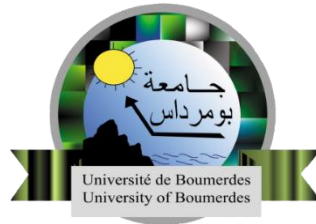


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة امحمد بوقرة بومرداس
Université M'Hamed Bougara Bumerdes



Faculté des Sciences de L'ingénieur

Département : Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Electronique des systèmes embarqué

Thème :

**Etude et Simulation de la couche Physique d'un réseau
LTE**

Réalisé par:

BOUYAHIAOUI Feryal & YOUSFI Salima

Soutenue publiquement le 27/06/2018, devant le jury composé de :

Dr. SMAANI Billel	MCB	Président
Dr. GUERBAI Yasmine	MCB	Examinatrice
Dr. MOUATSI AbdElmalek	MCB	Examineur
Dr. NAFA Fares	MCB	Encadreur

Promotion: 2017/2018

Remerciement

D'abord, nous remercions Dieu le tout puissant. C'est grâce à lui que nous avons eu la foi et la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à M.NAFAFares, Maître de conférences à la faculté des Sciences de l'ingénieur pour ses précieux conseils, ses incessants encouragements et surtout sa grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury d'avoir accepté de siéger et de juger notre travail. Nous les remercions aussi pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce mémoire.

Finalement, nous remercions tous les enseignants qui ont participé à notre formation et tout le personnel administratif de M'Hamed Bougara Boumerdes.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A NOS Parents,

A NOS familles,

A tous mes cher(e)s amis(e)s ;

A tous ceux qui m'aiment.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont encouragé ou aidé tout au long de mes études.

BOUYAHIAOUI FERYAL ET YOUSFI SALIMA

المخلص

شهدت الشبكات المتنقلة و اللاسلكية نموا غير مسبوق في السنوات الاخيرة. انه جزء من نشر عدة اجيال متعاقبة من شبكات الاتصالات, و هي في الاساس مهادفة ال (2ج) ثم اكثر توجهها للوسائط المتعددة (3ج) و يوفر الجيل الرابع من الشبكات اللاسلكية زيادة حقيقية في الانتاجية و يسمح بإمكانية التشغيل المتداخل مع الشبكات الاخرى

في هذا المشروع ، قمنا بمحاكاة طبقة من شبكة ال تي اي ، بما في ذلك الطبقة المادية ، باستخدام سيميلنك ، كما أخذنا بعين الاعتبار الأجزاء الرئيسية التي تشكل هذه الطبقة وقمنا بإضافة الاعدادات الضرورية لنقترب من النموذج الحقيقي .بعد ذلك، توصلنا إلى تحليل حول تأثير بعض المعايير على أداء الإرسال لمثل هذا النموذج.

الكلمات المفتاحية: 4ج, ال تي اي, محاكاة, أو أف دي أم, الطبقة المادية, تعديل, بي اي ار, اس ان ار.

Résumé

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Il s'agit d'une part du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés la téléphonie (2G), puis plus orientés vers le multimédia (3G), la 4G de réseaux sans fil apporte une véritable augmentation du débit et permet l'interopérabilité avec les autres réseaux

Dans ce projet nous avons procédé à simulation d'une couche d'un réseau LTE, notamment la couche PHY, en utilisant SIMULINK. En effet, nous avons pris en considération les principales parties qui constituent cette couche et nous avons effectué le paramétrage nécessaire afin de se rapprocher au modèle réel. Après cela, nous avons abouti à une analyse sur l'effet de quelques paramètres sur les performances de transmission d'un tel modèle.

Mots -clés : 4G, LTE, simulation, OFDM, couche PHY, modulation, BER, SNR

Abstract

The mobile and wireless networks knew an unprecedented development these last years. It is on one hand about the deployment of several successive generations of telecommunication networks essentially dedicated to the telephony (2G, then more directed to the multimedia (3G, the 4G of wireless networks brings a real increase of the debit (flow) and allows the interoperability with the other networks.

In this project we simulated a layer of an LTE network, including the PHY layer, using SIMULINK. Indeed, we have taken into consideration the main parts that make up this layer and we have made the necessary parameterization to get closer to the real model. After that, we came to an analysis of the effect of some parameters on the transmission performance of such a model.

Keywords : 4G, LTE, simulation, OFDM, PHY layer, modulation, BER, SNR

CHAPITRE I

Figure I.1 : Evolution des réseaux sans fil.....	3
Figure I.2 : Présentation générale sur le système LTE	5
Figure I.3 : Architecture du réseau 4G	6
Figure I.4 : Architecture E-UTRAN.....	8
Figure I.5 : Architecture du réseau cœur EPC	9
Figure I.6 : Modulation QAM	12
Figure I.7 : Modulation OFDM	12
Figure I.8 : Préfixe Cyclique.....	13
Figure I.9 : Schéma bloc du SC-FDMA	13
Figure I.10 : Structure de la trame LTE de type FDD.....	15
Figure I.11 : Grille de ressources du système LTE	15
Figure I.12 : Structure de la trame LTE de type TDD.....	16
Figure I.13 : Concept de schéma duplex.....	16
Figure I.14 : Evolution de réseau LTE	17

CHAPITRE II

Figure II.1 : les canaux de l'interface radio LTE.....	22
Figure II.2 : Variation d'amplitude en fonction de densité de probabilité.....	24
Figure II.3 : Fonction de densité de probabilité.....	25
Figure II.4 : Schéma de la transmission pour un lien DL	26
Figure II.5 : Structure du codage canal	27
Figure II.6 : Schéma du code CRC.....	27
Figure II.7 : Structure du turbo codeur.....	28
Figure II.8 : Modulation adaptative.....	29
Figure II.9 : Modulation QAM.....	29
Figure II.10 : Un exemple d'un système MIMO.....	30
Figure II.11 : Schéma de principe d'un modulateur OFDM.....	32
Figure II.12 : Schéma de modulation OFDM.....	33

LISTE DES FIGURES ET TABLAUX

Figure II.13 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse.....	34
Figure II.14: Insertion du préfixe cyclique.....	35
Figure II.15 : Structure du récepteur LTE.....	37

CHAPITRE III

Figure III.1: L'outil de simulation (MATLAB).....	39
Figure III.2 : La librairie SIMULINK.....	40
Figure III.3 : paramètre de bloc Bernoulli Binary Generator.....	41
Figure III.4 : paramètre de bloc General CRC Générateur.....	42
Figure III.5 : paramètre de bloc de Turbo Encoder.....	43
Figure III.6 : paramètre de bloc de Rectangular QAM Modulator Base band.....	44
Figure III.7 : paramètre de bloc Multipoint Selector.....	45
Figure III.8 : paramètre de bloc OFDM Modulator.....	46
Figure III.9 : paramètre du bloc Rayleigh fading.....	47
Figure III.10 : paramètre de bloc AWGN.....	48
Figure III.11 : paramètre de bloc OFDM Demodulator.....	49
Figure III.12: paramètre de bloc QAM Démodulator.....	50
Figure III.13 : Paramètres du bloc Frame conversion.....	51
Figure III.14 : paramètre de bloc pad.....	51
Figure III.15 : paramètre de bloc Turbo Decoder.....	52
Figure III .16 : paramètre de bloc general CRC syndrome detector.....	53
Figure III .17 : paramètre de bloc Erreur Rate Calculation.....	54
Figure 3.18 : la chaîne de transmission émetteur/récepteur	55

CHAPITRE IV

Figure IV.1 Constellation générée par le modulateur 16 QAM à l'émission avant la modulation OFDM.....	58
Figure IV.2 Constellation générée par le modulateur 16 QAM à la réception après la démodulation OFDM.....	59

LISTE DES FIGURES ET TABLAUX

Figure IV.3 Constellation générée par le modulateur 64QAM à l'émission avant la modulation OFDM.....	59
Figure IV.4 Constellation générée par le modulateur 64QAM à l'émission avant la modulation OFDM.....	60
Figure IV.5 BER en fonction du SNR pour 16-QAM.....	61
Figure IV.6 BER du système en fonction du SNR avec les trois modulations (QPSK ,16QAM, 64 QAM).....	61

LES TABLEAUX

Tableau I.1 Caractéristiques de la LTE.....	17
Tableau II.1 Canaux physiques pour la voix descendante.....	22
Tableau II.2 signaux physique pour la voix descendante.....	23
Tableau IV.1 Paramètres LTE utilisés dans la simulation.....	58

Liste des abréviations et des acronymes

1G : 1^{ère} Génération.

2G : 2^{ème} Génération.

3G : 3^{ème} Génération.

4G : 4^{ème} Génération.

5G : 5^{ème} Génération.

3GPP : 3rd Génération Partnership Project

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line.

AWGN: Additive White Gaussian Noise.

ARQ :Automatique Repeat reQuest.

BER: Bit Error Rate.

BSS :Base Station Subsystem.

BLER :Block Error Rate.

BTS : Base Transceiver Station.

BSC : Base Station Controller.

CDMA : Code Division Multiple Access.

CRC :Cyclic Redundancy Check.

FDD :Frequeucy Division Duplex.

FDM: Frequency Division Multiplexing.

FDMA: Frequency Division Multiple Access.

GPRS: General Packet Radio Service.

GSM: Global System for Mobile communications.

HARQ :Hybrid automatic repeat request.

ISI : Inter Symbol Interference.

LTE :Long Term Evolution.

LLR :Log Likelihood Ratio.

MAC :Medium Access Control.

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiple Access.

PDSCH : Physical Dowlink Shared Channel.

PDCCH : Physical Downlink Control Channel.

QPSK: Quaternary Phase Shift Keying.

QAM : Quadrature Amplitude Modulation.

RRC : Radio Ressource Controller.

SNR: Signal to Noise Ratio.

SC-FDMA : Single –carrier FDMA.

SISO :Soft-Input Soft-Output.

TDM: Time Division Multiplexing.

TDMA: Time Division Multiple Access.

TDD : Time Division Duplex.

UMTS :Universal Mobile Telecommunications Syste.

WIFI: Wireless Fidelity.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Dédicace.....	I
Résumé	III
Abstract	III
Liste Des Figure ET Tableaux.....	VII
Liste Des Abréviations ET Des Acronymes.....	IX
Sommaire.....	XI
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur LTE

I.1.Introduction	3
I.2.L'évolution des réseaux mobiles.....	3
I.2.1. La première génération des téléphones mobiles (1G).....	4
I.2.2.La deuxième génération des téléphones mobiles (2G).....	4
I.2.3.La troisième génération des téléphones mobiles (3G).....	4
I.3. La 4G LTE (Long Term Evolution).....	5
I.3.1. Définition.....	5
I.3.2.Objectifs de la LTE.....	6
I.3.3Architecture du réseau 4G/LTE.....	6
I.3.4Caractéristique du réseau EPS.....	7
I.3.5Entités du réseau EPS (Evolved packet system).....	7
A. EquipmentUser (UE).....	7
B. E-UTRAN.....	7
C. EPC (Evolved PacketCore)	8
3.4 Les caractéristiques fondamentales de la 4 G	10
A. La capacité de la 4G	10
B. Débit sur l'interface radio	10
C.Mobilité	10
D.Flexibilité dans l'usage de la bande	10

SOMMAIRE

E. Codage et sécurité.....	11
F. Multiplexage.....	11
4. Technologies employées dans le réseau 4G.....	11
4.1 La modulation.....	11
I.4.2 Techniques d'accès.....	12
I.4.2.1 OFDM	12
I.4.2.2 SC-FDMA	13
I.5 Structure des ressources de transmission du LTE	14
I.5.1 Structure de la trame en mode FDD.....	14
I. 5.2 Structure de la trame en mode TDD.....	15
I. 6- L'évolution de réseau LTE	17
I.6.1 LTE vers LTE Advanced	18
I. 6.2 Cinquième génération 5G.....	18
7 -Conclusion.....	19

Chapitre II : Description de la couche physique

II.Introduction.....	20
II.1.La couche physique.....	20
II.2.1 Définition.....	20.
II.2.2 Les caractéristiques clés de la couche physique.....	20
II.3 La couche MAC (Medium Acces Control).....	20
II.4 Les canaux.....	21
II.4.1Le concept de canal.....	21
• Les canaux de transport.....	21
• Les canaux logiques.....	21
• les canaux physiques.....	21

II.5 Les signaux physiques.....	23
II.5.1 signaux de référence ou Reference Signals (RS).....	23
II.5.2 signaux de synchronisation.....	23
II.5.3 Ryleigh Fading.....	24
II.6 Partie émetteur.....	25
II.6.1 Les fonctions de la couche physique.....	26
• Le codage de canal.....	26
• La modulation.....	26
• les traitements spatiaux (MIMO).....	26
• La modulation multi porteuse OFDM.....	26
II.6.2Le Codage de Canal.....	26
A.Contrôle à redondance cyclique (CRC).....	27
B.Turbo codage	27
II.6.3 La modulation.....	28
II.6.4 Les traitements spatiaux (MIMO).....	30
II.6.5 La Modulation Multiporteuse OFDM.....	31
• Fonctionnement et débits.....	
II.7 Génération conceptuelle d'un signal OFDM.....	32
II.7.1Génération pratique d'un signal OFDM.....	33
II.7.2 La condition d'orthogonalité.....	33
A. Première condition d'orthogonalité.....	33
B. Deuxième condition d'orthogonalité.....	33
II 7.3 Efficacité spectrale.....	34
• Cyclic Prefix.....	35
II.7.4 Brouillage.....	36

SOMMAIRE

II.8 Mappage de couche.....	36
II.9 Partie réception.....	36
II.9.1 Démodulation.....	37
II.9.2 Décodage canal.....	37
A. Contrôle CRC.....	37
B. Turbo décodage.....	37
II.10 Conclusion.....	38

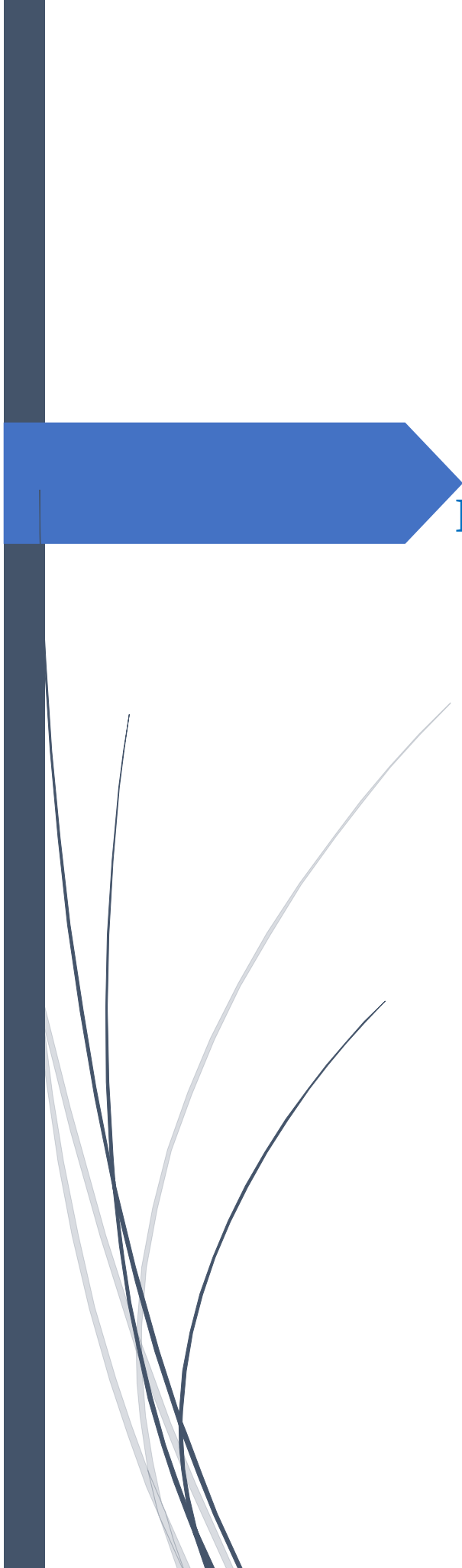
Chapitre III : Mise en programme sous Matlab

III.1 Introduction.....	39
III. 2 Présentation de l’outil de simulations.....	39
III. Simulation des paramètres des chaines de transmission.....	40
III.1 La partie émettrice	40
• Le bloc Bernouilli Binary Generator.....	41
• General CRC Générateur	42
• Turbo Encode.....	42
• Rectangular 16-QAM Modulator Baseband	43
• Multiport selector /Matrix concatenate.....	44
• OFDM Modulator.....	45
III.2 Canal de transmission.....	46
• Bloc Rayleigh fading.....	46
• Le bloc AWGN Channel.....	47
• Le bloc Terminator	48
III .3 La partie de réception.....	48
• Rectangular 16-QAM Démodulateur Baseband.....	49

• Le bloc pad.....	50
• Turbo Décodeur.....	51
• Général CRC Syndrome Detector.....	52
• Error Rate Calculation.....	53
III 4. Taux d'erreur binaire (BER)	54
III.5 Conclusion.....	55

Chapitre IV : Simulation et résultats

IV.1.Introduction.....	56
IV.2. Mesure de performances.....	56
IV.2.1 Taux d'erreur binaire (BER).....	56
IV.2.2 Rapport signal sur bruit (SNR).....	56
IV.3 Simulations et résultats.....	56
IV.3.1 Evaluation.....	57
• Constellations généré par le modulateur 16 QAM.....	57
• Constellation générée par le démodulateur 16 QAM à la réception.....	58
• Constellations généré par le modulateur 64 QAM.....	58
• Constellation générée par le démodulateur 16 QAM à la réception.....	59
IV.3.2 Bloc de calcul du taux d'erreur.....	59
IV.3.3 Schémas de modulation.....	60
IV.4.Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Bibliographie.....	63



Introduction Générale

Introduction général

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Il s'agit d'une part du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés à la téléphonie (2G, GSM) puis plus orientés vers le multimédia (3G, UMTS). D'autre part, les réseaux locaux sans fil sont rentrés dans la vie quotidienne au travers de standards phare tels que WiFi, Bluetooth, etc.[8]

Les évolutions se poursuivent de partout, tant dans le monde des réseaux spécialisés (capteurs, étiquettes intelligentes, etc.) que des réseaux télécoms. En effet, avec la demande croissante et l'augmentation du nombre d'abonnés, Il fallait donc pousser le développement vers d'autres améliorations pour augmenter la capacité des réseaux, ce qui a donné naissance à la quatrième génération **LTE (Long Term Evolution) «4G»** apportant une amélioration du débit. La future génération de réseaux sans fil dite de quatrième génération (4G) apporte un véritablement tournant dans le foisonnement et la disparité des solutions existantes.

La LTE est une nouvelle norme spécifiée par 3GPP pour les communications sans fil de quatrième génération (4G). LTE fournit une efficacité spectrale élevée, des débits de données de crête élevés, un temps d'aller-retour court et une flexibilité de fréquence. Pour atteindre ces objectifs, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) et les entrées multiples et multiples (MIMO) sont adoptés en tant que technologies de base

Hormis les différentes couches dont dispose la LTE, cette couche physique (couche PHY) présente un domaine très intéressant pour effectuer les études et les développements.

De point de vue couche physique, la LTE fonctionne sur deux types d'interfaces aériennes (liaisons radio), l'une est en liaison descendante (de la tour à l'appareil) et l'autre est en liaison montante (de l'appareil à la tour). Pour la liaison descendante emploie porteuse unique Frequency Division Multiple Accès (SC-FDMA), tandis que sur la liaison descendante (downlink), il utilise Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA).

Dans le but de créer une plateforme de simulation intégrale d'un système LTE, nous nous sommes intéressé particulièrement à la création d'un modèle de de la couche PHY en étudiant l'effet de chaque paramètres sur les performances de cette technologie.

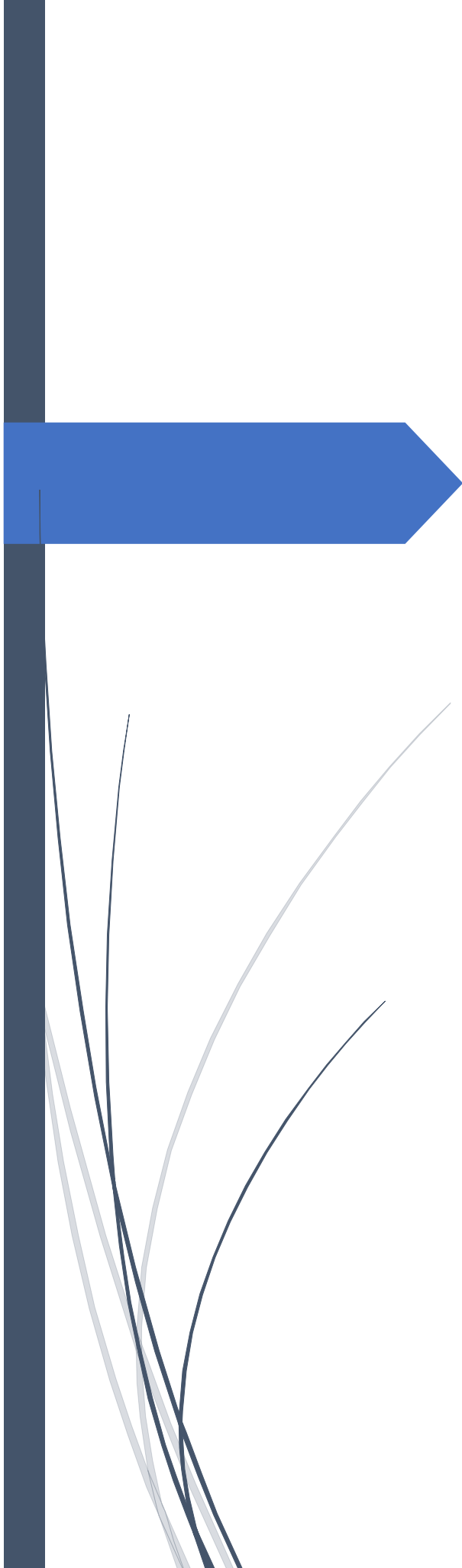
Pour cela, notre travail sera subdivisé en quatre chapitres distincts :

Dans le premier chapitre nous donnons un aperçu sur la 4G LTE avec une présentation de l'entité l'architecture du réseau LTE et ses différentes techniques. La description de la couche physique avec tous les détails sur les différentes parties utilisées lors de transmission de ces données est illustrée dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre sera consacré à la mise sous-programme Matlab/simulink de toutes les parties constituante de la couche PHY de la LTE.

Ainsi, et afin d'évaluer les performances relatives à la couche PHY, une série de simulation sera effectuée dans le dernier chapitre, notamment le quatrième chapitre.

Et en fin, une conclusion générale terminera notre mémoire.



CHAPITRE I

Généralités sur la LTE

1-Introduction

L'idée d'une nouvelle technologie mobile, plus performante que la 3G et ses évolutions, a vu le jour au milieu des années 2000, au sein du groupe 3GPP, l'organisme de normalisation des systèmes mobiles 3G UMTS. Poussé par les opérateurs qui pressentaient le besoin à venir d'un système mobile conçu autour des services de données très haut débits, avec plus de capacité plus de vitesse, plus facile à déployer et exploiter, le groupe 3GPP a commencé des études sur ce qui a alors été appelé LTE (Long Term Evolution). [1]

L'évolution à long terme est l'équivalent français du terme anglais LTE. Elle désigne un projet réalisé par l'organisme de standardisation 3GPP œuvrant à rédiger des techniques qui permettront d'améliorer la norme UMTS des réseaux cellulaires 3G, vers la quatrième génération, pour faire face aux futures évolutions technologiques. Les buts poursuivis pour la LTE consistent en une amélioration de l'efficacité spectrale qui permettra le transfert des données à très haut débit avec qualité de service, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule plus élevé que dans l'UMTS et une latence plus faible et la réduction de la complexité. La quatrième génération présente, pour l'amélioration des services, des plateformes multi-technologiques capables de supporter de nouvelles applications innovatrices. De même que ces précédentes, la 4G présente une architecture qui comporte un réseau d'accès : l'E-UTRAN et un réseau cœur véhiculant que des paquets de données (commutation des paquets) Elle est dite pour cela tout-IP. [1]

I-2 L'évolution des réseaux mobiles

Avant d'expliquer l'état actuel des technologies utilisées aujourd'hui, il nous semble intéressant de rappeler l'évolution de ces techniques, cela a pour avantage de savoir de quoi nous sommes partis pour mieux se positionner à l'heure actuelle [2]

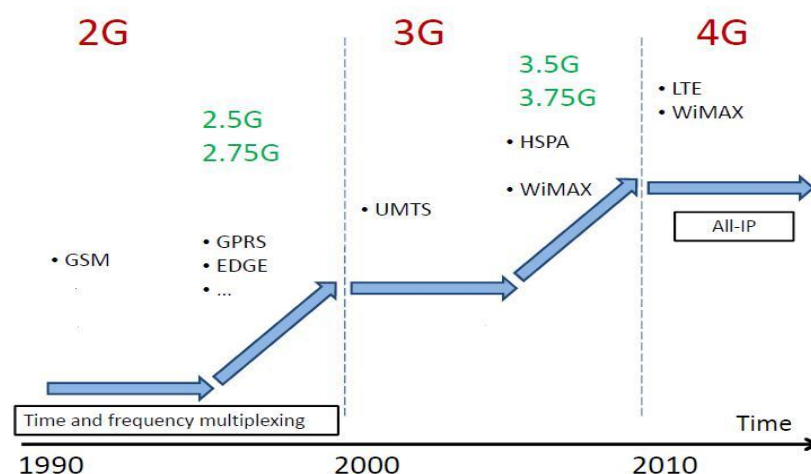


Figure I.1 : Evolution des réseaux sans fil.

I-2-1 La première génération des téléphones mobiles (1G)

La première génération des téléphones mobiles est apparue dans le début des années 80 en offrant un service médiocre et très coûteux de communication mobile. La 1G avait beaucoup de défauts, comme les normes incompatibles d'une région à une autre, une transmission analogique non sécurisée (écouter les appels) et le non disponibilité du roaming vers l'international (roaming est la possibilité de conserver son numéro sur un réseau d'un autre opérateur) [2].

I-2-2 La deuxième génération des téléphones mobiles (2G)

Dans les années 90, le GSM est apparu. Il s'agit de la norme 2G, s'appuyant sur les transmissions numériques permettant une sécurisation des données (avec cryptage). C'est une norme mondiale, qui permet le, roaming entre pays exploitant ce type de réseau. Le GSM permettait aussi l'émission de SMS (limités à 160 caractères) [2].

Grâce à l'évolution de l'informatique un cadre technique s'est mis en place pour proposer aussi le transfert de données à des débits plus importants grâce à une gestion différente par paquets.

Cela a permis de voir émerger la technologie 2,5G avec le GPRS, puis 2,75G grâce à la technologie EDGE, ces deux dernières continuant à profiter de l'infrastructure existante 2G du GSM. Si les avantages sont évidents (moindre coût, mise à jour logicielle, bénéfice d'une couverture déjà déployée...), le débit proposé restait faible (200 Kbit/s) par rapport aux offres filaires (512 Kbit/s et au-delà pour l'ADSL).

I-2-3 La troisième génération des téléphones mobiles (3G)

Pour aller plus loin et proposer des services dépassant le cadre de la consultation WAP ou de la réception d'emails et se rapprocher de ceux utilisés sur les ordinateurs, il a fallu changer d'architecture. Distincte des modes de transmission antérieurs, elle est qualifiée de 3G, ou réseau de troisième génération.

La 3G a été impulsée par les exigences de l'IMT-2000 pour permettre des applications vidéo sur le mobile (le minimum requis pour une application vidéo est de 384 kbps. Outre l'augmentation de débit, un point complexe à résoudre était de passer d'un service de téléphonie (à connexion circuit) vers un service DATA (connexion paquets). Cette génération a commencé à s'introduire sur le marché à partir de la version 3.5 (2005.c), celle-ci, nommée HSDPA a permis d'augmenter le débit descendant. Puis est arrivé le HSUPA

pour augmenter le débit montant et enfin le HSPA et HSPA+. De ce fait, l'accès aux services de connexions à internet et surtout de messagerie s'est peu à peu installé dans les habitudes des utilisateurs et les terminaux se sont améliorés (Smartphone,..) permettant un usage plus confortable de la connexion haut débit

Au-delà de ces technologies différentes, la 3G ne se suffit pas à elle-même et des évolutions permettent d'améliorer ses performances. Le LTE apparaît avant tout comme une rupture technique par rapport aux générations précédentes [3] :

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

I-3-La 4G LTE (Long Term Evolution)

I-3-1 Définition

La technologie LTE s'appuie sur un réseau de transport à commutation de paquet IP. Elle utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz) un débit binaire théorique

Pouvant atteindre 300 Mbit/s en « downlink », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s,

Long Tem Evolution (LTE) peut fournir des débits de données élevés, une faible latence et une bande passante flexible. Pour atteindre ces objectifs, le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences, ainsi les entrées multiples et sorties multiples (MIMO) sont adoptées comme technologies de base. En outre, d'autres technologies telles que le codage de canal robuste, la planification, l'adaptation de liaison et l'ARQ hybride sont également importantes.

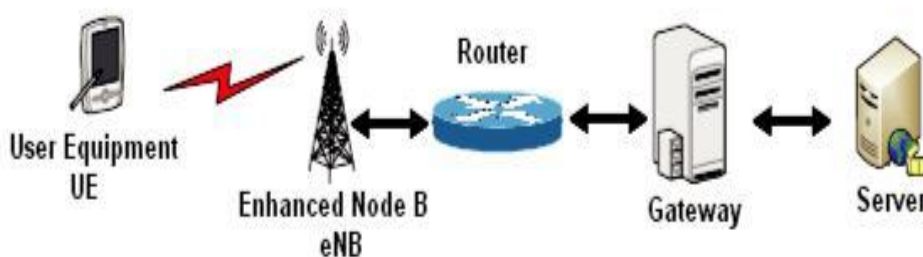


Figure I.2 : Présentation générale sur le système LTE

I-3-2 Objectifs de la LTE

Les objectifs principaux motivant l'introduction de la quatrième génération des réseaux mobiles sont essentiellement la réduction des coûts des usagers et opérateurs tout en augmentant les débits pour aboutir à une bonne qualité de service. et en diminuant la latence (le temps d'aller-retour réseau).

Théoriquement la 4G doit réduire les temps de réponse d'un facteur de 10 par rapport aux systèmes 3G. Pour cela, du point de vue architecture, une partie importante du traitement est localisée le plus près possible du mobile, c'est-à-dire dans la station de base, afin de réduire les temps de réponse et améliorer la réactivité des protocoles aux conditions radio. Cette nouvelle génération doit aussi accepter plusieurs centaines (200) d'utilisateurs actifs simultanés sous une même cellule et suivre la mobilité de ces derniers sans interruption du service. Comme la bande passante est partagée, il est clair que les débits seront d'autant meilleurs qu'il y aura moins de trafic sur la zone et que l'antenne relais radio sera proche. [10]

I-3-3 Architecture du réseau 4G/LTE

Comme tous les réseaux pour mobiles, celui de la 4G LTE se compose de trois parties comme le montre la figure:

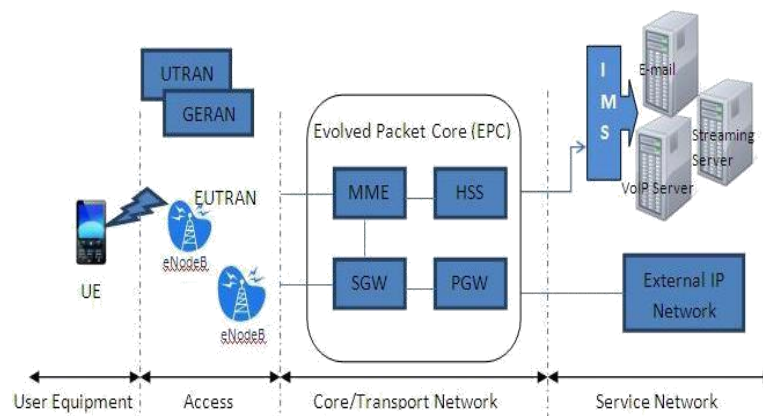


Figure I.3: Architecture du réseau 4G

Le réseau d'accès radio terrestre universel évolué (E-UTRAN) qui est le réseau d'accès radio pour l'EU (Equipment User), et le cœur de paquets évolué (EPC) qui est le cœur du réseau. L'architecture du réseau cœur est aussi désignée par, l'évolution d'architecture de service (SAE). En d'autres termes, la combinaison de l'E-UTRAN et de l'EPC est aussi appelée système paquet évolué (EPS : Evolved Packet System) [2].

I-3-4 Caractéristique du réseau EPS

L'EPS représente l'ensemble du réseau, à savoir LTE et SAE. Il possède une architecture plat est simplifiée comparée à celle hiérarchique de la 2G/3G puisque la fonction de contrôleur d'antenne disparaît. La seule entité présente dans l'accès est l'eNodeB qui peut être assimilé à un node B+ RNC. Le node B représente en fait, une station de base(ou antenne-relais) dans un réseau UMTS, basé sur la technologie W-CDMA, il est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM. Quand au RNC, il représente l'élément du réseau UMTS qui contrôle les transmissions radio des stations de base. Il gère la répartition de la ressource radio, le chiffrement des données avant l'envoi au téléphone mobile, ainsi qu'une partie de localisation des abonnés. Un RNC s'interface avec le SGSN pour la transmission des données, avec le MSC pour le transfert de voix [3].

I-3-5 Entités du réseau EPS (Evolved packet system)

Le réseau EPS est constitué des entités suivantes :

A. EquipmentUser (UE)

En LTE, l'UE communique avec l'E-UTRAN et l'EPC en utilisant les protocoles appropriés la communication du plan utilisateur qui se termine au niveau de l'eNodeB et supporte tous les protocoles affairant au plan utilisateur. De point de vu plan de contrôle, l'UE communique avec l'eNodeB et le MME à travers les protocoles RRC et NAS respectivement [9].

B. E-UTRAN

La partie radio du réseau, appelée « E-UTRAN » est simplifiée par rapport à celles des réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN) par l'intégration dans les stations de base «eNodeB » avec des liaisons en fibres optiques et des liens IP reliant les eNodeB entre eux (liens X2) ainsi que des fonctions de contrôle qui étaient auparavant implémentées dans les RNC (Radio Network Controller) des réseaux 3G UMTS. Cette partie est responsable sur le management des ressources radio, la porteuse, la compression, la sécurité, et la connectivité vers le réseau cœur évolué[9].

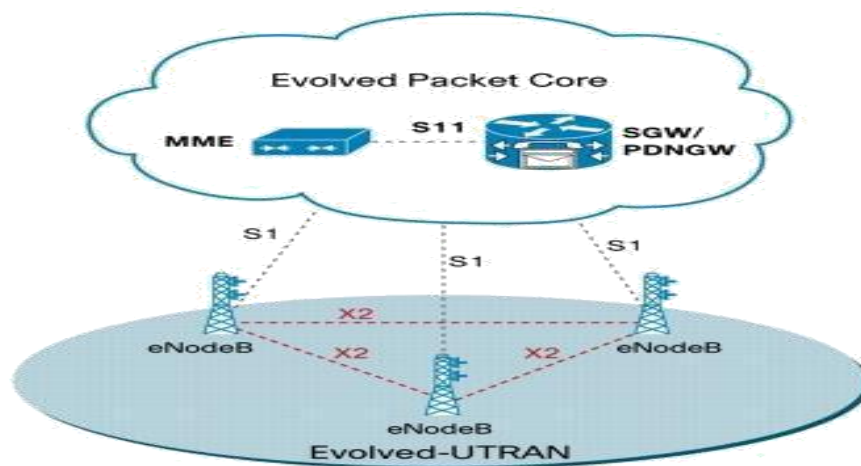


Figure I.4 : Architecture E-UTRAN

➤ ENodeB

L'eNodeB est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM et NodeB dans l'UMTS, la fonctionnalité de Handover est plus robuste dans LTE. Ce sont des antennes qui relient les UE avec le réseau cœur du LTE via les RF air interface. Ainsi qu'ils fournissent la fonctionnalité du contrôleur radio réside dans eNodeB, le résultat est plus efficace, et le réseau est moins latent, par exemple la mobilité est déterminée par eNodeB à la place de BSC ou RNC [9].

A. EPC (Evolved PacketCore)

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

EPC Simplifie le réseau d'architecture à tout IP, comme il assure la mobilité entre les systèmes à base 3GPP, et autre non basés sur la 3GPP par exemple WIMAX et CDMA200 [9].

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

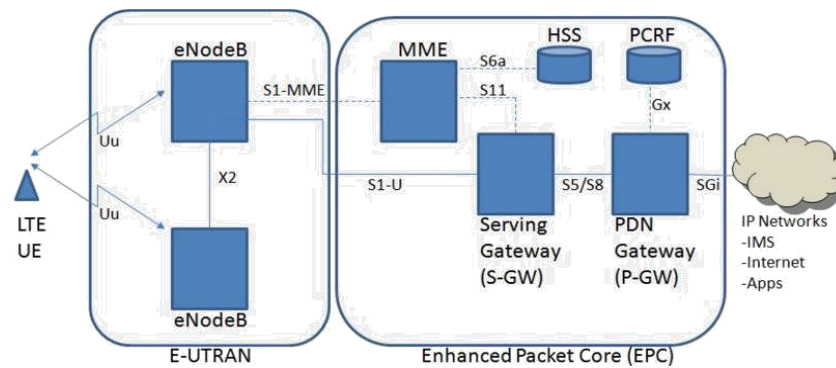


Figure I.5: Architecture du réseau cœur EPC

❖ MME (Mobility Management Entity (3GPP Release 8))

Le MME est le nœud de contrôle qui gère la signalisation entre l'UE et le réseau cœur. Il a en charge la gestion de la connexion de signalisation et de sécurité entre le réseau et l'UE. Enfin, le MME maintient un contexte de l'UE tant que celui-ci est enregistré au réseau. Ce contexte contient notamment les paramètres de sécurité et les capacités radio et réseau de l'UE [1].

❖ HSS (Home Subscribers Service)

Le HSS contient l'information de souscription de l'utilisateur tel que le profil de QoS de l'abonné ou les restrictions d'accès en itinérance. Il contient également les informations concernant les réseaux de données auxquels l'utilisateur peut se connecter. Ces informations peuvent se retrouver sous la forme d'un nom de point d'accès (APN) ou sous forme d'une adresse PDN[1].

❖ P-GW (Packet-Switch GetWay)

La P-GW a pour rôle d'allouer une adresse IP à l'UE. Elle permet également de mettre en application la qualité de service. La P-GW alloue ainsi des paquets IP transférés au sein de bearers de QoS différentes et joue ainsi un rôle déterminant dans le cadre de la gestion de la qualité de service[1].

❖ PCRF (Policy and Charging Rules Function)

Le PCRF est un nœud optionnel au sein de l'architecture EPC. Toutefois, il permet d'appliquer des règles de gestion évoluées sur le trafic et la facturation de l'utilisateur en fonction de son offre, le PCRF peut communiquer au PCEF (policy control enforcement function) un ordre afin que ce dernier diminue le débit de l'utilisateur. Le PCRF peut également indiquer lors de l'établissement d'une session ou cours de session les caractéristiques de qualité de service

(QoS Class Identifier et débits) à appliquer par le PCEF sur les flux de données. Le PCRF s'assure que le traitement appliqué est en accord avec le profil souscription de l'utilisateur. [4].

❖ S-GW (Serving Gateway)

Tous les paquets IP à destination d'utilisateurs sont transférés à travers la S-Gw, qui sert de point d'ancrage pour les bearers de données lorsque l'UE est en mobilité entre plusieurs eNodeB. La S-GW conserve également contextes sur les bearers de l'UE lorsqu'il est en veille. Si elle reçoit des données destinées à un UE en veille, la S-Gw contacte le MME pour notifier l'UE et rétablir ainsi les bearers associés aux contextes. Par ailleurs, la S-GW gère quelques fonctions annexes au sein du réseau visité dans le contexte d'itinérance. La S-GW sert également de point d'ancrage pour l'interfonctionnement avec d'autres technologies d'accès 3GPP comme l'UMTS ou GPRS [4]

I-3-4 Les caractéristiques fondamentales de la 4 G

A- La capacité de la 4G

Le LTE a été pour la première fois discuté au 3GPP, les prévisions de trafic indiquaient déjà clairement que les besoins de capacité augmenteraient significativement. On constate a posteriori que cette anticipation s'est vérifiée. Une raison majeure ayant motivé l'introduction du LTE est par conséquent le besoin d'accroître la capacité des réseaux mobile [7].

B- Débit sur l'interface radio

La technologie LTE offre un débit de 100 Mbit/s pour le flux descendant et de 50 Mbit/s pour le flux montant. Pour ce qui est de l'interface radio E-UTRAN, elle doit avoir la possibilité de supporter un débit maximum. L'allocation d'une bande passante 20 MHz supporte un débit de 100 Mbit/s pour le sens descendant et de 50 Mbit/s pour le sens montant.[7]

A- Mobilité

Avec le facteur de la mobilité, la technologie assure le bon fonctionnement à des vitesses comprises entre 120 et 350 km/h où le « handover» .LTE ne permet que le « hard handover » et non pas le « soft handover » dans des conditions où l'usager se déplace à grande vitesse.[8]

D-Flexibilité dans l'usage de la bande

La LTE permet l'utilisation d'une bande variée, avec les possibilités suivantes : 1.25, 2.5, 5, 10, 15 et 20MHz, pour les sens descendant et montant. Ce choix permet à l'opérateur un déploiement flexible selon les services proposés et besoins des clients.[8]

E- Codage et sécurité

L'utilisation du codage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est une technologie de codage radio de type « Accès multiple par répartition en fréquence » (AMRF ou en anglais FDMA) pour la liaison descendante et du SC-FDMA (Le single-carrier FDMA est une technologie de codage radio de type « Accès multiple par répartition en fréquence» pour la liaison montante au lieu du W-CDMA en UMTS [9].

L'OFDMA et sa variante SC-FDMA sont dérivés du codage OFDM (utilisé par exemple sur les liens ADSL et dans les réseaux Wi-Fi), mais contrairement à l'OFDM, l'OFDMA est optimisé pour l'accès multiple, c'est-à-dire le partage simultané de la ressource Spectrale (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs distants les uns des autres. L'OFDMA est compatible avec la technique des antennes MIMO [9].

F- Multiplexage

Il existe deux modes de multiplexage de fréquences : multiplexage de fréquences (FDD) et multiplexage temporel (TDD). En mode FDD (Frequency Division Duplexing), l'émission et la réception se font à des fréquences différentes. En mode TDD, l'émission et la réception transitent à une même fréquence, mais à des instants différents. [9].

I-4 Technologies employées dans le réseau 4G**I-4-1 La modulation**

La modulation utilisée dans le LTE est une modulation adaptative qui varie en fonction de la distance qui sépare l'abonné de l'eNodeB. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation : QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)(4QAM), 16-QAM et 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation).[11]

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) permet de doubler l'efficacité de la modulation d'impulsion en amplitude (PAM) en modulant les amplitudes des composants sinus et cosinus de la porteuse. Le signal produit consiste en deux trains d'impulsions PAM en quadrature de phases

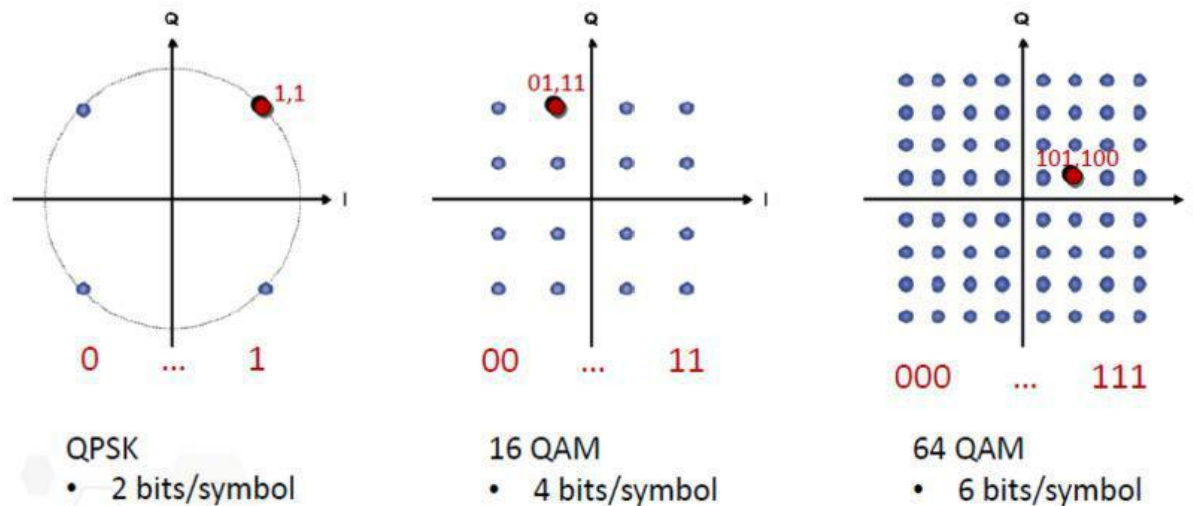


Figure I.6: Modulation QAM

I-4-2 Techniques d'accès:

La modulation du LTE est basée essentiellement sur l'utilisation de la technologie OFDM et des technologies d'accès associés, OFDMA/SC-FDMA.

❖ OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

Le multiplexage OFDM est une technique qui consiste à subdiviser la bande de transmission en N sous canaux, conduisant à une augmentation de la durée symboles. C'est une technique de modulation multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide qui permet de diviser le flux de données à transmettre en N sous flux de données parallèles, qui seront transmis sur des sous bandes orthogonales différentes. Cette technique permet d'offrir une grande efficacité au niveau de l'utilisation du spectre et de la puissance grâce à l'utilisation de N sous-porteuse orthogonales et très proche l'une de l'autre.[11]

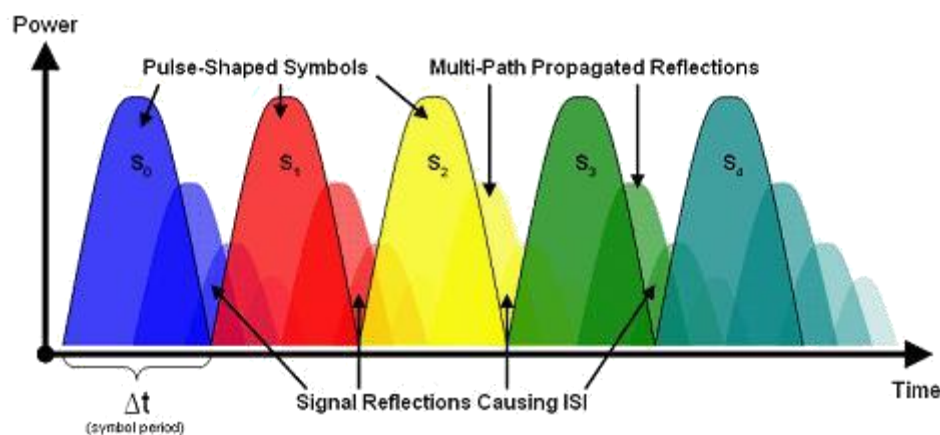


Figure I.7: Modulation OFDM

De plus, l'augmentation de la durée symbole accroît la robustesse de l'OFDM face au temps de propagation du aux trajets multiples (NLOS). D'autre part, une grande immunité contre les interférences inter-symboles crée par la propagation NLOS est apportée par l'insertion d'un temps de garde appelé aussi préfixe cyclique (CP). En effet, le symbole OFDM est allongé avec ce préfixe qui doit être plus grand que le plus grand des retards qui apparaissent dans le canal. Si un symbole d'une transmission précédente arrive en retard à cause de la propagation multi-trajets, il entre en collision avec le CP du symbole actuel, et comme la taille du CP est suffisante, cette collision ne peut pas affecter le reste du symbole, où il y a les informations utiles.

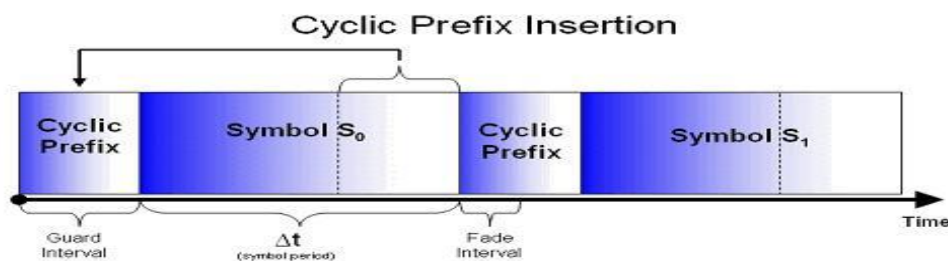


Figure I.8: Préfixe Cyclique

❖ SC-FDMA

La technique d'accès multiple à division de fréquence et à canal unique (SC-FDMA) est adoptée à la place de l'OFDMA pour la liaison montante du système LTE. Le principe de base du SC-FDMA est identique à l'OFDMA à la différence qu'une DFT est appliquée avant la modulation OFDM figure I.9, ce qui permet de disperser les symboles de données sur l'ensemble de sous porteuses transportant l'information et permet ainsi de produire une structure à une seule porteuse. Le SC-FDMA présente un PAPR réduit par rapport à l'OFDM, ce qui le rend attrayant pour la transmission en sens montant du fait que l'UE en bénéficie en terme d'efficacité de la puissance transmise [5].

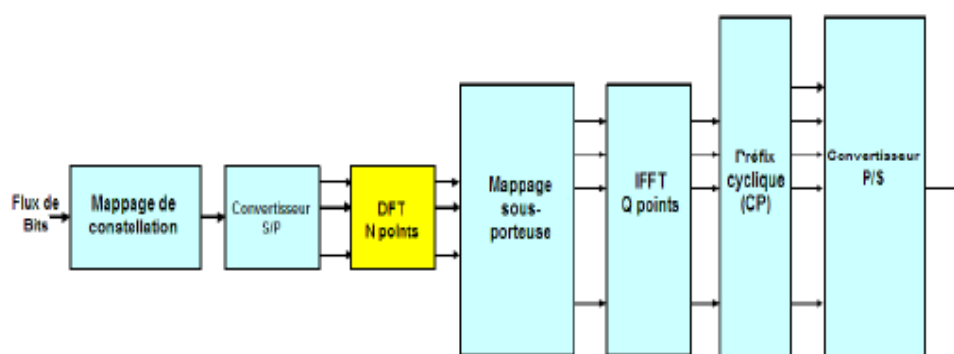


Figure I.9 : Schéma bloc du SC-FDMA

❖ OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access)

Toujours côté radio, la 4G introduit, dans le sens descendant une nouvelle modulation, l'OFDMA appelée également 'multi-carrier' (multi-opérateurs), déjà notamment utilisée en Wi-Fi, en Wimax et en xDSL. Elle offre une meilleure efficacité spectrale, un faible temps de latence et résiste mieux aux interférences. [11]

Cette technique de multiplexage d'accès consiste la répartition du signal sur des porteuses orthogonales pour transmettre le signal indépendamment et à des fréquences différentes.

I-5 Structure des ressources de transmission du LTE

Le duplexage définit la manière dont sont séparées les transmissions sur la voie descendante et sur la voie montante. La voie descendante, aussi appelée DownLink (DL), correspond à la transmission de la station de base vers l'UE. La voie montante, aussi appelée UpLink (UL), correspond à la transmission de l'UE vers la station de base. Il existe deux principaux modes de duplexage, tous deux gérés par l'interface radio du LTE [5]:

- le duplexage en fréquence ou Frequency Division Duplex (FDD) ;
- le duplexage en temps ou Time Division Duplex (TDD).

I.5.1 Structure de la trame en mode FDD

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

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

- La structure de trame radio qui est utilisé pour la transmission en mode FDD : Dans le FDD bidirectionnel, dix (10) sous-frames peuvent être utilisés pour la voix descendante ou montante puisque ces derniers utilisent des fréquences différentes.

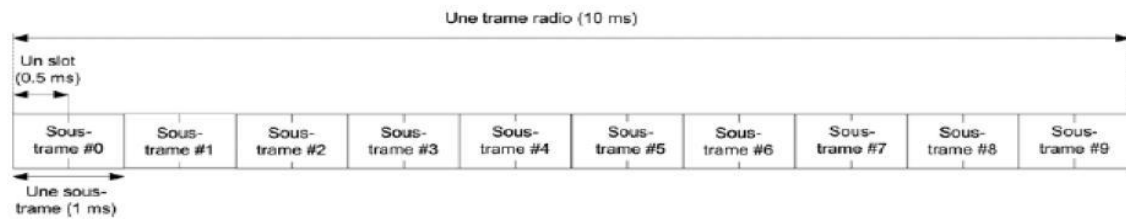


Figure I.10 : Structure de la trame LTE de type FDD

Dans le domaine fréquentiel, les ressources sont groupées en unités de 12 sous porteuses (ainsi elles occupent une bande totale de 180kHz). Une seule unité de 12 sous porteuses d'une durée d'un slot est appelée block de ressources (RB).

L'unité élémentaire de ressources est appelée élément de ressource (RE) qui consiste en une sous porteuse pour une durée d'un symbole OFDM. Un RB comprend alors 84 RE's dans le cas du CP normal, et 72 dans le cas du CP étend [5].

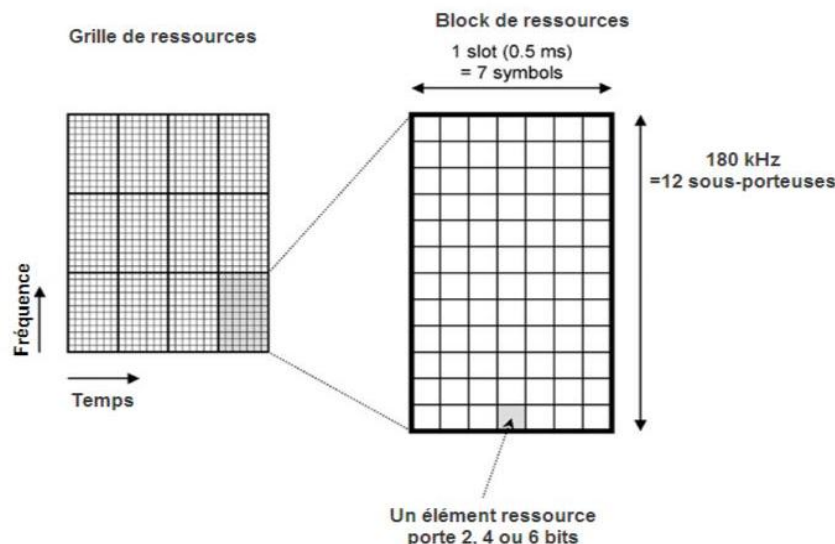


Figure I.11 : Grille de ressources du système LTE

I.5.2 Structure de la trame en mode TDD

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

Cette technique présente un avantage certain dans le cas où les débits d'émission et de réception sont variables et asymétriques. Lorsque le débit d'émission augmente ou diminue, davantage ou moins de bande passante peut être allouée. Un autre avantage de cette technique concerne les terminaux mobiles se déplaçant à très faible vitesse ou en position fixe.

- La structure de trame radio qui est utilisé pour la transmission en mode TDD : Certaines sous-trames sont réservées pour la voie montante tandis que d'autres le sont pour la voie descendante. Ce mode dispose de sous-trames spéciales. Autrement dit, contiennent un temps de garde (GP ou Guard Period) permettant de basculer entre la voie montante et descendante.

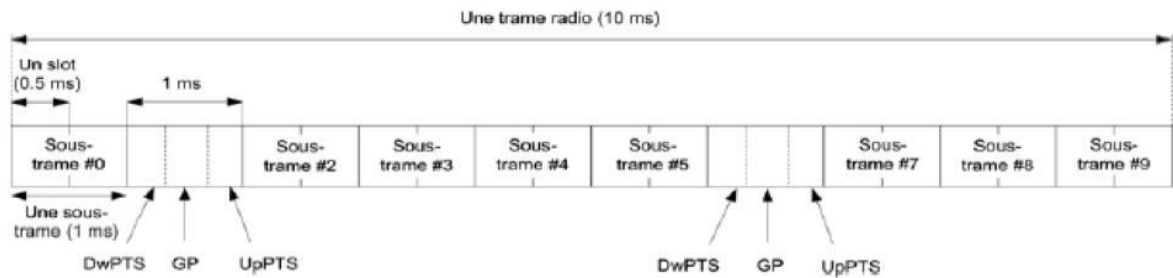


Figure I.12 : Structure de la trame LTE de type TDD

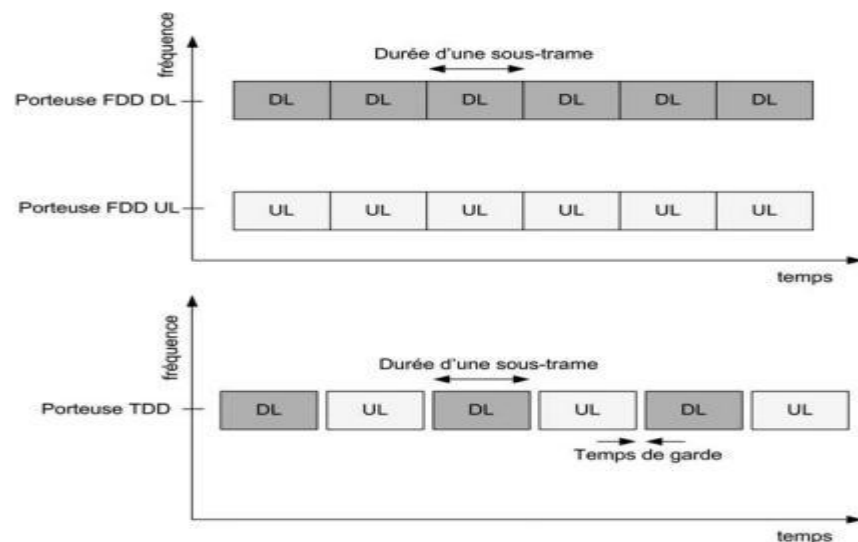
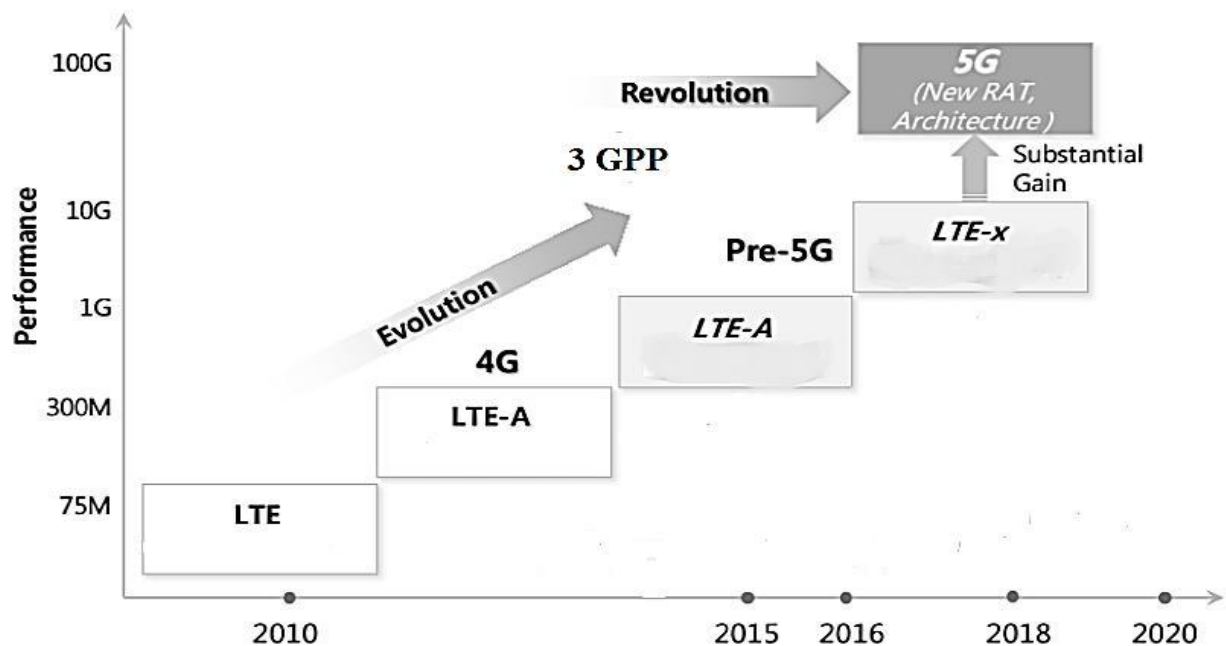


Figure I.13 : Concept de schéma duplex

Tableau I.1 Caractéristiques de la LTE [9]

Largeur de bande en (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de Blocs de ressources	6	15	25	50	75	100
Nombre de sous porteuses	72	180	300	600	900	1200
Fréquence d'échantillonnage (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Taille FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Nombre de symboles OFDM par sous trame	14/12 (selon la durée du CP)					
Longueur CP normal	5.2 pour l=0 4.7 pour l=1.2					
Longueur CP étendu	16.7					
Espacement sous porteuses (KHz)	15	15	15	15	15	15

I-6L'évolution de réseau LTE**Figure I.14** : Evolution de réseau LTE.

I.6.1 LTE vers LTE Advanced

Ce nouveau standard est une évolution du LTE retenu par la plupart des opérateurs pour la 4G. Il permettrait d'atteindre un débit descendant maximal de 1 Gb/s en situation fixe, et de 100 Mb/s en mobilité. Cette nouvelle norme sera capable de mieux distribuer la charge sur le réseau, et pourra supporter plus d'utilisateurs sur une même cellule. La LTE-Advanced utilisera :

- Principe de transmission multi-antennes MIMO.
- Agrégation du spectre.
- Étalement de la bande 40 -100 MHz

I.6.2 Cinquième génération: 5G

L'évolution des générations mobiles avait pour ambition d'améliorer la vitesse afin de supporter l'usage croissant de l'Internet mobile. C'est en partie le cas pour la 3G et ça l'est encore plus pour la 4G, quand celle-ci est disponible, puisqu'elle permet des débits pouvant atteindre les 300 Mbit/s, selon les opérateurs et les fréquences utilisées.

Avec de telles performances, on peut légitimement se demander l'intérêt de développer, dès maintenant, un nouveau standard. C'est que l'enjeu de la 5G n'est pas de répondre aux problèmes d'aujourd'hui, ceux-là ne nécessitent que des efforts financiers et logistiques de la part des opérateurs pour améliorer leur couverture. Non, c'est pour les utilisations de demain qu'est pensée la 5G : l'ensemble des usages qui subiront de plein fouet les limitations de nos infrastructures.

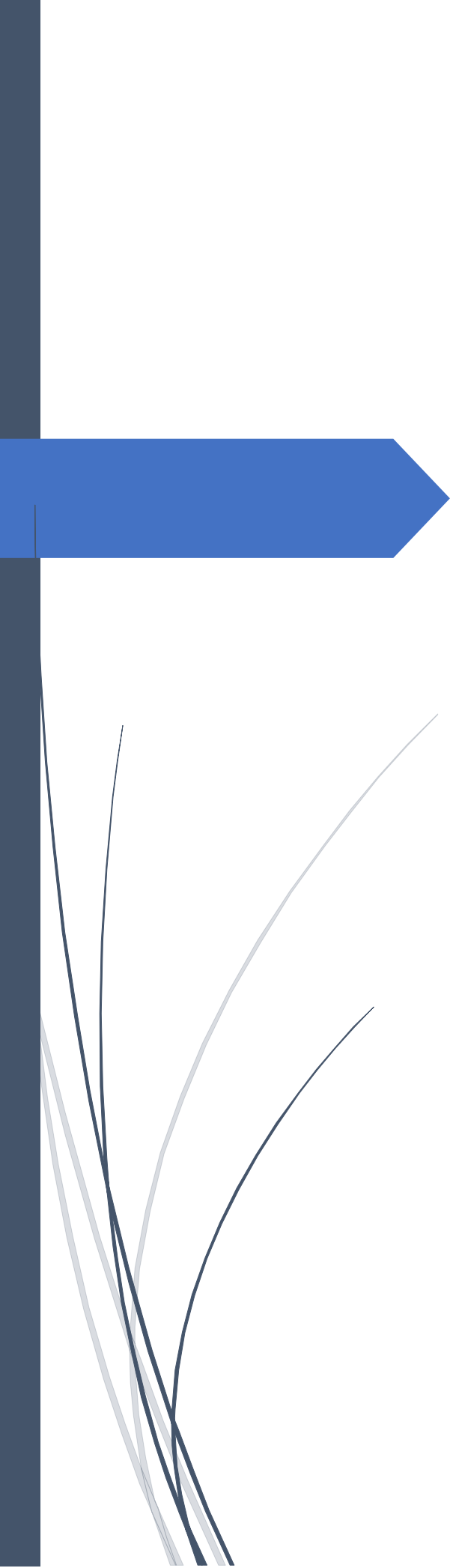
La 5G est à des années de devenir un standard, et pour l'instant, l'industrie elle-même peine à la définir. Et pour cause, la 5G, c'est d'abord beaucoup d'idées et une promesse : répondre aux besoins exponentiels en matière de télécommunication. [11]

Le futur standard est placé sous le signe de la convergence. Il n'y aura vraisemblablement pas une seule 5G, mais différentes technologies adaptées aux différents usages de demain et capables de communiquer entre elles. Les réseaux 4G ont encore un large potentiel d'amélioration : ils seront optimisés et serviront de fondation au futur standard. [11]

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des différents composants et caractéristiques de la technologie LTE (quatrième génération). L'architecture du système LTE présente plus simplicité pour qu'elle soit la plus plate (flat architecture) possible en omettant des éléments du réseau : le RNC pour la (3G) et la BSC pour la (2G) ce qui en résulte une réduction considérable de la latence des données transmises. De point de vue modulation et accès nous avons aussi vu les différences des technologies d'accès, l'OFDMA et le SC-FDMA.

Les réseaux de prochaine génération orientent la planification des réseaux cellulaires vers des nouvelles avenues de recherche.



CHAPITRE II

Description de la couche physique

II.1 Introduction

La couche physique de la technologie LTE est un moyen efficace d'envoyer des données et des signaux de contrôle entre station de base et l'utilisateur mobile. Dans ce chapitre, nous présentons une brève description du fonctionnement de la couche physique, la couche MAC, ainsi nous expliquons les différentes interactions qui existent entre elles. Nous allons modéliser les différents blocs de la couche physique dans le cas d'une liaison descendante (lien entre un eNodeB et un UE) à travers les canaux de transport descendante.

II.2 La couche physique

2.1 Définition

La couche 1, appelée également Layer 1 (L1) ou couche PHY, représente la couche physique. Elle est chargée de transporter l'information générée par les couches supérieures, son rôle est d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations inhérentes au canal radio mobile. D'un point de vue fonctionnel, la couche physique offre un service de transport sur l'interface air à la couche MAC [4]

2.2 Les caractéristiques clés de la couche physique

Outre les modulations OFDM et SC-FDMA, la couche physique du LTE a été conçue autour de deux caractéristiques clés :

- la gestion des antennes multiples à l'émission et à la réception (le MIMO).
- l'optimisation conjointe des couches physique et MAC.

Le MIMO a été pris en compte nativement dans la conception de la couche physique, contrairement au HSDPA où il avait été ajouté au système existant. Le MIMO améliore la robustesse de la transmission et les débits, notamment grâce à la transmission de plusieurs flux indépendants d'information sur les mêmes ressources temps-fréquence. Cette intégration originelle couplée à l'absence d'interférence intracellulaire dans les systèmes OFDM conduit à une grande efficacité du MIMO dans le système LTE. [4]

II.3 La couche MAC(Medium Acces Control)

La sous-couche MAC permet l'accès et l'adaptation au support de transmission grâce aux fonctions suivantes :

- le mécanisme d'accès aléatoire sur la voie montante.

- la correction d'erreurs par retransmission HARQ (Hybride Automatic Repeat Request) lors de la réception d'un acquittement HARQ négatif
- les allocations dynamique et semi-statique de ressources radio (scheduling) ;
- le maintien de la synchronisation sur le lien montant ;
- la priorisation des flux sur le lien montant.[4]

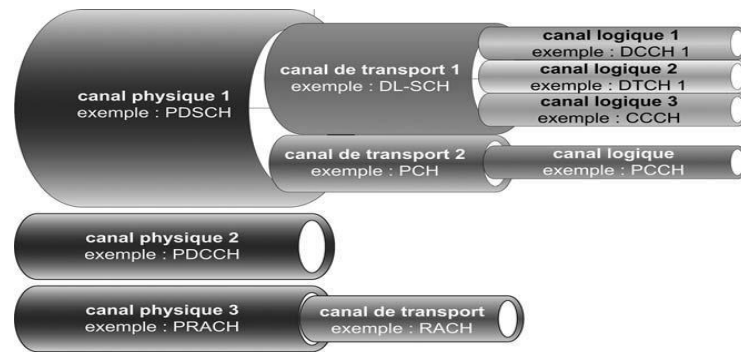
II.4 Les canaux

Le concept de canal

Le système LTE, de manière similaire à l'UMTS, utilise le concept de canal afin d'identifier les types des données transportées sur l'interface radio, les caractéristiques de qualité de service associées, ainsi que les paramètres physiques liés à la transmission. Ces canaux sont des composantes de l'architecture du système et sont donc à distinguer du canal de transmission (qui capture les effets de la propagation radio) et du canal fréquentiel (ou porteuse) déjà rencontrés.

On distingue trois classes de canaux, selon les couches du modèle OSI auxquelles ils sont attachés.

- **Les canaux de transport** : qui opèrent entre la couche MAC et la couche physique et sont définis par la manière et les caractéristiques selon lesquelles les données sont transportées par l'interface radio (par exemple la méthode d'accès aux ressources radio)
- **Les canaux logiques** : fournissent des services au niveau de la couche MAC vers les couches supérieures, ils opèrent entre les couches RLC et MAC et sont définis selon le type d'information qu'ils transportent (par exemple : signalisation du plan de contrôle ou données du plan usager).
- **les canaux physiques** qui sont utilisés par la couche physique et sont définis par les caractéristiques physiques de leur transmission (par exemple leur placement dans la trame).

**Figure II.1** les canaux de l'interface radio LTE

- Le tableau suivant présente de manière synthétique les différents canaux physiques, pour la voie descendante

Tableau II.1 Canaux physiques pour la voie descendante

Canal physique	Acronyme	Caractéristiques	Usage
Physical Downlink Shared Channel	PDSCH	Ses paramètres de transmission sont déterminés dynamiquement par l'adaptation de lien	Pour la transmission du DL-SCH et du PCH
Physical Broadcast Channel	PBCH		Pour la transmission du BCH
Physical Control Format Indicator Channel	PCFICH	Le PCFICH est placé dans le 1 ^{er} symbole OFDM de chaque sous-trame	Indique le nombre de symboles OFDM utilisé pour la transmission du PDCCH dans une sous-trame
Physical Downlink Control Channel	PDCCH	Le PDCCH est placé dans les premiers symboles OFDM de chaque sous-trame	Pour la transmission d'informations de contrôle : Schéma de modulation et du codage et allocation de ressources du DL-SCH et PCH, information d'ARQ pour le DL-SCH
PHICH	PHICH	Le PHICH est placé dans les premiers symboles OFDM de chaque sous-trame	Porte les acquittements d'HARQ

II.5 Les signaux physiques

Outre les canaux physiques, la couche physique utilise également des signaux physiques, qui ne portent pas d'information issue des couches supérieures (c'est-à-dire de canaux de transport) mais sont nécessaires aux opérations de la couche physique. Les signaux physiques correspondent également à des éléments de ressource et sont associés à des paramètres de transmission physiques prédéfinis. On distingue deux grands types de signaux physiques : [4]

II.5.1. signaux de référence ou Reference Signals (RS)

Les signaux de référence portent des séquences de symboles prédéfinies et connues du récepteur, qui lui permettent notamment d'estimer le canal de transmission. Cette information est cruciale pour de nombreuses fonctions de la couche physique.

II.5.2. signaux de synchronisation

Les signaux de synchronisation permettent au mobile de se synchroniser à la cellule et sont présents en voie descendante uniquement. Chaque cellule émet un signal de synchronisation qui l'identifie de manière unique dans une zone donnée.

Tableau II.2 signaux physique pour la voix descendante

Signal physique	Acronyme	Caractéristiques	Usage
Cell-specific Reference Signals	CRS	Sont communs à la cellule	Pour la démodulation cohérente à l'UE, la mesure de la qualité du canal, la déféminisation des paramètres MIMO, le maintien de la synchronisation, les mesures de mobilité
UE-specific Reference Signals	DRS	Sont spécifique à un UE particulier	Pour la démodulation cohérente
Primary, Secondary Synchronisation Signal	PSS, SSS	Sont communs à la cellule	Pour la synchronisation initiale, la détection et l'identification cellule

II 5.3. Rayleigh Fading

La distribution de rayleigh est une distribution de probabilité continue pour les valeurs positives à valeurs variables aléatoires. Dans les modèles de décoloration de Rayleigh, l'amplitude du signal passant par un canal de communication s'estompera (varie aléatoirement) selon la distribution de Rayleigh. La fonction de densité de probabilité d'une variable aléatoire de Rayleigh distribuée r est donnée par la formule suivante :

$$FR(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (2)$$

Avec $r \geq 0$

La décoloration de Rayleigh est un modèle raisonnable quand il y a beaucoup d'objectifs dans l'environnement qui dispersent le signal radio avant qu'il arrive au récepteur. Le théorème de la limite centrale maintient que, s'il y a une dispersion suffisante, la réponse impulsionnelle du canal sera modélisée comme un processus Gaussien indépendamment de la distribution des différents composants.[18]

La décoloration de Rayleigh est considérée comme un bon modèle pour la propagation du signal troposphérique et de l'ionosphère, de même qu'elle se rapproche de l'effet des environnements urbains fortement bruités sur les signaux radio [18]

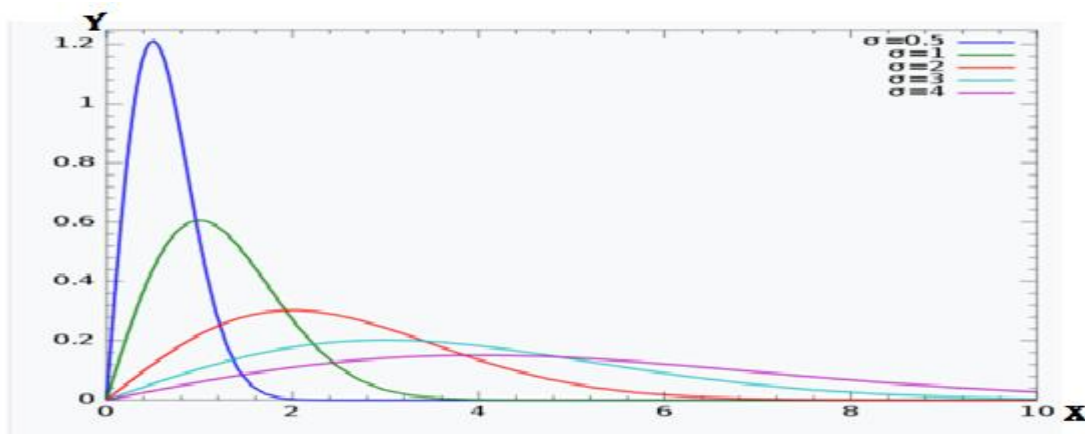


Figure II.2 Variation d'amplitude en fonction de densité de probabilité

Axe des x : densité de probabilité

Axe des y : amplitude

Exemple :

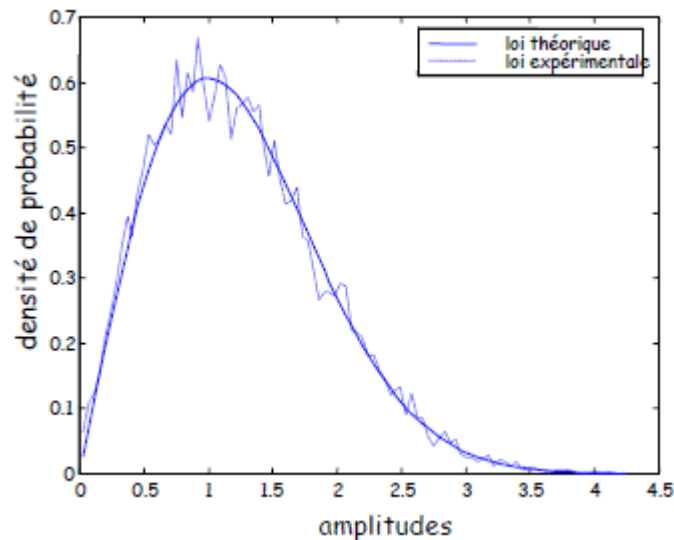


Figure II.3 : Fonction de densité de probabilité

II.6 Partie émetteur

Les données provenant des couches supérieures sont encapsulées sous la forme de trames appelées « bloc de transport » avant leur passage dans le lien radio et leur transmission dont la durée est caractérisé par le TTI (Transmission Time Interval).

L'émetteur commence avec les données de ressources qui sont regroupées sous la forme des blocs de transport.

Dans chaque TTI, un bloc de transport sera transféré d'abord à la partie codage du canal qui se compose de deux codeurs CRC et Turbo codeur. Ensuite, le bloc de bits codés est désigné comme un bloc de code. Le bloc d'adaptation des débits combiné avec la technique de retransmission ARQ hybride est une sorte de coordinateur entre le codage de canal et les blocs du canal physique partagé en liaison descendante.

Comme illustré à la figure 3.1, il existe deux lignes de traitement avant le bloc de mappage de couche. Les deux lignes correspondent au traitement en parallèle de deux mots de codes dans le cas d'une transmission avec multiplexage spatial. Dans le cas contraire une seule ligne de traitement est considérée.

Le mappage de couche et le précodage combinés avec différents schéma de transmission sont les deux clés d'approche pour permettre la fonctionnalité dans le LTE/LTE-Advanced .tous les deux sont inclus dans le bloc mappage d'antenne dans la couche physique de la liaison descendante.

Enfin les blocs mappage de ressource physique et OFDM sont définis à chaque port d'antenne.

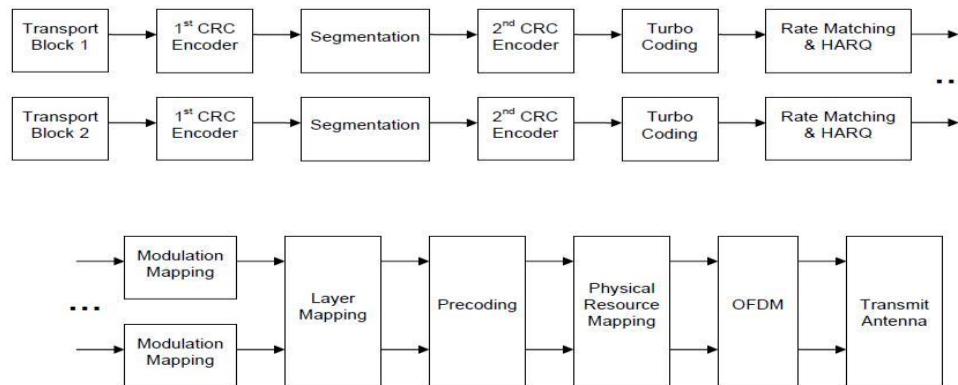


Figure II.4 : Schéma de la transmission pour un lien DL

II.7 Les fonctions de la couche physique

La couche physique réalise les fonctions suivantes pour la transmission de données : [4]

- **le codage de canal**, qui protège les bits d'information contre les erreurs de transmission, en introduisant de la redondance dans la séquence de bits transmis ;
- **la modulation**, qui associe les bits à transmettre à des symboles de modulation capables d'imprimer une onde électromagnétique ;
- **les traitements spatiaux (dits MIMO)**, qui précèdent les symboles de modulation afin de les transmettre de plusieurs antennes (par exemple pour donner une direction au signal émis) ;
- **la modulation multi porteuse**, qui associe le signal à transmettre sur chaque antenne à des porteuses multiples, selon le principe de l'OFDM pour la voie descendante et du SC-FDMA en voie montante.

II.7.1 Le codage de canal

Le principe du codage de canal consiste à une représentation des données de façon à être résistant aux erreurs et leur protection pour une meilleure fiabilité lors de leur transmission à travers un canal donné en utilisant les codes correcteur d'erreurs **CRC** et **Turbo codage**.

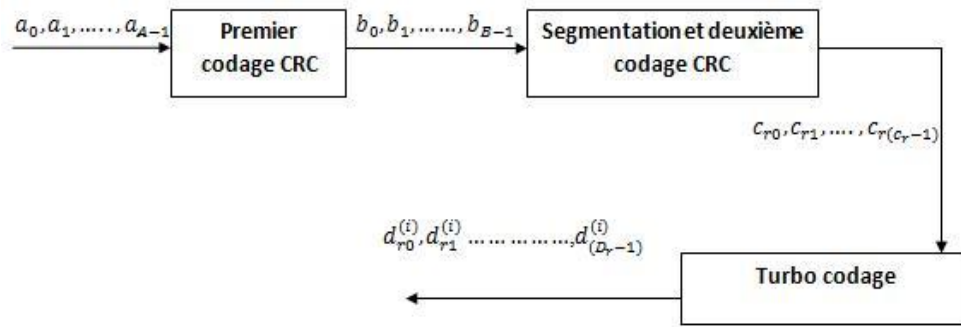


Figure II.5 : Structure du codage canal

A. Contrôle à redondance cyclique (CRC):

Les CRC sont évalués (échantillonnés) avant et après la transmission ou le transfert, puis comparés pour s'assurer que les données sont strictement identiques. Les calculs de CRC les plus utilisés sont conçus afin de pouvoir toujours détecter les erreurs de certains types, comme celles dues par exemple, aux interférences lors de la transmission.

CRC est utilisé au début du codage de canal. Il existe deux régimes CRC pour PDSCH: «gCRC24A» et «gCRC24B». Deux d'entre eux possèdent une longueur de 24 bits de parité, mais travailler avec différents générateurs polynômes cycliques. Le «gCRC24A » se concentre sur un bloc de transport, tandis que le « gCRC24B » se concentre sur le bloc de code, qui est une segmentation d'un bloc de transport lors de la taille d'un bloc de transport est plus grande que la limite supérieure (6144 bits).

.si la taille du bloc de code dépasse la taille maximale, le bloc de code va être segmenté sous la forme $C = \lceil B / (Z-L) \rceil$ ou $L=24$ donc $C = \lceil B/6120 \rceil$ bloc de code. Si la taille du bloc < 40 bits des bits de zéro seront ajoutées au début de bloc de code [12].

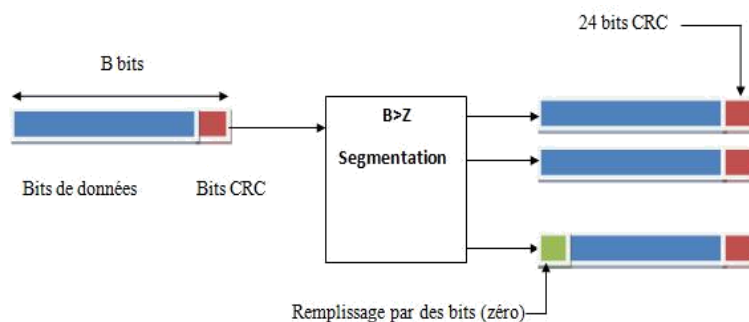


Figure II.6 : Schéma du code CRC

B. Turbo codage

Le principe du turbo code, comme tout code correcteur d'erreur, est d'introduire une redondance dans le message afin de le rendre moins sensible aux bruits et perturbations subies lors de la transmission.

Le codage de canal pour PDSCH adopte Turbo codage, qui est une sorte de codage de canal robuste. Lors de l'utilisation d'un canal AWGN, la performance de Turbo code peut être proche des limites théoriques de la capacité de Shannon. Le schéma du turbo codeur utilisé est un code convolutionnel parallèle concaténé avec deux codeurs convolutionnel récursif et un entrelaceurQPP (quadratique permutation polynomial) Ou bien Turbo code internal interleaver. [12]

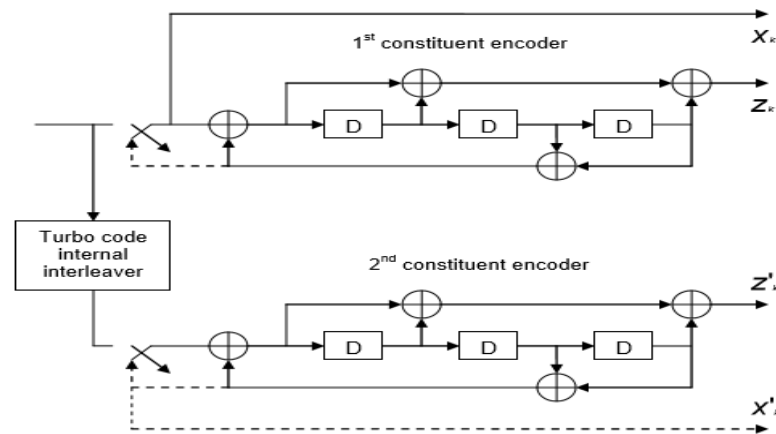


Figure II.7: Structure du turbo codeur

II.7.2 La modulation

La modulation utilisée dans le LTE est une modulation adaptative qui varie en fonction de la distance qui sépare l'abonné de l'eNodeB. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation : QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) (4QAM), 16-QAM et 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

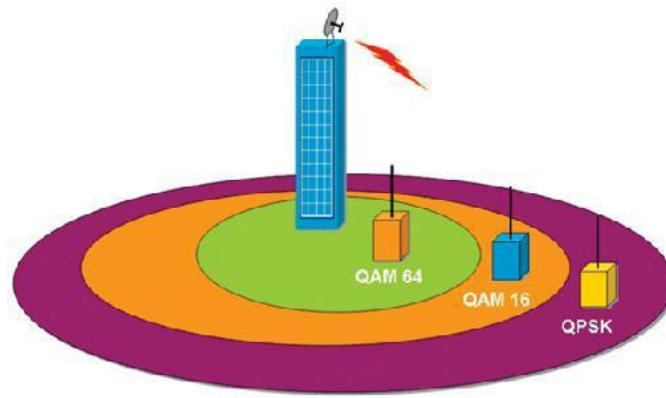


Figure II.8 Modulation adaptative

- La modulation permettant d'associer les bits à des symboles de modulation, tel que

Pour chaque mot de code, le bloc de bits brouillé et doit être modulé avec l'une des Modulations (QPSK, 16 QAM, 64QAM) le résultat est dans un bloc de symboles avec des valeurs complexes.

Les hauts ordres de modulation (64QAM-16QAM) offrent des débits de données plus rapides et des une efficacité spectrale plus élevées. Mais ils sont beaucoup moins résistants au bruit et aux interférences.

- La QAM ou Modulation d'amplitude en quadrature résulte de la combinaison de deux fréquences porteuses sinusoïdales déphasées l'une de l'autre de 90° (d'où le nom de quadrature). Elle peut aussi être vue comme une modulation de phase et d'amplitude. Elle permet des débits élevés avec une rapidité de modulation relativement faible. La QAM16 utilise 4 bits par symbole [11].

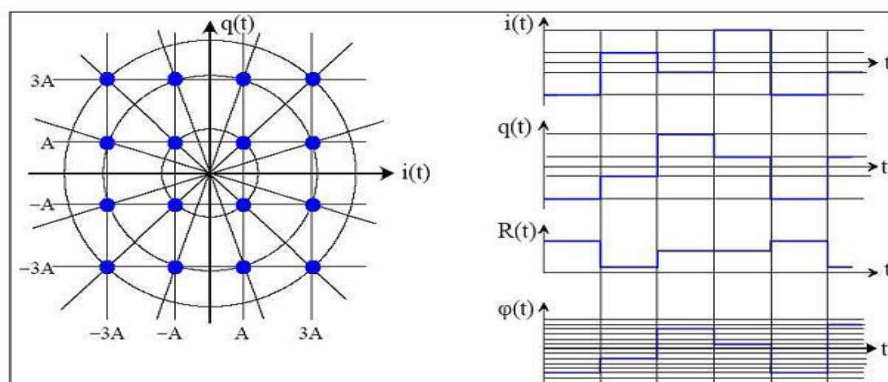


Figure II.9 Modulation QAM.

II.7.3 les traitements spatiaux (MIMO)

Le terme MIMO (Multiple Input, Multiple Output) désigne une technologie d'antenne destinée aux communications sans fil, qui consiste à utiliser plusieurs antennes tant au niveau de la source (émetteur) qu'à celui de la destination (récepteur). Les antennes présentes à chaque extrémité du circuit de communication sont combinées pour minimiser les erreurs et optimiser le débit des données.[1]

Les systèmes MIMO représente une partie essentielle de la technologie LTE/LTE Advanced afin d'assurer les conditions ambitieuses du spectre de fréquence utilisé.

Pour le LTE/LTE Advanced la transmission avec MIMO support une configuration jusqu'à huit antennes d'émissions et huit antennes de réceptions dans le but d'augmenter le débit et la portée de réseaux. Lorsqu'un tel système comprend, seulement, une seule antenne à l'émission et plusieurs antennes à la réception, il est nommé **SIMO** même, lorsqu'il comprend plusieurs antennes à la réception et une seule antenne à l'émission, nommé **MISO**. Finalement, si les deux côtés comptent une antenne chacun, le système est dit **SISO**.

Le MIMO améliore aussi la robustesse de la transmission et les débits, notamment grâce à la transmission de plusieurs flux indépendants d'information sur les mêmes ressources temps-fréquence. Cette intégration originelle couplée à l'absence d'interférence intracellulaire dans les systèmes OFDM conduit à une grande efficacité du MIMO dans le système LTE. [1]

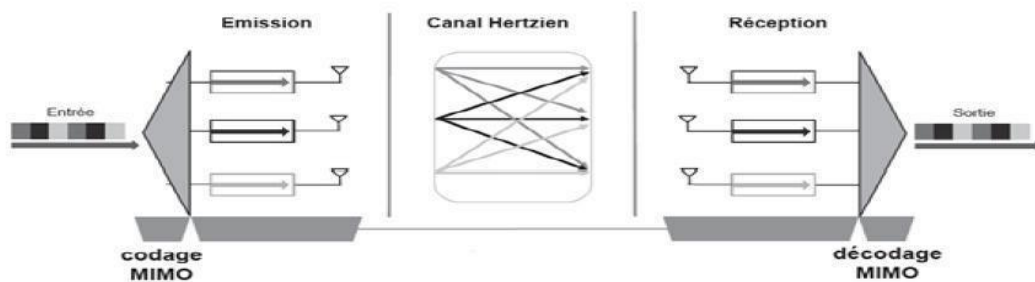


Figure II.10: Un exemple d'un système MIMO

II.7.4 La modulation multi porteuse OFDM

La LTE a introduit un certain nombre de nouvelles technologies, permettant l'emploi efficace du spectre et fournissant des débits beaucoup plus élevés. Au-delà des 11 Mbps est l'utilisation de la technique Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). elle est également utilisée dans les réseaux CPL, L'ADSL et certaines des communications de téléphonie mobile. Ainsi, la LTE a utilisé la technologie OFDM en tant que porteur du signal et les régimes d'accès associés, OFDMA, SC-FDMA

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. [19]

Il consiste à diviser le canal en de multiples sous-canaux. La porteuse elle-même est donc divisée en sous-porteuses (subcarriers) par l'émetteur. C'est au récepteur de reconstituer la communication, à partir de ces différentes informations.[19]

La fréquence utilisée devient donc un multiplexage de sous-fréquences (division Multiplexing).

Pour éviter les interférences, les sous-porteuses sont traitées par une transformation de Fourier nommée Fast Fourier Transform (FFT). Cet algorithme échantillonne les différentes sous-porteuses, de façon à ce que le niveau correspondant à l'information sur l'une d'elle, corresponde à des niveaux nuls sur les autres. Cette transformation de la fréquence est dite orthogonale (Orthogonal Frequency).[19]

OFDM permet une utilisation optimale de la bande de fréquence, tout en apportant une très bonne résistance aux interférences. En effet, les perturbations peuvent n'affecter qu'une à quelques sous-porteuses, et non pas l'ensemble de la transmission. De plus la problématique des multi trajets est réduite, par introduction de code de redondances.

Le risque d'interférence entre symboles, en OFDM qui pourrait arriver en même temps au récepteur, par le biais de chemins différents (multipath) est multiplié. Ainsi, un délai d'attente est respecté entre deux envois. Appelé « Guard Interval » (GI), cette temporisation est de 0,8s (800 nanosecondes). si l'environnement le permet, ce paramètre peut être réduit à 0,4s, ainsi le temps total d'envoi du symbole, incluant le GI passe de 4s à 3,6s, ce qui augmente encore un peu plus le débit possible.

- **Fonctionnement et débits**

Le canal est divisé en 52 sous-porteuses de 312,5 khz chacune. Parmi celles-ci, 48 sont utilisées pour transférer les données.les autres servent à la synchronisation et aux corrections associées. [19]

II.7.4.1 Génération conceptuelle d'un signal OFDM :

Le principe est de grouper des données numériques par paquets de N, qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par chaque donnée une porteuse différente en même temps. [8]

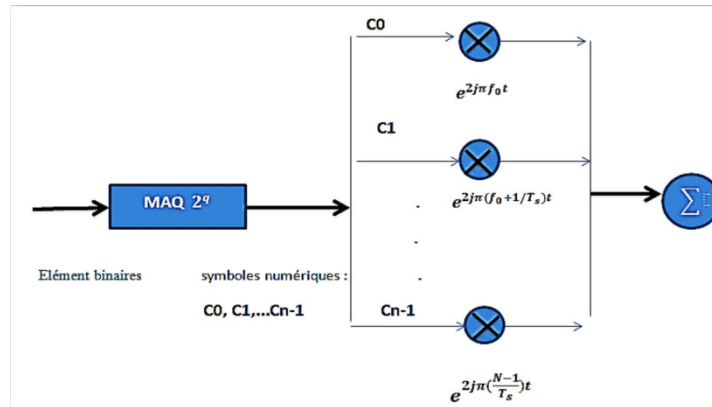


Figure II.11: Schéma de principe d'un modulateur OFDM.

Considérons :

- Une séquence de N données $C_0, C_1, \dots, C_{N-1}$
- T_s la durée symbole.
- f_k la fréquence du signal

Le signal individuel est donc sous la forme complexe

$$C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (2.1)$$

Par suite le signal total émis :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi f_k t} \quad (2.2)$$

Les données numériques C_k sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation de modulation d'amplitude en quadrature MAQ à plusieurs états (4, 16, 64). Ces données sont des symboles q-aires formés par groupement de q bits.[8]

II.7.4.2 Génération pratique d'un signal OFDM

Un signal OFDM est généré en utilisant l'IFFT. Le signal modulé en bande de base $s(t)$ est discrétisé :

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (2.3)$$

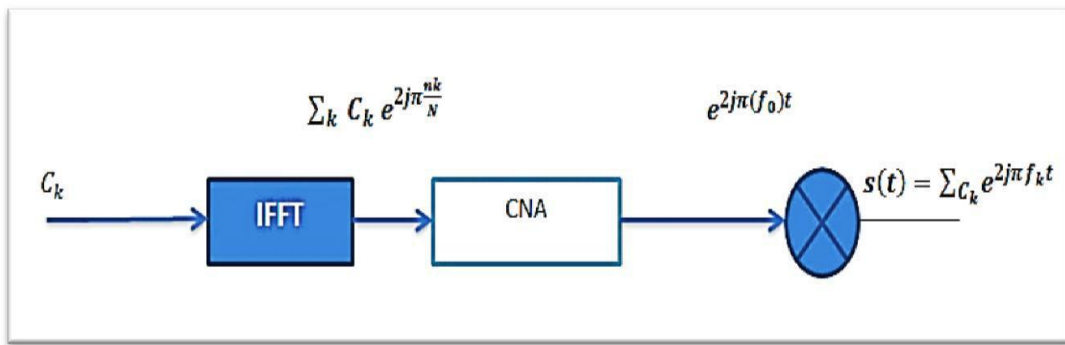


Figure II.12 Schéma de modulation OFDM

Si l'espace entre les fréquences est $1/T_s$, donc le multiplexage est orthogonal. Dans ce cas

Pour :

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s} \quad (2.4)$$

On a :

$$S(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{2j\pi \frac{Kt}{T_s}} \quad (2.5)$$

II.7.4.3 La condition d'orthogonalité

❖ Première condition d'orthogonalité

Le spectre d'une sous-porteuse, modulant une donnée pendant une fenêtre de temps T_s est la transformée de Fourier de cette fenêtre.

❖ Deuxième condition d'orthogonalité

Le spectre du signal OFDM est la somme des spectres de chacune des sous-porteuses. [8]

II 7.4.4. Efficacité spectrale

L'orthogonalité entre les sous porteuses (sous porteuses espacées de $1/T_s$) permet d'arranger les sous porteuses de manière à ce que les lobes latéraux des sous porteuses adjacentes se recouvrent sans pour autant créer de l'interférence entre Porteuses IEP au niveau du récepteur. L'occupation spectrale est alors réduite par Rapport à une FDM (Frequency Division Multiplexing) classique.

Ce spectre s'annule aux fréquences $\{f = f_n + k/T_s\}$ pour tout entier k . $1/T_s$ est donc l'espacement inter-porteur minimal qui garantit à la fois l'orthogonalité entre les porteuses et une efficacité spectrale optimale.[20]

Notons que lorsque la mise en forme est une fonction rectangulaire de longueur T , les filtres adaptés en réception sont des intégrateurs sur la durée T . Les spectres des différentes porteuses sont présentés sur la figure II.12.

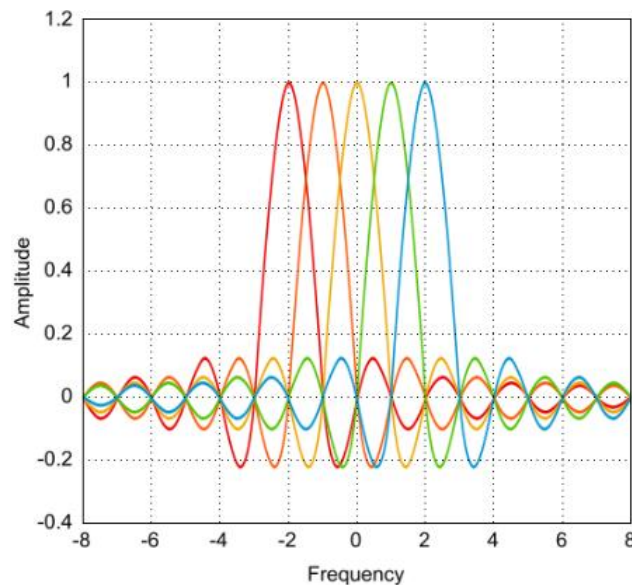


Figure II.13 : Spectre du signal en sortie du modulateur OFDM, décomposé sur chaque porteuse

Axe des x : fréquence.

Axe des y : amplitude.

➤ Préfixe cyclique

La OFDM est résistante à ISIs, parce que sa durée de symbole est longue comparée à celle des symboles de données série, pour un émetteur OFDM de N sub-Carriers, si la durée d'un symbole de données est T', la durée d'un symbole OFDM en quittant l'émetteur:

$$T_s = T'N \quad (2.6)$$

Ainsi, si le délai de propagation d'un canal multi-path est supérieur à T mais inférieur à T_s , le symbole de données dans le flux de données série subit une décoloration sélective de fréquence, alors que le symbole de données sur chaque sous-porteuse ne subit qu'une décoloration à plat. Pour éliminer entièrement l'ISI, un préfixe cyclique (CP) est introduit pour chaque symbole OFDM, et la longueur du CP choisi doit être plus longue que le délai de propagation rencontré. Ainsi que, le CP peut maintenir l'orthogonalité entre les sous-porteurs, ce qui implique que l'ICI est nul. [18]

- Pour éviter ces interférences et absorber ce retard, le symbole OFDM est allongé avec un préfixe cyclique plus grand que le plus grand des retards apparaissant dans le canal. L'introduction d'un préfixe cyclique permet de lutter contre les Interférences Inter Symboles (ISI) [14].
- Deux tailles de CP sont permises :
 - Un court ou normal ($5,21\mu s/4,69\mu s$).
 - Un long ($16,67\mu s$)

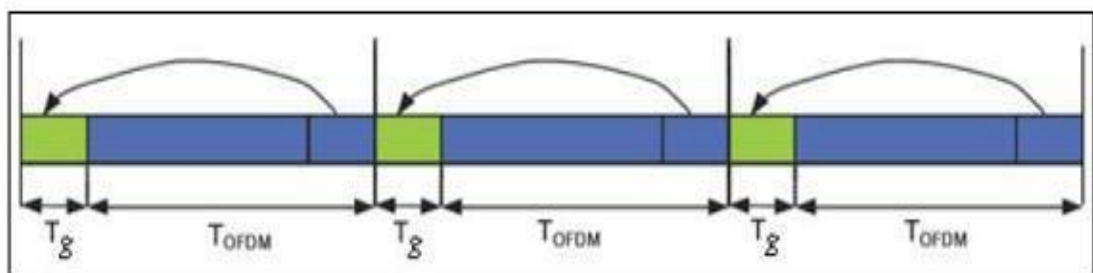


Figure II.14 Insertion du préfixe cyclique

II.7.5 Brouillage

Le mot de code transmis au canal physique dans une sous-trame, doit être brouillé avant la modulation pour faire face aux interférences en effectuant l'opération XOR des bits entrée avec un code de scrambling. Telle que pour chaque mot de code, le bloc de débit ou le nombre de bits dans le mot de code transmis au canal physique dans une sous trame, doit être brouillé avant la modulation pour faire face aux interférences (veut dire qu'on a un chevauchement entre les symboles) intercellulaire. Le résultat est mis dans un bloc de bits brouillés. Les mots codés sont peu-sages multipliés par une séquence orthogonale et un brouillage spécifique à UE. [13]

II.8 Mappage de couche

Dans le mappage de couche, les symboles de modulation pour un ou deux mots de code sont mappés sur une ou plusieurs couches. À l'exception de la transmission sur un port d'antenne unique (dans ce cas, les symboles pour un mot de code sont directement mappés sur une couche), il existe principalement deux types de mappage de couche: un pour multiplexage spatial et l'autre pour la diversité d'émission.

Les symboles complexes modulés d'entrée $d(i)$ sont mis en correspondance avec n couches.

Si un port d'antenne unique est utilisé donc une seule couche est utilisée.

Dans le cas d'un multiplexage spatial, il peut y avoir un ou deux mots de code. Mais le nombre de couches est limité. D'une part, il doit être égal ou supérieur au nombre de mots de code. D'autre part, le nombre de couches ne peut pas dépasser le nombre de ports d'antenne [13].

La chose la plus importante est le concept de «couche». Les couches de multiplexage spatial ont la même signification que «flux». Ils sont utilisés pour transmettre plusieurs flux de données en parallèle, de sorte que le nombre de couches ici est souvent désigné comme le rang de transmission. En l'espace multiplexing, le nombre de couches peut être adaptée au rang de transmission, au moyen de la rétroaction d'un indicateur Rang (RI) au mappage de la couche.

II.9 Partie réception

Pour chacune des entités fonctionnelles coté émetteur, il existe du coté récepteur une entité correspondante pour le traitement inverse.

A la réception les signaux reçus vont subir de l'OFDM inverse et l'inverse du mappage des ressources. Le récepteur (UE) doit faire l'estimation du canal ou les informations de celui-ci doivent être fournies à l'égalisateur. Après l'extraction des couches, deux lignes de traitement opèrent en parallèle dans le cas d'un multiplexage spatial. Sinon le traitement s'effectuera sur une seule ligne.

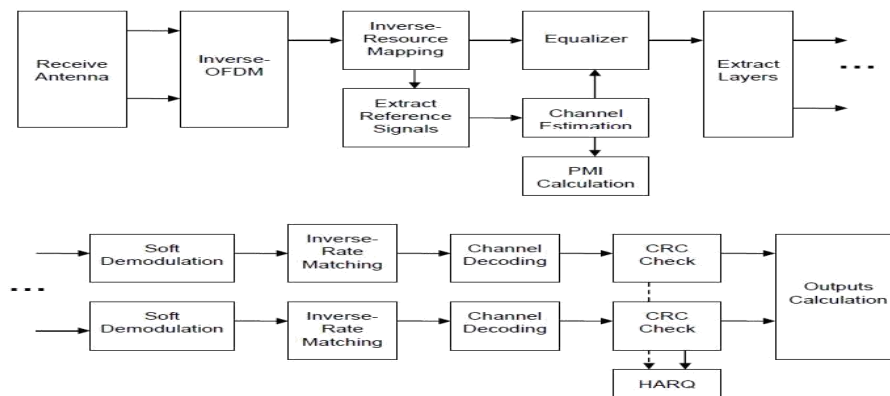


Figure II.15 Structure du récepteur LTE

II.9.1 Démodulation

La partie de démodulation doit travailler en mode soft décision. La fiabilité de chaque bit reçu est mesurée par le rapport de log de vraisemblance :

$$\text{LLR}(b_k) = \log \left[\frac{\text{pr}(b_k=0/X_k)}{\text{pr}(b_k=1/X_k)} \right] \quad (2.7)$$

Le LLR (Log Likelihood Ratio : en français : log vraisemblance) est le rapport des probabilités que les bits 0 ou 1 soit transmis sachant le signal reçu. [15]

II.9.2 Décodage canal

A. Contrôle CRC

Pour le contrôle CRC, un bloc détecteur CRC est appliqué à la réception. Les paramètres spécifiques du détecteur CRC doivent être les mêmes que le générateur CRC pour le «gCRC24A» et «gCRC24B» respectivement.

B. Turbo décodage

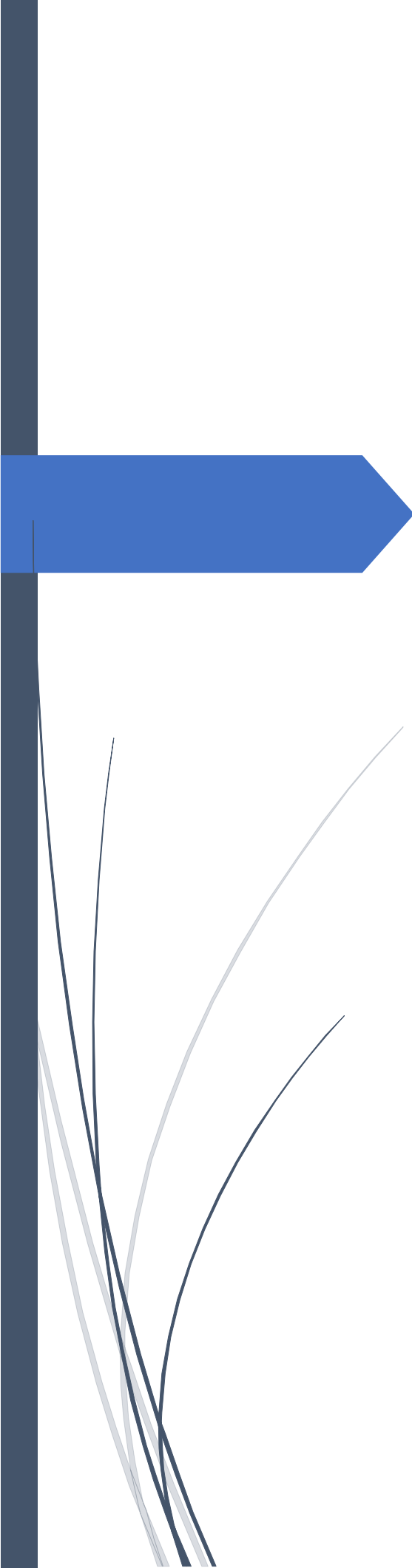
Le turbo décodeur est constitué de deux décodeurs élémentaires à entrée/sortie pondérée ou SISO (soft-input soft-output). Ces décodeurs, disposés en série, travaillent alors de manière séquentielle dans le processus itératif de turbo décodage. Chacun dispose à son entrée :

1. de l'information issue du canal de transmission : la séquence de bits d'information bruitée $\mathbf{Xb}$ et $\mathbf{X'b}$. Puis les séquences de bits de redondance bruitées 1 et 2 respectivement Pour le decodeur1 et le décodeur.

2. de l'information dite à priori pour chacun des décodeurs considérés c'est-à-dire, l'information extrinsèque, noté $Z1$ et $Z2$ produite respectivement par le décodeur élémentaire 1 pour le décodeur 2 réciproquement[15].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes parties qui permettent le fonctionnement de la couche physique de la LTE. Ces parties-là, décrivent les différents opérations par lesquelles le bloc d'information (trame) doit passer en émission (coté eNodeB) et en réception (Coté UE). Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à la mise sous-programme Matlab de toutes les parties constituante de la couche PHY de la LTE.



CHAPITRE III

Mise en Programme Sous MATLAB

III 1. Introduction

L'objectif de notre travail consiste à simuler la couche physique du réseau de téléphone mobile de 4ème génération (LTE/LTE-Advanced). Nous avons tout d'abord modélisé et détaillé les différentes parties de la couche physique en liaison descendante du système. Au cours de ce chapitre, nous allons simuler le fonctionnement de la couche physique en liaison descendante avec l'outil Matlab en variant les différents paramètres, ce qui nous permettra de mettre en évidence l'apport de cette nouvelle technologie sur les performances telles que le débit, le taux d'erreur par bits(BER).

III 2. Présentation de l'outil de simulations

MATLAB dont le nom provient de MATrix LABoratory est un langage de programmation de quatrième générationnetunenvironnement de calcul scientifique et de visualisation de données basé sur le type de variable matricielle. Outre ses grandes capacités de calcul numérique appliqué à différents domaines scientifiques tels le traitement de signal, l'automatique...etc., il intègre des fonctionnalités graphiques de grande qualité en 2D ou 3D. MATLAB est aujourd'hui un langage de programmation complet dans un environnement de développement simple et pratique .[16] Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

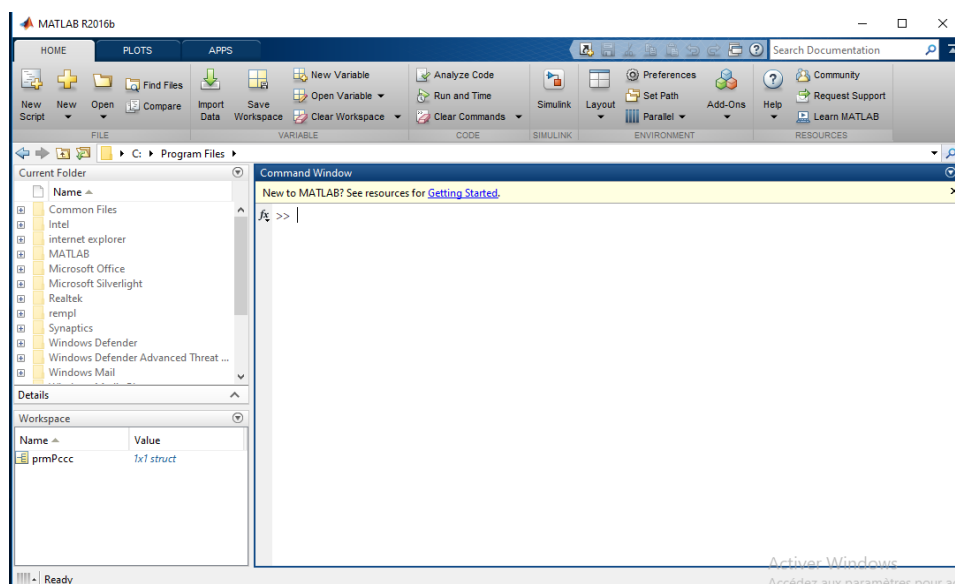


Figure III.1 L'outil de simulation (MATLAB).

- ❖ SIMULINK est un outil additionnel de Matlab, permet la modélisation et la simulation, il est doté d'une interface graphique est d'une extension de MATLAB qui permet de simuler le fonctionnement d'un système modélisé avec une approche schéma bloc Permettent d'évaluer son fonctionnement.

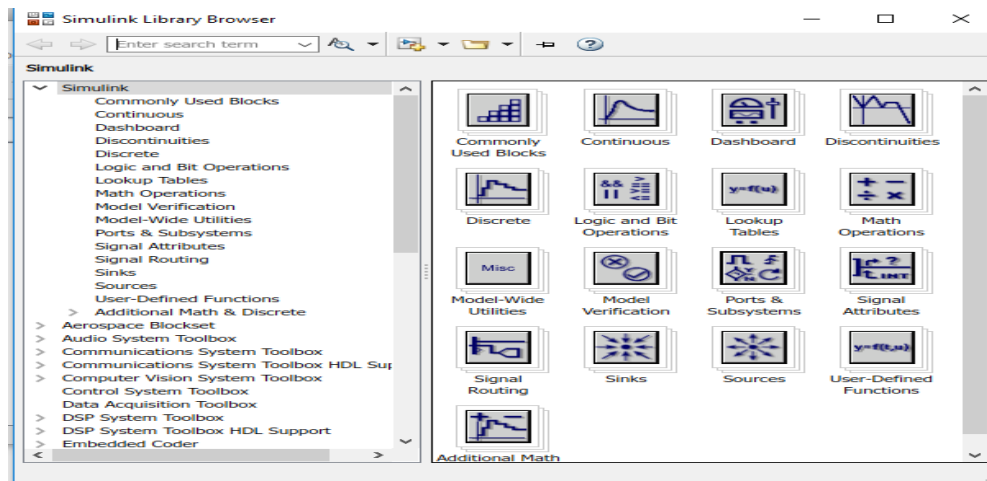


Figure III.2 La librairie SIMULINK.

Dans notre étude, on utilise l'environnement de simulink qui nous permet la conception de notre système grâce à des simulations dynamiques qui mettent en évidence l'apport des fonctionnalités de la couche physique en downlink. La réalisation de ce système se base sur la recherche des blocs nécessaires à sa réalisation puis ils doivent être programmé et ensuite les interconnectés. Mais la difficulté réside aussi dans le réglage des différents paramètres composants des différents blocs et les harmoniser pour qu'ils fonctionnent d'une façon synchrone.

III. Simulation des paramètres des chaines de transmission

Nous allons simuler une chaîne de transmission complète, avec une modulation et démodulation de type 16-QAM.

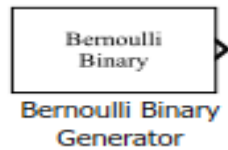
III.1 La partie émettrice

Le but dans la chaine d'émission, est étudier une transmission à porteuses multiples pour un canal sans fils et de développer un programme sous l'environnement Matlab pour simuler une transmission OFDM. la simulation réalisée dans ce travail a permis de mettre en relief l'intérêt d'une modulation OFDM du point de vue du taux d'erreur binaire BER , d'une part, D'autre part , elle illustre l'influence des paramètres de la chaine de transmission comme le

nombre de porteuses , le choix de différents type de modulations, la longueur des intervalles de garde sur la qualité de la transmission .les résultats des simulations obtenus en variant les différents paramètres de la chaine de transmission OFDM, à savoir , le type de modulation QAM , le nombre de sous porteuses , la longueur du préfixe cyclique CP.

Sous simulink cette partie est réalisée avec les blocs suivants :

❖ Le bloc Bernoulli Binary Generator



Génère des 0 et des 1, d'une façon aléatoire. On peut régler la probabilité d'apparition des 0 Et des 1 : elle est réglée à 0.5, comme en sortie d'un codage source et le débit binaire est fixé à 1/3000 s seed). Comme le montre la figure suivante :

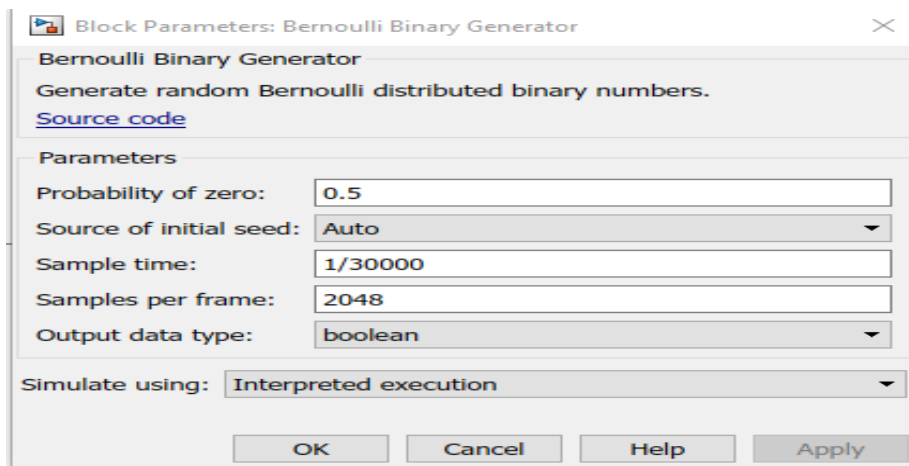
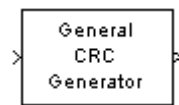


Figure III.3 paramètre de bloc Bernoulli BinaryGenerator

❖ General CRC Générator



Ce bloc génère les bits CRC selon le paramètre polynomial du générateur et les ajouter aux trames de données de sortie. il Spécifie le polynôme générateur comme une chaîne, exprimant le polynôme sous forme algébrique, une chaîne hexadécimale, un vecteur de ligne binaire de longueur égale au degré du polynôme du générateur ou vecteur de ligne entier avec des coefficients dans l'ordre décroissant de puissances. Ce bloc accepte un signal d'entrée de vecteur de colonne binaire.

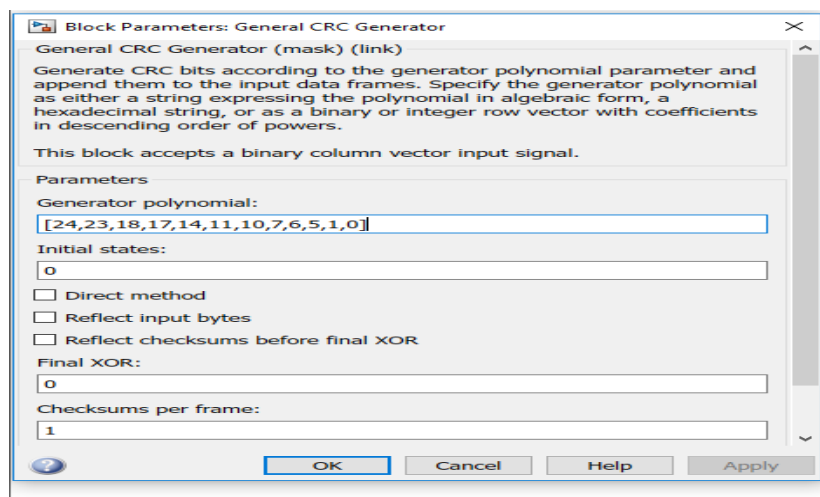
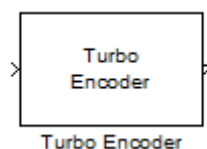


Figure III .4 paramètre de bloc General CRC Générator

❖ Turbo Encode



Le Turbo Encoder System encode un signal d'entrée dans de nombreux systèmes de communication, Spécifiez le treillis en tant que structure Matlab qui contient la description en treillis du code de convolution constitutif. Nous pouvons également utiliser la fonction

Poly2trellis pour créer un treillis personnalisé à l'aide de la longueur de contrainte, du générateur de code (octal) et des connexions de rétroaction (octal). Ce bloc ne prend en charge que les palissages de taux 1 par n où n est un entier.

La structure par défaut est le résultat de poly2trellis(4, [13 15], 13), avec un Source d'indices d'entrelacement Spécifiez la source des indices d'entrelacement en tant que propriété ou port d'entrée. Nous définissons ce paramètre sur Property, Et le mappage que le bloc utilise pour permuter les bits d'entrée en tant que vecteur de colonne d'entiers. La valeur par défaut est (2072:-1:1). Ce mappage est un vecteur avec le nombre d'éléments égaux à la longueur, L, du signal d'entrée. Chaque élément doit être un entier compris entre 1 et L, sans valeurs répétées.

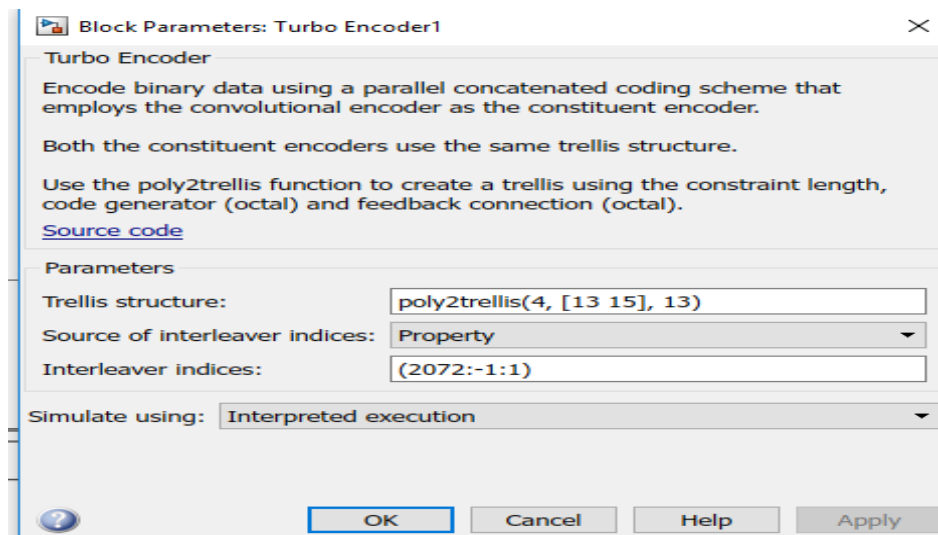
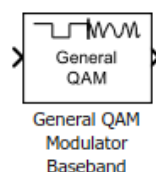


Figure III.5 paramètre de bloc de Turbo Encoder

❖ Rectangular 16-QAM ModulatorBaseband



On a utilisé une modulation d'amplitude en quadrature M-arynumber 16 avec une constellation sur un réseau rectangulaire. La sortie est une représentation en bande de base du

signal modulé. Ce bloc accepte un signal d'entrée de vecteur scalaire ou colonne. Il offre la possibilité de visualiser une constellation de signaux à partir du masque de bloc. Chaque symbole représente un regroupement de 4 bits, soit $2^4=16$ valeurs différentes de symboles. Ces symboles sont transmis autour de la fréquence porteuse.

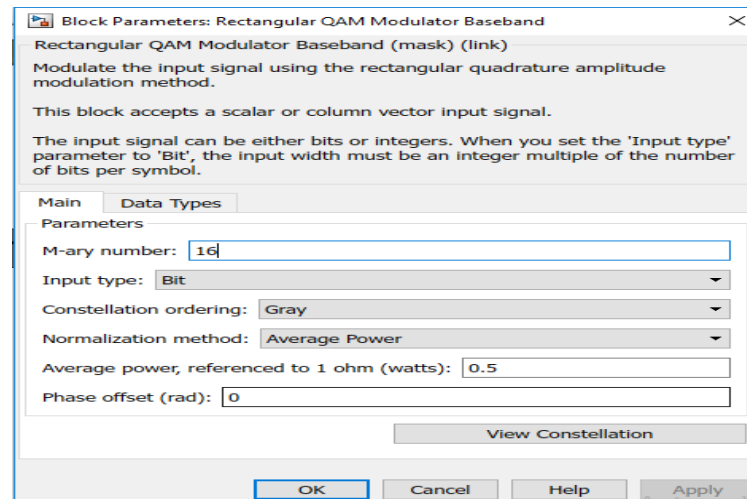
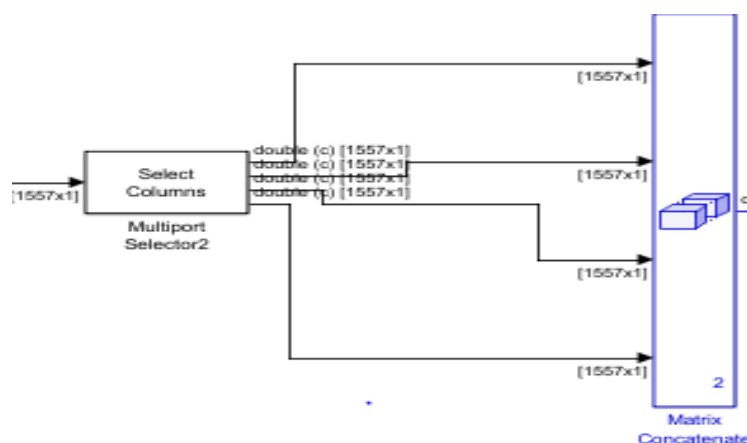


Figure III.6 paramètre de bloc de Rectangular QAM Modulator Base band

❖ Multiport selector /Matrix concatenate

Multiport selector distribue des sous-ensembles arbitraires de lignes d'entrée ou de colonnes à plusieurs ports de sortie. Le bloc Multiport sélecteur extrait plusieurs sous-ensembles de lignes ou les colonnes de M par N de la matrice d'entrée u, Pour découper les symboles reçus à son entrée par 4, en rangeant chaque ensemble dans une sortie. Ensuite nous avons ajouté un bloc **Matrix concatenate** pour rassembler le tout en changeant le nombre des inputs par 4.



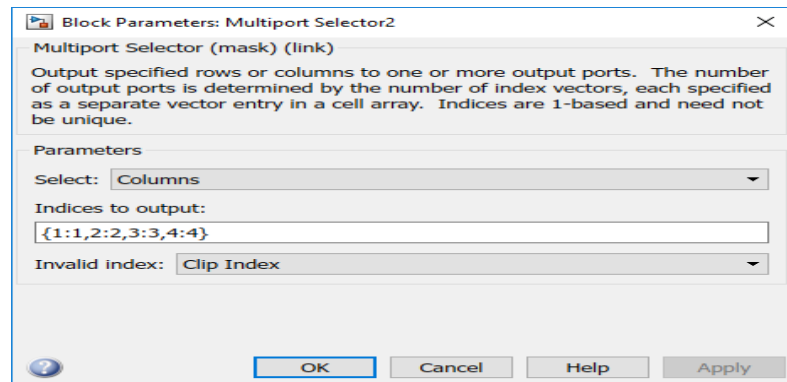
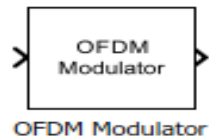


Figure III.7 paramètre de bloc Multiport Selector

❖ OFDM Modulator



On applique la modulation OFDM au signal d'entrée pour l'affecter à des sous-porteuses, Pour réaliser la simulation de la transmission OFDM, nous avons considéré l'approche suivante :

On Simule les performances pour la longueur de FFT au nombre **256**

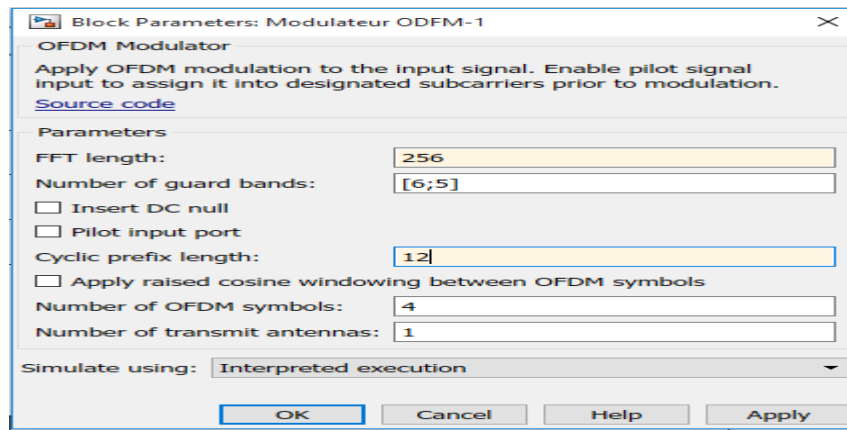


Figure III.8 paramètre de bloc OFDM Modulator

Remarque

Nous pouvons remplacer le bloc OFDM Modulator par IFFT et Cyclic prefix.

Canal de transmission

❖ Bloc Rayleigh fading



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

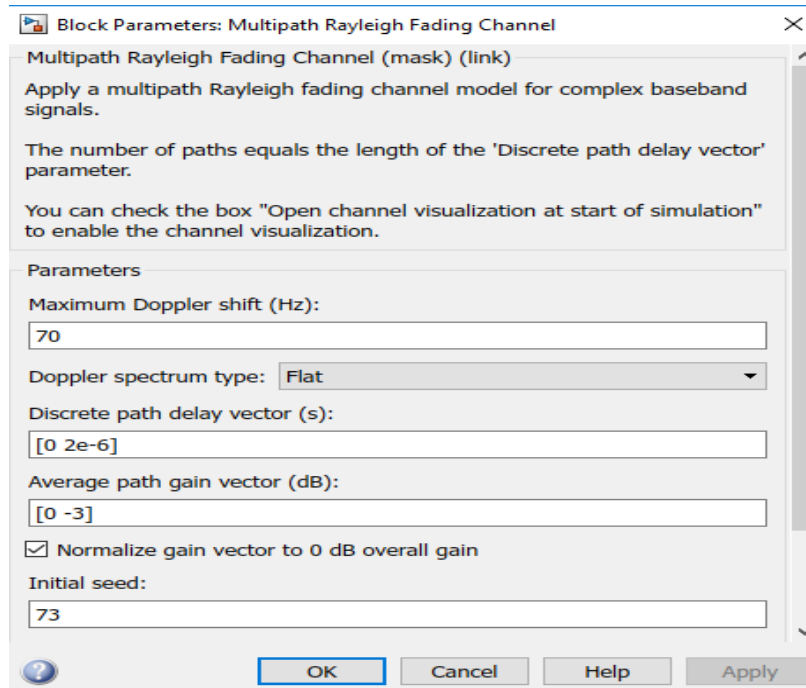
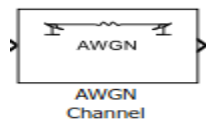


Figure III.9 paramètre du bloc Rayleigh fading

❖ Le bloc AWGN Channel



Nous pouvons observer l'influence du bruit dans le canal de transmission. Pour cela, il suffit d'utiliser le bloc "AWGN Channel" qui permet d'ajouter un bruit gaussien au signal. Le bloc Channel AWGN ajoute bruit blanc gaussien à un signal d'entrée réel ou complexe. Lorsque le signal d'entrée est réel, ce bloc ajoute du bruit gaussien réel et produit un véritable signal de sortie. Lorsque le signal d'entrée est complexe, ce bloc ajoute bruit gaussien complexe et génère un signal de sortie complexe. Ce bloc accepte un scalaire à valeur, vecteur, ou signal d'entrée de la matrice avec un type de données simple ou double.

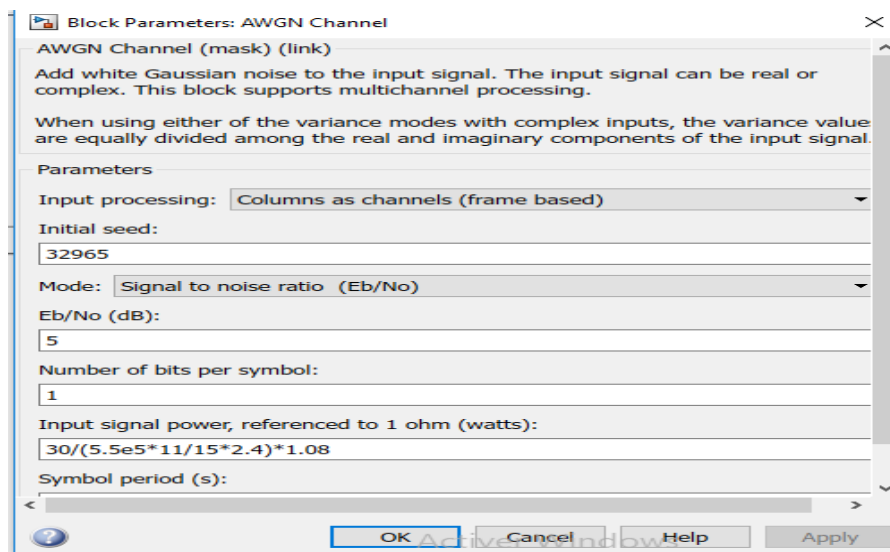


Figure III .10 paramètre de bloc AWGN

❖ Le bloc Terminator

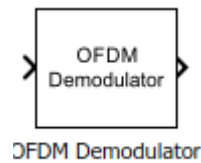
Le bloc de terminaison est utilisé pour fermer des blocs dont les ports de sortie ne sont pas connectés à d'autres blocs. Le préfixe cyclique est ajouté pour éviter la propagation différée du canal.



III .2 La partie de réception

Le récepteur effectue l'opération inverse de l'émetteur, le signal OFDM est converti en signal numérique à l'aide de la grande vitesse convertisseur analogique-numérique. Les données sont par la suite démodulées. On obtient à la sortie de la chaîne de réception un train d'informations dont la vraisemblance avec le signal original transmis dépend des perturbations introduites par le canal et les erreurs de traitement.

❖ OFDM Demodulation



On applique la démodulation OFDM au signal d'entrée (le signal émis). On active la sortie du signal pilote pour le séparer du signal de données après la démodulation.

Le bloc de bande de la modulation de division de fréquence orthogonale (OFDM) démodule un signal d'entrée OFDM. Le bloc accepte une seule entrée et dispose d'un ou deux ports de sortie, en fonction de l'état du port pilote de sortie. Spécifions la longueur de FFT, qui équivaut au nombre de sous-porteuse. La longueur de la FFT, doit être supérieure ou égale à 8 est donc fixé au 1568. L'entrée est un vecteur 2-par-1. Le nombre de sous-porteurs doit se situer entre $\lceil N_{FFT}/2 - 1 \rceil$.

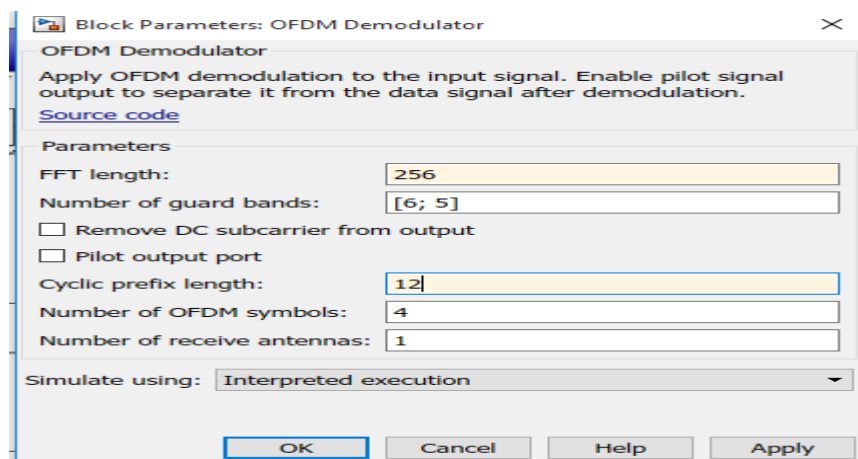
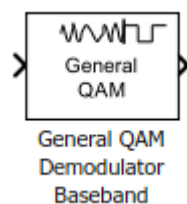


Figure III.11 paramètre de bloc OFDM Demodulator

❖ Rectangular 16-QAM Démodulateur Baseband



Ce bloc Démodule le signal d'entrée en utilisant le procédé de modulation d'amplitude en quadrature à une constellation sur un réseau rectangulaire. La constellation de signaux comporte des points M, où M est le paramètre de numéro M-ary effectue à 16. la sortie est de type bit avec hard décision, la commande de constellation gray, la méthode normalisées average power est fixé à 0.5 watts.

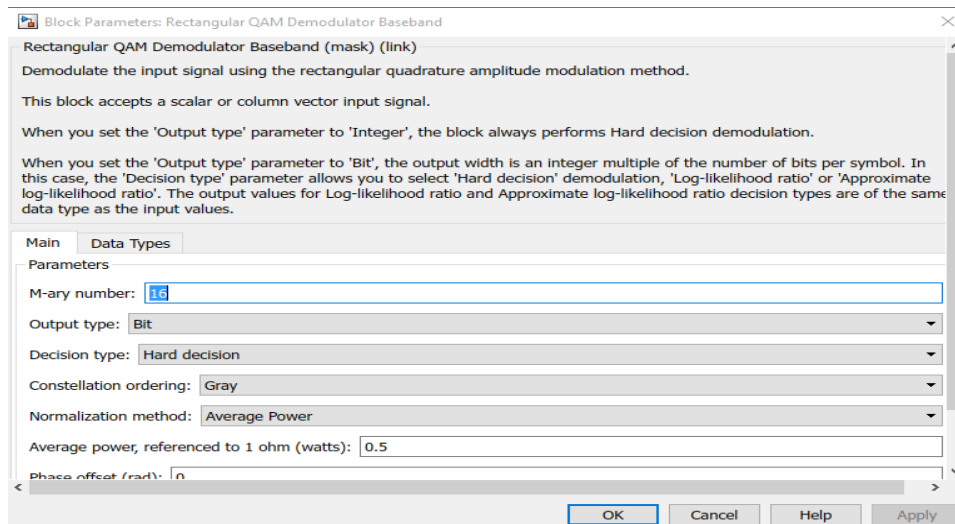
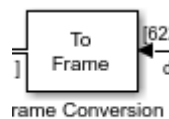


Figure III.12 paramètre de bloc QAM Démodulator

Dans cette partie on a utilisé aussi un sous système qu'est constitué d'un bloc frame conversion, ce dernier nous permet de passer l'entrée vers la sortie et regrouper les données en trame. qui peut être soit basée sur l'image ou à base d'échantillons.



La figure suivante représente les paramètres de ce bloc

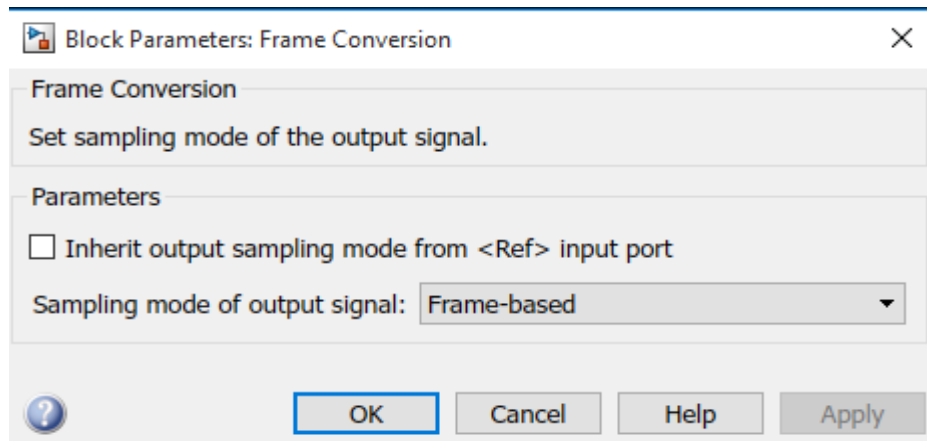
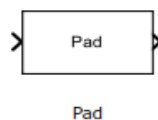


Figure III.13 Paramètres du bloc Frame conversion

❖ Le bloc pad



Ce bloc est utilisé pour ajouter une valeur constante à l'entrée le long des dimensions spécifiées. On l'utilise lorsque les dimensions de sortie spécifiées sont plus courtes que la dimension d'entrée correspondante. (Pour régler le problème de taille).

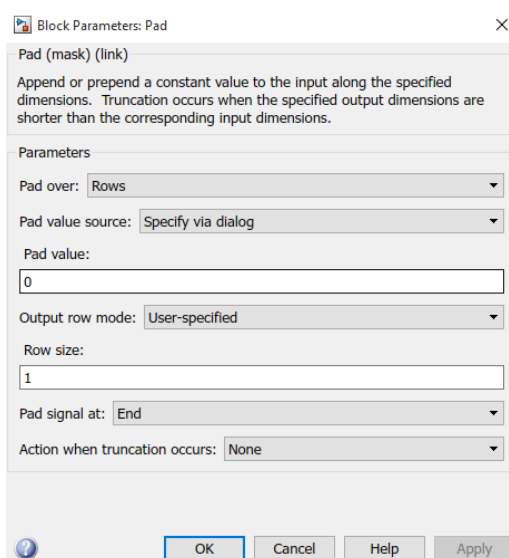
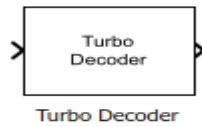


Figure III.14 : paramètre de bloc pad

❖ Turbo Décodeur



Le bloc turbo décodeur décode le signal d'entrée à l'aide d'un schéma de décodage concaténé parallèle. La structure treillis par défaut est le résultat de `poly2trellis(4, [13 15], 13)`.

la source des indices d'entrelacement en tant que propriété sous port d'entrée. nous définissons ce paramètre sur Property.

La valeur par défaut est `(2072:1:1)`. le bloc implémente le vrai décodage de probabilité a posteriori, utilise des approximations pour augmenter la vitesse des calculs.

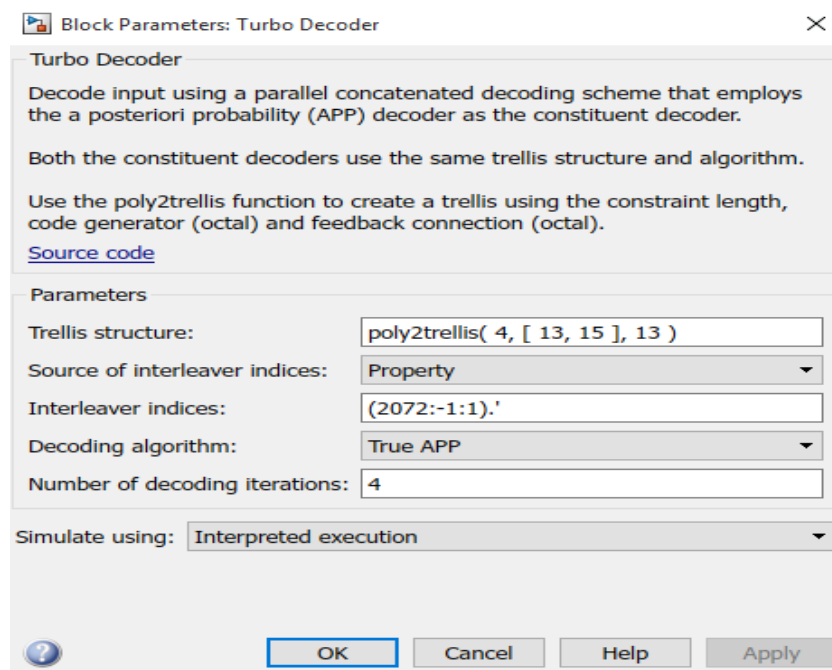
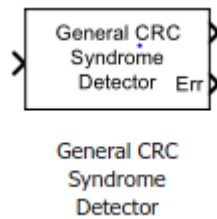


Figure III .15 paramètre de bloc Turbo Decoder

❖ Général CRC Syndrome Detector



Ce bloc nous permet de Détecter les erreurs dans les trames de données d'entrée en fonction du paramètre du générateur polynomial. Spécifions le générateur polynôme comme une chaîne, exprimant le polynôme sous forme algébrique, une chaîne hexadécimale ou comme un vecteur ligne binaire ou entier avec coefficient dans l'ordre décroissant des puissances. la première sortie est la trame de données avec les bits CRC supprimés et la deuxième sortie indique si une erreur a été détectée dans la trame de données. Ce bloc accepte un signal d'entrée vectoriel de colonne binaire.

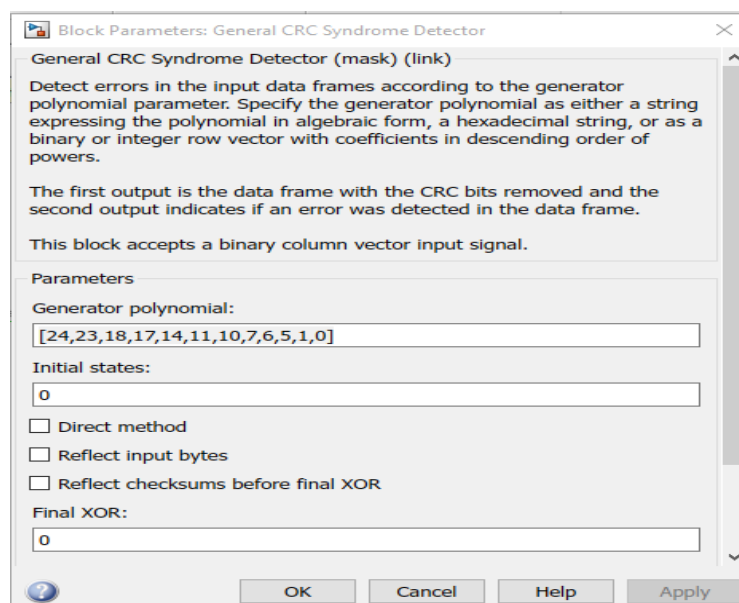
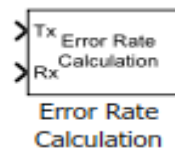


Figure III .16 paramètre de bloc general CRC syndrome detector

❖ **Error Rate Calculation**

Le bloc de calcul du taux d'erreur compare des données d'entrée de l'émetteur avec les données d'entrée d'un récepteur. Il calcule le taux d'erreur comme une statistique en cours d'exécution, en divisant le nombre total de couples inégaux des éléments de données par le nombre total d'éléments de données d'entrée d'une seule source. On utilise ce bloc pour calculer soit le symbole ou Le taux d'erreur de bits, car il ne tient pas compte de l'ampleur de la différence entre les éléments de données d'entrée. Si les entrées sont des bits, alors le bloc calcule le taux d'erreur binaire. Si les entrées sont les symboles, puis il calcule le taux d'erreur de symbole avec un retard recevoir et un délai de calcul fixé à 0

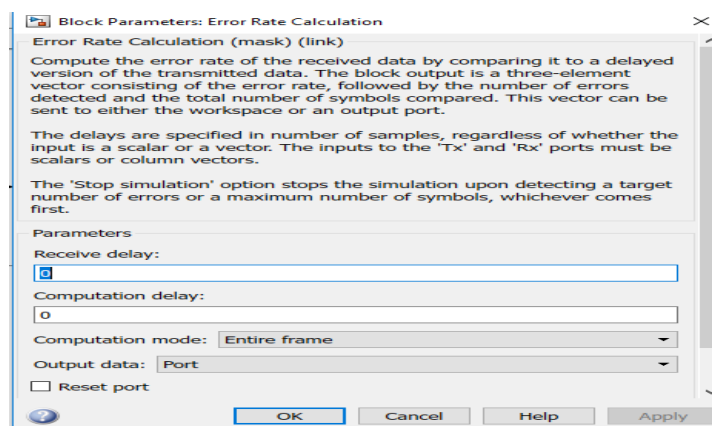


Figure III .17 paramètre de bloc Erreur Rate Calculation

III 4. Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur binaire constitue le paramètre primaire décrivant la qualité de la transmission numérique. Il se définit comme le rapport entre les bits erronés et le nombre total de bits reçus. Ce taux détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation, il augmente à cause des perturbations : équipement ou réseau défectueux, pointage incorrect d'une antenne, longueur de canal, etc.

- La structure finale de La chaine de transmission équivalente sous Simulink est illustrée dans la figure suivante :

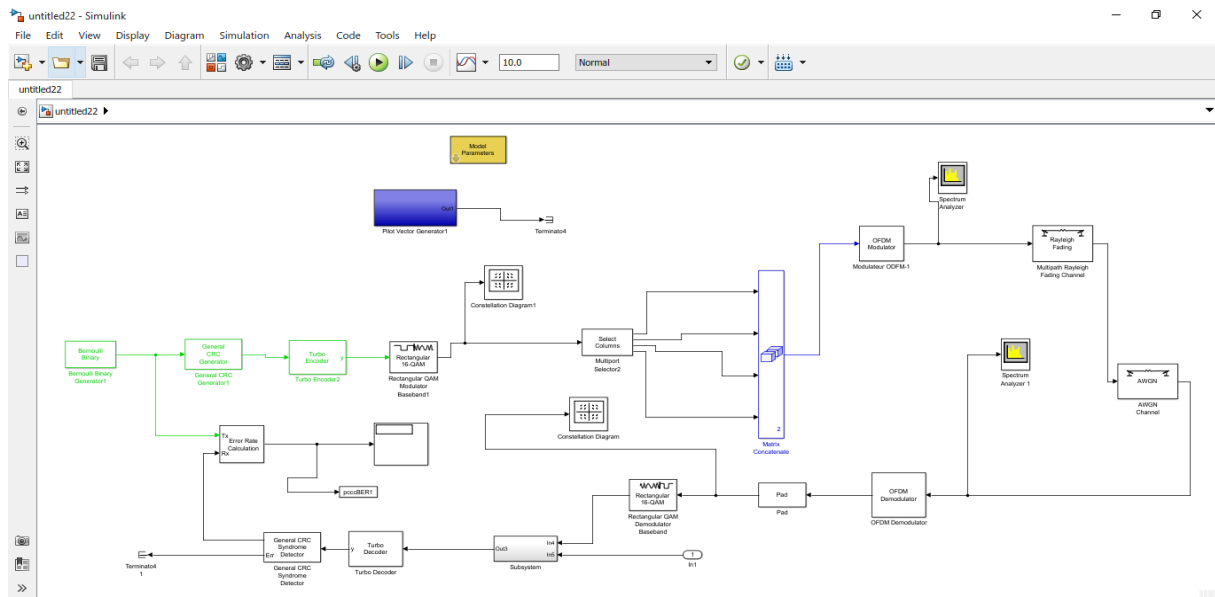
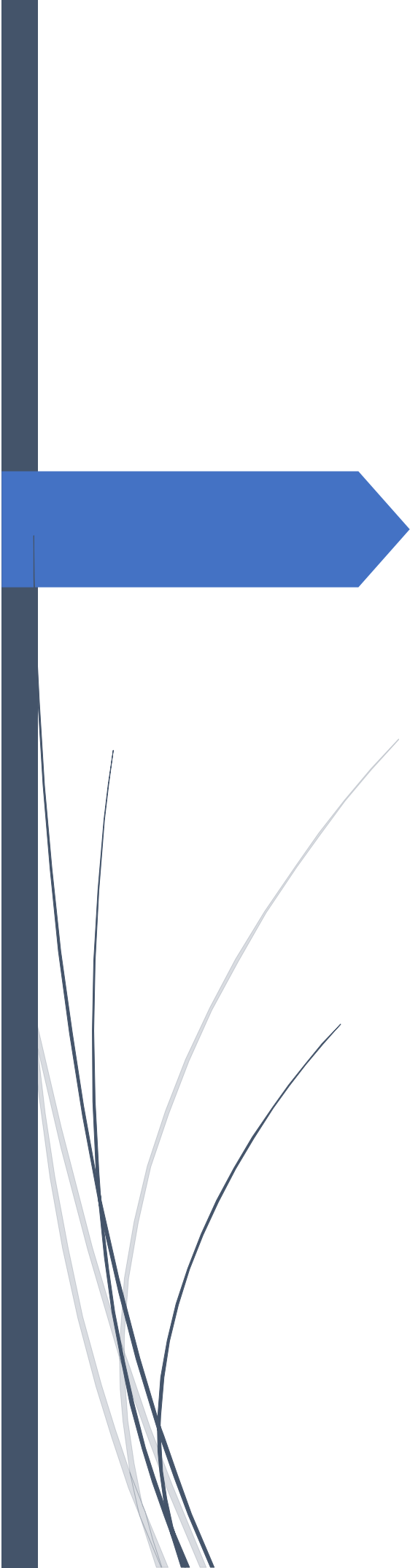


Figure 3.18 la chaine de transmission émetteur/récepteur

III.5 Conclusion

La simulation que nous avons réalisée a permis de mettre en relief l'intérêt d'une modulation OFDM du point de vue du taux d'erreur binaire .ainsi, les paramètres de la chaine de transmission et réception (nombre de sous porteuses, choix du type de modulation QAM, la longueur de CP) doivent être ajustés en fonction du canal, spécialement pour des canaux à multi- trajets. Dans le chapitre suivant nous allons simuler la chaine de transmission réalisée.



CHAPITRE IV

SIMULATION ET RESULTATS

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mettre en simulation le modèle de la couche PHY mentionnée dans le chapitre précédent. Ainsi, nous allons étudier l'influence de chaque paramètre sur les performances de transmission.

IV.2. Mesure de performances

IV.2.1 Taux d'erreur binaire (BER)

Le taux d'erreur binaire constitue le paramètre principal pour mesurer la qualité de la transmission numérique. Il se définit comme le rapport entre les bits erronés et le nombre total de bits reçus. En effet, ce taux détermine le nombre d'erreurs apparues avant la modulation et juste après la démodulation. Il augmente à cause des perturbations : équipement ou réseau défectueux, pointage incorrect d'une antenne, longueur de canal, etc. [21]

IV.2.2 Rapport signal sur bruit (SNR)

Ce terme fait référence au signal démodulé perçu après le processus de démodulation. Le bruit total est celui extrait du réseau de transmission plus le bruit intégré au signal de modulation sous la forme de bruit d'amplitude, de bruit phase et d'interférence inter symboles ainsi que d'autres dégradations de la modulation. . [21]

On le calcule à l'aide de l'une ou l'autre des formules représentées ci-dessous :

$$\left(\frac{S}{N}\right) \text{ (db)} = 10 \log \frac{P_s}{P_n} \quad (1)$$

$$\frac{S}{N} = \frac{P_s}{P_n} \quad (2)$$

P_s : Puissance du signal en W

P_n : Puissance de bruit en W

IV.3 Simulations et résultats

Pour étudier les performances du système de la couche PHY, on va prendre le BER comme mesure de performance et voir l'influence du SNR sur ce paramètre et aussi sur la démodulation. Ainsi, nous allons tracer le diagramme de constellation des différents types de modulation à l'émission et à la réception en plus de la variation du BER en fonction du rapport signal sur bruit (SNR).

Le système LTE est évalué en présence d'un bruit gaussien blanc additif.

Les paramètres suivants sont utilisés dans toutes les simulations :

Tableau IV.1 Paramètres LTE utilisés dans la simulation

La taille du FFT/IFFT	256
La taille du CyclicPrefix	16
Fréquence	10 MHZ
Modulation	16 QAM 64QAM
Nombre de sous porteuse	180

IV.3.1 Evaluation

Dans cette partie, la simulation est faite pour voir l'effet de modulation utilisé et la valeur du SNR sur BER. Nous nous sommes intéressés par les schémas de modulation de la technologie LTE qui sont 16 QAM et 64 QAM.

1^{er} cas : 16QAM

- **Constellations générées par le modulateur 16 QAM**

Les bits étant transmis sous la forme de symboles, le nombre de bits inclus dans chaque symbole désigne la taille de constellation. Dans cette étape nous allons choisir une modulation 16 QAM avec un rapport signal sur bruit ($S/N = 5$ dB) et on va voir comment recevoir le signal avant et après démodulation OFDM.

Constellation du modulateur 16 QAM avant OFDM

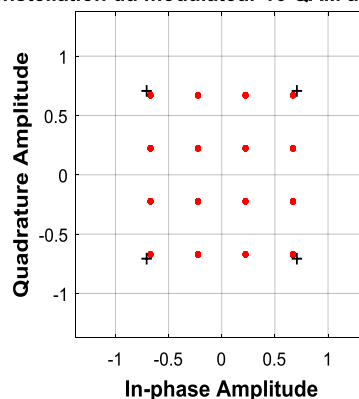


Figure IV.1 Constellation générée par le modulateur 16 QAM à l'émission avant la modulation OFDM

- Constellation générée par le démodulateur 16 QAM à la réception

Constellation du démodulateur 16 QAM après OFDM

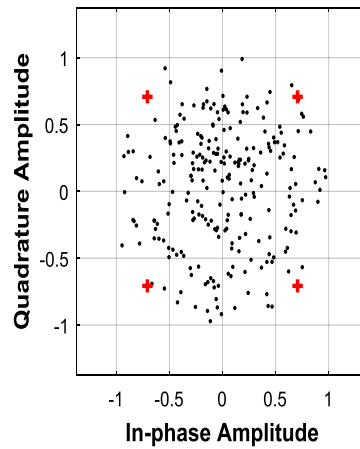


Figure IV.2 Constellation générée par le modulateur 16 QAM à la réception après la démodulation OFDM

Remarque

A la réception et après la démodulation OFDM on va voir les symboles répartis d'une manière anarchique comme la montre la figure 3.2. Ainsi la constellation récupérée est complètement différente de celle d'origine.

Ceci est du essentiellement au bruit AWGN qui s'ajoute au signal utile et les autres effets du canal.

2^{ème} cas : 64 QAM

Dans cette étape nous allons choisir une modulation 64 QAM avec un rapport signal sur bruit ($S/N = 5$ dB) et on va voir comment recevoir le signal avant et après démodulation OFDM.

- Constellations générées par le modulateur 64 QAM

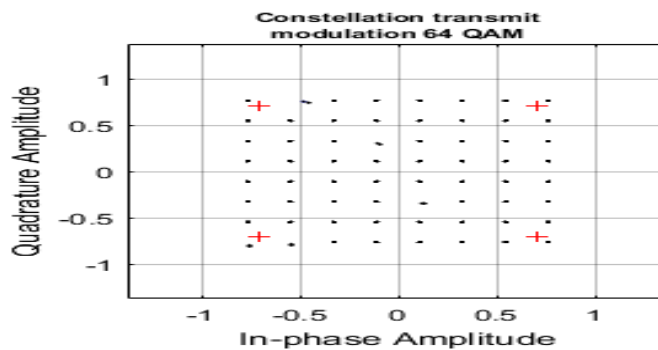


Figure IV.3 Constellation générée par le modulateur 64QAM à l'émission avant la modulation OFDM

- Constellation générée par le démodulateur 16 QAM à la réception

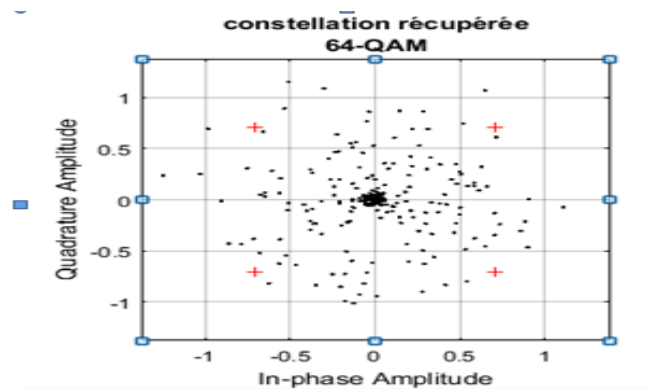


Figure IV.4 Constellation générée par le modulateur 64QAM à l'émission avant la modulation OFDM

IV.3.2 Bloc de calcul du taux d'erreur

Ce bloc est implémenté dans Simulink dans la boîte à outils du système de communication; il calcule le taux d'erreur des données reçues en les comparant aux données transmises. La sortie de bloc est un vecteur à trois éléments constitué du taux d'erreur, suivi du nombre d'erreurs détectées et du nombre total de symboles comparés. Ce vecteur peut être envoyé à l'espace de travail ou à un port de sortie.

Les données démodulées sont comparées aux données de bande de base d'origine pour trouver le nombre total d'erreurs, en divisant le nombre total d'erreurs par le nombre total de symboles démodulés, le taux d'erreur binaire est trouvé. Le taux d'erreur est un paramètre clé utilisé pour évaluer les systèmes. Lorsque des données sont transmises sur une liaison de données, il est possible que des erreurs soient introduites dans le système. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer les performances du système. BER évalue les performances d'un système comprenant l'émetteur, le récepteur et le médiateur entre les deux.

- On a pris l'exemple de modulation 16 QAM et à chaque fois on a changé la valeur de SNR, la figure suivante représente la variation du BER en fonction du SNR :

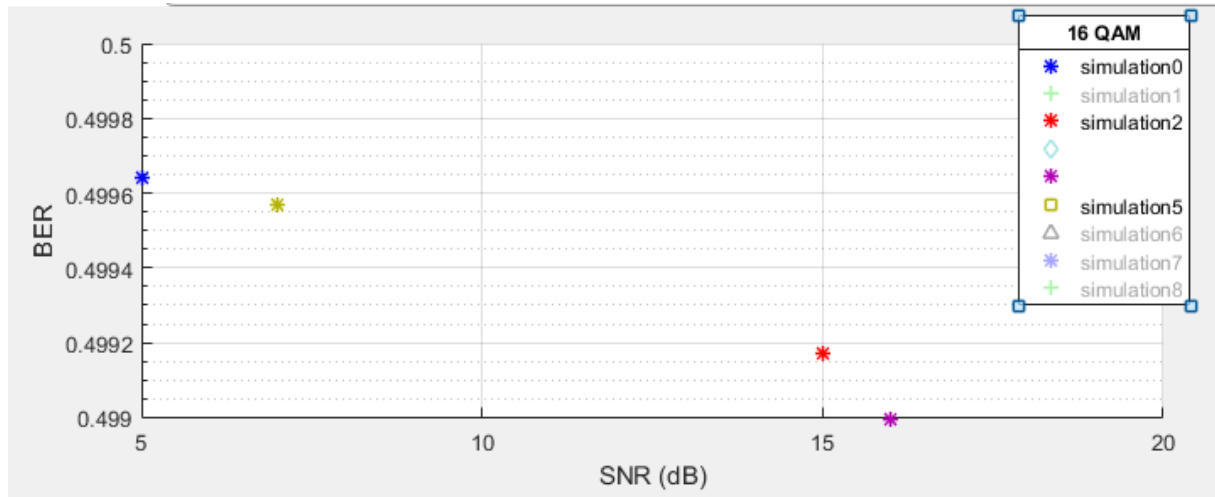


Figure IV.5 BER en fonction du SNR pour 16-QAM

D'après la figure, on remarque qu'à chaque fois on augmente le SNR le BER diminue donc on peut dire qu'on peut réduire la probabilité d'erreur en augmentant la valeur du SNR.

IV.3.3 Figure de modulation

La figure 4.6 montre les courbes BER d'un modèle de simulation de système exécuté pour une plage de valeurs SNR pour différents schémas de modulation (QPSK, 16QAM et 64QAM)

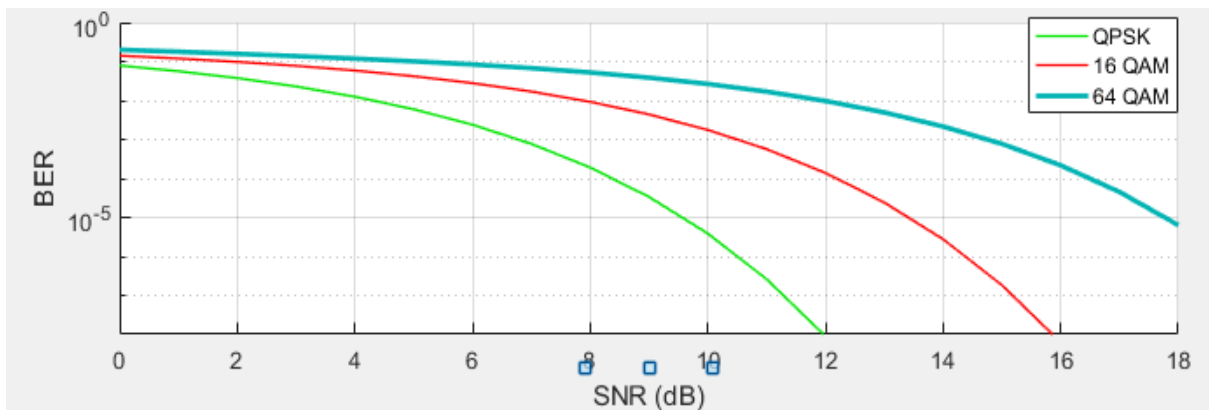


Figure IV.6 BER du système en fonction du SNR avec les trois modulations (QPSK, 16QAM, 64QAM)

D'après la figure ci-dessus, nous pouvons conclure que pour obtenir une qualité de transmission donnée, pour un taux d'erreur binaire donné, la valeur de SNR requise augmente progressivement lorsque nous passons de la modulation QPSK à la modulation 16QAM et 64QAM. Par exemple, pour la même valeur de BER 10^{-5} comme le montre la figure ci-

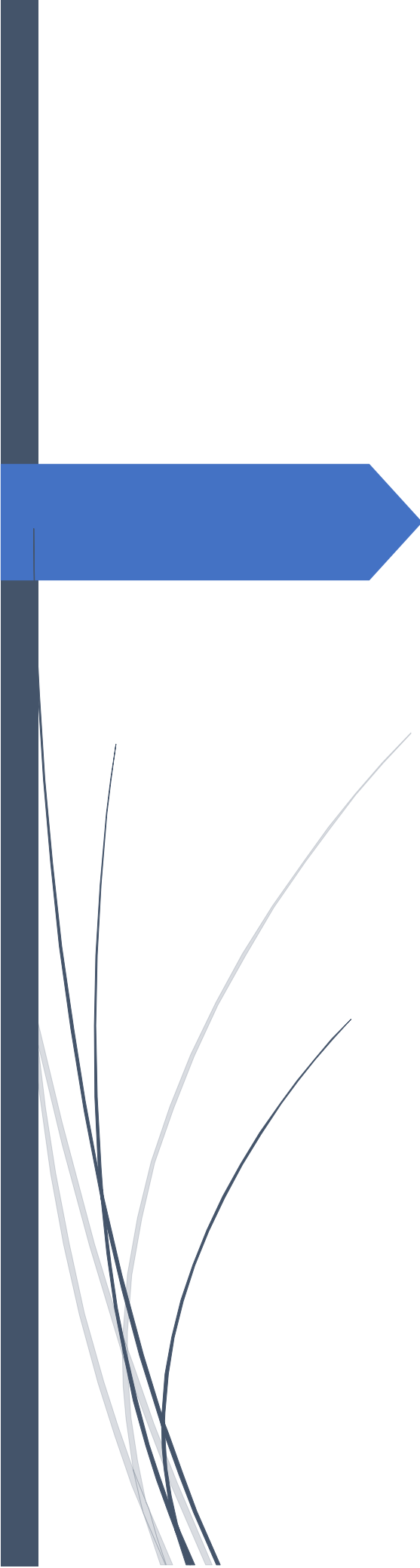
dessus, le SNR pour la QPSK est d'environ 9.5, pour 16 QAM est d'environ 13, et pour 64 QAM est d'environ 18.

Les exigences de puissance pour QPSK sont inférieures à ceux de 16QAM et 64QAM. Ceci suggère que des schémas de modulation d'ordre inférieur tels que QPSK sont utilisés dans des canaux avec un degré de dégradation élevé afin de réduire la probabilité d'erreur, Des schémas de modulation d'ordre supérieur tels que 64QAM sont employés dans des canaux plus propres et peuvent fournir une augmentation du débit de données.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a réussi de modéliser une simulation de la couche physique du système de liaison descendante pour mieux comprendre une chaîne de transmission OFDM.

La simulation que nous avons réalisée nous a permis de visualiser les constellations à la réception avant et après démodulation OFDM. Nous avons vu que les symboles à la réception appartiennent à la zone de décision du démodulateur. Ainsi, nous avons constaté que le taux d'erreur par bit dépend du type de modulation adoptée. On peut effectivement augmenter le débit en augmentant la constellation.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le développement des technologies de l'information et de la communication est primordial pour toute nation qui aspire au progrès et le bien-être de ses concitoyens, et c'est ainsi que l'utilisation des nouvelles technologie mobile est une obligation dans cette dernière. Par conséquent la maitrise de cette technologie devient une nécessité.

Notre objectif consiste à comprendre d'abord le fonctionnement général de la couche physique en liaison descendante de la technologie LTE/LTE Advanced et la présenter d'une façon plus simple. Ensuite faire une comparaison par simulation des différents types de modulation.

Nous avons donc fait une présentation détaillée des caractéristiques de l'architecture de la technologie LTE/LTE Advanced dans le premier chapitre, dans le deuxième chapitre nous avons décrit brièvement le fonctionnement de la couche physique.

Ensuite nous avons créé un modèle de la couche PHY en étudiant l'effet de chaque paramètres sur les performances de cette technologie avec une explication des différentes blocs utilisé dans cette couche en partant de l'émetteur passant par le canal de transmission jusqu'au récepteur.

Les simulations ont été faites avec Simulink et nous nous sommes intéressés à:

- L'étude de l'influence de chaque paramètre sur les performances de transmission.
- L'étude des performances du système LTE/LTE-Advanced en termes de taux d'erreur par bits pour différentes modulations.

Pour les travaux futurs, nous proposons :

1. Etendre le modèle pour les systèmes MIMO.
2. Utiliser la modulation adaptative et étudier son influence sur le débit des utilisateurs.
3. Consolider le modèle de la couche PHY avec les couches supérieures afin d'aboutir à un modèle intégral qui permet d'analyser et de simuler les algorithmes de développements.

- [1].B.Yannick, H.Eric et W.François. « LTE et les réseaux 4G » ISBN :978-2-212-12990-8. Groupe EYROLLES, pages.41-300, 2012.
- [2]. Tara Ali-Yahia, « MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX », paris, january2011.
- [3].<http://4glte.over-blog.com/article-evolution-de -la-1g-vers-la-4g-82164235.html>:consulté le 10/5/2018.
- [4]. Yannick Bouguen, Eric Hardouin et François-Xavier Wolff. LTE et les réseaux 4G. Édition groupe EYROLLES, 2012, ISBN : 978-2-212-12990-8.
- [5]. M. Mustapha, « Application de a technologie mimo a la 4g du mobile, »projet fin d'études, la faculté de Technologie, Setif, 2014.
- [6].T.Meriem, « Evolution des technologies des télécommunications vers la 4ème génération, »Rapport, 2012
- [7]. A. Ghosh, R. Ratasuk, «Essentials of LTE and LTE-A», Cambridge University Press, 2011.
- [8].G.Rachida, « Etude d'un standard de communication LTE »projet fin d'étude, la faculté de Technologie, 2016-2017
- [9]. Djami Schehrazed,ToulmoutChafia, « Contribution à l'optimisation d'un réseau LTE :Adaptation du Handover »,2016-2017 ,mémoire de master.
- [10]. Pierre Beaufils, « Réseaux 4G technologies et services »,hermes science, novembre 2008.
- [11]. Houda Tounsi, « Optimisation de la couverture radio du réseau 4G de Tunisie Telecom » ,2015-2015.
- [12]. 3GPP TS 36.212: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding", V9.2.0, mai 2010.
- [13]. 3GPP TS 36.211: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); physical channels and modulation", V9.2.1, mars 2010.
- [14]. Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, «4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G », 2016
- [15].A.Mohyiddine, Guerroudj Mustapha, « Conception d'une plateforme de la couche physique LTE/LTE Advanced ,
- [16]. Mohand Mokhtari, « MATLAB 5.2&5.3 et SIMULINK 2&3 pour étudiants et ingénieurs,2000.

Bibliographie

- [17].MALEK Benslama,HadjBatatia,AbderraoufMessai, « Transition from Digital Communication to Quantum Communication »,2016.
- [18]. Philippe Atelin, « Wifi :reseau sans fil.802 11 »,2008
- [19].K.Anavas, R.JayaDevan, « Digital Signal Processing »,2014.
- [20].Belahammou Oussama, Bassa Allaeddine, « Performance d'un système de communication OFDM »,2017.
- [21].FarhiNabila, HelaimiaSouhaila, « Etude et Simulation d'une Transmission de Type OFDM Pour Les Communications Sans Fil »,2015-2016 mémoire de master.