Télécommunications.

Les objectifs de la quatrième génération sont : un canal de largeur de bande flexible entre 5 et 20 *MHz* (optionnellement jusqu'à 40 *MHz*), une efficacité spectrale, un réseau de grande capacité, un débit nominal de 100 *Mb/s*, un transfert intercellulaire imperceptible à travers des réseaux hétérogènes, une connectivité sans faille et *roaming* global à travers des réseaux multiples, une qualité de service élevée (pour audio en temps réel), une transmission de données à haut débit, une interopérabilité avec les normes sans fil existantes, et un réseau à commutation de paquet *IP*.

Malgré les progrès énormes réalisés dans ce domaine, il existe des problèmes qui ralentissent sinon freinent le développement des réseaux 4*G*. Parmi ces contraintes, on peut énumérer : le coût de concession d'une licence 4*G* dans certains pays, le coût des téléphones 3 *G*, la demande des services à large bande sur les portables, le cycle de vie trop court pour les batteries des téléphones 4*G* (Les services 4*G* consomment beaucoup d'énergie à cause du multimédia).

1.4 Quelques notions de base

1.4.1 Streaming

Le *streaming* ou diffusion en mode continu désigne un principe utilisé principalement pour l'envoi de contenu en « direct » (ou en léger différé) [1].

1.4.2 Hand over

Le *hand over* ou le transfert intercellulaire est un mécanisme fondamental dans la communication cellulaire et c'est l'ensemble des opérations mises en œuvre permettant qu'une station mobile puisse changer de cellule sans interruption de service [1].

1.4.3 Roaming

Le *roaming* est Lorsque l'utilisateur se rattache au réseau, le *MME* s'interface au *HSS* afin de mettre à jour La localisation du mobile et obtenir le profil de l'utilisateur [8].

1.4.4 Paging

Le paging est une opération pour localiser le terminal et lui demander de réserver des ressources afin de pouvoir lui relayer son trafic.

1.4.5 Path Loss

Path Loss est un phénomène appelé l’Affaiblissement de parcours, son effet est de la diminution de l’amplitude de signal avec l’éloignement suivant certaines situations [9].

1.4.6 Shadowing

Shadowing où L’effet de masque est un phénomène plus local et aléatoire dû aux atténuations successives [9].

1.4.7 Fast Fading

L’évanouissement est les variations rapides de l’amplitude du signal (addition constructive ou destructive des ondes) [9].

1.5 Conclusion

Le marché de la téléphonie mobile qui compte plus de 4 *Milliards* d’abonnés dans le monde pour une population de 6.8 *Milliards* d’habitants, soit environ 60% d’utilisateurs, a attiré le monde aux technologies de l’information et de la communication. Ce marché va grandissante du fait de l’importance de la société de l’information dans le monde. La téléphonie mobile joue un rôle important dans cette société, elle offre beaucoup de services en temps réel, ce qui est demandé par les civilisations modernes.

Chapitre 2 Architecteur et protocole de la norme

3GPP-LTE

2.1 Introduction

Le *LTE* (*Long Terme Evolution*) est la dernière technologie sans fil apparue. L'organisme *3GPP* a défini cette technologie après le succès de son prédécesseur l'*UMTS/HSPA*. Le *LTE* est basé sur des techniques radios telles que l'*OFDMA* et le *MIMO* qui permettent le transfert des données à très haut débit avec une portée plus importante, et un nombre d'appels par cellule supérieur et une latence plus courte.

Le but de ce chapitre est de discuter l'architecture de *LTE* et plus particulièrement l'*E-UTRAN*. Il décrira avec détail les entités fonctionnelles du réseau ainsi que les interfaces et les protocoles de communication.

2.2 Architecture générale du réseau EPS

L'architecture globale du réseau *EPS* est donnée par la Figure 2.1. Elle inclut non seulement le réseau cœur et le réseau d'accès, mais aussi des autres blocs, et cela dans le but de montrer la relation entre eux.

Les nouveaux blocs spécifiés pour le *LTE*, connu aussi sous le nom d'*EPS* (*Evolved Packet System*), sont l'*EPC* (*Evolved Packet Core*) et l'*E-UTRAN* (*Evolved UTRAN*).

Les deux parties *PS* et *CS* du réseau cœur reliés respectivement à un réseau d'*IP* public ou privé et au réseau du téléphone. L'*IMS* (*IP Multimedia Subsystem*) est localisé dans la partie externe de réseau cœur qui fournit l'accès aux réseaux *IP* publique et privé [10] [11].

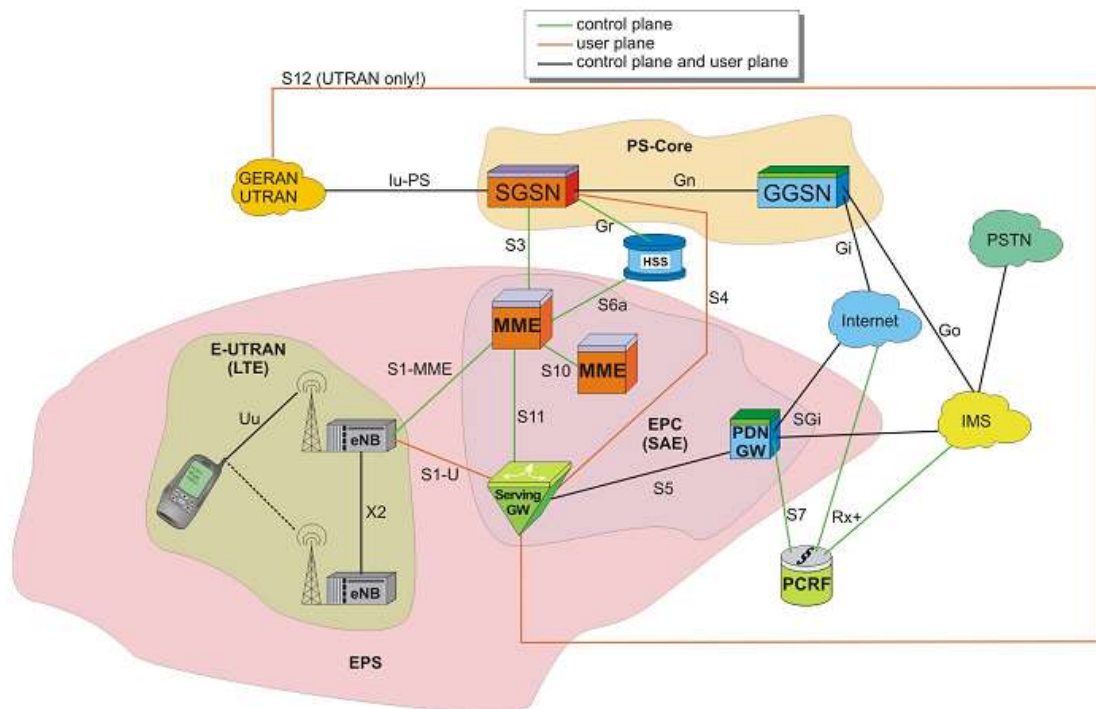


Figure 2.1. Architecture général du réseau EPS.

2.3 Réseau d'accès (Access Network)

2.3.1 Les caractéristiques de réseau d'accès

a Le débit de l'interface radio

L'interface radio *E-UTRAN* doit supporter un débit maximum instantané de 100 Mbit/s en considérant une allocation de bande de fréquence de 20 MHz pour le sens descendant et un débit maximum instantané de 50 Mbit/s en considérant aussi une allocation de bande de fréquence de 20 MHz pour le sens montant. Les technologies utilisées sont *OFDMA* pour le sens descendant et *SC-FDMA* pour le sens montant. Cela correspond à une efficacité spectrale de 5 bit/s/Hz pour le sens descendant et 2,5 bit/s/Hz pour le sens montant [12].

b La connexion permanente

La connectivité est permanente pour l'accès à Internet. Mais même si la connexion est permanente au niveau du réseau, il est nécessaire pour le terminal de passer de l'état *IDLE* à l'état *ACTIF* lorsqu'il s'agit d'envoyer ou de recevoir de trafic. Ce changement d'état s'opère en moins de 100 ms. Le réseau peut recevoir le trafic de tout terminal

rattaché, puisque ce dernier dispose d'une adresse *IP*, puis il met en mémoire ce trafic, il réalise l'opération de paging afin de localiser le terminal, et lui demande de réserver des ressources afin de pouvoir lui assurer son trafic [13].

c Le délai pour la transmission des données

Le délai de la transmission des données est moins que 5 *ms* entre l'*UE* et l'Access Gateway, en situation de non-charge où un seul terminal est *ACTIF* sur l'interface radio. La valeur moyenne du délai devrait avoisiner les 25 *ms* en situation de charge de l'interface radio comme il est représenté dans la figure 2.2. Ceci permet de supporter les services temps réel IP, comme la voix sur et le streaming sur *IP* [14] [11].

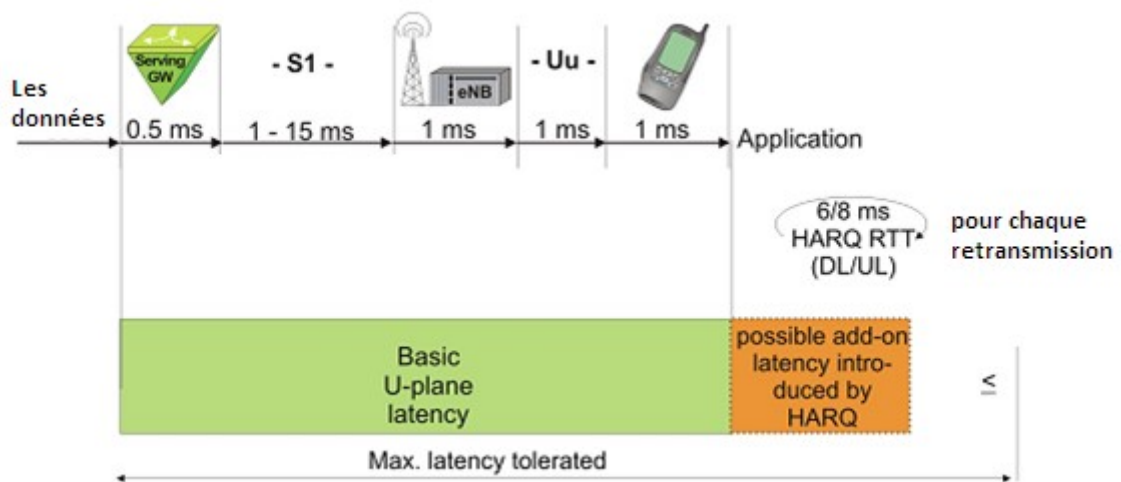


Figure 2.2. Latence du plan usager.

d La mobilité

La mobilité est assurée par des vitesses comprises entre 120 et 350 *km/h*. et le *hand over* pourra s'effectuer dans des conditions où l'utilisateur se déplace à grande vitesse [11] [15].

e La coexistence et Interfonctionnement avec la 3G

Le *hand over* entre *E-UTRAN (LTE)* et *UTRAN (3G)* doit être réalisé en moins de 300 *ms* pour les services temps-réel, et en moins de 500 *ms* pour les services non temps-réel. Le *hand over* pourra aussi s'effectuer entre la *LTE* et les réseaux *CDMA-2000*. Les opérateurs *CDMA* évolueront aussi vers la *LTE* [13].

f Flexibilité dans l'usage de la bande

Le *E-UTRAN* doit pouvoir opérer dans des allocations de bande de fréquence de différentes tailles : 1.25, 2.5, 5, 10, 15 et 20 *MHz* (figure 2.3) [11] [16]:

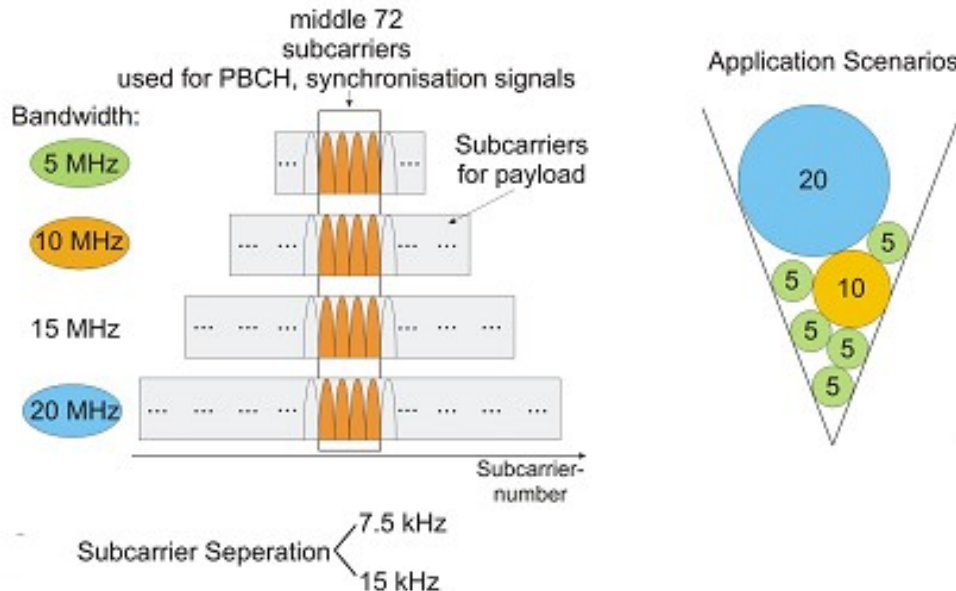


Figure 2.3. Flexibilité dans l'usage de la bande.

g Support du multicast

Le *LTE* supporte la technologie multicast à diffusion générale qu'elle est nécessaire pour les applications multimédias telle que la télévision.

h La couverture de la cellule

La technologie *LTE* pourra opérer sur des bandes des fréquences diverses et Particulièrement les bandes basses comme celle de 700 *MHz* (choisie par les opérateurs *AT&T* et *Verizon Wireless*), il sera aussi possible de prendre en considération des cellules à large diamètre [13].

i Les bandes des fréquences destinées à LTE

Les différentes bandes des fréquences allouées à la norme *3GPP-LTE* sont représentées sur la figure 2.4 [11]:

LTE Frequency Band					LTE Frequency Band		
E-UTRA Band	Uplink (UL) eNode B receive UE transmit		Downlink (DL) eNode B transmit UE receive		E-UTRA Band	UL / DL Frequencies (MHz)	
	F(UL_low)	F(UL_high)	F(DL_low)	F(DL_high)		lowest	highest
1	1920	1980	2110	2170	33	1900	1920
2	1850	1910	1930	1990	34	2010	2025
3	1710	1785	1805	1880	35	1850	1910
4	1710	1755	2110	2155	36	1930	1990
5	824	849	869	894	37	1910	1930
6	830	840	875	885	38	2570	2620
7	2500	2570	2620	2690	39	1880	1920
8	880	915	925	960	40	2300	2400
9	1749.9	1784.9	1844.9	1879.9	41 - 64	xxx	xxx
10	1710	1770	2110	2170			
11	1427.9	1452.9	1475.9	1500.9			
12	698	716	728	746			
13	777	787	746	756			
14	788	798	758	768			
15 - 16	xxx	xxx	xxx	xxx			
17	704	716	734	746			
18 - 32	xxx	xxx	xxx	xxx			

■	= UMTS core band
■	= American bands (north and south)
■	= Japan and Australia
■	= UMTS extension bands
■	= GSM900 and GSM1800 bands
■	= Future 3500 MHz band
■	= 700 MHz band in the USA
■	= Chinese TDD bands

Figure 2.4. Les bandes des fréquences destinées à la *LTE*.

2.3.2 Les entités du réseau d'accès (E-UTRAN)

a L'entité UE (équipement d'utilisateur)[11]

Le *UE* est le dispositif utilisé pour faire des communications. Typiquement, c'est un dispositif tenu dans la main comme un téléphone intelligent, une Tablet PC, ou un PC Portable (figure 2.5). Le *UE* contient également le module universel d'identité d'abonné (*USIM*), c'est un module séparé du reste de l'*UE*.



Figure 2.5. Les équipements des utilisateurs dans la norme *LTE*.

Le *USIM* est une application placée dans une carte démontable appelée l'*Universal Catre Circuit intégré (UICC)*.

Le *USIM* est employé pour identifier et authentifier l'utilisateur et pour dériver la sécurité pour protéger la transmission par l'interface radio, ceci inclut des fonctions de gestion de mobilité telles que Les hands over [11] [17] [18].

Le tableau 2.1 montre les différentes catégories d'équipements des utilisateurs

UE Catégorie		1	2	3	4	5
Taux maximal (Mbps)	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
RF largeur de bande		20 MHz				
Modulation	DL	QPSK. 16QAM. 64QAM				
	UL	QPSK. 16QAM				QPSK. 16QAM. 64QAM
2 Rx Diversité		Assumé dans des conditions d'exécution				
2x2 MIMO		Facultatif		Obligatoire		
4x4 MIMO		Non support				Obligatoire

Tableau 2.1. Les différentes catégories d'équipements des utilisateurs.

b L'entité eNodeB (evolved Node B)

La fonction principale de l'*eNodeB* supporte la communication avec l'*UE*. La figure 2.6 représente l'entité *eNodeB* réelle [17] [18]:



Figure 2.6. L'entité eNodeB

2.3.3 Les interfaces du réseau d'accès (E-UTRAN)

Les interfaces réseau S1 et X2 de l'*E-UTRAN* sont montrées par la figure suivante:

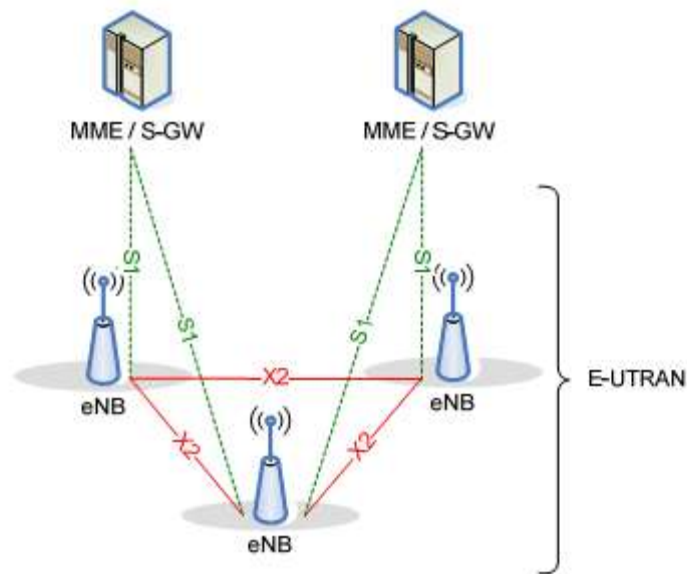


Figure 2.7.Architecture de l'E-UTRAN Sans UE

a Interface S1

Elle est située entre l'*eNodeB* et le réseau cœur, il contient deux autres interfaces :

➤ **L'interface S1-U**

L'interface *S1-U* transporte les paquets, venants des utilisateurs, entre l'*eNodeB* et le *Serving GW*. Cette interface utilise une simple pile du protocole de transport « *GTP over UDP/IP* ». Il n'existe ni contrôle de flux ni contrôle d'erreur, ou aucun autre mécanisme pour garantir la livraison des données sur l'*interface S1-U*.

Le *GTP* (*GPRS Tunneling Protocol*) est hérité des réseaux *2G/GPRS*, et *3G/UMTS*. Dans les réseaux *3G*, le *GTP* est utilisé entre les nœuds *GPRS* (*SGSN* et *GGSN*).

➤ **L'interface S1-C**

L'interface *S1-C* est utilisée pour la signalisation. Toutes les procédures de signalisation de *S1-C* sont résumées par les quatre groupes suivants [11] [17] [18]:

- Les procédures du *Bearer-level*, ce groupe comprend toutes les procédures relatives à l'établissement, la modification, et la libération des supports (porteuses). Ces procédures sont utilisées pendant l'établissement et la libération d'une session de communication.
- Les Procédures du *Hand over* qui englobent tous les fonctions *S1* relative à la

mobilité des utilisateurs entre les *eNodeB*, ou avec les technologies *2G/3G*.

- Transport de signalisation *NAS*, c'est le transport de signalisation entre le terminal et le *MME* à travers l'interface *S1*. Le lien de signalisation entre le terminal et le *MME* est aussi appelé *NAS(Non-Access-Stratum) signalling*.

- Procédure de *Paging* qui est utilisée dans le cas d'un usager à la fin d'une session. En utilisant cette procédure du paging, le *MME* demande à l'*eNodeB* de chercher le terminal dans un nombre donné de cellules.

L'interface *S1-C* doit fournir un haut niveau de fiabilité afin d'éviter les messages de retransmission, et les retards dans l'exécution des procédures du plan de contrôle par le *SCTP (Stream Control Transmission Protocol)*.

b Interface X2 [17] [18]

Elle est définie entre Les *eNodeBs*, et elle contient deux autres interfaces :

➤ **L'interface X2-U**

Le rôle de cette interface est de transporter les paquets de données entre les *eNodeBs*. Elle est utilisée dans une durée limitée en temps (quand le terminal se déplace d'un *eNodeB* à un autre). Par ailleurs, cette interface permet de transférer les paquets de données placées dans les mémoires tampons entre les *eNodeBs*. Cette interface utilise le même protocole de tunnel *GTP* qui est utilisé dans l'interface *S1-U*.

➤ **L'interface X2-C**

L'interface *X2-C* est une interface de signalisation. Les procédures de l'interface *X2-C* sont très limitées en nombre, et ils sont relatifs à la mobilité des usagers entre les *eNodeB*. Cette interface utilise la procédure du « *Load indicator* » qui permet à un *eNodeB* de signaler sa condition de charge aux les *eNodeBs* voisins. Cette procédure aide à supporter la gestion du balancement de la charge ou d'optimiser les seuils du hand over ainsi que les décisions du hand over. L'interface *X2-C* utilise aussi une couche de transport de type « *SCTP over IP* ».

Le réseau de transport des interfaces *S1* et *X2* utilise la couche réseau *IP* à la fois pour le plan usager, et pour le plan de contrôle. En plus des services garantis par ce protocole, L'*IP* dans *E-UTRAN* supporte aussi les services suivants [11] [17] [18]:

- ✓ *NDS/IP* (Network Domain Security for *IP*) est une référence à un groupe de dispositifs de sécurité de niveau *IP* défini par *3GPP* pour l'échange de données entre les éléments du réseau.
- ✓ *Diffserv* (*Differentiated Services*) est une architecture réseau qui spécifie un mécanisme pour classer et contrôler le trafic [11] [17] [18].

2.4 Réseau cœur (Core Network)

2.4.1 Les caractéristiques

Le réseau cœur de *LTE* est représenté sur la figure 2.8. Le *SAE* (System Architecture Evolution) est un système qui supporte des technologies d'accès multiples avec un taux de transfert des données très haut. Ce système est basé sur la commutation de paquets.

Contrairement aux réseaux 2G/3G qui sont basés sur les domaines de commutation de circuit *CS* (*Circuit Switched*), et de commutation de paquet *PS* (*Packet Switched*) dans le réseau cœur, ce nouveau réseau ne possède qu'un domaine de paquet appelé *EPC*. Ainsi, tous les services devront être offerts sur *IP* y compris ceux qui étaient auparavant offerts par le domaine circuit tels que la voix, la visiophonie, le *SMS* [19]. *L'EPC* a une fonctionne, en situation de *roaming*, en mode « *home routed* » ou en mode « *local breakout* ». Autrement dit, lorsqu'un client est dans un réseau visité, son trafic de données est soit routé à son réseau nominal qui le relaye par la suite à la destination (*home routed*), ou routé directement au réseau de destinataire sans le acheminer à son réseau nominal (*local breakout*) [16].

Il est possible d'acheminer le trafic de *L'EPC* vers l'accès *LTE*, *CDMA-2000* (*paquet*), *2G* (*paquet*), et *3G* (*paquet*) et ainsi garantir le *hand over* entre ces technologies d'accès. *L'EPC* supporte les *Default bearers*, et les *Dedicated bearers*, c'est-à-dire lorsque l'utilisateur se rattache au réseau *EPC*, ce dernier lui crée un *default bearer* qui représente une connectivité permanente tant que l'utilisateur est rattaché au réseau mais sans débit garanti. Quand l'utilisateur souhaite d'établir un appel qui requiert une certaine qualité de service, telle que l'appel voix ou visiophonie, le réseau pourra établir pour la durée de l'appel un *dedicated bearer* qui supporte la qualité de service exigée par le flux de service et surtout qui dispose d'un débit garanti afin d'émuler le mode circuit [19]. A la fin, *L'EPC* supporte le filtrage de paquet, par exemple pour la détection des virus.

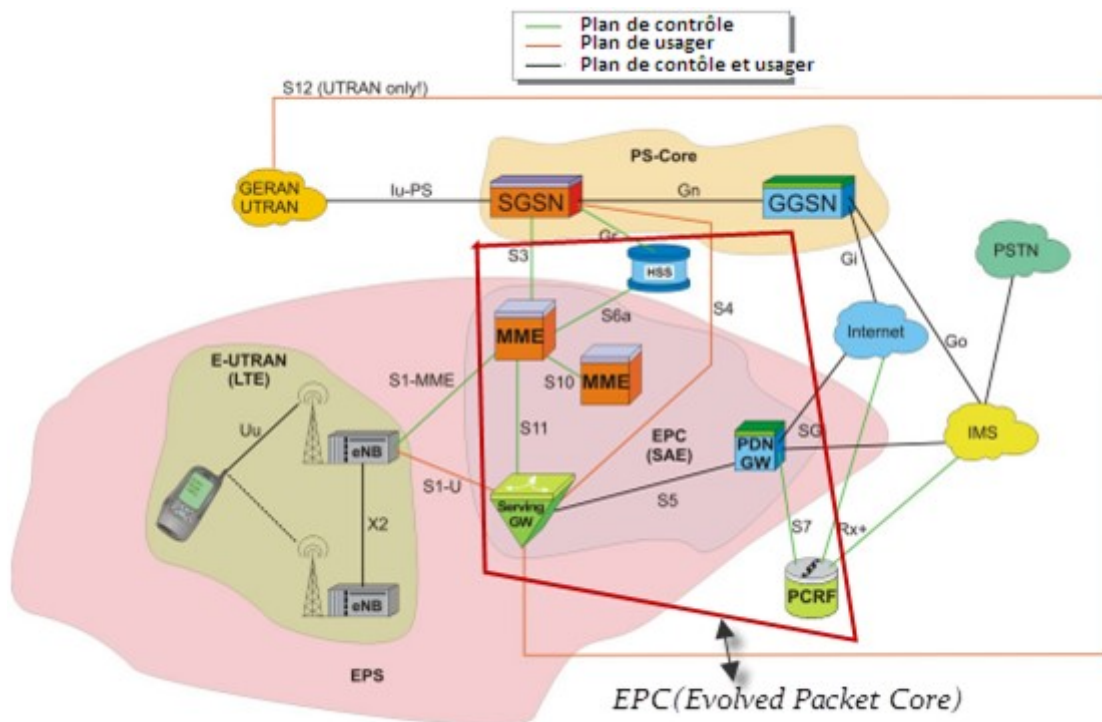


Figure 2.8. Le réseau cœur EPC.

2.4.2 Les entités du réseau cœur

Le réseau cœur évolué *EPC* consiste, comme la représente la figure 2.8, de cinq entités principales qui sont [21] [20] [13]:

a L'entité *MME* (Mobility Management Entity)

Le *MME* est L'entité principal de contrôle dans le réseau d'accès *LTE*, il exécute quelques taches qui sont:

- ✓ Le suivi des *UE* Mode Inactif (idle).
- ✓ L'activation / désactivation du *Bearer*.
- ✓ Le choix du *SGW* pour un *UE*.
- ✓ Le *handover* Intra-LTE impliquant la location du nœud du réseau d'accès.
- ✓ L'interaction avec le *HSS* pour authentifier un utilisateur en attachement et implémentation des restrictions d'itinérance.
- ✓ Elle agit comme un licenciement pour la *NAS* (Non-Access Stratum).
- ✓ Elle Fournit des identités temporaires pour les *UEs*.
- ✓ La *SAE/MME* agit en point de terminaison pour le chiffrement de

protection des *NAS* de signalisation. Dans ce cadre, il s'occupe également de la gestion de la clé de sécurité.

- ✓ La procédure de *Paging*.
- ✓ L'interface *S3* se termine dans la *MME* fournissant ainsi la fonction du plan de contrôle de mobilité entre les réseaux d'accès *LTE* et *2G/3G*.
- ✓ Le *MME/SAE* termine également l'interface *S6* pour le *HSS* pour l'itinérance *UEs*.
- ✓ La *MME/SAE* fournit un niveau considérable de fonctionnalité de contrôle global.

b L'entité SGW (Serving Gateway)

La passerelle de service *SGW* est un élément du plan de données au sein de la *LTE/SAE*. Son objectif principal est de gérer la mobilité du plan utilisateur, elle agit également comme une frontière principale entre le *RAN (Radio Access Network)* et le réseau cœur. Le *SGW* maintient également les chemins de données entre les *eNodeBs* et les passerelles *PDN*. De cette façon, le *SGW* forme une interface pour le réseau de données des paquets à l'*E-UTRAN*. Aussi quand les *UEs* se déplacent dans les régions des services par des *eNodeBs* différentes, la *SGW* sert de point d'ancrage de mobilité veillant à ce que le chemin de données est maintenu.

c L'entité PGW (PDN Gateway)

La passerelle *LTE/SAE PDN* assure la connectivité pour l'*UE* à des réseaux de paquets de données externes, remplissant la fonction d'entrée et de sortie pour les données *UE*. L'*UE* peut disposer d'une connectivité avec plus d'un *PGW* pour l'accès à des *PDNs* multiples.

d L'entité HSS (Home Subscriber Server)

Avec la technologie *LTE*, le *HLR* est réutilisé et renommé *HSS*. Le *HSS* est donc un *HLR* évolué qui contient l'information de souscription pour les réseaux *GSM*, *GPRS*, *3G*, *LTE* et *IMS*. A la différence de la *2G* et de la *3G*, où l'interface vers le *HLR* est supportée par le protocole du monde *SS7*, *MAP*, l'interface *S6* s'appuie sur le protocole du monde *IP*, *DIAMETER*. Le *HSS* est une base de données qui est utilisée simultanément par les réseaux *2G*, *3G*, *LTE/SAE* et *IMS* appartenant au même opérateur. Il supporte donc les

protocoles *MAP* (2G, 3G) et *DIAMETER* (LTE/SAE, IMS).

e L'entité PCRF (Policy and Charging Rules Function)

La *PCRF* est le nom générique de l'entité au sein de la *LTE SAE/EPC*, il détecte les flux de service, et il applique la politique de tarification. Pour les applications qui nécessitent une politique dynamique de tarification ou de contrôle, un élément du réseau intitulé *Applications Function (AF)* est utilisé.

2.5 Les plans usager et contrôle

Cette partie décrira de façon globale la structure des protocoles de bout en bout du *LTE* pour le plan usager et le plan de contrôle, qui correspond respectivement à la transmission des données utilisateurs et la transmission de signalisation.

2.5.1 L'architecture du plan usager

Le réseau d'accès et le plan de usager ne comprennent pas seulement les données des utilisateurs tels que les paquets de voix ou de contenu Web, mais aussi la signalisation associées aux services d'application tels que le *SIP* ou *RTCP*. La Signalisation des couches hautes est transmise via le plan usager.

Le plan usager de bout en bout est représenté dans la figure 2.9 (Du terminal jusqu'au serveur d'application). Dans cette figure, la couche application, présente uniquement dans le terminal et le serveur d'application, est basé sur un transport *IP*. Les paquets de niveau d'application sont routés à travers le *Packet Core Gateways*.

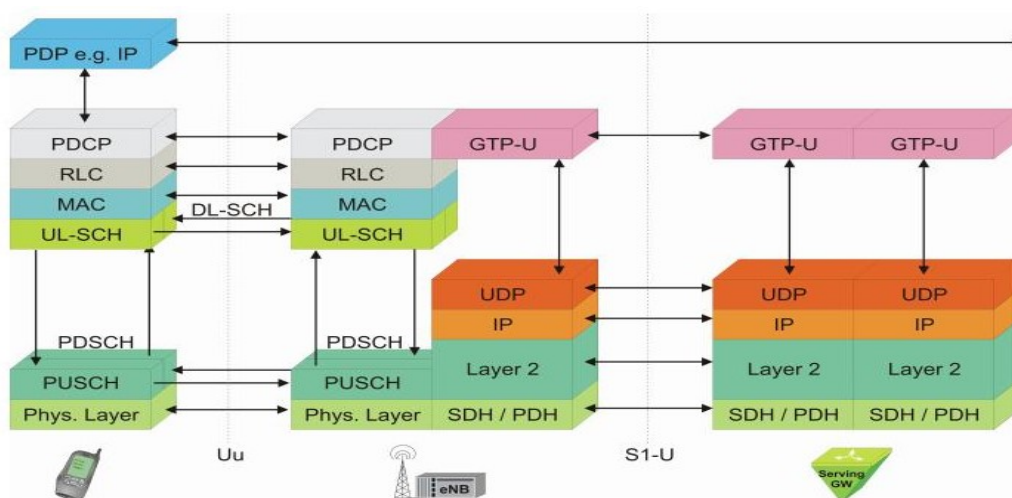


Figure 2.9. La pile protocolaire du plan usager.

La couche application peut comporter un grand nombre de protocole comme les protocoles de transports de bout en bout (*TCP* ou *UDP*), et *RTP* (*Real Time Protocol*) pour le transport de données et les protocoles de signalisation de niveau application (*SIP*, *SDP*, *RTCP*, etc.).

Par ailleurs, L1 et L2 sont référencée respectivement au lien physique et de données des interfaces *S1*, *S5*, et *SGi*. Pour ces couches, le standard *LTE* est assez flexible et propose plusieurs options appropriés aux réseaux *IP* [11] [17].

2.5.2 *L'architecture du plan de contrôle*

Le plan de contrôle correspond aux flux d'information considérés par *E-UTRAN* et *EPC* comme flux de signalisation. Ce plan inclut tous les messages de signalisation du *RRC* (*Radio Resource Control*) qui supporte les fonctions tels que *Radio Bearer Management*, la mobilité radio, paging des utilisateurs. Par ailleurs, ce plan comprend aussi la signalisation du *NAS* (*Non Access Stratum*) qui fait référence aux fonctions et services indépendants de la technologie d'accès. On verra plus tard, qu'il comprend aussi les couches *GMM* (*GPRS Mobility Management*), et *SM* (*Session Management*) qui sont réservées aux procédures de signalisation entre le terminal de l'utilisateur et le *MME*, à la session et la gestion des porteuses, le contrôle de sécurité, et l'authentification [11] [18].

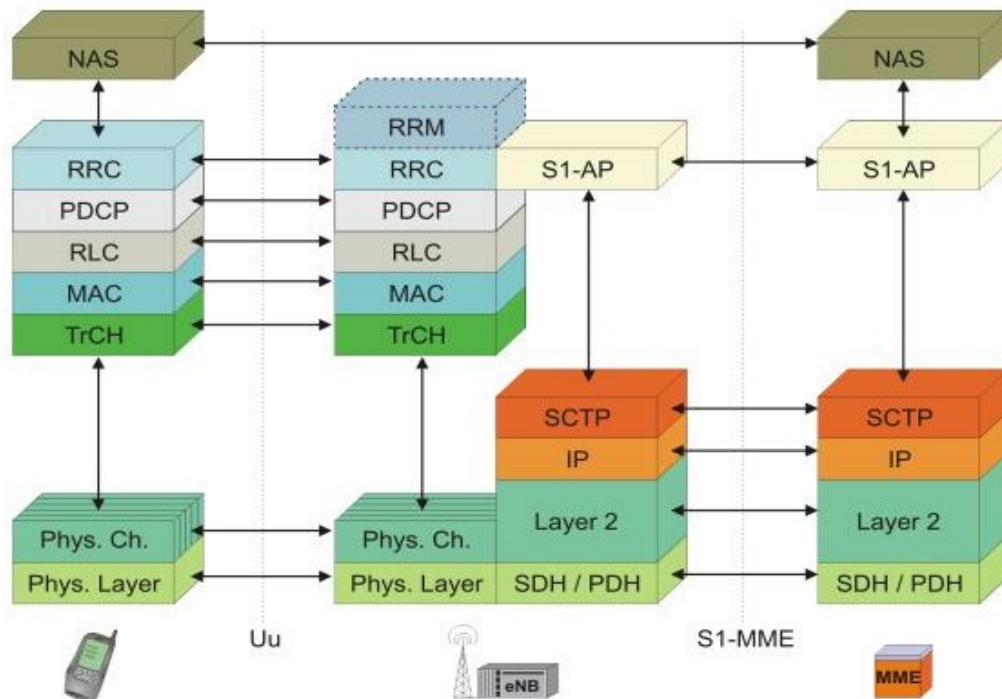


Figure 2.10. La pile protocolaire du plan de contrôle.

La Figure 2.10 représente la pile protocolaire du plan de contrôle. Il s'arrête au niveau de *MME*, parce que les protocoles des couches-hautes se terminent aussi au niveau de *MME*. Sur l'interface radio, le plan de contrôle utilise les mêmes piles *PDCCP*, *RLC*, *MAC*, et *PHY*, qui seront présenté dans la prochaine section, pour transporter à la fois le RRC et la signalisation *NAS* du réseau cœur. Les couches *RLC*, *MAC*, et *PHY* supportent les mêmes fonctions à la fois pour le plan usager, et le plan de contrôle.

Cependant, ceci ne veut pas dire que les informations du plan usager, et le plan de contrôle sont transmis de la même façon. Plusieurs porteuses radio (*Radio bearers*) peuvent être établies entre le terminal et le réseau, chacune d'elle correspond a un schéma de transmission spécifique, une protection radio, et un traitement prioritaire. C'est le rôle des canaux radio [11] [18].

2.6 Les protocoles de l'interface Radio

L'interface radio est caractérisée par rapport à la transmission filaire par le coût et la rareté du spectre, et le taux d'erreur très élevé dans la transmission. A cause de ces caractéristiques, la pile protocolaire de l'interface radio est très spécifique. Il est composé de couches représentées sur la figure suivantes [11]:

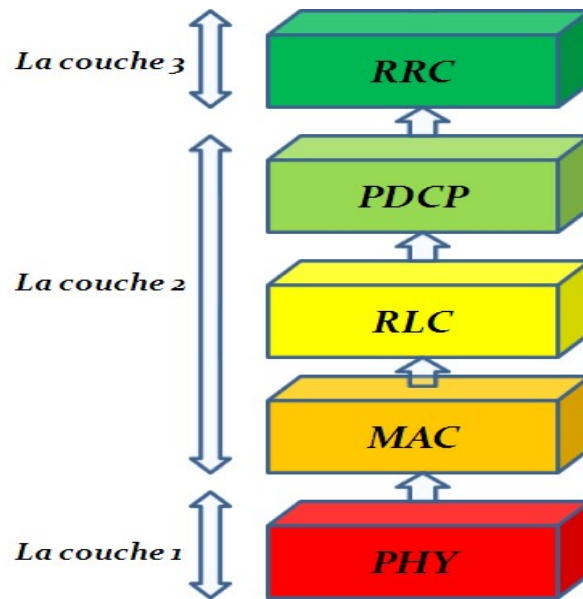


Figure 2.11. La pile protocolaire de l'interface radio pour UE.

La pile protocolaire de l'interface radio pour le *UE* contient quatre couches, la première couche est appelée la couche physique (*PHY*), la deuxième couche contient trois sous couches qui sont la sous couche *MAC*, la sous couche *RLC*, et la sous couche *PDCP*, la troisième couche qui est appelé la couche *RRC*, et la couche *NAS* comme une couche supérieur.

2.6.1 La couche 1 (La couche PHY)

Le rôle de la couche *PHY* (*Physical*) est de fournir des services de transport de données sur les canaux physique pour les couches *RLC* et *MAC*. La figure 2.12 représente le modèle de la couche physique de l'*eNodeB* dans le cas d'un canal de transport *SCH*. Un modèle similaire existe pour l'*uplink*, et les autres canaux de transport.

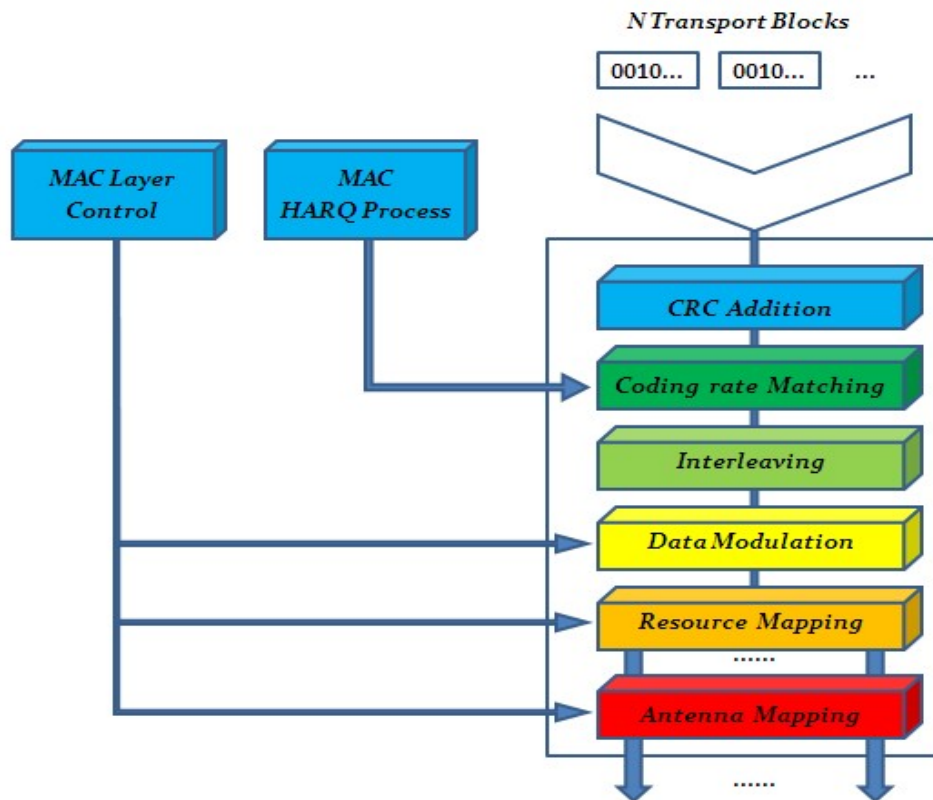


Figure 2.12. Le modèle de la couche PHY du Downlink Shared Channel.

Lors de chaque *TTI* (*Transmission Time Interval*), la couche physique reçoit un certain nombre de *Transport Blocks* pour les transmettre. Chaque 'Transport Block' inclura une *CRC* (*Cycle de contrôle de redondance*) qui est un ensemble de bits pour la détection des erreurs de transmission. Ensuite, les blocs sont protégés avec un codage canal robuste. Cette phase est sous le contrôle du processus *MAC HARQ* (*Hybrid ARQ*) qui adapte le taux de codage canal en se basant sur les informations fournies par l'entité réceptrice.

Le processus '*Interleaving*' ou entrelacement permet d'améliorer la robustesse face aux erreurs de transmission radio. Ce processus permet au décodeur canal de récupérer exactement, les mêmes bits transmis initialement. Le processus de modulation des données est sous le contrôle de l'ordonnanceur *MAC*.

Pour les opérations du *CRC*, et de l'entrelacement, la couche *PHY* utilise des paramètres statiques et des algorithmes spécifiés par le standard *E-UTRAN* [11] [17].

2.6.2 La couche 2

a La sous couche MAC

Le rôle principale de la sous couche *MAC* (*Medium Access Control*) est de fournir un couplage efficace entre les services de la sous couche *RLC* et la couche physique. De cette perspective, la sous couche *MAC* supporte quatre fonctions principales [11] [17]:

- ✓ Le mappage entre les canaux logiques et de transport. En effet, quand le standard offre différents options pour le transport de données pour un canal logique donné, la sous couche *MAC* s'occupe de choisir le canal de transport selon la configuration choisi par l'opérateur.
- ✓ La sélection du format de transport qui fait référence par exemple, au choix la taille du 'Transport Block', et le schéma de modulation.
- ✓ Gestion de propriété entre les canaux logique d'une terminale, ou entre plusieurs terminaux.
- ✓ Correction d'erreur à travers le mécanisme *HARQ*.

b La sous couche RLC

Le rôle principal de la sous couche *RLC* (*Radio Link Control*) est de recevoir/délivrer les paquets de données des/aux autres entités *RLC* pairs. Pour ce, la sous couche *RLC* propose trois modes de transmission *TM* (*Transport Mode*), *UM* (*Unacknowledged Mode*), et *AM* (*Acknowledged Mode*).

Le mode *TM* est le plus simple, il ne change pas les données des couches hautes. Ce mode est spécialement utilisé pour la transmission de *BCCH*, ou *PCCH*. Le mode *UM* rajoute la détection des pertes des paquets, et leurs réorganisations et le ré-assemblage. Finalement, le mode *AM*, le plus compliqué des trois, supporte les fonctionnalités du mode *UM*. Le mode *AM* s'applique uniquement aux canaux logiques *DCCH* et *DTCH* [11] [17].

c La sous couche PDCP

Le rôle principale de la sous couche *PDCP* (*Packet Data Convergence Protocol*) est de recevoir/délivrer les paquets de données de/vers les entités paires de *PDCP*. En principe, cette fonction est assurée par la sous couche *RLC*. De cette perspective, la sous couche *PDCP* fournit des fonctionnalités additionnelles.

La valeur ajoutée de la sous couche *PDPC* repose sur quatre fonctions principales [11] [17]:

- ✓ Fonctionnalités relatives à la sous couche 2, comme réorganisation des paquets *RLC* dans le cas d'une mobilité inter-*eNodeB*, la détection des doublets de paquets *RLC*.
- ✓ Compression et décompression des entêtes des paquets *IP*. Le *PDPC* supporte un unique schéma de compression *ROHC* (*Robust Header Compression*).
- ✓ Chiffrement des données et de la signalisation.
- ✓ Protection de l'intégrité des signaux. En donnant à la partie qui reçoit, le moyen de déterminer si le message de signalisation est altéré durant la transmission ou non.

2.6.3 La couche 3 (La couche RRC)

La couche *RRC* (*Radio Resource Control*) est la couche clé dans le processus de signalisation. Elle supporte plusieurs fonctions entre le terminal et l'*eNodeB*. Les procédures proposées par la couche *RRC* peuvent être classifiées comme suit [11] [17] :

- ✓ La gestion de connexion *RRC* qui inclut l'établissement et la libération de la connexion *RRC* entre le terminal et l'*eNodeB*.
- ✓ L'établissement et la libération des ressources radio qui est relié à l'allocation des ressources pour le transport des messages de signalisation, ou les données des utilisateurs entre le terminal et l'*eNodeB*.
- ✓ *Broadcast* des informations système réalisé à travers le canal logique *BCCH*.
- ✓ *Paging* qui est réalisé à travers le canal de control logique *PCCH*.
- ✓ Transmission des messages de signalisation vers et à partir du *EPC* ces messages sont traités par le *RRC* de façon transparent.
- ✓ Mesures de contrôle qui fait référence aux configurations des mesures réalisées par le terminal ainsi que les méthodes de les rapporter à l'*eNodeB*.
- ✓ Support des procédures de mobilités *inter-cell* ou le *hand over*.
- ✓ Le contexte utilisateurs transféré entre *eNodeB* lors d'un *hand over*.

2.6.4 La couche NAS

Le modèle *AS/NAS* utilisé dans le *LTE* est représenté dans la figure 2.13. Ce modèle, présente deux zone, la zone *AS* (*Access Stratum*), et la zone *NAS* (*Non-Access Stratum*).

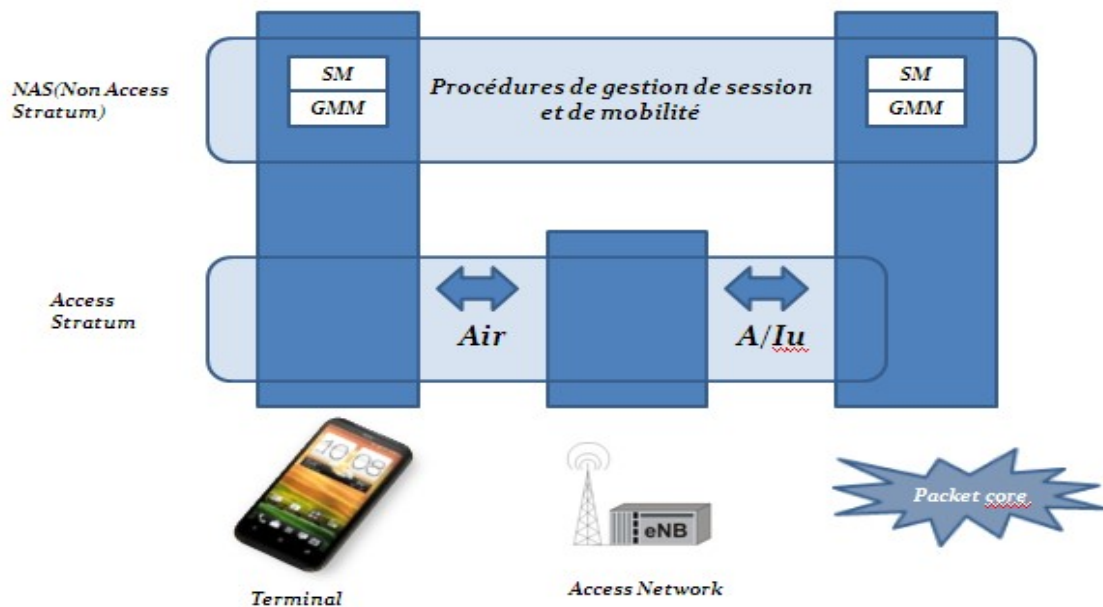


Figure 2.13. Le modèle Access et No-Access Stratum.

Le *NAS (No-Access Stratum)* correspond aux fonctions et aux procédures qui sont complètement indépendant de la technologie d'accès. Qui inclut des fonctionnalités comme [11] [17]:

- ✓ Gestion de session, qui inclut l'établissement, modification et la libération de session, ainsi que les négociations de *Quality of Service*.
- ✓ Gestion des abonnés, qui correspond à la gestion des données utilisateur.
- ✓ Gestion de la sécurité, qui inclut une authentification utilisateur-réseau mutuelle, ainsi que l'initiation du chiffrement.
- ✓ Facturation.

En *2G/GSM*, les fonctionnalités *NAS* sont supportées par deux groupes de protocoles, les couches *GMM (GPRS Mobility Management)*, et *SM (Session Management)* qui ont été définis par les spécifications *3GPP*. Quelques ajoutes ont été introduites, comme la gestion du *QoS*, mais le reste est une duplication des couches *NAS* hérités du *GSM*.

La couche *GMM* est en charge des mobilités des terminaux usager. Dans ce contexte, le

terme 'mobilité' ne fait pas référence à la mobilité radio, comme le *hand-over* entre cellules, qui est déjà supporté par l'*E-UTRAN*. La couche *GMM* fait référence à la gestion de localisation du terminal. Par ailleurs, la couche *GM* supporte quelques fonctions de sécurité comme l'authentification mutuelle, l'activation du chiffrement, la protection d'intégrité, et la gestion des états du terminal.

La couche *SM* est construite au-dessus de la couche *GMM*, et il utilise les services *GMM* pour la gestion des sessions. La fonction principale de la couche *SM* est de supporter la gestion du contexte du terminal usager *PDP* (*Packet Data Protocol*), et la gestion de porteur entre le terminal et le *SGSN*. Ceci, inclut les procédures d'activation, de modification, et la désactivation de la session et du porteur associé.

2.7 Les canaux radio

L'interface radio *E-UTRAN* doit être capable de transmettre les informations à haut débit et à faible temps de latence. Cependant, pas tous les flux d'information ne nécessitent la même protection face aux erreurs de transmission ou la manipulation de la Qualité de Service (QoS). Les messages de signalisations *E-UTRAN* doivent être transmis le plus rapidement possible en utilisant le meilleur schéma de protection contre les erreurs, car ils sont critiques dans le cas d'une mobilité radio [11] [17].

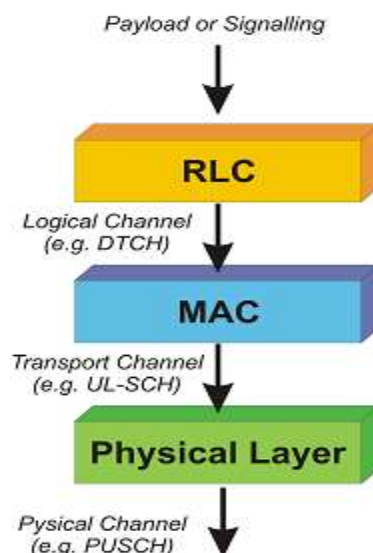


Figure 2.14. Les canaux existants dans l'architecture d'E-UTRA.

Dans le but d'être flexible et de permettre aux différents schémas de transmettre les

données, les spécifications de l'*E-UTRAN* ont introduit plusieurs types de canaux comme il est représenté dans la figure 2.14 [11]:

- ✓ Les canaux logiques
- ✓ Les canaux de transport
- ✓ Les canaux physiques.

2.7.1 Les canaux logiques

Les canaux logiques correspondent aux services de transfert des données offerts par les protocoles des couches hautes de l'interface radio. Il y a uniquement deux types de canaux logiques (figure 2.15) : les canaux de contrôle, pour le transfert des informations du plan de contrôle, et les canaux de trafic pour les transferts des données des utilisateurs du plan usager. Chacun de ces canaux correspond à un certain type de flux d'information [11].

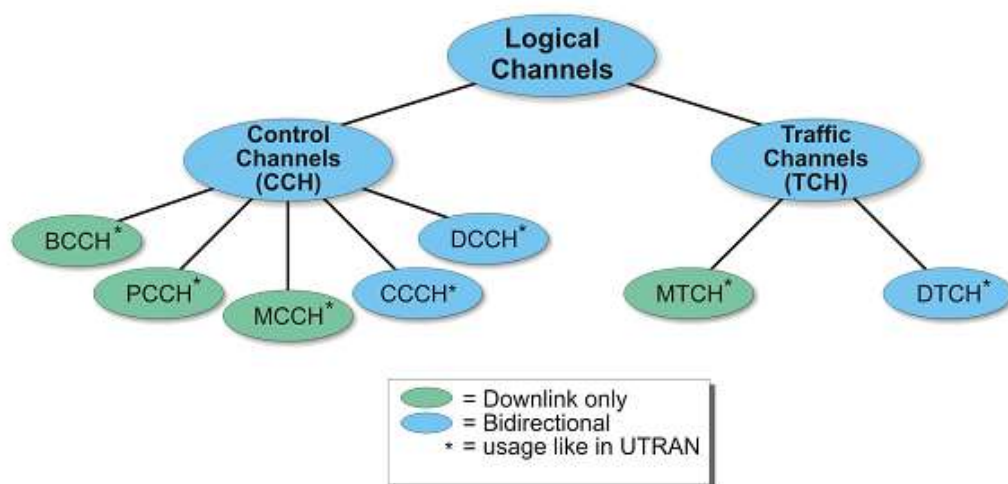


figure 2.15. Les différentes canaux logiques.

a Les canaux logiques de contrôles

Les canaux logiques de contrôles dans l'*E-UTRAN* sont [11] [17] :

- ✓ *BCCH* (*Broadcast Control Channel*), c'est un canal commun en *downlink*, il est utilisé par le réseau pour broadcaster les informations système de l'*E-UTRAN* à l'ensemble des terminaux présents dans une cellule radio. Ces informations sont utilisées par le terminal, par exemple pour connaître l'opérateur, pour avoir les

informations sur la configuration des canaux commun de la cellule, et comment accéder au réseau, etc.

- ✓ *PCCH (Paging Control Channel)*, c'est un canal commun en *downlink*, il transfert les informations de paging aux terminaux présentent dans une cellule.
- ✓ *CCCH (Common Control Channel)*.
- ✓ *MCCH (Multicast Control Channel)* Transmet des paramètres de *MBMS*.
- ✓ *DCCH (Dedicated control Channel)*, c'est un canal point-à-point bidirectionnel, il supporte les informations de contrôle entre un terminal donné et le réseau. Ce canal supporte uniquement les signalisations *RRC* et *NAS*.

b Les canaux logiques de trafic

Les canaux logiques de trafic sont [11] [17] :

- ✓ *DTCH (Dedicated Traffic Channel)*, c'est un canal point-à-point bidirectionnel utilisé entre un terminal donné et le réseau. Il peut supporter la transmission des données des utilisateurs qui inclut les données, et la signalisation de niveau d'application associée à ce flux des données.
- ✓ *MTCH (Multicast Trafic Channel)* Ce point du canal multipoint est employé pour le service de *MBMS*.

2.7.2 Les canaux de transport

Les canaux de transport décrivent pourquoi et quelles données caractéristique sont transférés à travers l'interface radio. Par exemple, les canaux de transport décrivent comment les données sont protégées contre les erreurs de transmission, le type de codage canal, la protection *CRC* qui est utilisée, la taille des paquets de données envoyés sur l'interface radio, etc. Cet ensemble d'information est connu sous le nom de 'Transport Format'. Les canaux de transports sont classés en deux catégories (figure 2.16) : les canaux de transport *downlink*, et les canaux de transport *uplink* [11].

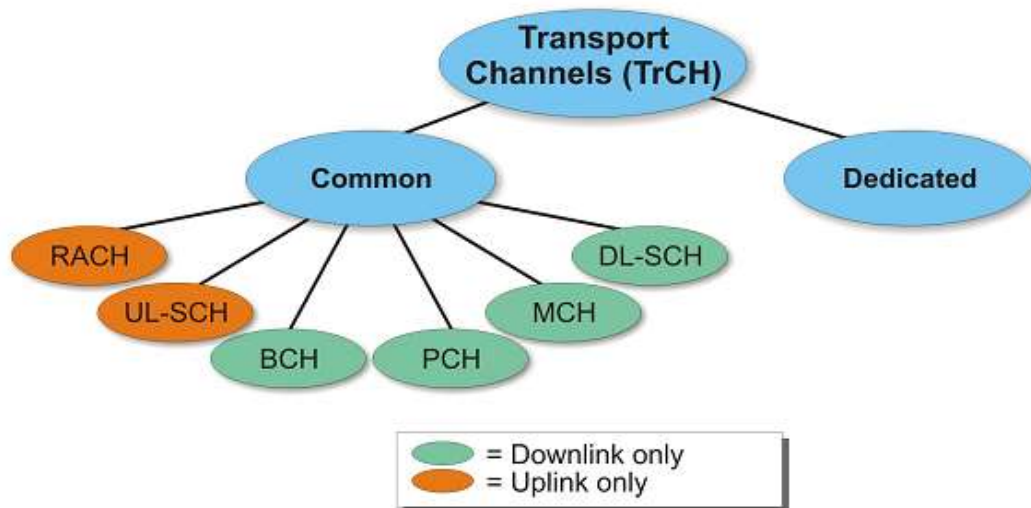


Figure 2.16. Les différents canaux de transport.

a Les canaux de transport en downlink

Les canaux de transport *E-UTRAN* en *downlink* sont [11] [17]:

- ✓ *BCH* (*Broadcast Channel*), il est associé au canal logique *BCCH*. un 'Transport Format' fixé et prédéfini doit couvrir l'ensemble de la cellule.
- ✓ *PCH* (*Paging Channel*), il est associé au *BCCH*.
- ✓ *DL-SCH* (*Downlink Shared Channel*), il est utilisé pour transporter le contrôle d'utilisateur, ou le trafic data.
- ✓ *MCH* (*Multicast Channel*), il est associé au *MBMS* pour le contrôle des informations de transport.

b Les canaux de transport en uplink

Les canaux de transport *E-UTRAN* en *uplink* sont :

- ✓ *UL-SCH* (*Uplink Shared Channel*), c'est l'équivalent du *DL-SCH* en *uplink*.
- ✓ *RACH* (*Random Access Channel*), c'est un canal de transport spécifique qui supporte un contrôle d'information limité. Il est utilisé durant les premières phases de l'établissement de communication, ou dans le cas du changement d'état de *RRC*.

2.7.3 Les canaux physiques

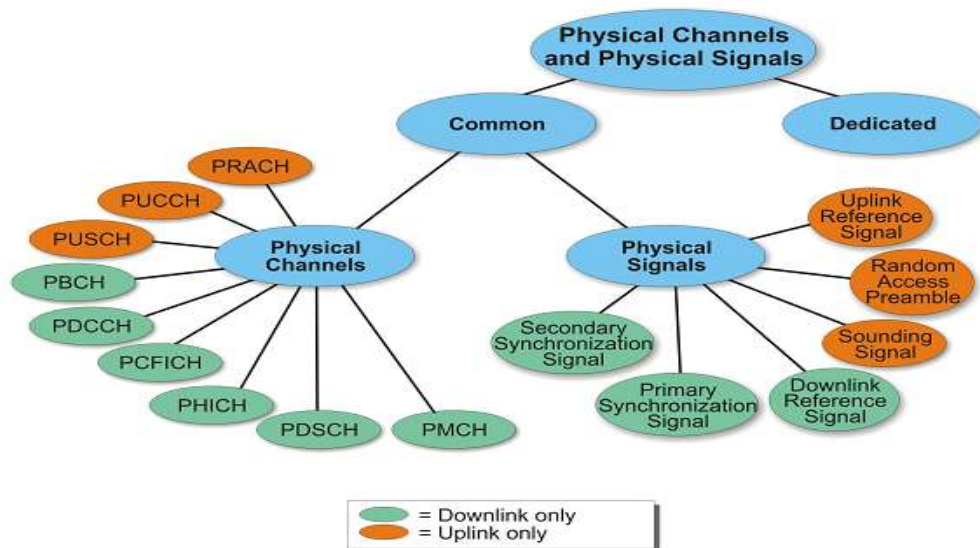


Figure 2.17. Les différents canaux physiques.

Les canaux physiques sont l'implémentation des canaux transport sur l'interface radio. Leur structure dépend étroitement des caractéristiques de l'interface physique *OFDM*. Les canaux physiques sont classés en deux catégories (figure 2.17): les canaux physiques *downlink*, et les canaux physiques *uplink* [11].

a Les canaux physiques en downlink

Les canaux physiques en *downlink* sont [11] [17]:

- ✓ *PDSCH* (*Physical Downlink Shared Channel*), il transporte les données usager, et la signalisation des couches hautes.
- ✓ *PDCCH* (*Physical Downlink Control Channel*), il transporte les assignations d'ordonnancement pour le lien montant.
- ✓ *PMCH* (*Physical Multicast Channel*), il transporte l'information *Multicast/Broadcast*.
- ✓ *PBCH* (*Physical Broadcast Channel*), il transporte les informations de système.
- ✓ *PCFICH* (*Physical Control Format Indicator Channel*), il informe l'*UE* sur le nombre des symboles *OFDM* utilisés pour le *PDCCH*.
- ✓ *PHICH* (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*), il transporte les *ACK* et *NACK* des réponses de l'*eNodeB* aux transmissions en *uplink* relative au mécanisme *HARQ*.

b Les canaux physiques en uplink

Les canaux physiques en *uplink* sont [11] [17] :

- ✓ *PUSCH* (*Physical Uplink Shared Channel*), il transporte les données utilisateur et la signalisation des couches hautes.
- ✓ *PUCCH* (*Physical Uplink Control Channel*), il transporte les informations de contrôle, comprends les répons *ACK* et *NACK* du terminal aux transmissions *downlink*, relative au mécanisme *HARQ*.
- ✓ *PRACH* (*Physical Random Access Channel*), il transporte le préambule de l'accès aléatoire envoyé par les terminaux au réseau d'accès.

En plus des canaux physiques, la couche physique utilise des signaux physiques et qui sont :

- ✓ ***Le signal de référence de Downlink***

Le signal de référence de *downlink* est situé sur les *subcarriers* choisis sur des symboles choisis d'*OFDM* d'une slot de *downlink*.

- ✓ ***Le signal de synchronisation primaire et secondaire***

Le signal de synchronisation identifie 168 groupes qui se divisent en 3 parties chacune identifie une cellule.

- ✓ ***Uplink reference signal or UL pilot symbol***

Le signal de référence d'*uplink* est situé sur le 4ème bloc du symbole *SC-FDMA* d'une fente d'UL de *PUSCH*. Le *PUCCH* peut avoir 2 ou 3 signais de référence d'*uplink*. Le signal de référence est cycliquement prolongé de l'ordre de *Zadoff-Chu*. Il est employé comme référence pour l'égalisation des signes d'UL dans le domaine de fréquence.

- ✓ ***Le signal retentissant d'Uplink***

Le signal retentissant d'*uplink* est transmis sur le dernier symbole du *PUSCH*. Il est demandé par l'*eNodeB* afin d'accéder à la qualité mobile du canal par radio, et à la synchronisation des transmissions de l'UL de l'UE.

2.7.4 Mappage entre les canaux [11]

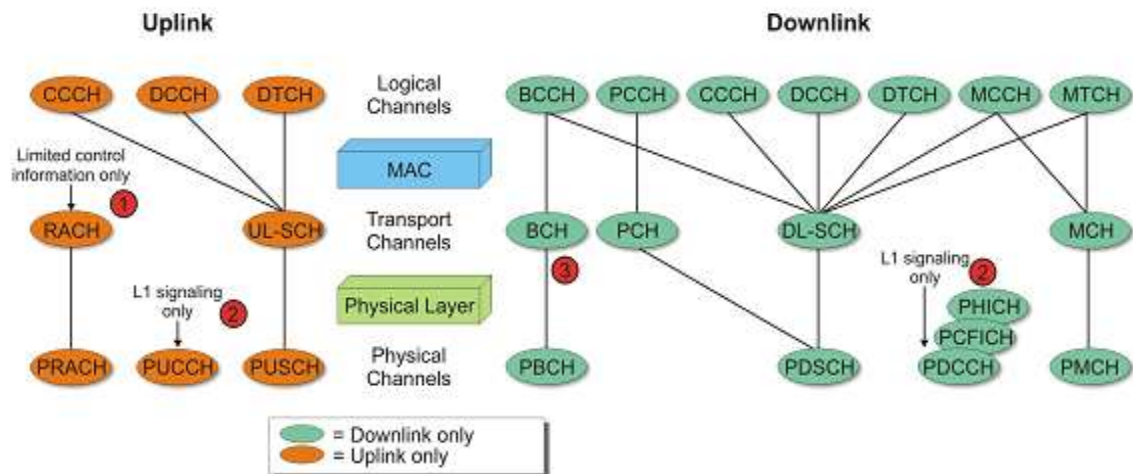


Figure 2.18. Mappage entre les canaux de l'E-UTRAN.

La figure 2.18 représente le mappage entre les canaux logiques, les canaux de transports, et les canaux physiques. Toutes les combinaisons ne sont pas permises, car certains canaux logiques ont des contraintes spécifiques.

2.8 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté l'architecture de réseau EPS, ses caractéristiques, ses entités, et son réseau cœur. Ce réseau comprend deux parties principales : le réseau cœur SAE et l'accès LTE, nous avons définis les six entités correspondantes à ce réseau, en commençant par l'entité *eNodeB* qui est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE, la deuxième entité est le MME, sa principale fonction est l'authentification d'UE à partir des informations enregistrées dans HSS, la troisième entité est le SGW, ses principales fonctions ont été décrites, comme le *hand over* inter-*eNodeB*, le *hand over* LTE, et 2G/3G et la mémorisation des paquets. La quatrième entité qui est le PDNGW, elle joue le rôle d'une interface aux réseaux externes.

L'accès LTE est plus complexe par rapport aux autres réseaux, et il est basé sur des procédures et des protocoles spécifiques.

3.1 Introduction

Depuis les années 90, les réseaux cellulaires ont connu un certain nombre d'évolutions (de la seconde génération à la 3G+) offrant des débits toujours plus importants et permettant le développement des nouveaux services en plus de la transmission de la voix.

La *LTE* a introduit un certain nombre de nouvelles technologies, permettant l'emploi efficace du spectre et fournissant des débits beaucoup plus élevés. Ainsi, la *LTE* utilise la technologie *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiple*) en tant que porteur du signal, les régimes d'accès associés, l'*OFDMA* (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), le *SC-FDMA* (*Single Frequency Division Multiple Access*), et la technique *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*).

3.2 Orthogonal Frequency Division Multiplex (*OFDM*)

3.2.1 Modulation Single Carrier et Egalisation

Le retard induit par le phénomène de trajets multiples peut provoquer l'interférence entre un symbole reçu le long d'un chemin d'accès retardé, et un symbole ultérieure arrivant au niveau du récepteur grâce à un trajet non direct. Cet effet est dénommé interférences entre-symboles (*IES*). Dans un système à une seule porteuse, et à des débits très élevés, il est possible que l'*IES* dépasse un temps symbole en entier et par conséquent, le déversement d'un symbole dans un symbole ultérieur [22].

a Propagation multi trajet [11]

Les différents chemins de propagation sont produits principalement par quatre phénomènes physiques qui sont la dispersion, la réfraction, la réflexion, et la diffraction (figure 3.1).

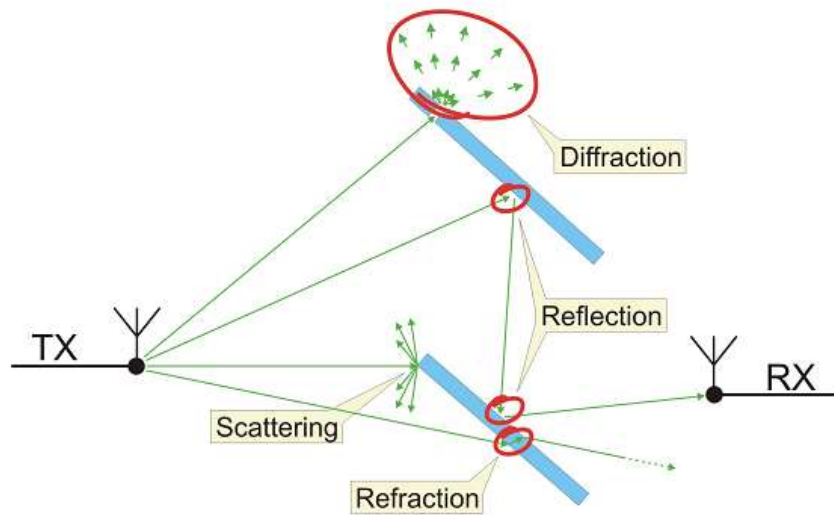


Figure 3.1. Le multi trajets induit des retards de propagation.

➤ **Dispersion**

Il se produit quand une onde électromagnétique frappe un obstacle dont la dimension est près de la longueur d'onde de cette onde électromagnétique [23].

➤ **Réfraction**

La réfraction se produit quand une onde électromagnétique change le milieu de propagation. Exemple: Quand la lumière régulière se déplace d'un milieu aéré à un milieu d'eau, elle va être affectée par la réfraction .C'est-à-dire, un changement de direction de propagation à cause la variation spatiale de la constant diélectrique du milieu [23].

➤ **Réflexion**

La réflexion signifie que l'onde électromagnétique frappe un obstacle dont la dimension est bien au-delà de sa longueur d'onde. Les actions de la réflexion sont principalement responsables au phénomène des trajets multiples [23].

➤ Diffraction

La diffraction est un mélange entre la dispersion et la réflexion. Il se produit quand les ondes électromagnétiques fonctionnent par les trous qui ont une dimension proche à la longueur d'onde de cette onde électromagnétique.

La réflexion et la dispersion produit un mélange des annulations de signal (quand (+) et (-) rassemblement) et amplifications de signal (quand (+) et (+) ou (-) et (-) rassemblement).

Chaque chemin d'une longueur différente et une réflexion différente se traduira par un décalage de phase spécifique (figure 3.2). Comme tous les signaux sont combinés au niveau du récepteur, certaines fréquences dans la bande passante du signal subissent des interférences constructives (combinaison linéaire des signaux en phase), tandis que des autres rencontrent des interférences destructives (combinaison linéaire des signaux hors-phase). Le signal composite reçu est déformée par la fréquence de fading sélectif comme il est illustré dans la figure suivante [23]:

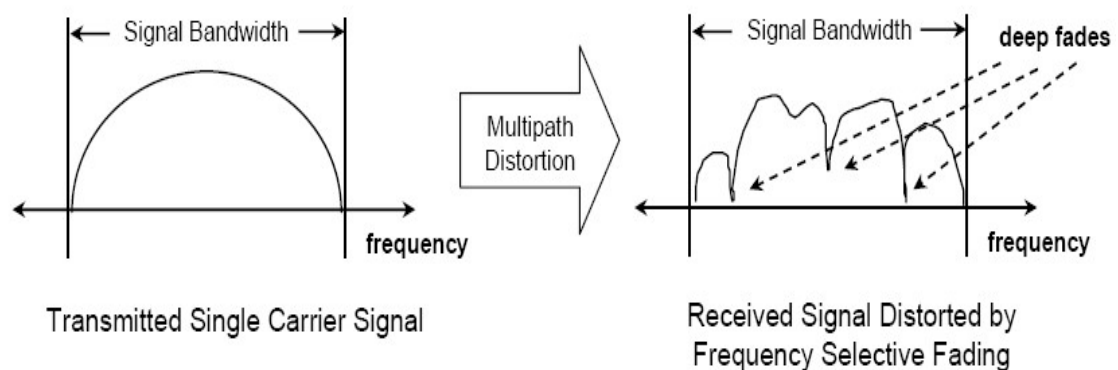


Figure 3.2. Plus les *delays preads* sont plus longs plus le canal devient sélectif en fréquence.

Les systèmes single carrier compensent la distorsion de canal via une égalisation dans le domaine temporel par une des deux méthodes suivantes [21] :

- **Inversion du canal** : avant d'envoyer l'information, on envoie une séquence déjà connue par le récepteur, un égaliseur de canal détermine la réponse du canal pour la multiplier après avec les données reçues pour inverser les effets des trajets multiples.
- **Egalisateur Rake** : il est employé dans les systèmes *CDMA*, il combine des copiés du signal numérique décalé dans le temps pour aboutir à un meilleur *SNR*.

Pour les débits de la *LTE* (jusqu'à 100 *Mbits/s*) et les *delay spreads* ou temps de propagation (près de 17 μ s), *L'IES* devient beaucoup plus sévère couvrant éventuellement plusieurs périodes de symbole et l'approche d'égalisation canal devient impraticable.

3.2.2 Principes de l'OFDM

Le principe de *l'OFDM* consiste à répartir, sur un grand nombre de sous-porteuses, le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes [17] [22] [24].

Une description d'un modulateur *OFDM* de base est fournie à la figure suivante :

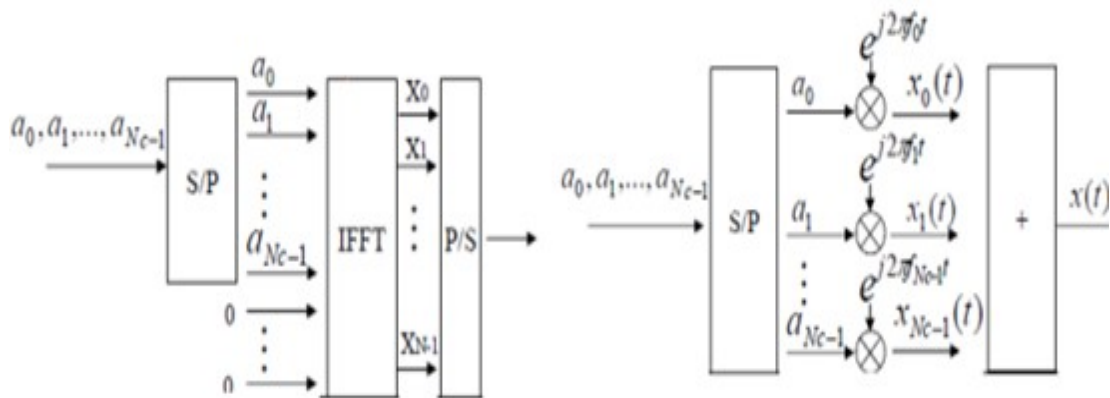


Figure 3.3. Le modulateur *OFDM*.

Le modulateur *OFDM* Il se compose d'une banque N_c de modulateurs complexe, où chaque modulateur correspond à une sous-porteuse *OFDM*. En bande de base, un signal *OFDM* $x(t)$, au cours de l'intervalle de temps $(m \cdot t_u \leq t < (m+1) \cdot t_u)$ peut donc être exprimée par [17] [24] [22] :

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^m e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (3.1)$$

Où $X_k(t)$ est la $k^{\text{ième}}$ sous-porteuse modulée avec la fréquence $f_k = k \cdot \Delta f$; a_k est le symbole de modulation, qui est complexe en général, appliquée à la sous-porteuse $k^{\text{ième}}$ durant l'intervalle m du symbole *OFDM*.

C'est à dire pendant l'intervalle de temps $(m \cdot T_u \leq t < (m+1) \cdot T_u)$. La transmission *OFDM* est basée sur des blocs, ce qui implique que, au cours de chaque intervalle d'un symbole *OFDM*, N_c symboles de modulation sont transmis en parallèle. Les symboles de modulation peuvent être de n'importe quel alphabet de modulation, tels que *QPSK*, *16QAM*, ou *64QAM* [17] [22] [24].

Les caractéristiques de base de la transmission OFDM sont [17] [22] [24] :

- ✓ L'utilisation d'un nombre relativement important de sous-porteuses à bande étroite. Par exemple, une évolution multi-porteuse de *WCDMA* avec une largeur de bande globale de 20 MHz pourrait se composer de quatre sous-porteuses, chacun avec une bande passante de 5 MHz. En revanche, la transmission *OFDM* peut impliquer plusieurs centaines sur la liaison radio du même récepteur.
- ✓ Une impulsion simple de forme rectangulaire, comme il est illustré dans la figure 3.4, correspond à un spectre Sinc-carré par sous-porteuse, Ces sous-porteuses sont serrées dans le domaine fréquentiel, soit un espacement de $f = 1/T_u$ (figure 3.5), le T_u es le temps de modulation d'un symbole par sous-porteuse.

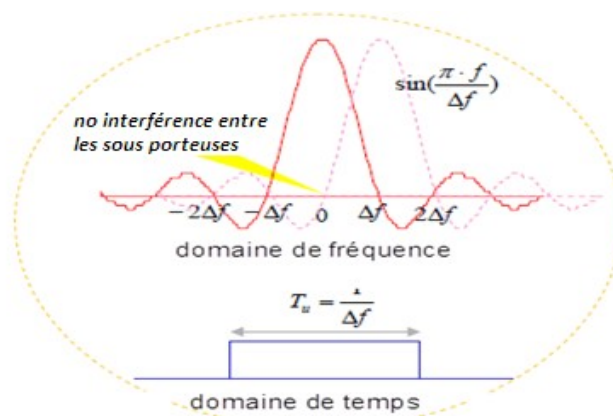


Figure 3.4. La forme des impulsions et le spectre d'une sous-porteuse *OFDM*.

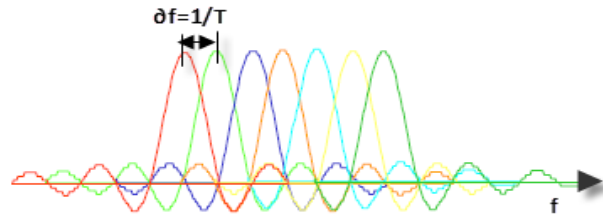


Figure 3.5. L'espacement des sous porteuses OFDM.

Dans la *3GPP-LTE*, l'espacement sous-porteuse de base est de 15 kHz. D'autre part, le nombre de sous-porteuses dépend de la largeur de bande de transmission, avec un ordre de 600 sous-porteuses dans le cas de fonctionnement dans un spectre de 10MHz. Le terme *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiple*) signifie que deux sous-porteuses *OFDM* modulées $x_{k1}(t)$ et $x_{k1}(t)$ sont orthogonales entre elles au cours de l'intervalle de temps $(m) \cdot T_u \leq t < (m+1) \cdot T_u$.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'*OFDM* utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent que peu. En codage orthogonal, l'espacement entre les sous-porteuses doit être égal à :

$$\Delta f = (f_q - f_{q+1}) = \frac{n}{T} \text{ HZ} \quad (3.2)$$

Cela implique que l'interaction entre sous porteuses est approximativement nul, sachant que :

$$\int_0^T \cos(2\pi f_q t + \varphi) * \cos(2\pi f_{q+1} t) dt \approx 0 \quad (3.3)$$

Où T (seconde) est la durée utile d'un symbole (c.à.d. la taille de la fenêtre de capture du récepteur), et n est un entier positif (généralement égal à 1). Par conséquent, avec N sous-porteuses, la largeur totale de la bande passante sera de $B \approx N \cdot \Delta f$ (Hz).

Le multiplexage orthogonal permet une haute efficacité spectrale, la bande passante étant quasiment utilisée dans son intégralité. Ce pseudo orthogonalité produit un spectre de fréquence presque plat (typique du bruit blanc), ce qui entraîne un minimum d'interférences avec les canaux adjacents. Un filtrage séparé de chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage, une transformée de fourrier *FFT* étant suffisante pour séparer les porteuses entre elles [17] [22] [24].

3.2.3 Avantages de l'OFDM

Pour éliminer l'IES, le symbole OFDM est constitué de deux composantes principales qui sont le CP, et une période FFT (T_{FFT}). La durée du CP est déterminée par le plus haut degré prévu de *delay spreads*. Lorsque les signaux transmis arrivent au niveau du récepteur par deux chemins de différentes longueurs, ils sont décalés dans le temps comme la montre la figure suivante [17] [22] [24] :

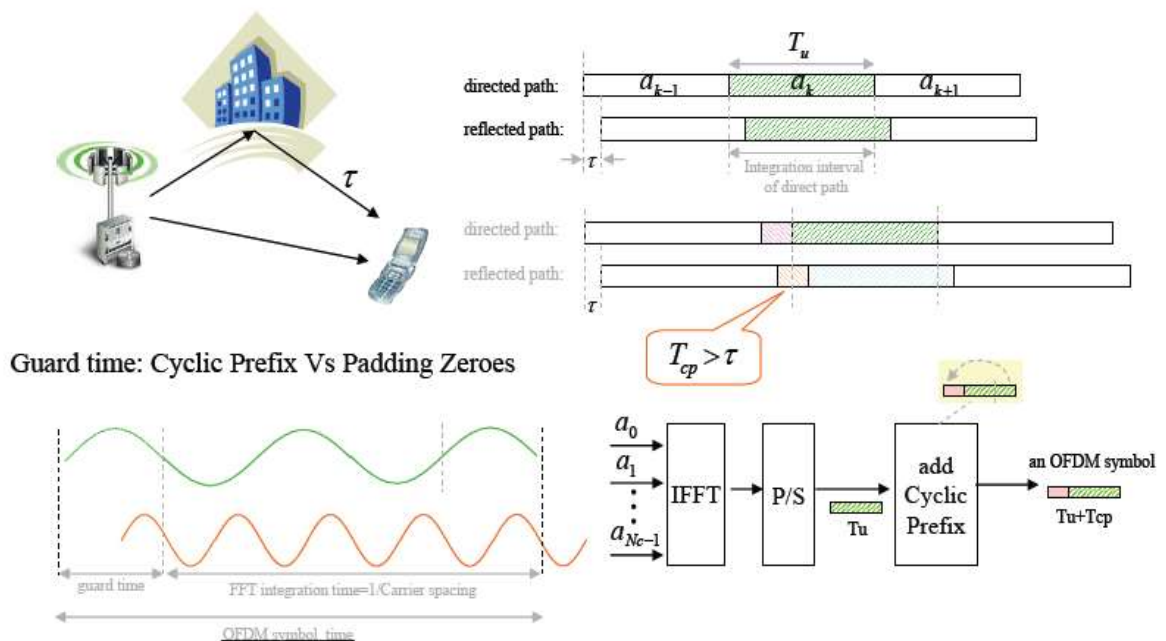


Figure 3.6. L'OFDM élimine l'IES via des périodes symbole plus longues et le préfixe cyclique. Avec un CP d'une durée suffisante, les symboles précédents ne rejaillissent pas sur la période FFT (contenant l'information utile), il n'y a que des perturbations causées par les « copies »- échelonnées dans le temps, du symbole actuel. Une fois la réponse impulsionnelle du canal est déterminée (par transmission périodique des signaux de référence connus), les distorsions peuvent être corrigées en appliquant un décalage de base d'amplitude et de phase sur les sous- porteuses.

L'OFDM a deux inconvénients principaux par rapport aux systèmes à porteuse unique:

- ✓ la sensibilité aux erreurs de fréquence porteuse (due soit à l'offset de

l'oscillateur local ou aux décalages Doppler).

- ✓ un grand rapport de puissance crête-à-moyenne du signal (*PAPR*, *Peak-to-Average Power Ratio*).

3.3 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (*OFDMA*)

3.3.1 La structure des trames en LTE

Pour remédier aux problèmes de la faible efficacité des réseaux orientés-paquets où beaucoup de ressources sont consommées pour la gestion, la période *back-off* conçue pour minimiser les collisions est assez longues et le paquet garde la bande passante complet pendant la transmission et l'acquittement, la mise en œuvre d'un système plus performant est devenue indispensable. C'est ainsi que l'*OFDMA* s'est présenté avec un faible temps de latence, et une grande efficacité.

Les trames *LTE* (figure 3.7) sont de 10 *ms*. Ils sont divisés en 10 sous- trames, chaque sous-trame est de longueur 1,0 *ms*. Chaque sous-cadre est divisée en deux slots, chacun d'eux a un temps de 0,5 *ms*. Un slot est composé de 6 ou 7 symboles *OFDM* (le préfixe cyclique est normal ou étendu) est employé [11] [17].

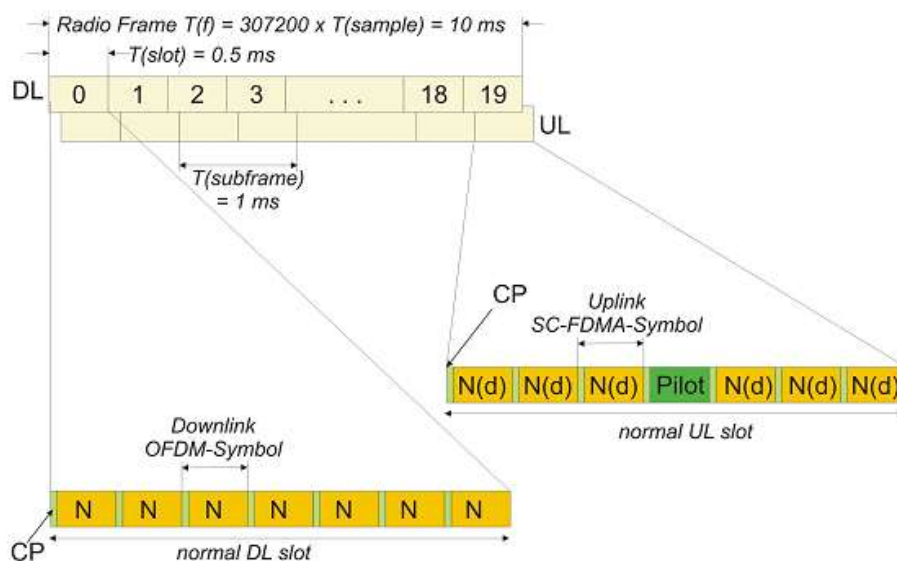


Figure 3.7. La structure générique de trame LTE.

3.3.2 Physical Resource Block

En LTE, l'espace temps/fréquence est divisé en *PRB* (*Physical Resource Blocks*). Chaque *PRB* est défini comme étant composé de 12 sous-porteuses consécutives pour un slot (0,5 ms). Un *PRB* est le plus petit élément d'allocation des ressources affectées par le planificateur de station de base comme il est représenté dans la figure suivante [11] [17] :

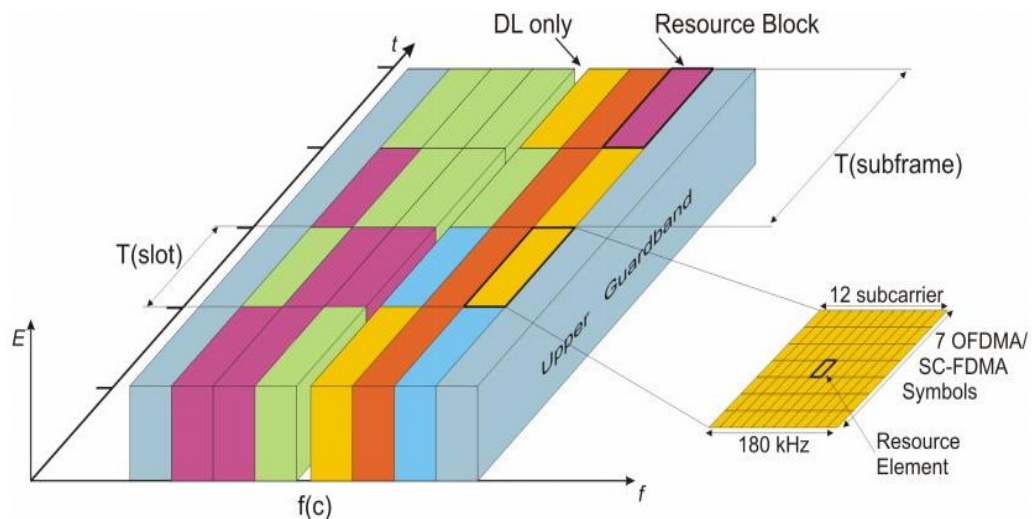


Figure 3.8. Physical Resource Blocks.

Le nombre total des sous-porteuses disponibles est dépend de la largeur de bande de transmission globale du système. Les spécifications *LTE* définissent les paramètres de bande passante de 1,25 MHz à 20 MHz comme la montre le tableau suivante [11] [22] [24]:

Largeur de bande	1.25	2.5	5	10	15	20
largeur de bande de sous porteuse	15					
Bloc physique de ressource	180					
Nombre de PRBs disponible	6	12	25	50	75	100

Tableau 3.1.Le tableau récapitulatif du nombre de *PRBs* disponibles par bande-passante.

La performance d'un canal secondaire alloué à un utilisateur sera différente de celle d'un autre utilisateur, puisque les qualités de canal y sont différentes, en fonction des conditions de propagation individuelles. Ceci veut dire qu'un canal qui a de

mauvaises performances avec un utilisateur peut se révéler favorable à un autre. La technique *OFDMA* exploite cette caractéristique, du fait qu'elle permet d'allouer des canaux différents, selon les utilisateurs, dans une fenêtre temporelle à configuration variable.

On consacre des ressources aux canaux de contrôles communs qui sont classiquement des informations sur le réseau, la cellule et les symboles pilotes qui sont utiles pour effectuer l'identification de la réponse du canal comme il est montré par la figure suivante [22] [24]:

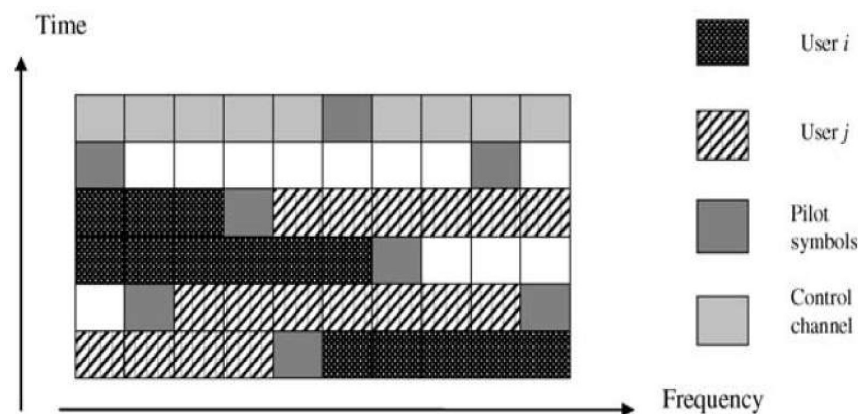


Figure 3.9. Répartition des ressources sur les utilisateurs.

3.4 Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (*SC-FDMA*)

Le *SC-FDMA* est bien adapté aux exigences de *LTE* en *uplink*, et il offre des performances, et une complexité globale similaire à l'*OFDMA*, mais il utilise en revanche une technique de multiplexage fréquentiel à une seule porteuse.

La chaîne de transmission du *SC-FDMA* est la suivante [17] [22] [24]:

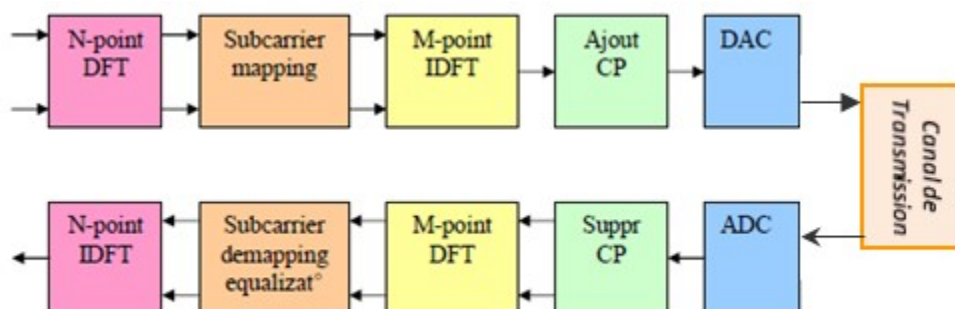


Figure 3.10. Chaîne de transmission *SC-FDMA*.

Le *SC-FDMA* peut être vu comme un *OFDMA* où des symboles de données de domaine de temps sont transformés au domaine de fréquence par *DFT* (*Discret Fourier Transform*) avant de passer par une modulation *OFDMA*.

Les signaux binaires d'entrée sont transformés en signaux complexes à l'aide d'un modulateur en bande de base dans l'un format possible de la modulation : *BPSK*, *PSK*, *QPSK* et *64-QAM*. Ces signaux sont mis à l'entrée d'un *DFT* pour les transférer au domaine fréquentiel. L'utilisation de la *DFT* a été choisie pour les raisons suivantes [17] [22] [24]:

- ✓ la détection après l'*IDFT* donne un *SNR* (*Signal Noise Ratio*) proportionnellement répartie sur la bande entière. Car dans le cas d'une détection en *OFDMA*, le canal ayant subi un bruit aura un *SNR* faible et proportionnelle seulement à ce canal, contrairement au *SC-FDMA* où la détection se fait sur la bande du signal (donnée en domaine temporel).
- ✓ la transmission en série des données avec la mono porteuse rend le *PAPR* faible.

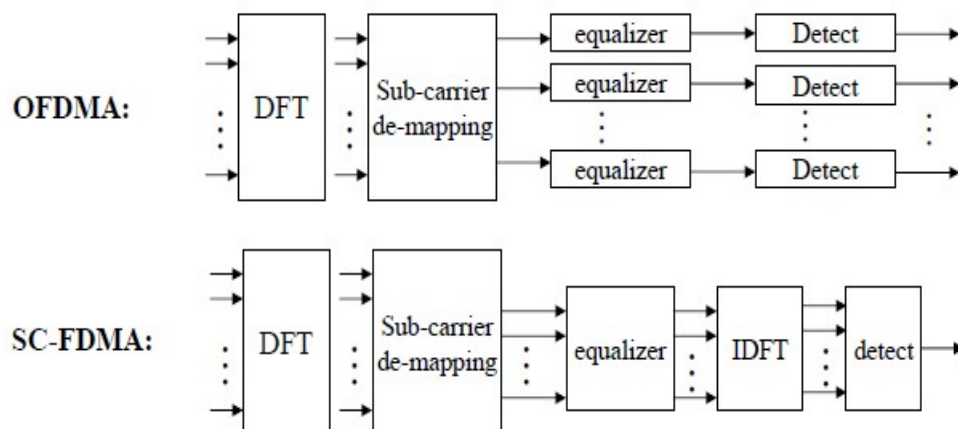


Figure 3.11. Comparaison entre la détection en *SC-FDMA* et *OFDMA*.

La *DFT* produit une représentation des symboles dans le domaine fréquentiel qui seront transmis au *bloc Subcarrier Mapping* pour les transformer à *M* sous porteuses orthogonales. Puis une *IDFT* à *N* points permet d'obtenir un unique signal dans le domaine temporel.

L'émetteur effectue deux autres opérations avant la transmission : il insère un ensemble de données qui sont appelé le préfixe cyclique (*CP*) offrant un temps de garde suffisant pour éviter l'interférence entre les blocs transmis sous la propagation multi trajets. Généralement, le préfixe cyclique est une copie de la dernière partie du bloc. Un filtrage linéaire est nécessaire afin de réduire l'énergie du signal. Le filtre utilisé est un filtre en cosinus sur- élevé.

A la réception, le récepteur transformera le signal reçu en domaine fréquentiel via le *DFT*, exécutant ainsi l'égalisation fréquentielle. Puisque le *SC-FDMA* utilise la modulation mono porteuse et donc soumis aux interférences inter symbole, alors un égaliseur est nécessaire afin de combattre l'*ISI* (contrairement au *CP* qui combat l'interférence entre bloc). Les symboles égalisés sont transformés via l'*IDFT* en domaine temporel permettant une détection, et un décodage dans le dit domaine.

Le *SC-FDMA* utilise deux méthodes pour associer les données aux sous-porteuses (*mapping*) [17] [22] [24]:

- ✓ **Le mode Distribué** : Un certain nombre de zéros est inséré entre les échantillons de sortie de la *DFT*, offrant une plus grande diversité fréquentielle. Donc, les données de l'utilisateur occupent un ensemble de sous-porteuses non consécutives de façon à réaliser une diversité en fréquence (figure 3.12).

- ✓ **Le mode Localisé**: Aucun zéro n'est inséré entre les échantillons de sortie de la *DFT* (*Discrete Fourier Transform*) (figure 3.12), ceux-ci étant donc transposés sur des sous-porteuses consécutives. Donc, les données de l'utilisateur occupent un ensemble de sous porteuses consécutives localisées réalisant ainsi le gain sélectif en fréquence par établissement d'un ordonnancement dépendant du canal dépendant *CDS* (*Channel-Dependent Scheduling*).

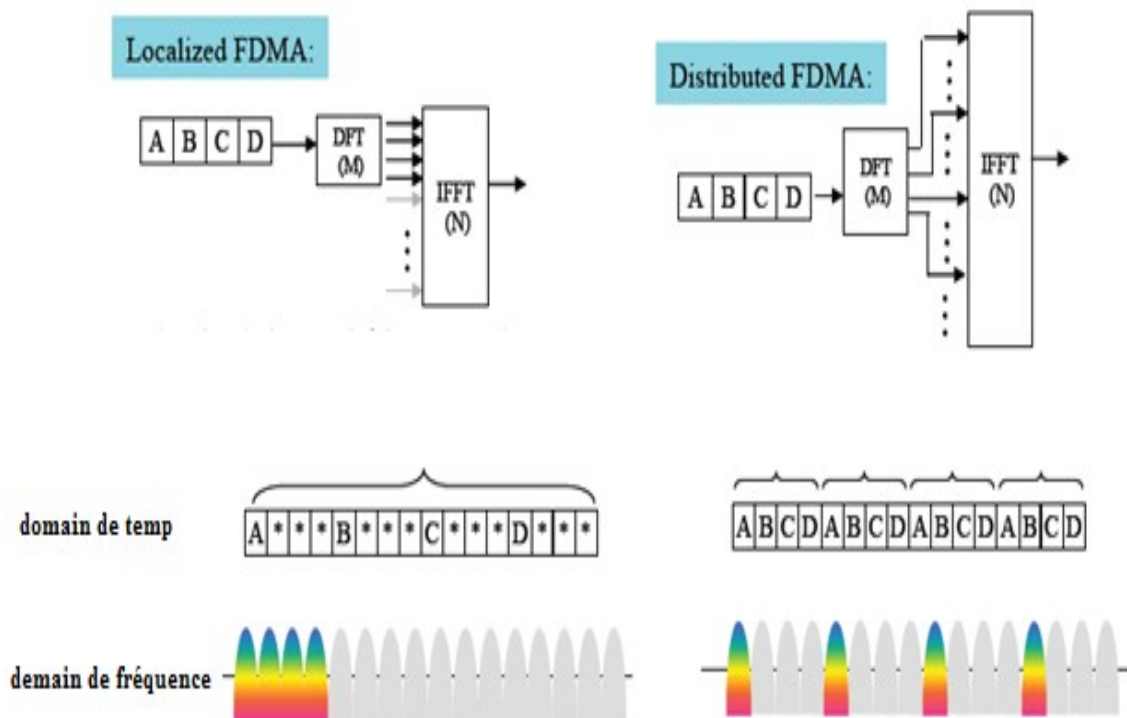


Figure 3.12. Mode localisé et mode distribué.

3.5 Multiple Input Multiple Output et Maximal Radio Combining (MIMO &MRC)

3.5.1 La principe du MRC

Les techniques actuelles associées à des modulations, et des codages adaptées mettant en œuvre un lien point à point permettent d'approcher à la limite théorique de Shannon. Des récentes recherches en théorie de l'information ont montré que la capacité des systèmes multi-antennes (*MIMO*) augmente linéairement avec le nombre d'antennes, dépassant considérablement la limite théorique de Shannon en apparence, et ceci sans utiliser des ressources radio supplémentaires [22] [24].

Ces systèmes permettent ainsi d'augmenter le débit usagé et de combattre efficacement les évanouissements, et les interférences en exploitant la diversité produite par le canal *MIMO* (constitué de sous canaux), améliorant ainsi la qualité du lien sans fil.

Dans le *LTE*, la technique de *Maximal Ratio Combining (MRC)* est utilisée pour

accroître la fiabilité du lien dans des conditions de propagation difficiles quand la force du signal est faible et les conditions de trajets multiples sont difficiles.

Comme il est montré dans la figure 3.13. En utilisant la *MRC*, un signal est reçu par deux (ou plus) d'antennes séparées / paires émetteur- récepteur. Notez que les antennes sont physiquement séparées, et donc ont des réponses impulsionnelles de canal distinguées. La compensation de canal est appliquée sur chaque signal reçu dans le processeur bande de base avant d'être linéairement combinés pour créer un signal reçu composite, et unique [17] [22] [24].

Lorsqu'ils sont combinés de cette façon, les signaux reçus sont ajoutés de façon cohérente dans le processeur bande de base. Toutefois, le bruit thermique de chaque émetteur-récepteur est non corrélé. Ainsi, la combinaison linéaire des signaux de canal compensés en bande de base donne comme résultat une augmentation moyenne de 3 *dB* du *SNR* pour un récepteur à deux canaux *MRC* dans un bruit d'environnement limité [17] [22] [24].

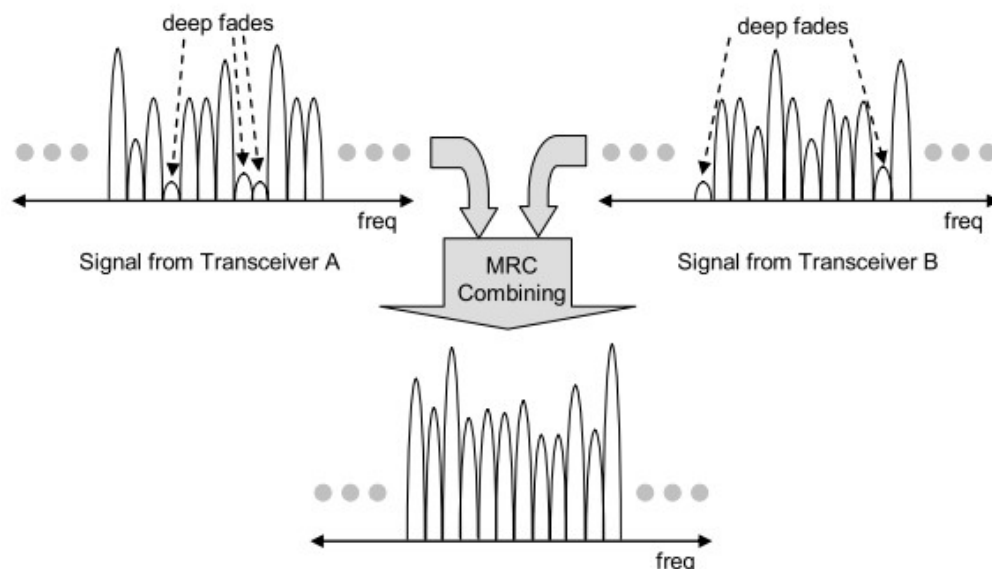


Figure 3.13. La technique *MRC* améliore la fiabilité du lien.

3.5.2 Le système MIMO

La *MRC* améliore la fiabilité du lien, mais elle n'augmente pas le taux nominal de données du système. En mode *MRC*, les données sont transmises par une antenne unique et sont traitées au niveau du récepteur par l'intermédiaire de deux récepteurs

ou plus. La *MRC* est donc, une forme de diversité de récepteurs. Le *MIMO* augmente les taux de données du système.

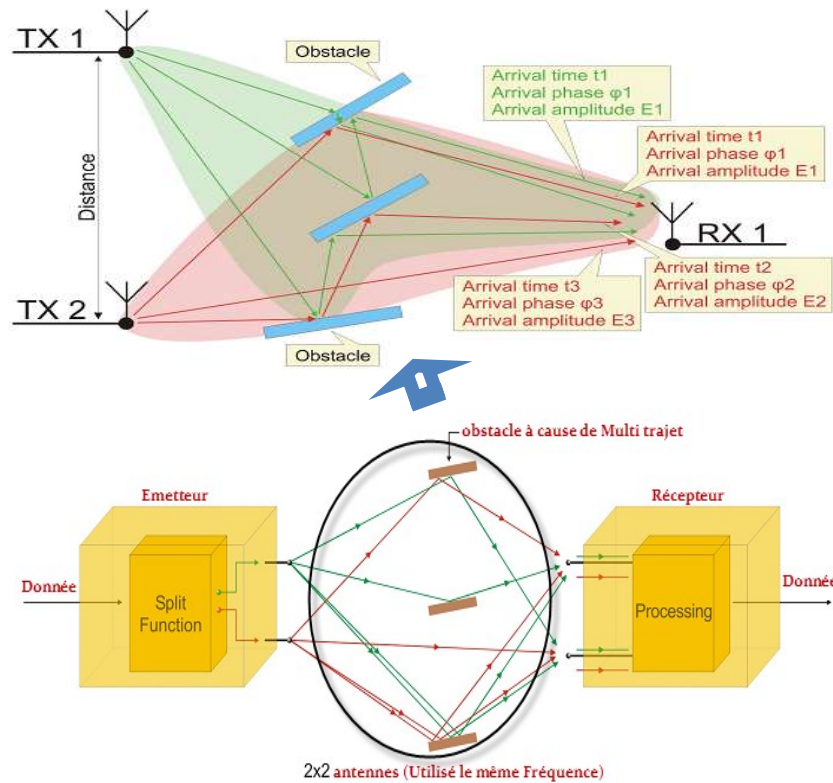


Figure 3.14. Représentation de système MIMO (2x2 antennes).

Afin d'obtenir un gain en diversité et en débit, la *LTE MIMO* propose deux systèmes, le premier se compose de 4 antennes émettrices et 4 antennes réceptrices, et le deuxième se compose de 2 antennes émettrices et 2 antennes réceptrices (figure 2.14). Ainsi, le récepteur doit déterminer la réponse impulsionnelle du canal de chaque antenne d'émission.

En *LTE*, les réponses impulsionnelles des canaux sont déterminées par la transmission séquentielle de signaux de référence connus de chaque antenne de transmission. Notez que pendant qu'une antenne émettrice envoie le signal de référence, l'autre antenne est inactive. Une fois que les réponses impulsionnelles du canal sont connues, les données peuvent être transmises par les deux antennes en même temps [11].

Donc, le système *MIMO* « entrées multiples, sorties multiples » est une technique utilisée par les réseaux sans fil, il permet de transférer des données à plus longue portée et à plus grande vitesse que la technique *SISO* (Single-Input Single-Output) [11].

a Avantages de système MIMO

Ils utilisent des antennes multiples en émission et en réception afin de [9]:

- ✓ augmenter la diversité (émission et réception) pour diminuer le *TEB*
- ✓ augmenter la capacité du système
- ✓ augmenter l'efficacité spectrale (pas de répétition du signal)

b Applications [9]

- ✓ réseaux locaux sans fil (*WLAN*)
- ✓ réseaux cellulaires fixes Wireless large bande *2G*
- ✓ réseaux cellulaires mobiles *2.5G/3G (EDGE, UMTS, LTE, LTE-A)*
- ✓ communications haut débit
- ✓ systèmes broadcaste

c Modèles des canaux MIMO

Les quatre modèles des canaux *MIMO* sont représentés par la figure suivante [11] :

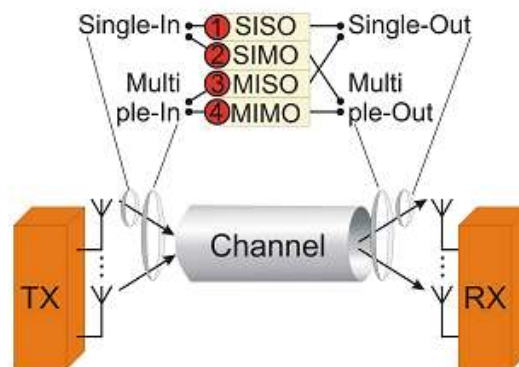


Figure 3.15. Les modèles des canaux *MIMO*.

3.5.3 Classification des systèmes MIMO

On peut considérer les trois catégories de système MIMO comme la représentation sur la figure 3.16 [17] [9] [25] :

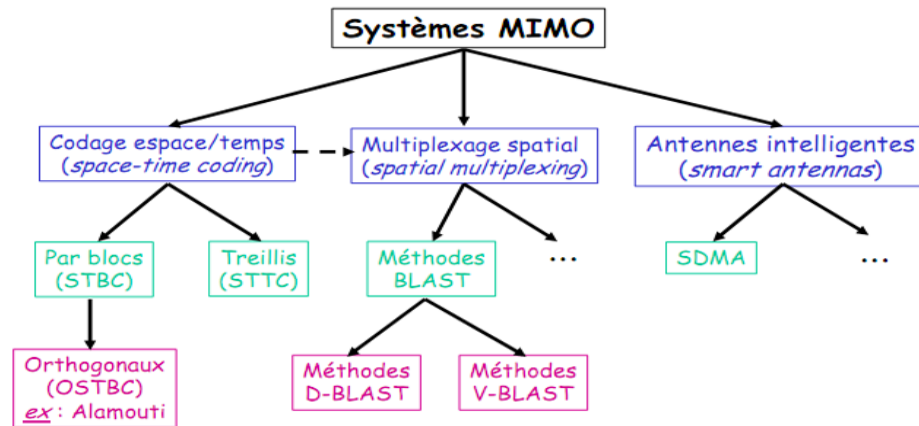


Figure 3.16. Classification des systèmes MIMO.

a Le multiplexage spatial MIMO

Chaque message est découpé en sous-messages. On transmet simultanément les sous-messages différents sur chacune des antennes de l'émission. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassemblés pour reformer le message entier d'origine. Comme pour la diversité *MIMO*, les sous-canaux de propagation doivent être décorrélés.

Le multiplexage *MIMO* permet d'augmenter les débits de transmission (grâce au gain de multiplexage).

Les techniques de diversité, et de multiplexage *MIMO* peuvent être conjointement appliquées. Par exemple, pour un système *MIMO* 5 x 5 (c'est-à-dire 5 antennes d'émission et 5 antennes de réception), on peut configurer un sous-système *MIMO* 2 x 3 pour faire le multiplexage et un sous-système *MIMO* 3 x 3 pour faire de la diversité *MIMO*.

b Le MIMO - Beamforming

On utilise le réseau d'antenne *MIMO* pour orienter et contrôler le faisceau d'onde radio (amplitude et phase du faisceau). On peut ainsi créer des lobes constructifs /

destructifs, et optimiser une transmission entre l'émetteur et la cible. Les techniques de *beamforming* permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple), et de limiter les interférences entre les utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé).

c La diversité spatiale MIMO

L'objectif de la diversité spatiale *MIMO* est de déterminer un codage espace-temps par bloc, c.à.d. répartir les données à émettre sur les différentes antennes émettrices et au cours du temps, Les signaux reçus sur chacune des antennes de réception sont ensuite remis en phase et sommés de façon cohérente.

Cela permet d'améliorer la performance, c.à.d. maximiser le débit en minimisant les erreurs, et augmenter le rapport *SNR* (grâce au gain de diversité) de la transmission. Pour que cette technique soit efficace, il faut que les sous-canaux *MIMO* soient décorrélés les uns des autres.

3.6 Conclusion

Ce chapitre donne une description des paramètres caractéristiques du canal de propagation.

Des généralités relatives au canal de propagation radio et la description des phénomènes physiques qui interviennent dans un canal de propagation ont été discutées. Les systèmes *MIMO* ont beaucoup d'avantages par les systèmes *SISO*, ils offrent des conditions de transmission très agréables pour les services qui nécessitent des hauts débits en temps réel.

Chapitre 4 Simulation et résultats

4.1 Introduction

La simulation numérique est une étape très importante dans l'étude et la mise en œuvre des systèmes réalistes de transmission. En effet, elle permet d'une part la validation des études théoriques et d'autre part l'optimisation de ces systèmes par l'analyse de l'influence des divers paramètres sur les performances.

Ce chapitre contient la simulation sous MATLAB/ SIMULINK de deux chaînes : une chaîne *OFDMA* pour la liaison descendant de norme *3GPP_LTE*, et une chaîne *SC-FDMA* pour la liaison montant de norme *3GPP_LTE*. Le rôle de chaque élément de ces deux chaînes, et l'influence de différents paramètres ont été discutés

4.2 Chaîne de transmission

4.2.1 Schéma synoptique de la chaîne de transmission

La simulation de la couche physique *3GPP_LTE* est figurée sur les deux schémas synoptiques illustrés par les figures 4.1, et 4.2 pour les deux méthodes d'accès (*OFDMA* et *SC-FDMA*) respectivement :

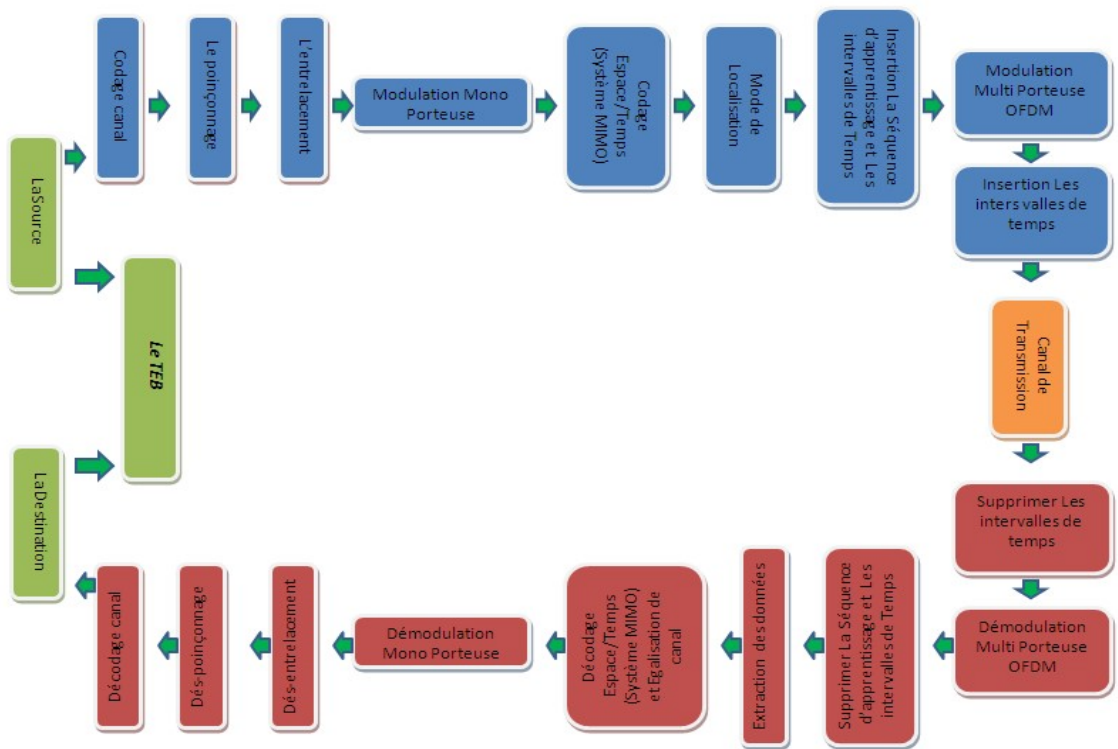


Figure 4.1. Le schéma simplifié de la liaison descendante (OFDMA).

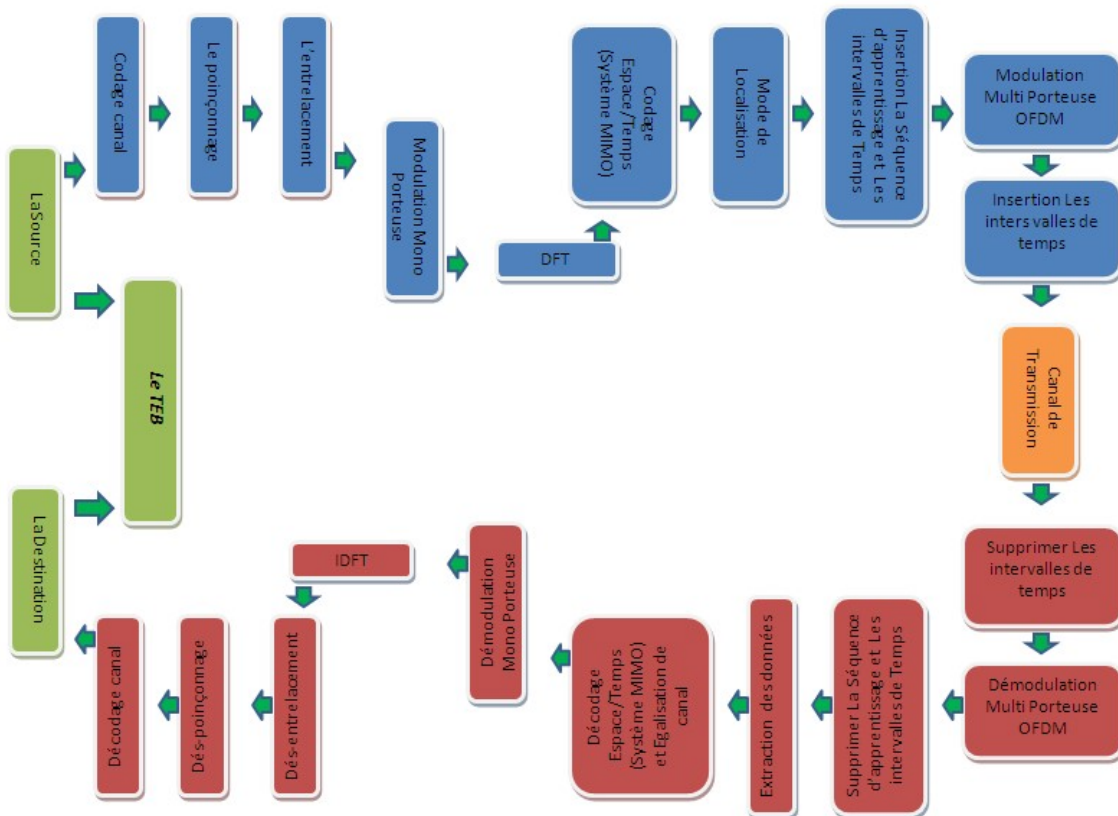


Figure 4.2. Le schéma simplifié de la liaison montante (SC-FDMA).

4.2.2 Simulation de la chaine de transmission sur l'outil SIMULINK

La simulation des chaines de transmission *OFDMA*, et *SC-FDMA* dans l'environnement *SIMULINK* est représentée sur les figures 4.3 et 4.4 respectivement :

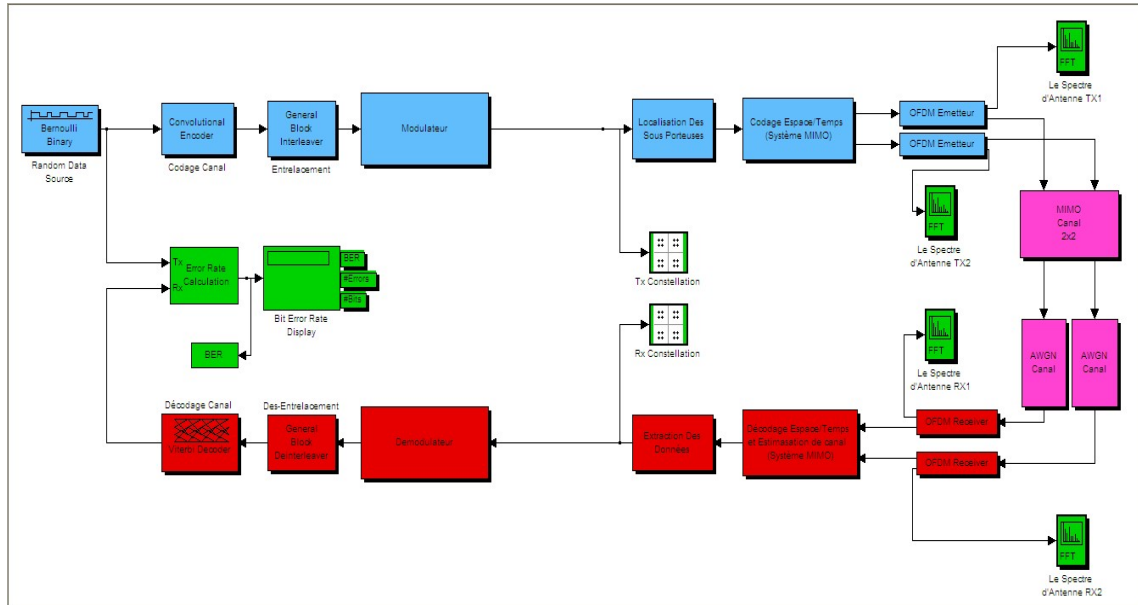


Figure 4.3. Simulation de la chaine de transmission *OFDMA*.

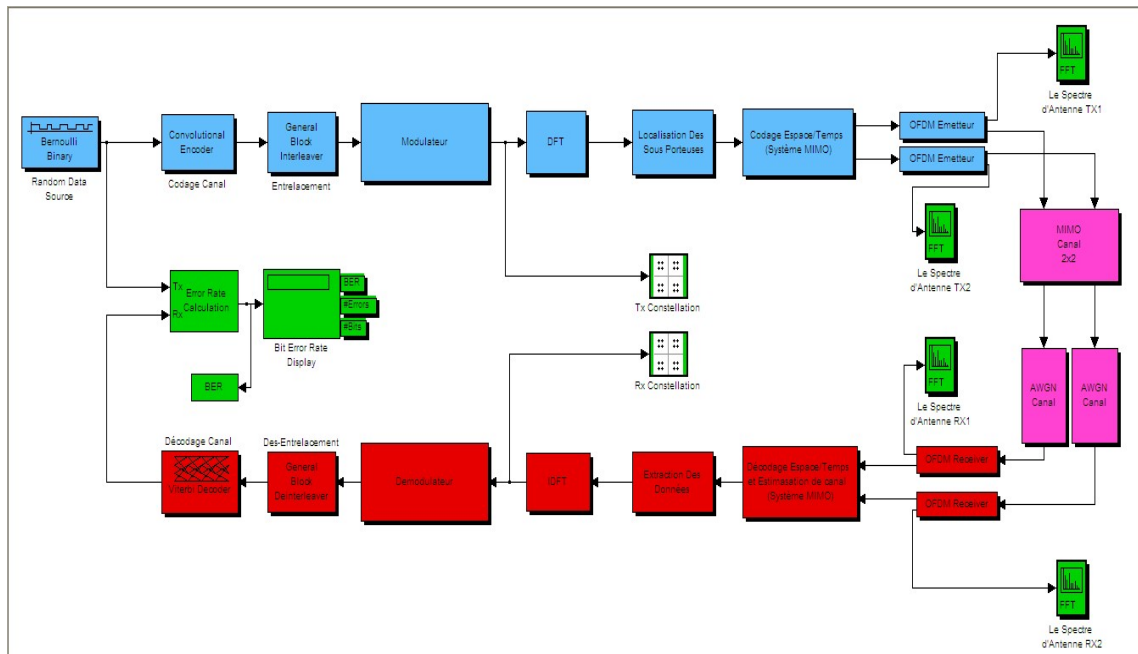


Figure 4.4. Simulation de la chaine de transmission *SC-FDMA*.

4.3 Simulation de l'émission de chaine *OFDMA* et *SC-FDMA*

4.3.1 Source des données :

Les données traitées peuvent être une vidéo, un fichier de son, ou un texte. La source de données utilisée dans cette simulation, et ces paramètres sont représentés sur la figure 4.5.

Le bloc *Bernoulli Binary Generator* génère des nombres binaires aléatoires en utilisant la distribution de Bernoulli qui produit la valeur 0 par une probabilité p et la valeur 1 par une probabilité $1-p$.

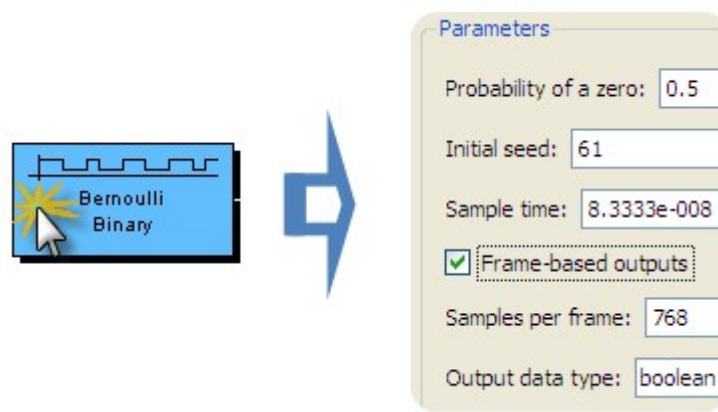


Figure 4.5. La source de données utilisée dans les deux chaines.

4.3.2 Codage de canal

Le bruit, et les interférences dans le canal de transmission dégradent la qualité des signaux Transmis. Cette dégradation génère des erreurs de détection à la réception, pour résoudre ce problème, on augmente la puissance du signal émis, ou on procède un codage de canal qui consiste à ajouter au message binaire transmis des bits de redondance, de telle sorte que le message codé possède d'une structure particulière. Le décodeur de canal du récepteur vérifie si cette structure est bien respectée. Dans le cas contraire, une erreur est détectée et éventuellement Corrigée [26].

Pour mesurer l'efficacité du codage de canal, on utilise les critères suivants [26]:

- ✓ le rendement du codeur $R = D_b/D_c$, ou D_b et D_c représentent le débit binaire respectivement avant et après le codage.

- ✓ le gain de codage, c'est-à-dire la réduction de puissance permise par le codage de canal pour une probabilité d'erreur donnée.

Parmi les codes de canal utilisé dans la norme *3GPP_LTE*, on a le code convolutif. Ce code transforme des mots de k éléments binaires à des mots de n éléments binaires ($n > k$) comme il est montré par la figure 4.6, le codeur est constitué de k registres à décalage en parallèle, et d'un circuit combinatoire.

Pour chaque mot initial de k éléments binaires, le contenu des registres est décalé vers la droite, et le mot est inséré à gauche dans la première colonne. Les $(m + 1)k$ éléments binaires trouvant dans les registres sont alors combinés selon des opérations logiques pour former un mot de n éléments binaires [26].

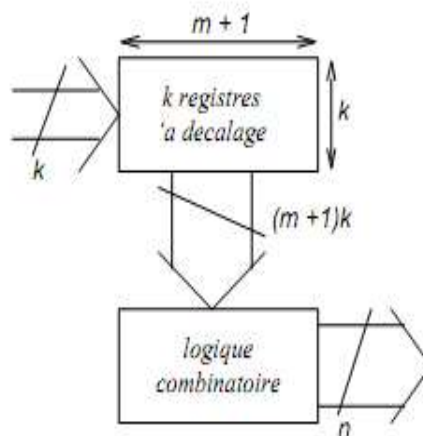


Figure 4.6. Le schéma de principe d'un codeur convolutif.

Le code choisi dans cette simulation est le code convolutif [171 133], avec : Rendement ($R = \frac{1}{2}$), et la longueur de contrainte égale à 7. Les polynômes générateurs utilisés sont donnés dans le tableau suivant:

Polynôme générateur	en binaire	en octal
$P_1(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$	$P_1(x) = [1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]$	$P_1(x) = [171]$
$P_2(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$	$P_2(x) = [1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1]$	$P_1(x) = [133]$

Tableau 4.1. Les polynômes générateurs du code convolutif utilisé.

La représentation du code convolutif utilisé est donnée par la figure 4.7.

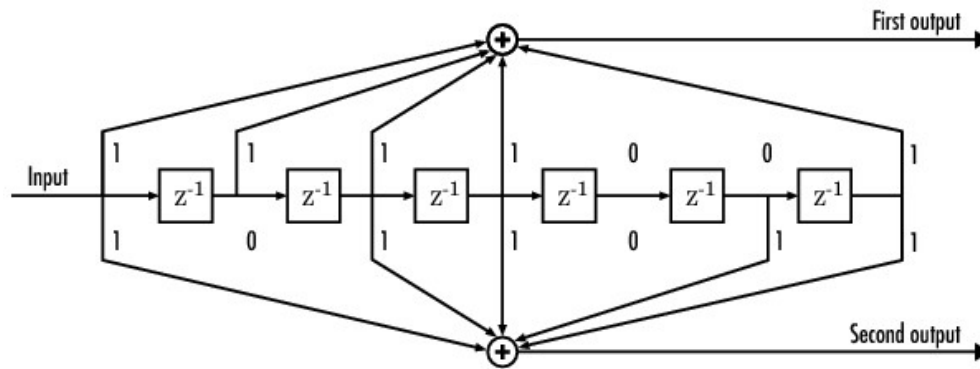


Figure 4.7. Le schéma de code convolutif utilisé.

La simulation de cette opération dans l'environnement SIMULINK est donnée par la figure 4.8. Le bloc Convolutional encoder simule un codeur convolutif en utilisant la fonction Poly2trellis.

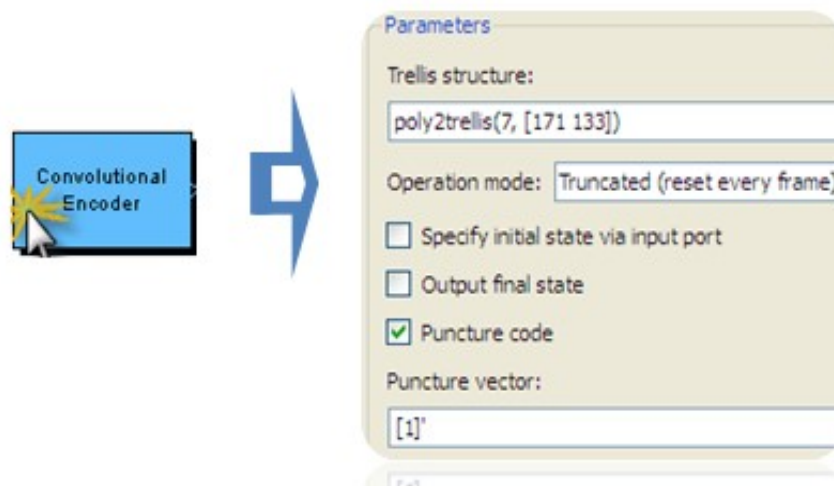


Figure 4.8. La boîte de dialogue de convolutional encoder.

4.3.3 Le poinçonnage

Le poinçonnage est pour but de réduire la quantité de données transmises, il élimine systématiquement les bits du flux à faible taux à la sortie du codeur (figure 4.9), cette opération conduit à un code à taux élevé. Donc, on peut utiliser le poinçonnage pour créer des taux variables de codage pour fournir divers niveaux de protection contre les erreurs aux utilisateurs [27].

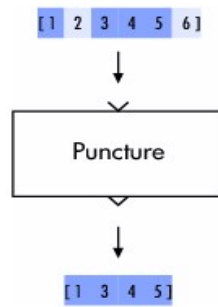


Figure 4.9. Le principe de l'opération de poinçonnage.

Les différents taux qui peuvent être utilisés sont $1/2$, $2/3$, $3/4$ et $5/6$. Les vecteurs de poinçonnage pour ces taux, sont donnés dans le tableau suivant [27]:

Taux	Vecteur de poinçonnage
$1/2$	[1]
$2/3$	[1 ;1 ;1 ;0]
$3/4$	[1 ;1 ;0 ;1 ;1 ;0]
$5/6$	[1 ;1 ;0 ;1 ;1 ;0 ;0 ;1 ;1 ;0]

Tableau 4.2.Le vecteur de poinçonnage pour différents taux du codage convolutif.

4.3.4 Entrelacement(*Interleaving*)

L'entrelacement consiste à permuter une séquence de bits de manière à ce que deux symboles proches à l'origine soient les plus éloignés possibles l'un de l'autre. Cela permet, en particulier, de transformer une erreur portant sur des bits regroupés en une erreur répartie sur l'ensemble de la séquence [13].Donc, l'entrelacement permet d'améliorer les performances du code correcteur d'erreurs.

La simulation de l'opération d'entrelacement dans l'environnement SIMULINK est représentée par la figure 4.10.

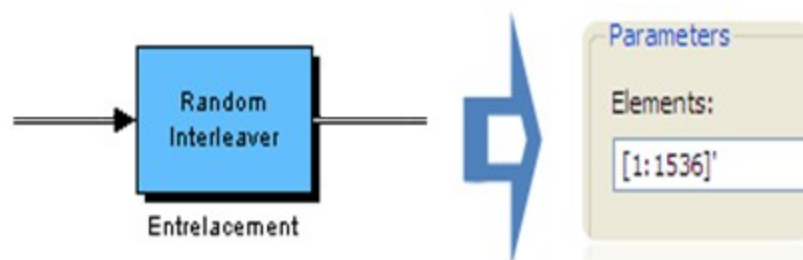


Figure 4.10. La simulation et la boîte de dialogue d'entrelacement.

4.3.5 Modulation mono porteuse

La modulation est une opération de traitement du signal. Il permet d'adapter le signal transmis à un canal de communication.

Les types de modulation utilisés dans la norme *3GPP-LTE*, on trouve la modulation *QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)*, et la modulation *QAM (Quadrature Amplitude Modulation)* qui est résulté de la modulation *ASK (Amplitude Shift Keying)* en utilisant deux porteuses en quadrature [11] :

$$I(t) = I \cos(2\pi f_0 t). \quad (4.1)$$

$$Q(t) = Q \sin(2\pi f_0 t). \quad (4.2)$$

Le type choisi dans cette simulation La Modulation *QAM* avec $M=16$.

Pour simuler cette opération dans l'environnement SIMULINK, on utilise le bloc et les paramètres représentés sur la figure 4.11.

Le bloc *Rectangular 16-QAM* module le signal d'entrée suivant la méthode rectangulaire de modulation d'amplitude de quadrature.

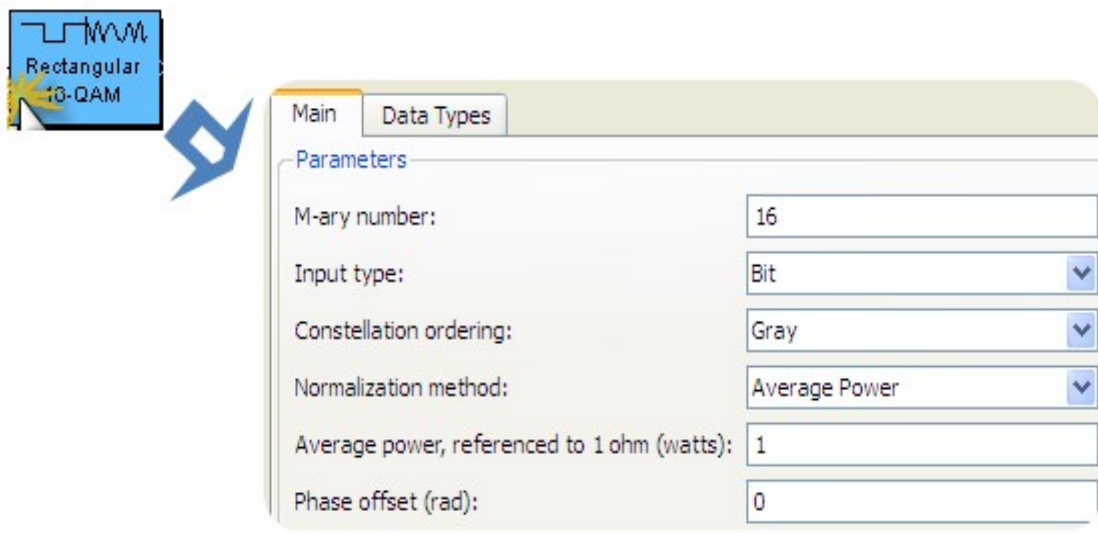


Figure 4.11. La simulation et la boîte de dialogue de modulation mono porteuse.

4.3.6 Mode de localisation des sous porteuses

a Le mode localisé

Dans le mode localisé, aucun zéro n'est inséré entre les échantillons de sortie de la *DFT*, ceux-ci étant donc transposés sur des sous-porteuses consécutives. Comme montré sur la figure 4.12.

b Le mode distribué

Dans le mode distribué, un certain nombre de zéros est inséré entre les échantillons produits par la *DFT* (figure 4.12). Ce mode offre une diversité fréquentielle plus grande.

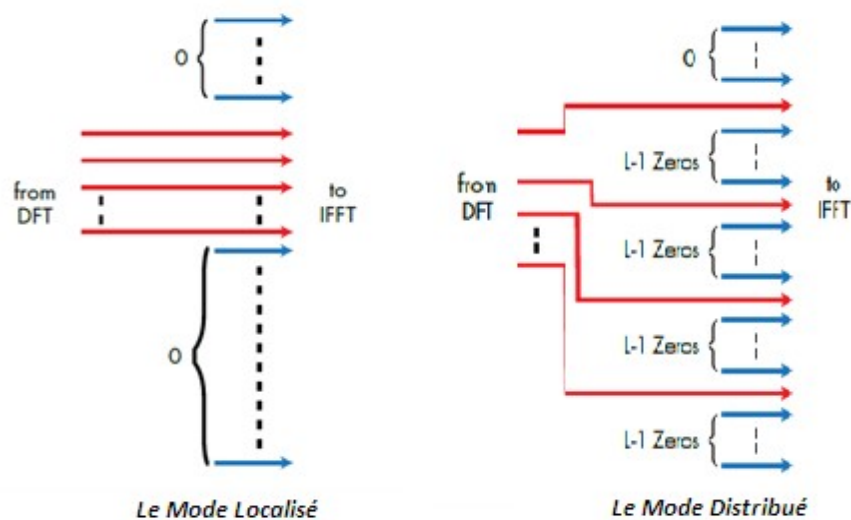


Figure 4.12. Le mode de localisation des sous porteuses.

Pour simuler cette localisation (mode distribué) dans l'environnement SIMULINK, on utilise les blocs, et les paramètres représentés par la figure 4.13.

Le bloc *Constant* : génère les pilotes à insérer (sous porteuses nulles).

Le bloc *Reshape* : fait la conversion série/parallèle des données.

Le bloc *Multiport selector* : fait la division des données à plusieurs parties afin d'insérer les sous porteuses nulles.

Le bloc *Concatenate* : combiné tous les opérations précédant pour réaliser un arrangement de tous les sous porteuses.

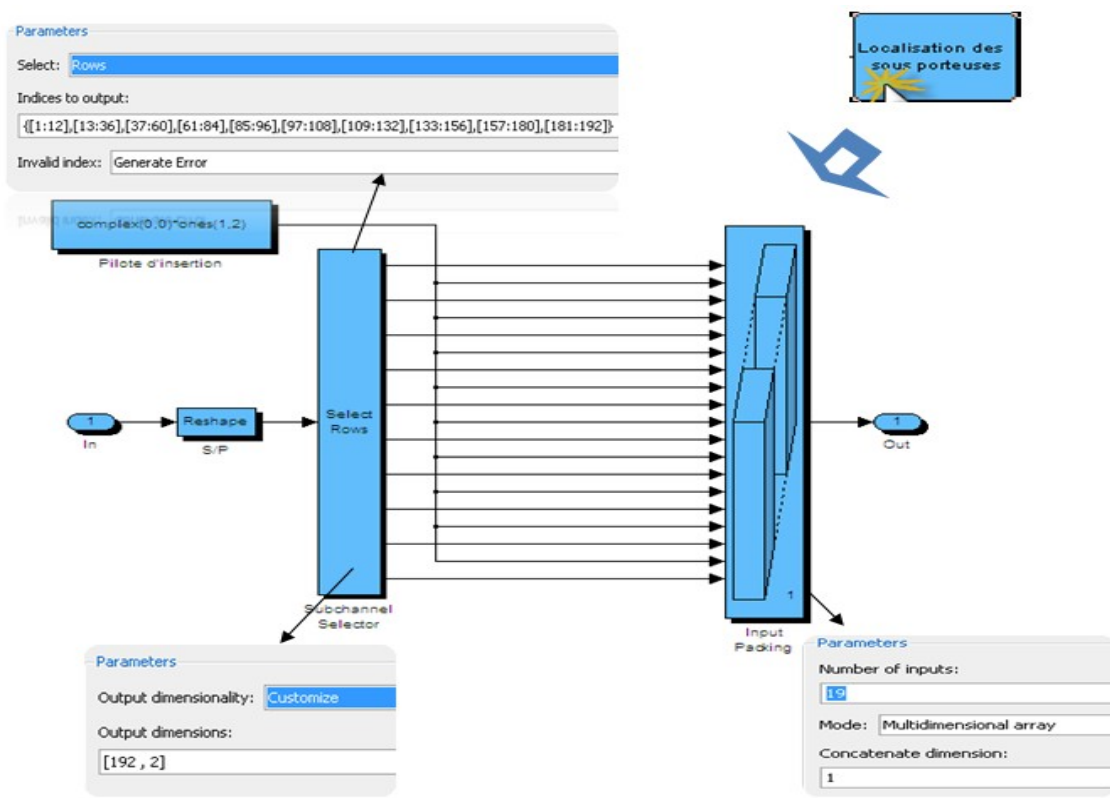


Figure 4.13. La simulation et la boîte de dialogue du mode distribué.

La simulation correspondante au mode localisé est donnée par la figure 4.14 :

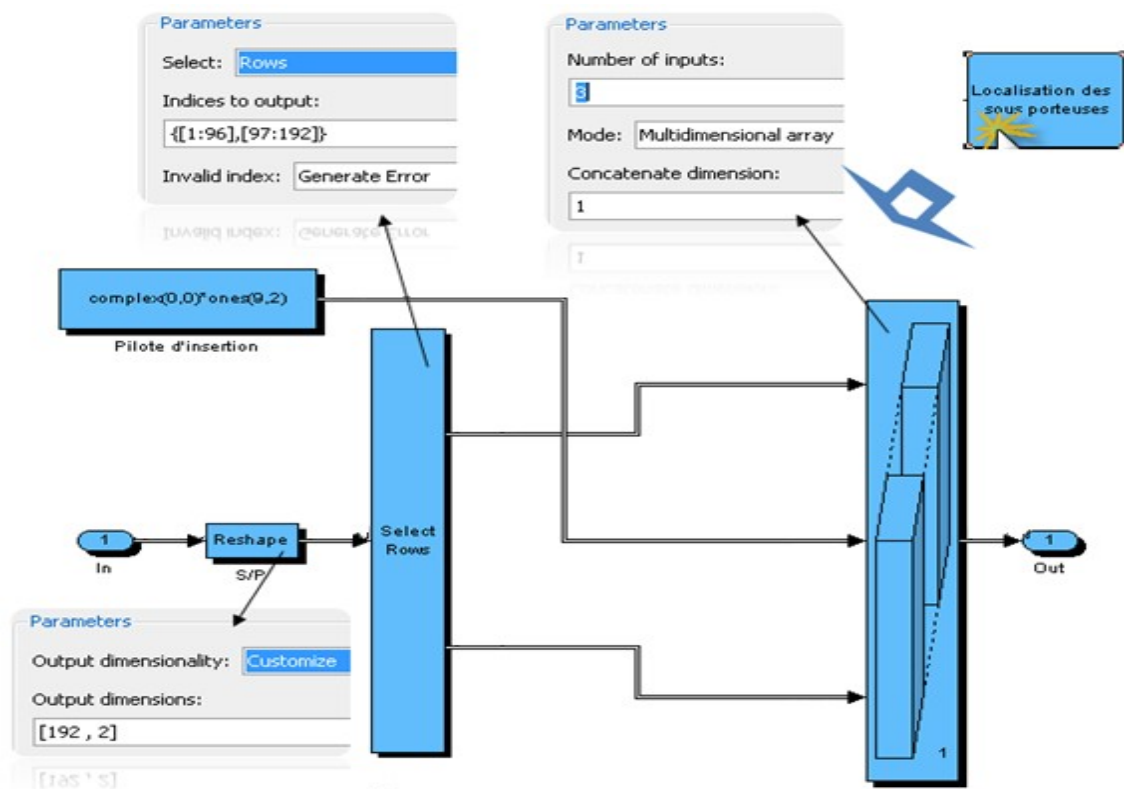


Figure 4.14. La simulation et la boîte de dialogue du mode localisé.

4.3.7 Le codage espace-temps en blocs (système MIMO) [21]

Le codage espace-temps en blocs a été présenté pour la première fois en 1998 dont le but d'améliorer l'efficacité spectrale des systèmes *MIMO* (figure 4.15). Le principe consiste à introduire une redondance d'informations entre les différentes antennes de l'émission et les différentes antennes de la réception. Ce codage améliore ainsi la robustesse pour une même puissance d'émission, et il se fait en prenant en compte les dimensions spatiale et temporelle [21].

A la sortie du codeur espace – temps, les antennes d'émission T_{x1} et T_{x2} envoient respectivement les symboles S_1 et S_2 pendant le premier temps t_1 et les symboles $-S_2^*$ et S_1^* pendant le temps t_2 et les canaux $h_{11}h_{12}h_{21}h_{22}$ sont supposés statistique dans les temps t_1 et t_2 au niveau de récepteur.

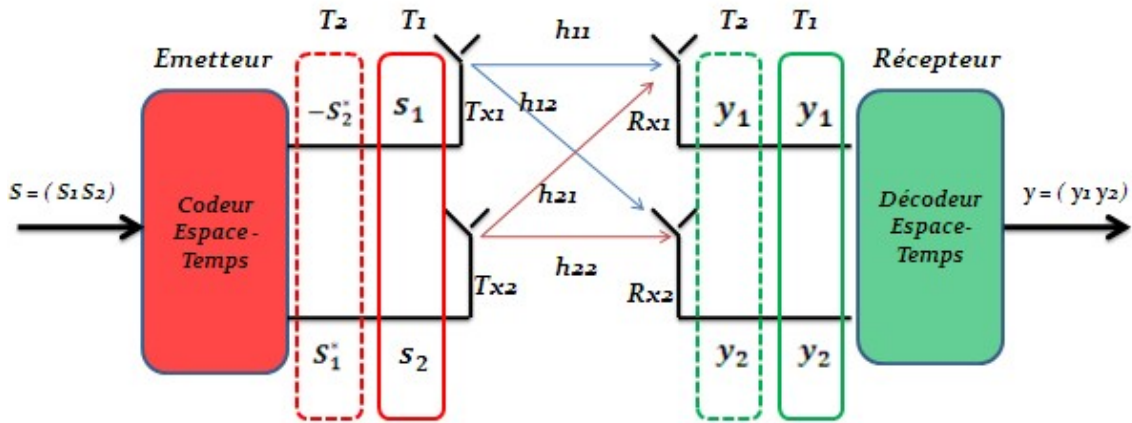


Figure 4.15. La représentation d'un codage espace-temps d'Alamouti (système MIMO).

Au niveau du récepteur, le signal reçu est la combinaison des symboles émis et affectés par les différents canaux comme il est montré par l'équation suivante:

$$y = s \cdot h + b \quad (4.3)$$

Avec : $y = [y_1(1)y_1(2)y_2(1)y_2(2)]^T$ Le vecteur du signal reçu, où $y_1(1)$ et $y_1(2)$ représentent les symboles reçus sur l'antenne R_{x1} pendant t_1 et t_2 respectivement.

De même, $y_2(1)$ et $y_2(2)$ sont les symboles reçus sur l'antenne R_{x2} pendant les deux temps t_1 et t_2 respectivement. $h = [h_{11}h_{12}h_{21}h_{22}]^T$ est le vecteur canal. $b = [b_1(1)b_1(2)b_2(1)b_2(2)]^T$ est le vecteur bruit, et s la matrice des symboles codés :

$$s = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{pmatrix}$$

La simulation de ce codage espace - temps est donnée par la figure 4.16.

Le bloc OSTBC Encoder (*alamoutiCode*) : est utilisé au niveau de l'émetteur pour créer une diversité d'émission sur deux antennes.

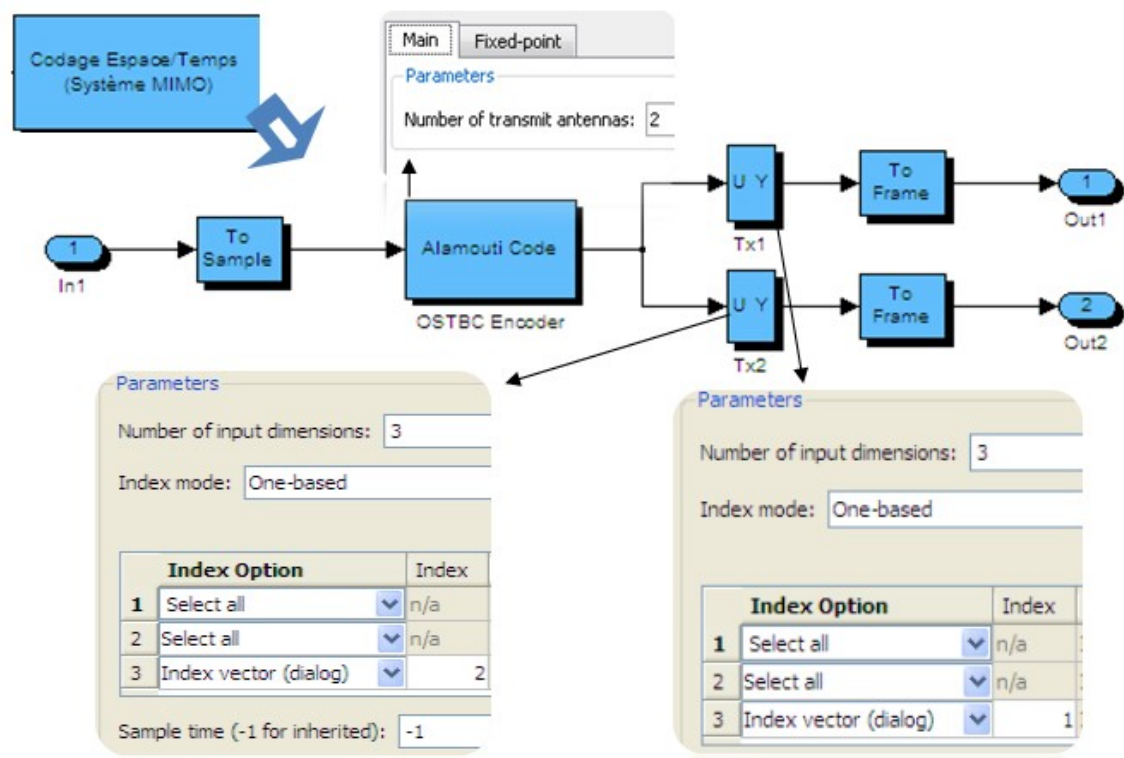


Figure 4.16. La simulation et les boîtes de dialogue de code espace-temps.

4.3.8 Insertion la séquence d'apprentissage et les bandes de garde

[11]

a La séquence d'apprentissage

La séquence d'apprentissage est une séquence bien définie, il est connu par l'émetteur et par le récepteur. Cette séquence est pour objective de faire une estimation du canal et une égalisation au niveau du récepteur. La séquence *CAZAC* (*Constant Amplitude Zero Auto correlation Codes*) est utilisée comme signal de référence pour effectuer l'estimation de canal, et elle est définie par [28] [29].

$$x_{u(m)} = \begin{cases} \exp \left[-\frac{j\pi u m^2}{N_{zc}} \right] & \text{pour } N_{zc} \text{ paire} \\ \exp \left[-\frac{j\pi u m(m+1)}{N_{zc}} \right] & \text{pour } N_{zc} \text{ impaire} \end{cases} ; \quad (4.4)$$

Avec : $N_{zc} = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, N_{zc} - 1$.

Où u est l'index de la séquence (est premier par rapport à N_{zc} : le seul diviseur commun pour u et N_{zc} est 1).

Pour un u fixe, la séquence ZC a une période d'auto-corrélation égal à zéro pour tous les décalages temporels sauf le zéro). Pour u différent, les séquences ZC ne sont pas orthogonales, mais ils présentent une faible corrélation croisée.

b Utilisation de la séquence d'apprentissage

Zadoff-Chu est une séquence utilisée dans la norme *3GPP-LTE* [28] [29] :

- ✓ Dans l'interface de l'air dans le signal de synchronisation primaire (*PSS*)
- ✓ Comme de préambule d'accès aléatoire (*PRACH*)
- ✓ pour les réponses *HARQACK* / *NACK* (*PUCCH*) et de détection de référence signal (*SRS*).

c Les bandes de garde

Ce sont l'ensemble des sous porteuses nuls à insérer sur les deux coté des symboles *OFDMA* ou *SC-OFDMA*. Ils sont pour objective de minimiser l'interférence entre les symboles.

L'opération d'insertion de la séquence d'apprentissage est représentée par la figure 4.17.

Le bloc *Concatenate* : est pour objective d'enchaîner deux ou plusieurs entrées vers une seul sortie.

Le bloc *Constant* : est pour génère les sous porteuses nulles et la séquence d'apprentissage.

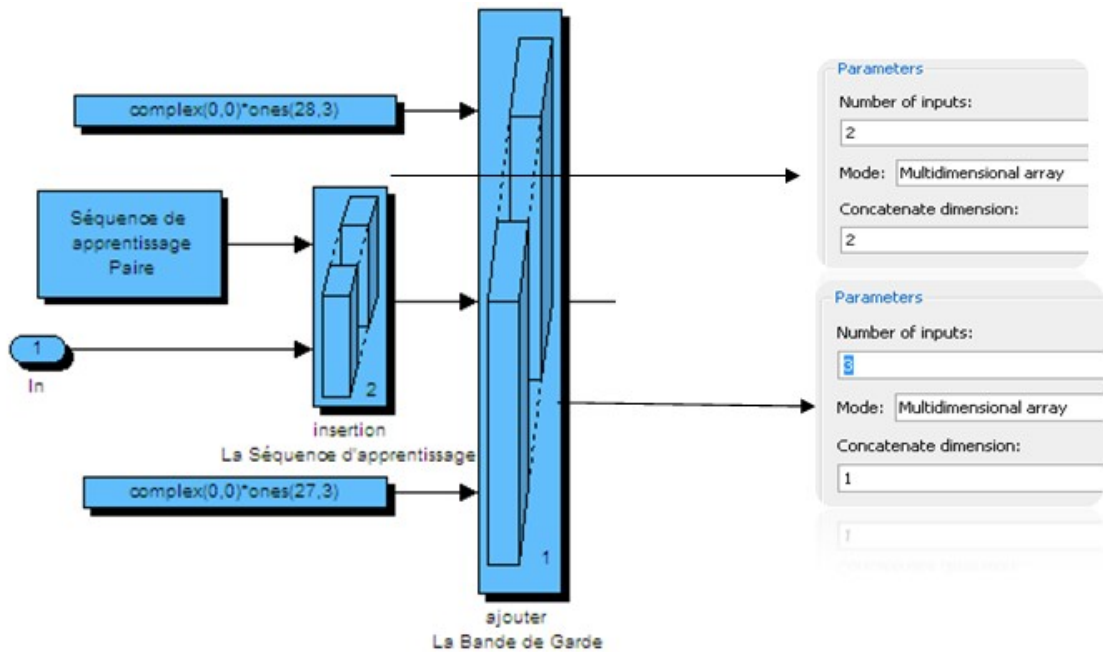


Figure4.17. La simulation et la boîte de dialogue d’Insertion la séquence d’apprentissage et les bandes de garde.

4.3.9 L’opération “ IFFT ”

La simulation de l’opération *IFFT* dans l’environnement SIMULINK est basée sur le bloc et les paramètres représentés sur la figure 4.18.

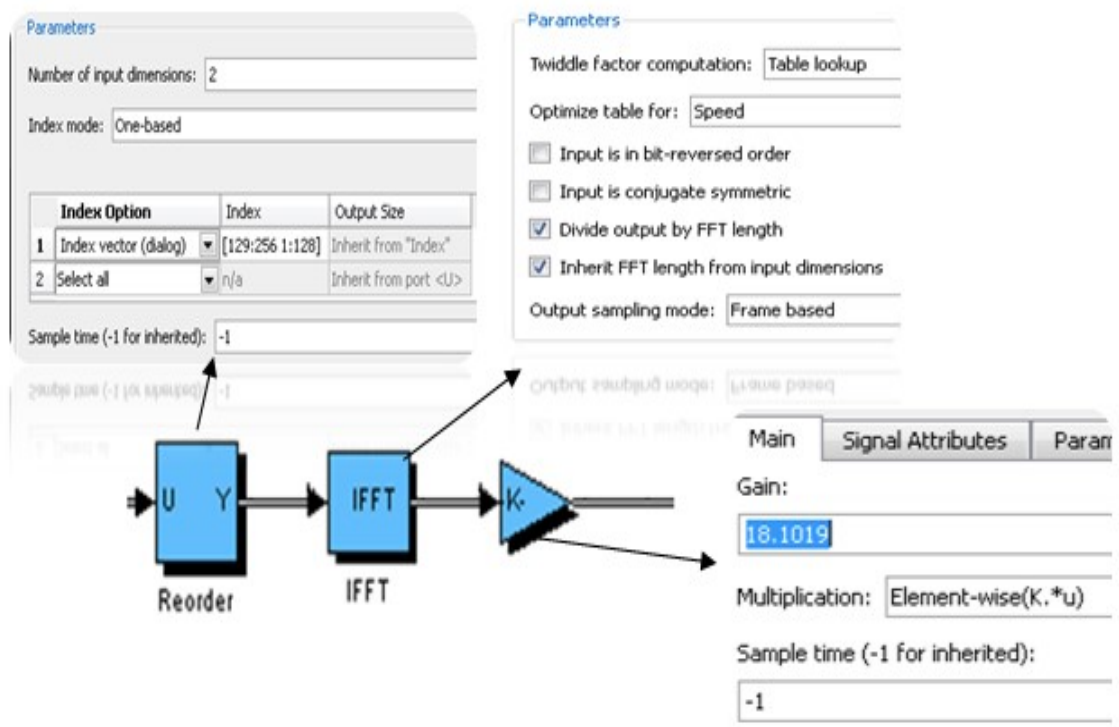


Figure4.18. La simulation et la boîte de dialogue d’opération *IFFT*.

Le bloc *IFFT* : est utilisé pour faire la translation entre les deux domaines (le temps et la fréquence)

4.3.10 Insertion du préfixe cyclique (CP)

a Préfixe cyclique

La durée ajoutée aux symboles *OFDMA* améliore le délai de propagation tandis que l'interférence entre symboles (*ISI*) est complètement éliminée par l'introduction d'un préfixe cyclique (certaines données). Le *CP* (figure 4.19) est une répétition des derniers échantillons de la portion de données qui est ajouté au début de la charge utile de données. L'*ISI* est complètement éliminée quand la durée des *CP* est plus longue que le retard du canal se propager. Un inconvénient du *CP*, c'est qu'elle introduit des frais généraux, ce qui réduit efficacement l'efficacité de bande passante. Étant donné que le spectre de puissance du signal *OFDMA* a une chute brutale au large au bord du canal, une plus grande fraction de la bande passante du canal allouée peut être utilisée pour la transmission de données qui compensent la perte de l'efficacité grâce au préfixe cyclique [11] [28] [29].

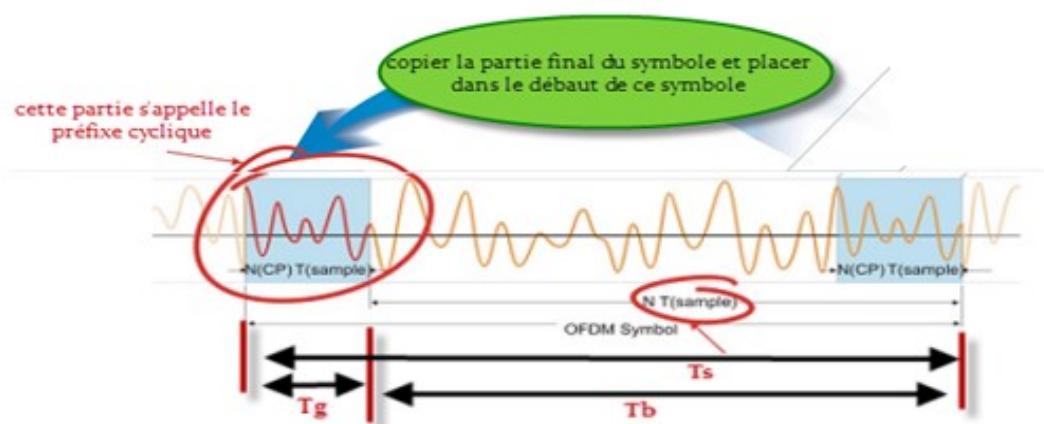


Figure 4.19. Le cyclique préfixe.

Où la longueur totale du symbole peut être écrite par:

$$T_s = T_g + T_b \quad (4.5)$$

T_s : est la longueur totale du symbole dans les échantillons.

T_g : est la durée de la période de garde dans les échantillons.

T_b : est la taille de l'IFFT utilisée pour générer le signal OFDM, représente le temps de symbole utile.

Le préfixe cyclique permet principalement d'éliminer les interférences qui pourraient provoquer des erreurs à la réception. Il existe deux types d'interférences [11] [29] :

- ✓ Interférences entre sous-porteuses appelées *ICI*, (*Inter Carrier Interferences*)
- ✓ Interférences entre symboles, *ISI*, (*Inter Symbol Interferences*)

b Interférences entre sous-porteuses

On élimine ces interférences en imposant l'orthogonalité entre les sous-porteuses. L'orthogonalité est la propriété fondamentale qui permet de transmettre des signaux multiples sur une même ligne et de les détecter sans interférences [29].

c Interférences entre symboles

Les interférences entre trames apparaissent sur le canal, c'est-à-dire au moment où les N symboles sont transmis en parallèle, sur les N sous-porteuses. Chaque symbole va subir sur sa porteuse des échos, inévitables dès le moment où l'on transmet un signal dans un canal non parfait. Mais ce phénomène va engendrer des interférences, les signaux vont se propager non seulement suivant un trajet direct, mais aussi suivant des trajets dits multiples, le signal reçu sera la contribution de tous ces signaux. Les trajets multiples vont perturber les trames suivantes, c'est pourquoi l'insertion d'un intervalle de garde entre celles-ci est indispensable.

Cet intervalle de garde (*CP*) a une durée Δ , supérieure au plus grand retard de tous les signaux issus des trajets multiples. Pour être précis, il faut bien dire que cet intervalle de garde Δ est ajouté au début de chaque symbole [29] [28].

L'opération d'insertion du préfixe cyclique est représentée par la figure 4.20.

Le bloc *Selector* : est utilisé pour objective de copier la dernière partie de chaque symbole et la recoller au début du symbole suivant.

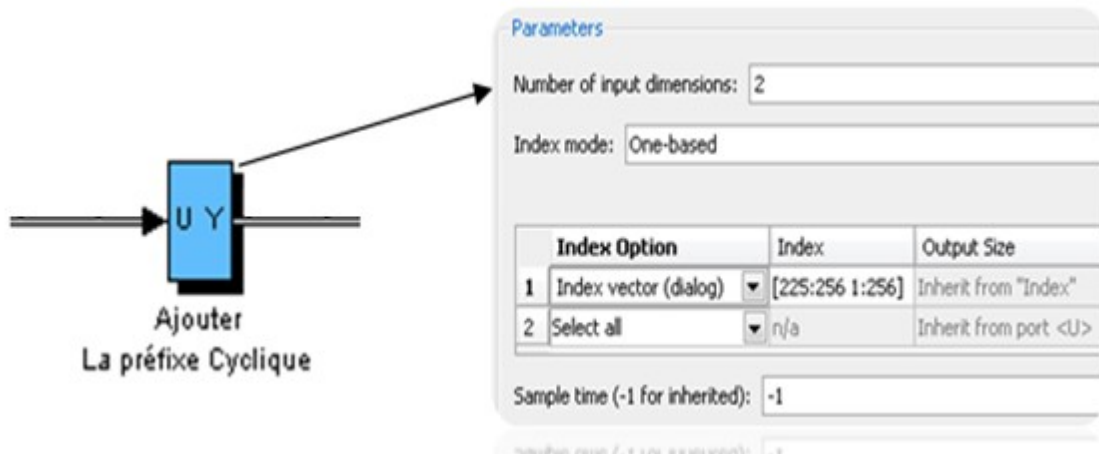


Figure 4.20. La simulation et la boîte de dialogue d’insertion du préfixe cyclique.

4.3.11 La conversion parallèle/série

La simulation de cette opération dans l’environnement SIMULINK est basée sur le bloc et les paramètres représentés sur la figure 4.21.

Le bloc Rechape : est utilisé pour la conversion parallèle/série



Figure 4.21. La simulation et la boîte de dialogue de conversion parallèle vers série.

4.3.12 Canal de propagation

Il existe deux types de canaux de propagation [9] :

➤ Canal à bande étroite

Il est caractérisé par :

- ✓ les signaux arrivent quasiment en même temps.
- ✓ pas d’étalement temporel.
- ✓ canal plat en fréquences.

➤ Canal à large bande

Ce canal est Caractérisé par :

- ✓ retards relativement grands entre signaux.
- ✓ canal sélectif en fréquences.

Les modèles des canaux utilisés en transmission numérique sont :

a Canal Gaussien (AWGN) (Additive White Gaussian Noise)

Le canal *Gaussien* ou *AWGN* est utilisé pour représenter les bruits d'origine interne comme le bruit thermique provoqué par les composants électronique et les amplificateurs au niveau du récepteur, et le bruit d'origine externe comme le bruit d'antenne (figure 4.22).

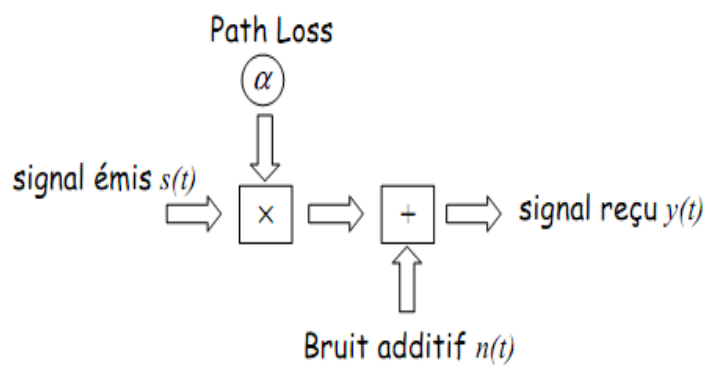


Figure 4.22. Le modèle de canal Gaussien.

A partir le figure 4.22, le signale reçu s'écrit de la façon suivante [9] :

$$y(t) = \alpha s(t) + n(t) \quad (4.6)$$

$\alpha(t)$: variable aléatoire gaussienne complexe de moyenne nulle

$r(t)=|\alpha(t)|$: variable de Rayleigh, de densité de probabilité :

$$P(r) = \frac{r}{2\sigma^2} \exp \left[\frac{-(r)^2}{2\sigma^2} \right], r \geq 0 \quad (4.7)$$

❖ Les caractéristiques d'un canal *AWGN*

- ✓ Canal le plus simple et plus facile à générer et à analyser
- ✓ *Path Loss + Shadowing*
- ✓ Atténuation invariante par rapport au temps

- ✓ Pas de multi-trajet
- ✓ densité spectrale de puissance $G_n(f)$ est la même pour toutes les fréquences d'intérêt dans la plupart des systèmes de communication. la fonction $G_n(f)$ est donnée par l'équation suivante [9] :

$$G_n(f) = \frac{N_0}{2} \text{ Watts/hertz} \quad (4.8)$$

$$P(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(n-a)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4.9)$$

Ou σ^2 est la variance de $n(t)$ et a représente la valeur moyenne de bruit.

La simulation d'un canal *AWGN* dans l'environnement SIMULINK est donnée par le bloc et les paramètres représenté sur la figure 4.23.

Le bloc *AWGN Channel*: est utilisé pour simuler le canal AWGN.

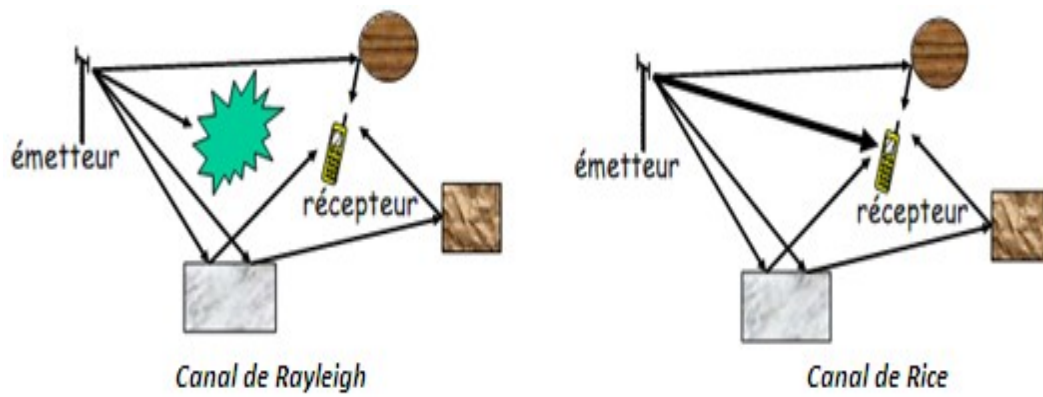


Figure 4.23. La simulation et la boîte de dialogue de canal *AWGN*.

b Canal multi-trajets

Dans ce cas, on a deux types de propagation (figure 4.24) [9]:

- ✓ Pas de ligne de vue (propagation NLOS) : Canal de *Rayleigh*
- ✓ Existence d'une ligne de vue (propagation LOS) : Canal de *Rice*



Figure

4.24. Canaux multi-trajets.

➤ Modèle de Rayleigh

On peut représenter le modèle de *Rayleigh* par l'équation suivant :

$$y(t) = \alpha(t)s(t) + n(t) \quad (4.10)$$

$\alpha(t)$: Variable aléatoire gaussienne complexe de moyenne nulle.

$r(t) = |\alpha(t)|$: Variable de Rayleigh

La distribution de *Rayleigh* est obtenue en additionnant un grand nombre de composantes indépendantes, ayant des phases uniformément distribuées dans l'intervalle $[0, 2\pi]$. La fonction de densité de probabilité de cette distribution est donnée par (figure 4.25):

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r \leq \infty) \\ 0 & (r < 0) \end{cases} \quad (4.11)$$

Où σ^2 représente la puissance moyenne temporelle de signal reçu.

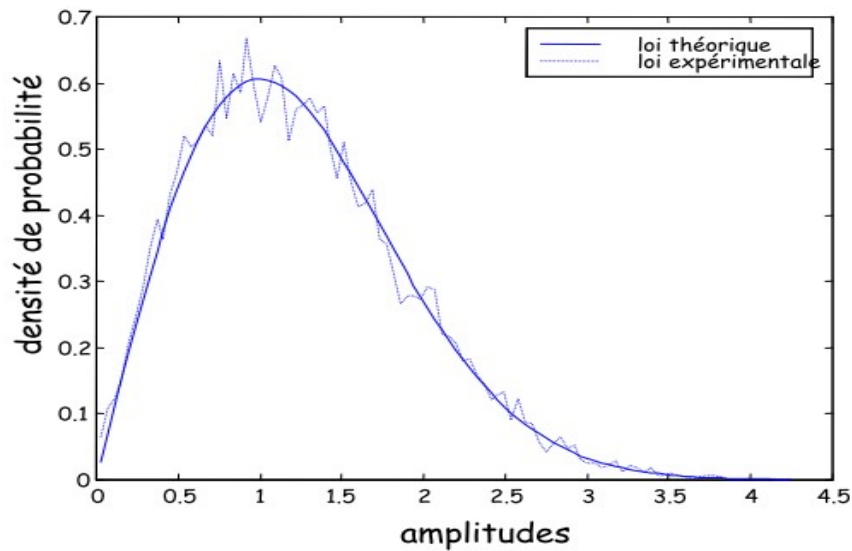


Figure 4.25. La densité de probabilité de modèle *Rayleigh*.

➤ **Modèle de Rice**

Le modèle de *Rice* est une propagation *LOS* c.à.d. que le signal direct est plus puissant que les autres signaux. Ce modèle est donné par l'équation suivant :

$$y(t) = \alpha(t)s(t) + n(t) \quad (4.12)$$

$\alpha(t)$: Variable aléatoire gaussienne complexe de moyenne non-nulle

$r(t) = |\alpha(t)|$: Variable de *Rice*.

La simulation du canal *Rice* dans l'environnement SIMULINK est montrée par la figure 4.26.

Le bloc *Rician Fading* : présente le canal *Rice* (multi-trajets) dans l'environnement *SIMULINK*.

Le bloc *sum* : pour faire l'opération d'addition sur les signaux arriver aux niveaux d'antenne

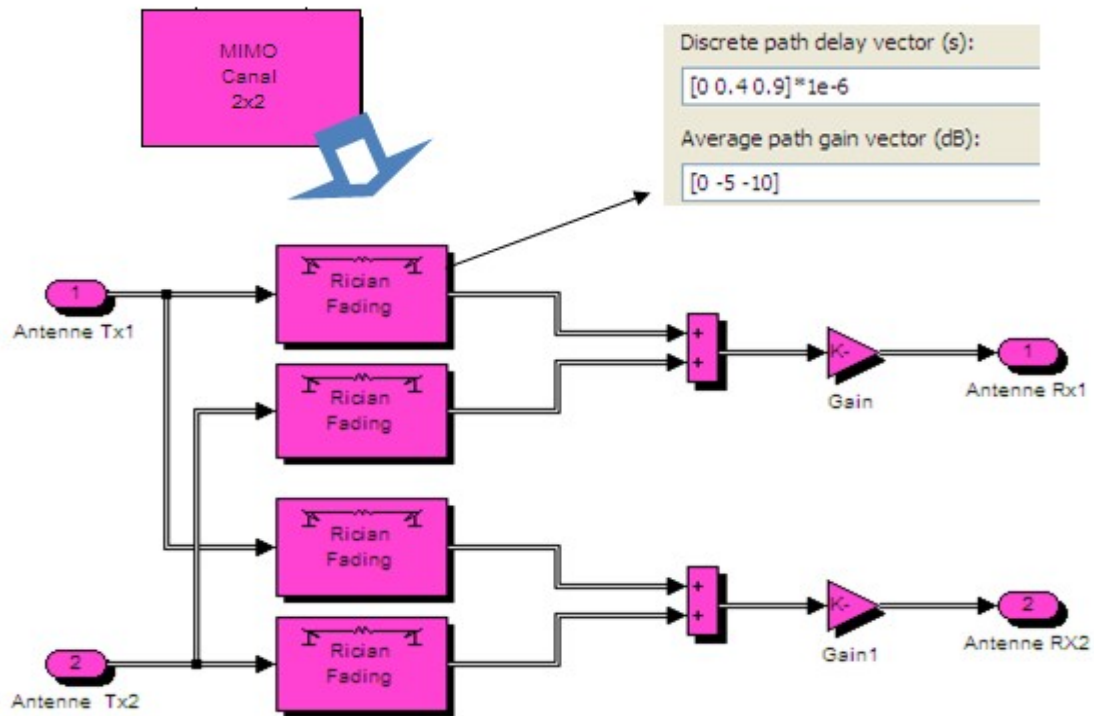


Figure 4.26. La simulation et la boîte de dialogue de canal *Rice*.

c Effet Doppler [9] [29]

L'effet *Doppler* est un décalage de la fréquence dû au déplacement comme il est montré par la figure 4.27.

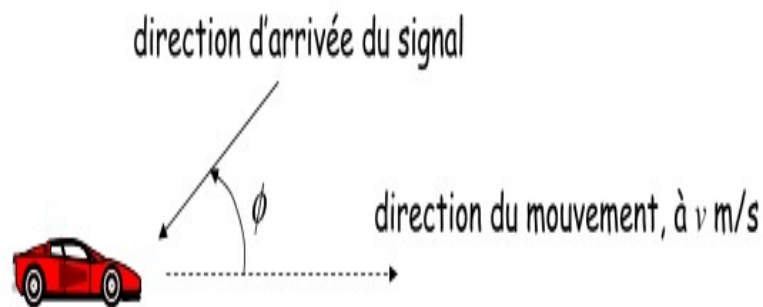


Figure 4.27. La représentation de l'effet *Doppler*.

La fréquence Doppler est donnée par les équations suivantes :

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos \phi = f \frac{v}{c} \cos \phi = f_m \cos \phi \quad (4.13)$$

$$f_m = f \frac{v}{c} = (\text{maximum du décalage Doppler}) \quad (4.14)$$

Chaque composante du multi-trajet est subie à l'effet *Doppler* implique étalement du spectre du signal.

❖ Spectre *doppler*

Il existe deux modèles du spectre Doppler qui sont :

- ✓ **Le modèle de *Clarke* (le plus courant)** : ϕ uniforme sur $[-\pi, +\pi]$

$$S_{\alpha}(f) = \begin{cases} \frac{1.5}{\pi f_m \sqrt{1-(f/f_m)^2}}, & |f| < f_m \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (4.15)$$

- ✓ **Le modèle pas toujours valable** : (faibles distances c.à.d. ϕ non-uniforme), mais bonne approximation

❖ Conséquence de l'effet *Doppler*:

- ✓ **Auto corrélation (normalisée) du fading de *Rayleigh*** :

$$p_{\alpha}(\tau) = \frac{E[\alpha(t)\alpha^*(t-\tau)]}{E[|\alpha(t)|^2]} = J_0(2\pi f_m \tau) \quad (4.16)$$

- ✓ **Temps de cohérence T_c** : temps pendant lequel le canal est constant.

$$\text{Tel que : } P_{\alpha}(T_c) = 0.5 \quad (4.17)$$

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_m} \quad (4.18)$$

Conséquences : La vitesse élevée implique variations rapides du canal.

4.4 Simulation de la réception de chaîne *OFDMA* et *SC-FDMA*

4.4.1 La conversion série /parallèle et la suppression du préfixe

cyclique

Les données reçues sont subies aux opérations suivantes : conversion série /parallèle S/P, et la suppression du préfixe cyclique. La figure 4.28 représente la simulation de ces deux opérations dans l'environnement *SIMULINK* en utilisant les blocs et les paramètres suivants :

Le bloc *Rechape* : est utilisé pour la conversion Série / Parallèle.

Le bloc *Selector* : est utilisé pour la suppression du préfixe cyclique.

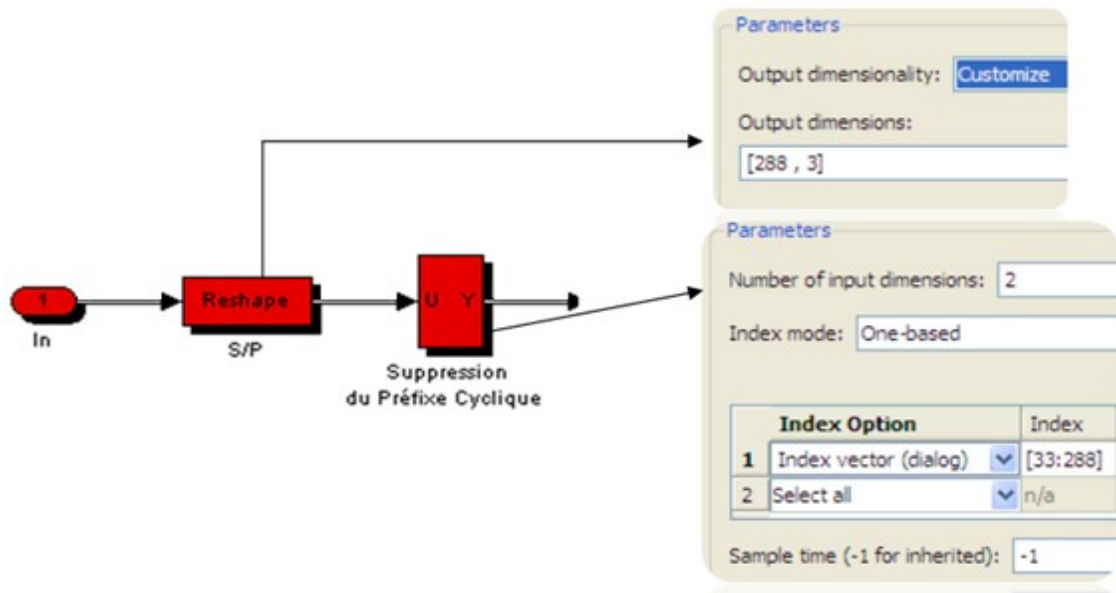


Figure 4.28. La simulation et les boîtes de dialogue de La conversion Série/Parallèle et suppression du préfixe cyclique.

4.4.2 L'opération 'FFT'

L'opération *FFT* permet de faire la translation temporelle/fréquentiel (figure 4.29).

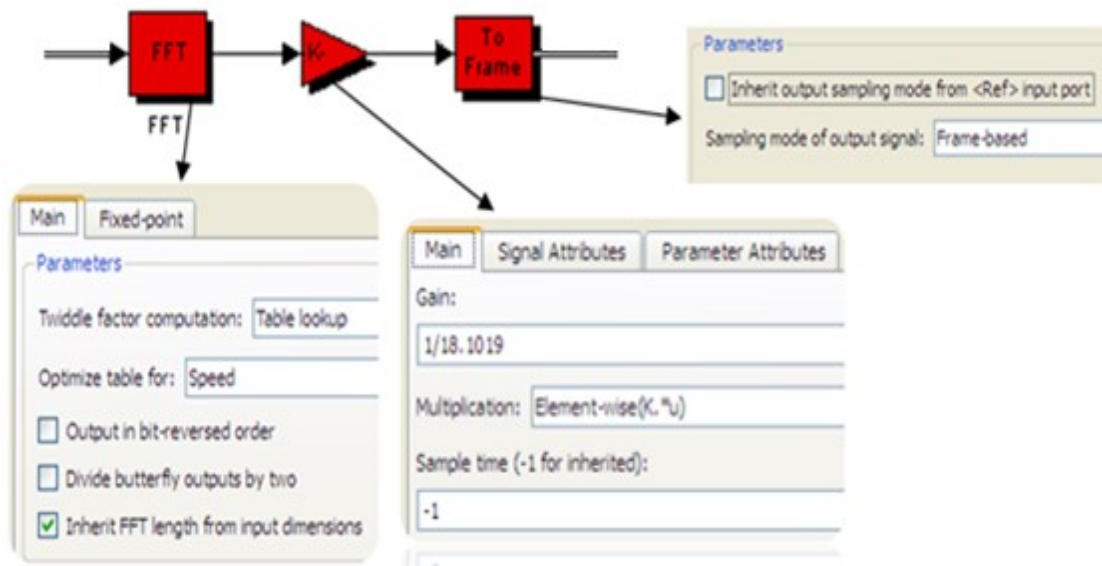


figure 4.29. La simulation et la boîte de dialogue de l'opération *FFT*.

4.4.3 Suppression des bandes de garde

Après l'opération de la *FFT*, il est nécessaire d'enlever les sous porteuses nulles (figure 4.30) correspondantes aux les intervalles de garde au début et à la fin de chaque symbole.

Le bloc *Selector* : utiliser pour objective de sélectionner et modifier d'un intervalle.

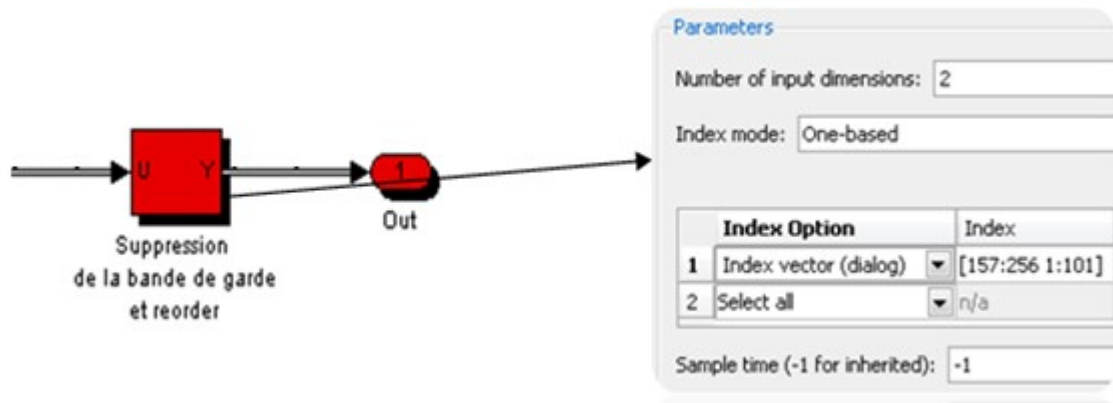


Figure 4.30. La simulation et la boîte de dialogue de la suppression de la bande de garde.

4.4.4 Suppression les pilotes d'insertion (le mode de localisation des sous porteuse)

Dans cette étape, il est nécessaire d'enlever les sous porteuses nulles correspondantes aux les pilotes d'insertion que nous avons ajouté dans l'étape de l'émission puis faire la conversion parallèle série (figure 4.31).

Le bloc *Selector* : est utilisé pour séparer les données utiles et la suppression des pilotes des insertions.

Le bloc *Rechape* : est pour faire la conversion parallèle /série.

Le bloc *Terminator* : capte les bits non utilisés.

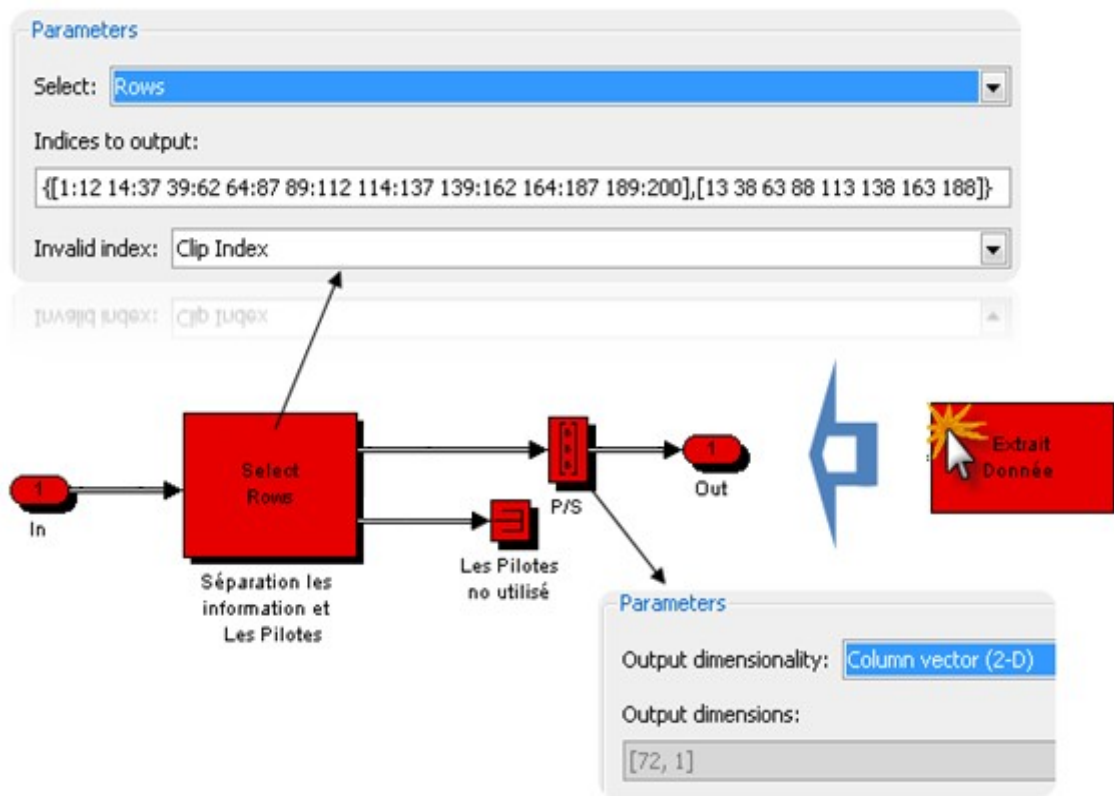


Figure 4.31. La simulation et la boîte de dialogue de la suppression des pilotes d’insertion.

4.4.5 Estimation de canal [9] [27] [29]

➤ **Intérêts :**

- ✓ Permet de l'utilisation de certains algorithmes d'égalisation qui nécessitent la connaissance du canal ;
- ✓ permet de l'utilisation de certains algorithmes de détection de symboles qui nécessitent la connaissance du canal (notamment à la réception).

➤ **les deux types d'estimation possibles :**

- ✓ *fixe* : pour les canaux fixes (non-sélectifs dans le temps)
- ✓ *adaptive* : pour canaux variables (sélectifs en temps)

➤ **les deux stratégies d'estimation :**

- ✓ avec séquence d'apprentissage (le plus utilisé)
- ✓ sans séquence d'apprentissage (les techniques aveugles (complexes))

➤ **Estimation adaptive avec séquence d'apprentissage :**

- ✓ Principe :

Le principe est de faire une mise à jour permanente des coefficients du filtre permettant pour minimiser l'erreur entre la sortie de l'égaliseur et le signal de

référence (séquence d'apprentissage), par l'émission d'une séquence d'apprentissage connue par le récepteur.

4.4.6 Décodage espace/temps et estimation de canal

La simulation de cette opération est montrée dans la figure 4.32.

Le bloc *OSTBC Combiner* : est utilisé au niveau du récepteur pour combiner les données reçus suivant les différents canaux de transmissions.

Le bloc *Multiport Selector* : fait la séparation entre les données et les séquences d'apprentissages.

Le bloc *Selector* : pour les opérations de sélection et suppression des éléments dans un vecteur.

Le bloc *Concatenate* : fait les opérations de modification sur les matrices.

Le bloc *Product* : fait l'opération de la division et le produit.

Le bloc *Frame Conversion* : fait la conversion entre les deux modes des données *sample-based* et *frame-based*.

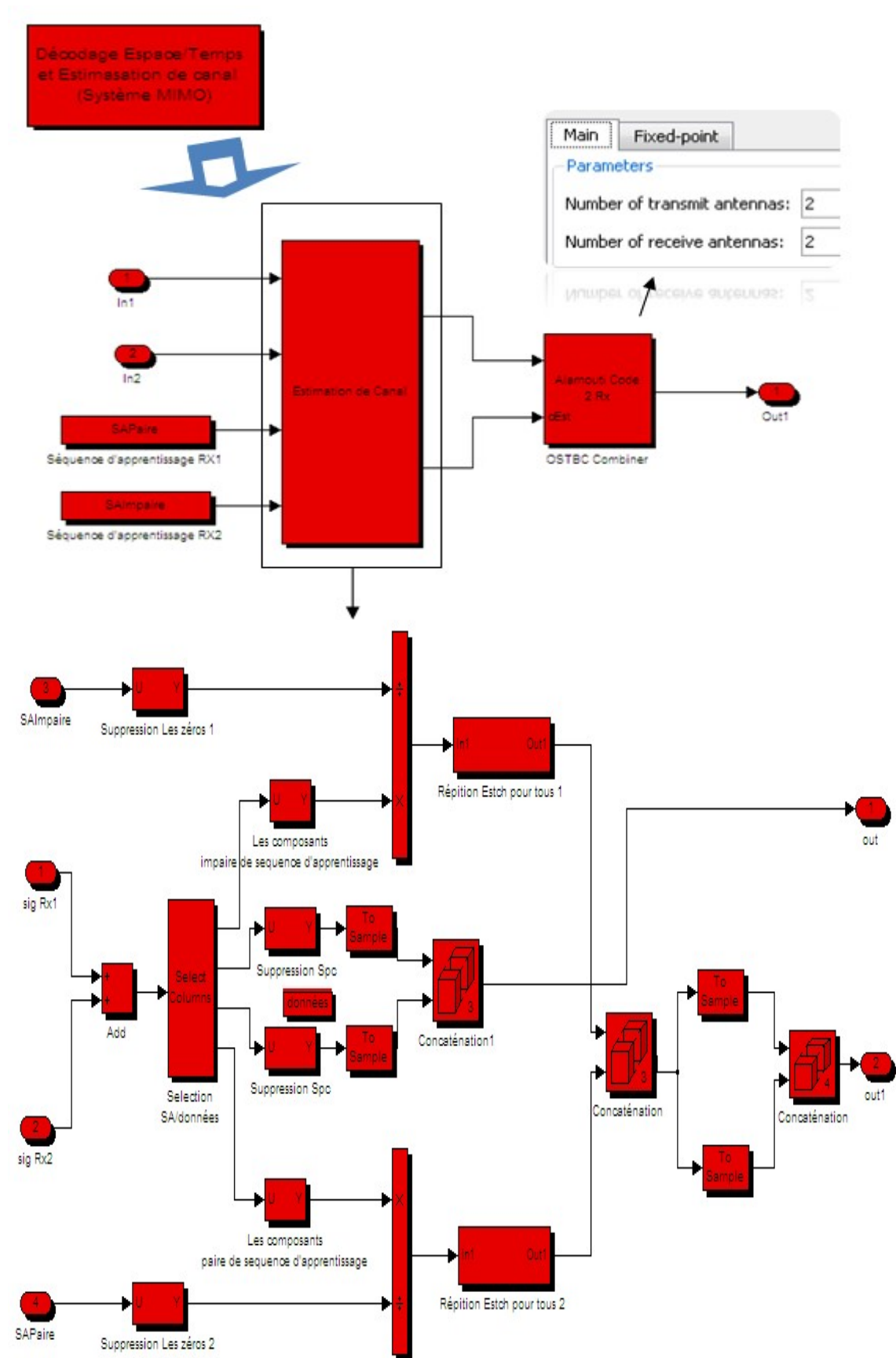


Figure 4.32. La simulation de l'estimation de canal et du décodage espace/temps.

4.4.7 Démodulation mono porteuse

Cette opération permet de convertir les données codées qui existent sous la forme complexe à la forme d'origine, par une estimation du symbole binaire transmis qu'elle s'appelle la décision métrique. Cette décision métrique peut effectuer selon deux méthodes [9] [27] :

a Décision matérielle

Dans cette méthode en calculant la distance minimale entre le symbole reçu et les points de la constellation:

$$d_{\varepsilon} = |y - h_s| \quad (4.19)$$

Avec d_{ε} est la distance euclidienne, y est le symbole reçu, h_s est le coefficient du canal et s est le symbole transmis.

La décision métrique est la plus petite distance euclidienne.

b Décision logiciel

Cette décision est basée sur le calcul du rapport de log-vraisemblance (LLR) pour chaque bit du symbole reçu:

$$LLR(b_k) \approx Ln \frac{\max_{s/b_k=1} \exp\left(-\frac{1|h_s-y|^2}{2\sigma_v^2}\right)}{\max_{s/b_k} \exp\left(-\frac{1|h_s-y|^2}{2\sigma_v^2}\right)} \quad (4.20)$$

σ_v^2 : La variance de bruit dans signal.

Dans cette méthode en calculant la différence des distances minimales entre le symbole reçu et tous les points de la constellation pour $b_k=1$ et $b_k=0$:

$$LLR(b_k) = \min_{s/b_k=1} |h_s - y|^2 - \min_{s/b_k=0} |h_s - y|^2 \quad (4.21)$$

Plus la valeur absolue de LLR est grande, plus la probabilité d'une interprétation correcte est grande. Une valeur négative du LLR correspond à un « 1 », une valeur positive correspond à un « 0 ».

La simulation de l'opération de démodulation *16-QAM* dans l'environnement SIMULINK est montrée par la figure 4.33.

Le bloc *Rectangular 16-QAM* : joue le rôle d'un démodulateur mono-porteuse.

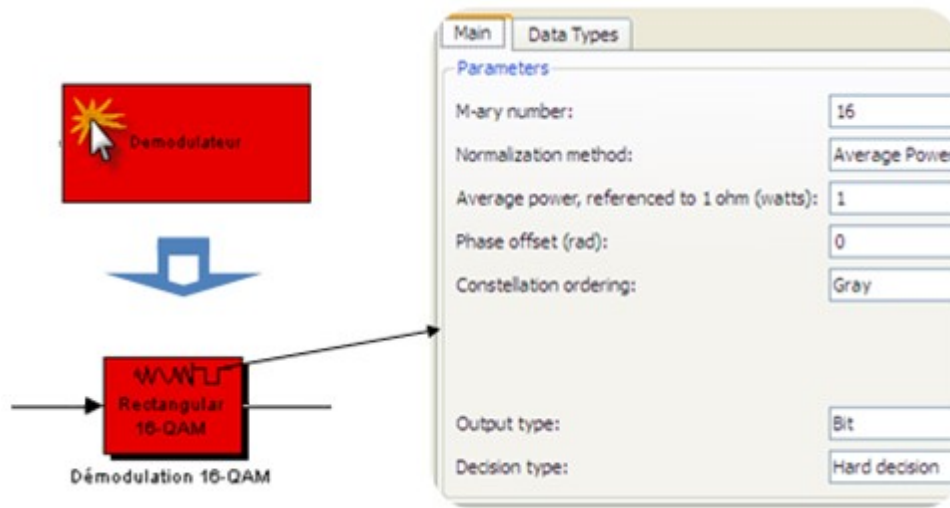


Figure 4.33. La simulation et la boîte de dialogue de démodulation *16-QAM*.

4.4.8 Dés-entrelacement

Le dés-entrelacement (figure 4.34) est opération inverse de l'entrelacement.

Le bloc *Random Deinterleaver* : permet de faire l'opération du dés-entrelacement dans l'environnement SIMULINK.

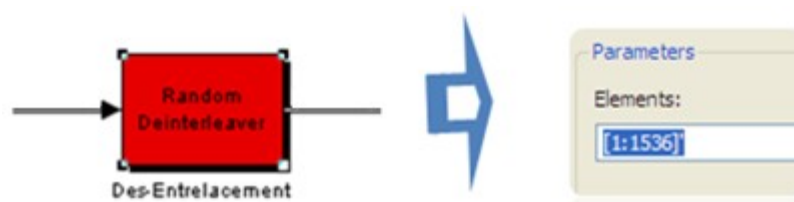


Figure 4.34. La simulation et la boîte de dialogue de dés-entrelacement.

4.4.9 Décodage canal

Le décodage canal permet de restituer l'information binaire utile codée lors de l'émission. L'algorithme de *Viterbi* est l'algorithme probabiliste le plus utilisé pour le décodage des codes convolutifs. Le principe de l'algorithme de *Viterbi* est de déterminer à partir des distances de *Hamming* entre les différents mots de codes, la

probabilité de chaque séquence issue du diagramme en treillis Ainsi, plus la distance de *Hamming* est élevée, plus la séquence la plus probable se distingue.

La correction est d'autant plus efficace quand la distance de *Hamming* minimale du code est élevée, ce qui est en accord avec la définition du pouvoir de correction du code. Cette technique de correction d'erreurs est basée sur le critère du maximum de vraisemblance ML (*Maximum Likelihood*).

Le bloc *Viterbi Decoder*: décode des symboles d'entrée pour produire des symboles de sortie. Ce bloc peut traiter plusieurs symboles à la fois pour des performances plus rapides (figure 4.35).

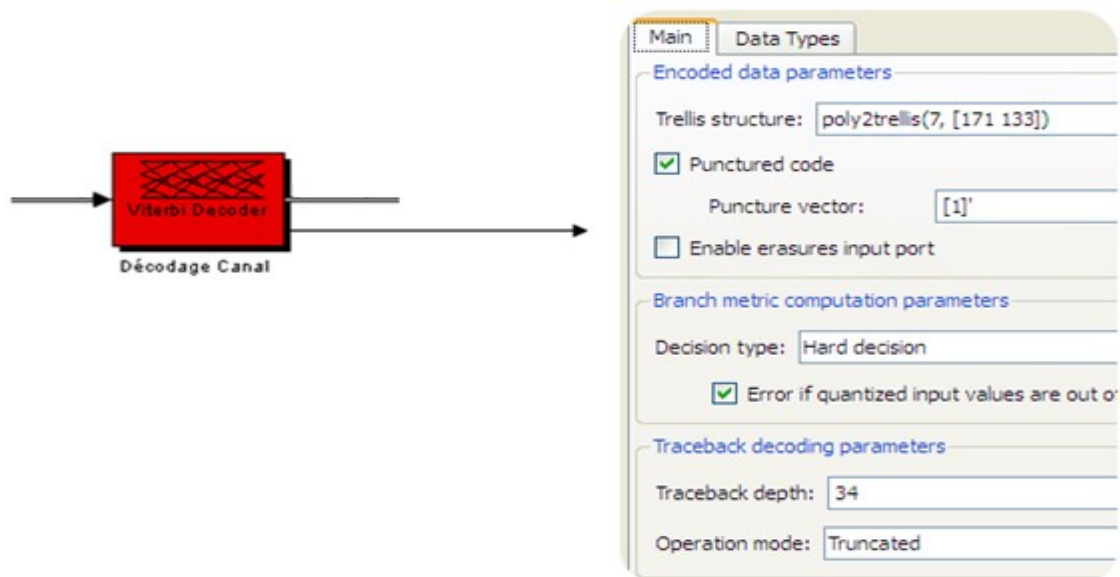


Figure 4.35. La simulation et la boîte de dialogue de décodage canal.

4.4.10 Calcul de TEB (taux d'erreur binaire)

La connaissance de *TEB* est la chose la plus importante dans chaque étude, et le taux d'erreur binaire est le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits Transmis

$$TEB = \frac{\text{le nombre de bits erroné}}{\text{le nombre de bits Transmis}} \quad (4.22)$$

Le bloc *Error Rate Calculation* sert à compter les bits ou les symboles erronés par rapport à ceux de l'information émise, il produit à sa sortie les trois valeurs qui s'affichent par le bloc *Bit Error Rate Display* (figure 4.36):

- ✓ le taux d'erreur qui correspond au rapport entre le nombre total des erreurs et le nombre total des bits testés.
- ✓ Le nombre total des erreurs produites
- ✓ le nombre total des bits d'informations reçues.

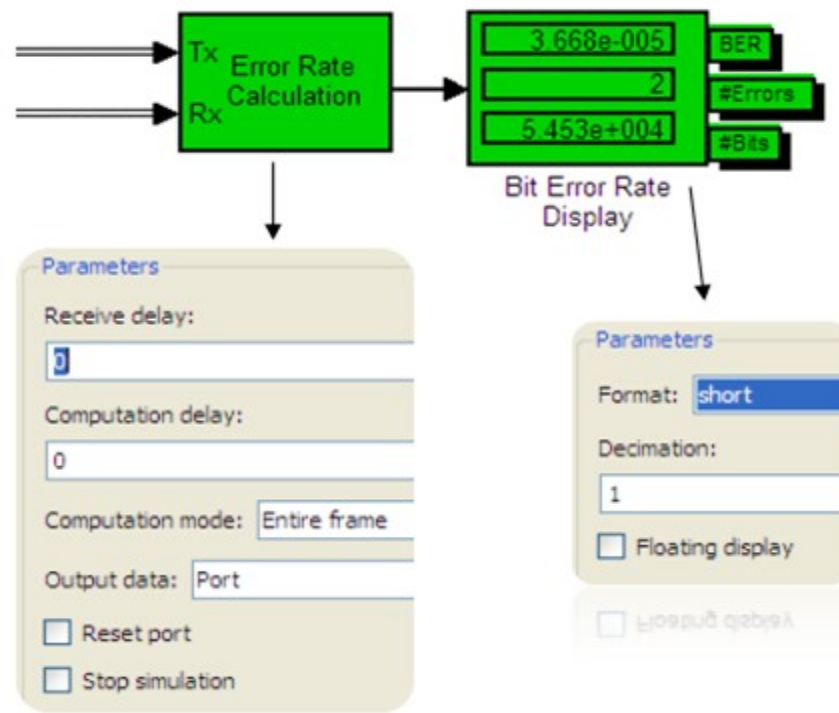
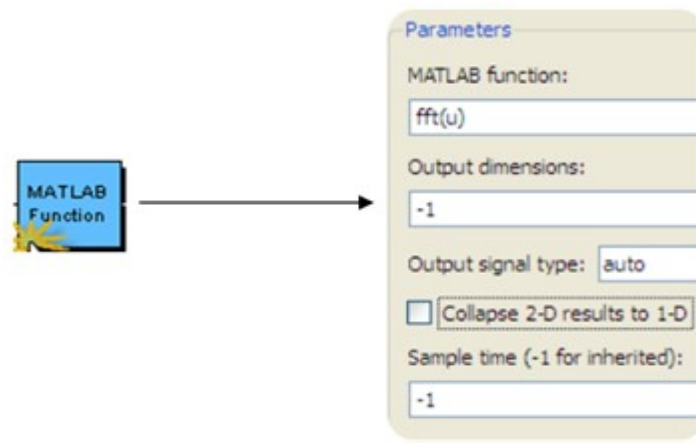


Figure 4.36. La simulation et la boîte de dialogue du calcul de *TEB*.

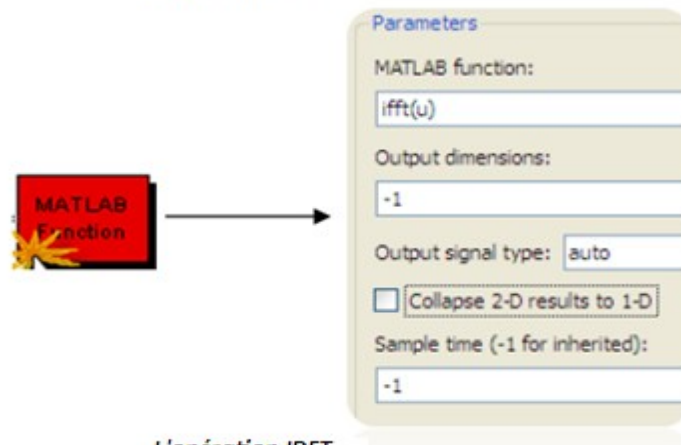
4.4.11 SC-FDMA (La Liaison montante)

La technique *SC-FDMA* est la méthode d'accès dans la liaison montante (*d'UE vers eNodeB*) dans la norme *3GPP-LTE*. La différence entre la chaîne *OFDMA* et la chaîne *SC-FDMA* est d'ajouter un bloc *DFT* entre la modulation mono porteuse et le codage espace-temps en bloc à l'émission et un bloc *IDFT* à la réception (figure 4.37).

Le bloc *Matlab Fcn* : est utilisé pour simuler les deux opérations *DFT* et *IDFT*.



L'opération DFT



L'opération IDFT

Figure 4.37. La simulation et la boîte de dialogue de l'opération *DFT* et *IDFT*

4.5 Présentation des résultats

Dans cette partie, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation obtenus.

Le tableau 4.3 résume les paramètres utilisés dans la simulation:

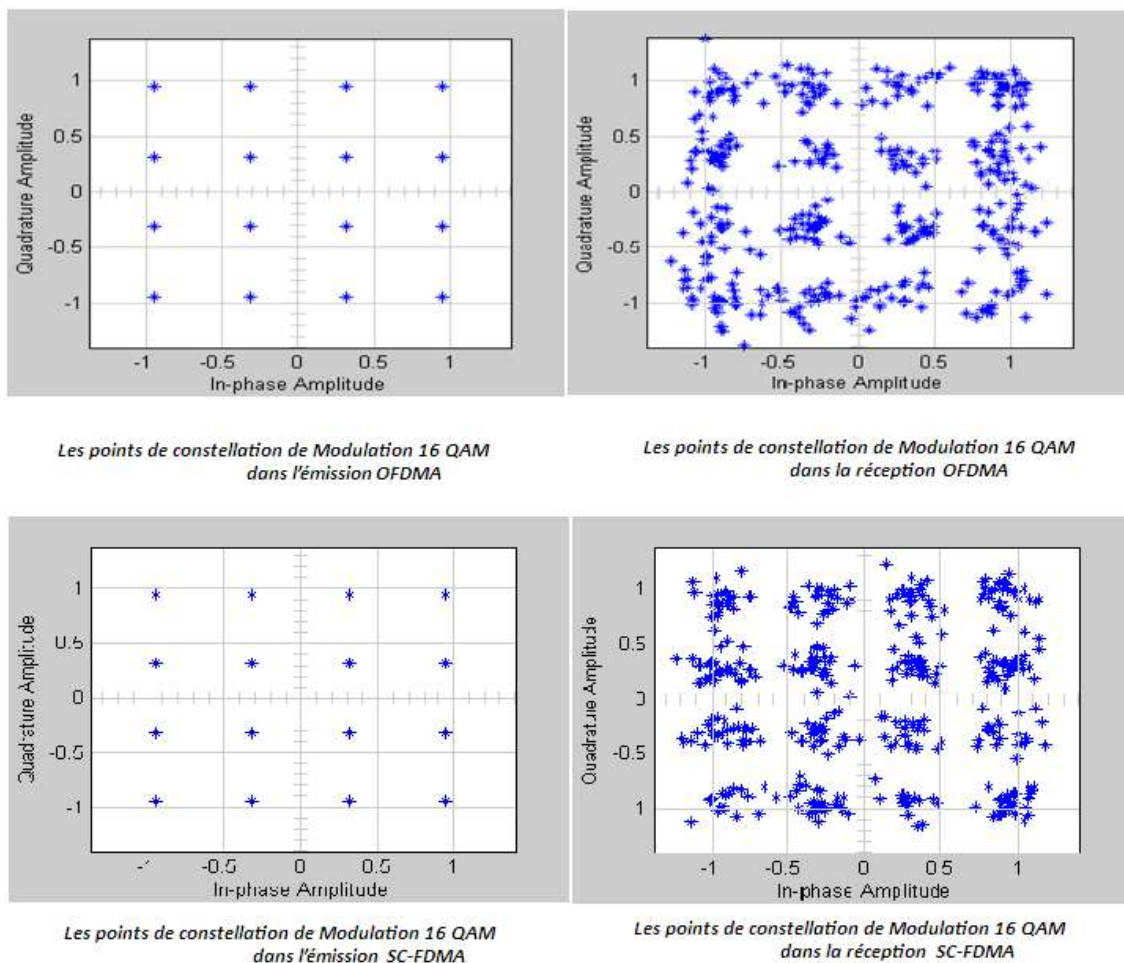
Les Paramètres	Les valeurs
La Bande Passant	3 Mzh
Structure Treillis du Codage	Poly2trellis (7, [171 133])
Les rendements de codage convolutif	1/2, 2/3, 3/4, 5/6
N-DFT / M-IFFT	192 / 256
Mappage des sous porteuses	Mode Localisé / Mode Distribuer
Préfixe cyclique	Normal = 4.69 microseconde

Tableau 4.3. Les paramètres utilisés dans la simulation.

4.5.1 Diagramme de constellation pour la modulation mon-porteuse

Le diagramme de constellation est une représentation graphique (appelée I-Q) des symboles numériques reçus au cours d'une certaine période de temps.

Les diagrammes de constellation de la modulation mono porteuse (pour les deux chaînes) sont représentés dans la figure 4.38. Le canal de transmission utilisé est le canal AWGN. Les symboles reçus perdent ces emplacements après le passage par le canal AWGN, donc nous aurons une probabilité de perte d'information au niveau de la réception dans les deux cas.



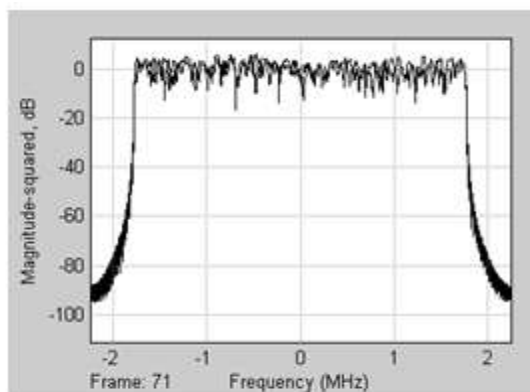
. **Figure 4.38.** Les diagrammes de constellation de la modulation 16-QAM pour les deux méthodes d'accès (*OFDMA* et *SC-FDMA*).

4.5.2 Les spectres de la modulation multi porteuse

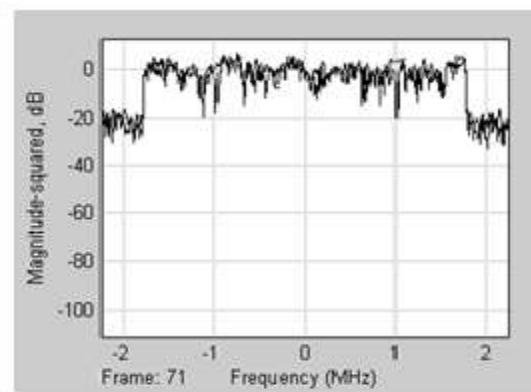
L'*OFDM* est un procédé de codage numérique des signaux qui est utilisé entre autres pour les systèmes de transmissions mobiles à haut débit de données. L'*OFDM* est

particulièrement bien adapté aux canaux de transmission radio sur longues distances sans transmissions d'onde multiples (échos), il permet alors de réduire sensiblement les interférences inter-symboles.

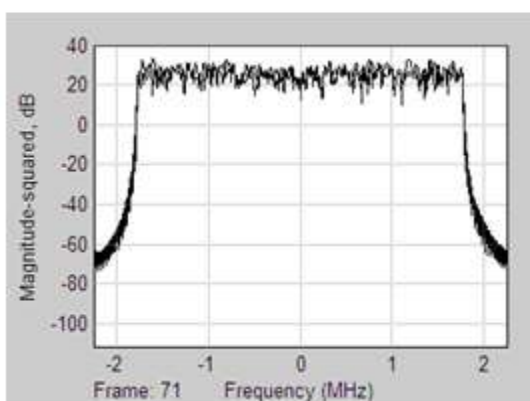
Les spectres d'un symbole *OFDM* pour l'émission et la réception dans les deux cas de méthode d'accès (*OFDMA* et *SC-FDMA*) sont représentés sur la figure 4.39, à partir de ces figures, on constate que le signal est atténué après le passage par le canal de transmission pour les deux cas (*OFDMA* et *SC-FDMA*), et que la bande de fréquence (5 MHz) est occupée de façon optimum puisque le spectre est presque plat dans cette bande. La bande occupée est à peu près $B=N/T_s$ (chaque sous-porteuse occupe à peu près $1/T_s$).



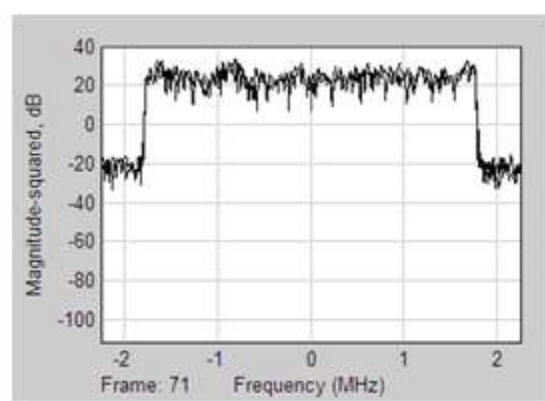
Spectre d'un symbole OFDMA avant le passage dans le canal



Spectre d'un symbole OFDMA après le passage dans le canal



Spectre d'un symbole SC-FDMA avant le passage dans le canal



Spectre d'un symbole SC-FDMA après le passage dans le canal

Figure 4.39. Les spectres de modulation multi porteuse pour les deux méthodes d'accès.

4.5.3 Performances des chaines de transmission

a La performance pour un canal AWGN+multi-trajet dans un système MIMO 2x2

Pour étudier les performances de nos chaines de transmission, on compare l'effet des paramètres suivants sur les données transmises :

✓ L'effet du type de modulation :

Les trois types de modulation utilisés dans la norme 3GPP-LTE sont les modulations QPSK, 16-QAM, et 64-QAM.

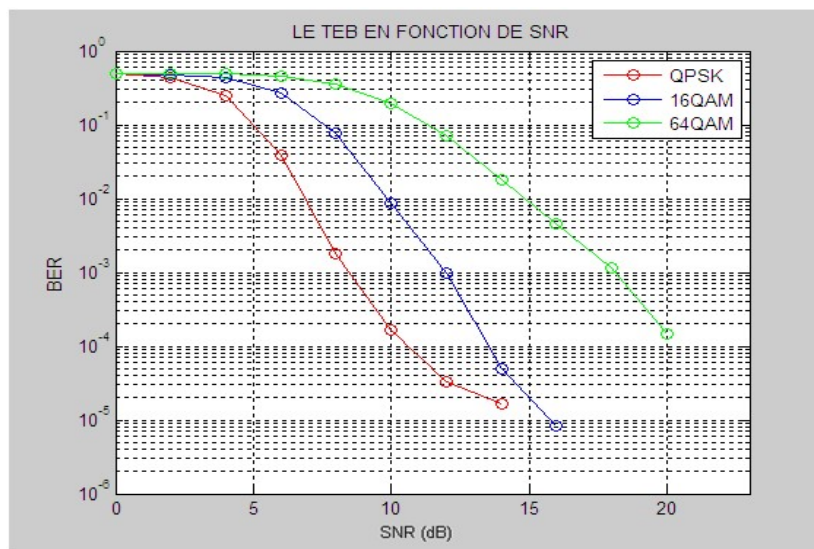


Figure 4.40. Evolution de $TEB = f(SNR)$ pour les différents types de modulation en utilisant l'OFDMA.

Pour une même valeur de TEB , l'augmentation de M (nombre des états de modulation) nécessite l'augmentation de SNR .

Donc, la modulation QPSK est meilleur par rapporte à la modulation 16-QAM (la modulation 64-QAM) de point de vu d'énergie (presque on gagne une quantité de SNR égale à 3 dB (8 dB), lorsque $BER=10^{-2}$), mais dans le sens de débit est l'inverse (car l'augmentation de M implique l'augmentation du débit de transmission).

✓ L'effet de l'utilisation ou non du codage canal (le cas de l'OFDMA):

On étudie l'effet de l'utilisation du codage canal dans notre chaine de transmission OFDMA.

L'évolution de TEB en fonction de SNR pour $M=16$ est représentée sur la figure 4.43.

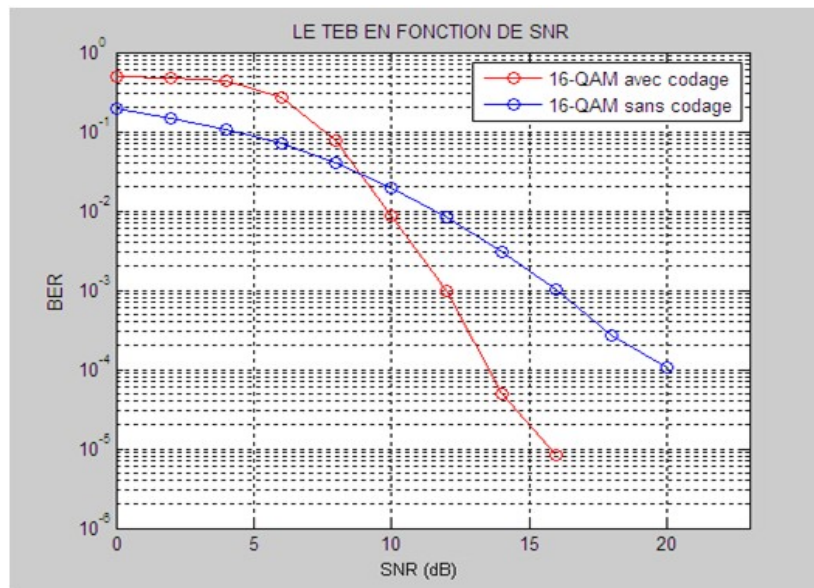


Figure 4.41. Evolution du $TEB = f(SNR)$ dans le cas d'utilisation ou non de codage canal.

Pour une valeur constante de TEB , l'absence du codage canal nécessite l'augmentation de SNR .

Donc, l'utilisation du codage canal améliore la qualité de transmission en utilisant moins d'énergie.

✓ **L'effet de la valeur de rendements du code convolutif (le cas de l'OFDMA):**

On compare l'effet de différentes valeurs de rendements R ($1/2$, $2/3$, $3/4$, $4/5$) du code convolutif sur la qualité de transmission.

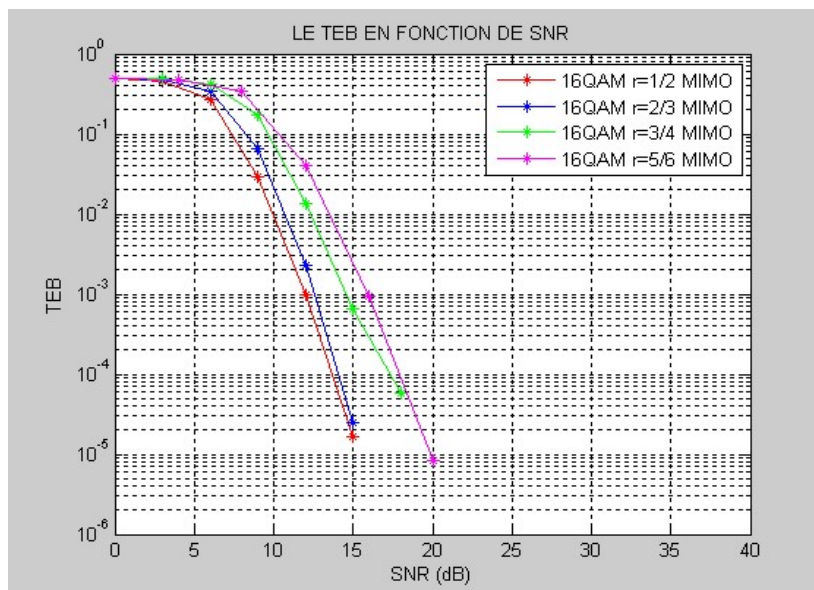


Figure 4.42. L'évolution du $TEB = f(SNR)$ pour les différentes valeurs de rendements du code convolutif.

L'évolution de TEB en fonction de SNR pour $M=16$ et pour les différentes valeurs de rendements R du code convolutif est représentée sur la figure 4.44.

L'augmentation de R implique une augmentation de SNR .

✓ **Comparaison entre les méthodes d'accès utilisés ($SC\text{-}FDMA$ et $OFDMA$) :**

On compare la robustesse des deux méthodes d'accès utilisée dans la norme $3GPP\text{-}LTE$ contre les erreurs de transmission.

L'évolution de TEB en fonction de SNR pour $M = 64$ est représentée sur la figure 4.45.

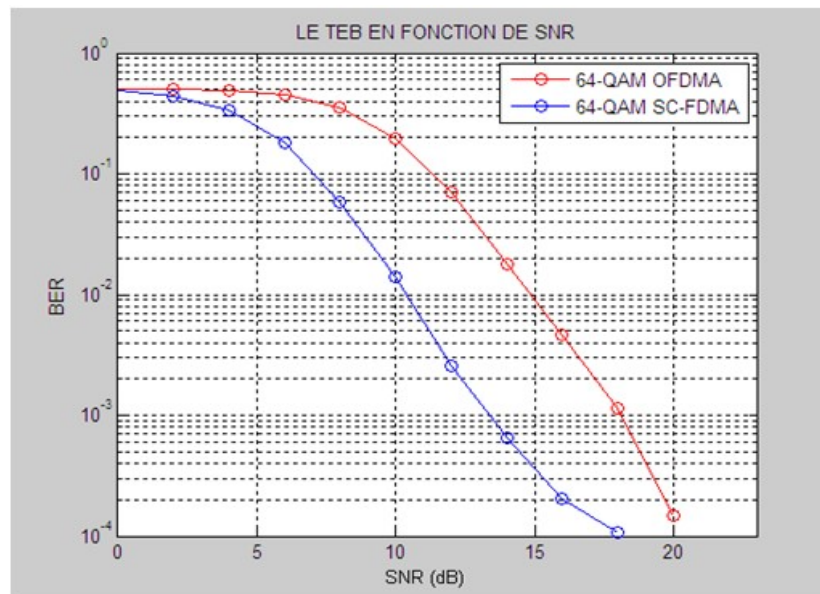


Figure 4.43. Evolution du $TEB = f(SNR)$ pour les différentes méthodes d'accès.

On remarque que pour garder le TEB constant dans un niveau quelconque, on doit augmenter le SNR dans le cas de la méthode d'accès $OFDMA$.

La méthode $SC\text{-}FDMA$ est plus robuste par rapport à la méthode $OFDMA$.

b La performance pour un canal AWGN seulement dans le système MIMO 2x2

✓ **L'influence de la présence du canal multi trajet :**

On compare l'effet d'utilisation de deux types de canal : le canal AWGN seulement, et le canal AWGN+multi trajet.

Évolution du TEB en fonction de SNR pour $M = 64$ (La modulation 64-QAM), et pour ces deux canaux est représentée dans la figure 4.46.

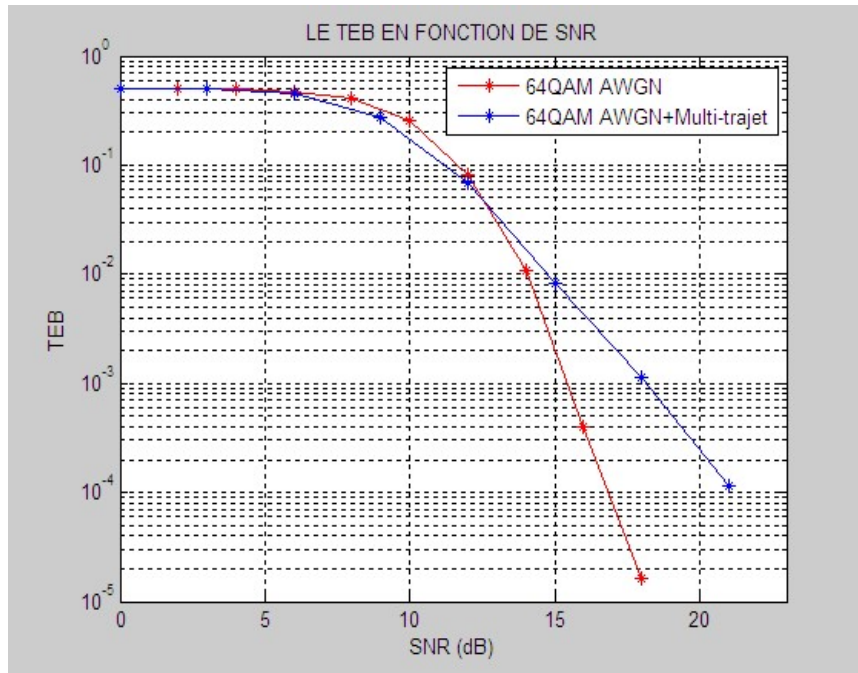


Figure 4.44. Evolution du $TEB = f(SNR)$ pour un canal *AWGN* seulement ou un canal *AWGN+multi trajet* dans le cas de système *MIMO 2x2*.

La présence du canal multi trajet nécessite l'augmentation de SNR .

Par exemple, pour $M = 64$ (le canal *AWGN* seulement), le SNR nécessaire pour une valeur de TEB égale à 10^{-3} est plus grand que celle pour $M=64$ (le canal *AWGN+multi-trajet*).

Donc, le canal *AWGN* seule est le meilleur par rapporte le canal *AWGN+multi-trajet*.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une simulation de la chaîne de transmission numérique de la norme *3GPP-LTE* en considérant les deux méthodes d'accès *OFDMA* et *SC-FDMA*. Pour valider ces simulations, on a comparé plusieurs paramètres : le type du canal de transmission, le type de modulation (*QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM*), le rendement du code convolutif R . On a constaté chaque fois que l'augmentation du nombre de bits par symbole (le débit de transmission) nécessite des paramètres rigoureux dans chaque bloc, et par conséquent, l'augmentation de SNR n'est pas demandée.

La complexité du canal de transmission des systèmes *MIMO* dégrade la qualité de transmission.

Bibliographie

- [1] M. Sauter : 'Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together', John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Zerroki Mostefa, Boucherba Djamel : ' Etude de Réseaux GPRS ', Institut de télécommunication d'Oran, Juin 2005.
- [3] Daniel Hardy, Guy Malléus, Jean-Nôel Méreur : 'Réseaux, Internet, Téléphonie et Multimédia ', DeBook University, Décembre 2003.
- [4] Ludovic Collin : ' Optimisation de systèmes multi-antennes basée sur la distance minimale ', Université de Bretagne Occidentale, décembre 2002.
- [5] Pierre Brisson-Peter Kropf : 'Global System for Mobile Communication', Université de Montréal, 2010.
- [6] Oukaci Mohamed : 'Apport du chaos pour la transmission sécurisée dans les systèmes DSCDMA", Université de Blida, 2009.
- [7] Zied Fetoui : 'Etude des mécanismes de Handover inter-système UMTS _WiMAX ', Ecole Supérieur de Communication de Tunis, 2006/2007.
- [8] Salem Mohamed amine, Mohamed Abdelwahed : 'Etude et simulation d'une liaison téléphonie mobile 3GPP LTE', Université de Blida, 2010.
- [9] Martial COULON : 'Canal de Propagation', INP ENSEEIHT, 2007.
- [10] Ahmed Hamza : 'Long Term Evolution (LTE), Tutorial, Network Systems Laboratory Simon Fraser University, 2009.
- [11] 'LTE from A-Z -Technology and Concepts of the 4G 3GPP Standard', inacon, 2009.
- [12] A. Furuskiir, T. Jonsson, M. Lundevall : 'The LTE Radio Interface Key Characteristics and Performance', IEEE, Ericsson Research, Suède, 2008.
- [13] www.efort.com, Site d'études et formations en Télécommunications Service et Réseaux de Télécommunication.

- [14] Roke Manor Research Limited : 'LTE eNodeB MAC Scheduler Introduction', Roke Manor, Romsey, Hampshire, 2009.
- [15] Qualcomm Incorporated : 'LTE Mobility Enhancements', RFC 12/20079, février 2010.
- [16] V. Plicanic : 'Flexible bandwidth in LTE', Department of Electrical and Information Technology, Suède, Mai 2009.
- [17] Harri Holma, Antti Toskala : 'LTE for UMTS –OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access', John Wiley & Sons, 2009.
- [18] Erik Dahlman, Stefan Parkvall : '3G Evolution, HSPA and LTE for Mobile Broadband', Johan Sköld and Per Beming, Second edition, 2008.
- [19] W. Brouwer : 'QoS in LTE PSCR Demo Days', Alcatel-Lucent, Public Safety in LTE, September 2010.
- [20] Motorola : 'Long Term Evolution', Technical white paper, 2007.
- [21] M El Besseghi ; O kaci : 'etude et simulation de liaison uplink (SC-FDMA) du standart 3GPP LTE', Université de Blida, 2011.
- [22] Jim Zyren, Wes McCoy : ' Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer', White Paper, 2007.
- [23] Kosai RAOOF : 'Modélisation et étude de la capacité du canal pour un système multi-antennes avancé exploitant la diversité de polarisation', Thèse de Doctorat, de l'université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2009.
- [24] BENNANI Anas, EL KHAMLI Yasser, GUENNOUNI Hasnae, LOUKILI Anouar, MOUNIR Assia : '3GPP Long Term Evolution, Norme Condidate Pour La Standarisation 4G Lte Advanced', Génie des systèmes de télécommunication et réseaux- ENSA, 2010.
- [25] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker : 'LTE – The UMTS Long Term Evolution from Theory to Practice', John Wiley & Sons, 2009.
- [26] Glavieux Alain : 'Codage de canal : Les bases théoriques aux turbo codes', Lavoisier, 2004.
- [27] KHETAAL Mohamed, TAIDIRT Karim : ' Implémentation et simulation de système Wimax norme IEEE 802.16.2004', Département d'électronique, Université de Blida, 2010.
- [28] Farooq Khan: 'From LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance', Cambridge university press, 2009.

[29] Harri Holma and Antti Toskala : 'LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice', John Wiley & Sons, 2009.

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons présenté une étude avec simulation sur la technologie *LTE* qui a été développée par l'organisme *3GPP*, et qui représente le réseau cellulaire le plus développé.

Le LTE est extrêmement optimisé par rapport à la *3G* de point de vue de l'efficacité spectrale grâce aux techniques utilisées qui sont *OFDMA*, et *SC-FDMA*, il permet aux opérateurs d'offrir des services avancés, et un rendement plus élevé.

Le LTE est basé sur une architecture de réseau de tous *IP* qui améliore la latence de réseau, et il assure la continuité de service en temps réel avec les autres réseaux *3GPP* existants.

Le *LTE* se base sur une nouvelle structure des antennes de l'émission et de la réception, c'est-à-dire la *MIMO*.

Finalement, ce projet nous a donné plusieurs informations sur les techniques utilisées dans le domaine des réseaux cellulaires, telles qu'*OFDM*, *OFDMA*, *SC-FDMA*, et *MIMO* et des autres informations sur les couches supérieures de la norme *3GPP-LTE*.