République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'**E**nseignement **S**upérieur et de la **R**echerche **S**cientifique

UNIVERSITÉ **M**OULOUD **M**AMMERI DE **T**IZI-**O**UZOU

FACULTÉ DE **G**ÉNIE **É**LECTRIQUE ET D'**I**NFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Études De Master Académique

Domaine : **Sciences et technologies**
Filière : **Génie Électrique**

Spécialité **: Télécommunications et Réseaux**

Présenté par :
Hamza YAHIAOUI
Redouane LOUNNAS

Thème :

Étude des Performances des Réseaux 4G LTE

Mémoire soutenu publiquement le 13/07/2017 devant le jury composé de :

Mr Yacine MOHIA
Maitre-assistant A, UMMTO, President

Mr Slimane HAMEG
Maitre-assistant A, UMMTO, Encadreur

Mr Fethi OUALLOUCHE
Maitre de conférences B, UMMTO, Examinateur

Glossaire

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

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line
ARCEP : Autorité de Régulation des Communications Électroniques et Postes
AUC: AUthentification Center

BG: Border Gateway
BSC: Base Station Controller
BSS: Base Station Sub-system
BTS: Base Transceiver Station

CCU: Channel Codec Unit
CDMA2000: Code Division Multiple Access
CGF: Charging Gateway Function
CQI: Channel Quality Indicator

DFT: Transformation de Fourier Discrète
DiffServ: Differenciated Service
DSCP: DiffServ Control Protocol

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

FDD: Frequency Division Duplexing

GGSN: Gateway GPRS Support Node
GMSC: Gateway MSC
GPRS: General Packet Radio Service
GSM: Global System for Mobile Communication

HLR: Home Location Register
HSDPA: High Speed Downlink Packet Access
HSOPA: High Speed OFDM Packet Access
HSPA: High Speed Packet Access
HSS: Home Suscriber Service

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF: Internet Engineering Task Force
IMEI: International Mobile Equipment Identity
IMS: IP Multimedia Sub-system

Glossaire

IMSI: International Mobile Subscriber Identity
IP: Internet Protocol
IPv6: IP version 6

KT: Korea Telecommunication

LAN: Local Area Network
LMT: Latvijas Mobilais Telefons
LTE: Long Term Evolution

M2M: Machine To Machine
MAN: Metropolitan Area Network
MIMO: Multi Input Multi Output
MME: Mobility Management Entity
MMS: Multimedia Messaging Service
MS: Mobile Station
MSC: Mobile Switching Centre
MTS: Mobile Tele System

NMC: Network and Management Centre
NS-2: Network Simulator 2
NS-3: Network Simulator 3
NSS: Network Sub System
NTT: Nippon Telegraph &Telephone

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMC: Operations and Maintenance Center
OSS: Operation Sub-System

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio
PCRF: Policy and Charging Rules Function
PCU: Packet Control Unit
PDN: GW Packet Data Network Gate-Way
PDP: Packet Data Protocol
PGW: Packet Switch-GetWay
PLMN: Public Land Mobile Network
PRB: Physical Resource Blocks

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

RSVP: Resource ReSerVation Protocol
RNC: Radio Network Controller
RNIS : Réseau Numérique à Intégration de Services
RTC: Réseau Téléphonique Commuté
RTCP: Real-time Transport Control Protocol

Glossaire

SAE: System Architecture Evolution
S-GW: Serving-Get Way
SC-FDMA: Single Carrier-Frenquency Division Multiplexing Access
SGSN: Serving GPRS Support Node
SIM: Subscriber Identity Module
SINR: Signal Interference Noise Ratio
SMS: Short Message Service
SMSC: Short Message Service Center
SS7: Signal Semaphore 7

TB: Transport Block
TCP: Transmission Control Protocol
TDD: Time-Division Duplex
TMN : Télécommunications Management Network

UDP : User Datagram Protocol
UE : Terminal Mobile
UIT : Union Internationale des Télécommunications
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

VLR: Visitor Location Register
VoIP: Voice over IP
VSF-OFCDM: Variable Spreading Factor Orthogonal Frequency and Code Division Multiplexing

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

Liste des Tableaux et Figures

Liste des Tableaux et Figures

Chapitre I: Historique et Généralités

Figures

Figure I.1 Architecture du réseau GSM 4
Figure I.2. Architecture du réseau GPRS 9
Figure I.3 Architecture du réseau UMTS 12

Tableaux

Tableau I.1 : Différents Paramètres du LTE / LTE-Advanced 16

Chapitre II: Etude détaillée des réseaux 4G

Figures

Figure II.1 : Présentation générale du système LTE 18
Figure II.2: Architecture du réseau 4G LTE 19
Figure II.3 : Architecture simplifiée d'EPS 20
Figure II.4 : Architecture de l'e-UTRAN 20
Figure II.5: Architecture EPC 22
Figure II.6: Pile protocolaire 26
Figure II.7: Le taux de l'efficacité spectrale des technologies du GSM à LTE 27
Figure II.8: Technique OFDM 30
Figure II.9: La différence entre OFDM et OFDMA 31
Figure II.10: Exemple d'interférence IES causé par le phénomène multi-trajets 31
Figure II.11: Les porteuses de l'OFDMA 32
Figure II.12 : Orthogonalité des sous porteuses en OFDMA 33
Figure II.13: PRB Grille de ressources temps fréquence en voie montante et descendante 35
Figure II.14 : Structure générique de la trame LTE 36
Figure II.15: Les types du préfixe cyclique 36
Figure II.16: Structure de la trame radio FDD 37
Figure II.17 : Duplexage FDD 37
Figure II.18 : Format de la trame TDD 38
Figure II.19 : La différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA 39
Figure II.20: Différente type d'antennes 40

Liste des Tableaux et Figures

Figure II.21: Modulation LTE 40
Figure II-22 : Les marchés 4G et 4G+ dans le monde 45

Tableaux

Tableau II.1: Les deux types de latence dans le réseau LTE 28
Tableau II.2 : Paramètres de l'OFDM pour chaque bande passante 33
Tableau II.3: Largeur de bande du système en nombre de PRBs pour chaque BP 35
Tableau II.4 Les catégories de terminaux 4G LTE 43

Chapitre III: Généralités sur la Qualité de service

Figures

Figure III.1: Besoin de mécanismes de QoS lors d'un accès à des ressources partagées 53
Figure III.2: EPS Bearers 54
Figure III.3 : QoS dans LTE/EPC 56
Figure III.4 : Type de Bearer de la QoS dans LTE/EPC 56
Figure III.5: Default Bearer 57
Figure III.6: Dedicated Bearer 58

Tableaux

Tableau III.1: Correspondances des paramètres QCI 58

Chapitre IV: Simulations, Résultats et Interprétations

Figures

Figure IV.1: Architecture du nœud NS-3 64
Figure IV.2 Architecture du réseau 4G LTE 67
Figure IV.3 La réalisation d'une simulation dans NS3 67
Figure IV.4: SINR en fonction de la distance UE-eNodeB 69
Figure IV.5: CQI en fonction de la distance UE-eNodeB 69

Liste des Tableaux et Figures

Figure IV.6: TB en fonction de la distance entre UE-eNodeB 70
Figure IV.7: Valeurs du CQI en fonction de la modulation QPSK 70
Figure IV.8: Valeurs du CQI en fonction de la modulation 64QAM 71
Figure IV.9: Valeurs du CQI en fonction de la modulation 16QAM 71

Sommaire

Sommaire

Introduction générale **1**

Chapitre I: Historique et Généralités.

I.1 Historique ‘’les évolutions de la téléphonie mobile **1**

I.1. Introduction 2

I.2. La Première Génération (1G) 2

I.3. La Deuxième Génération (2G) 2

I.4. Le réseau (GSM) 3

I.4.1. Architecture du réseau GSM 3

I.4.1.1. Le BSS (Base Station SubSystem) 4

a. Le MS (Mobile Station) 4

b. Les BTS (Base Transceiver Station) 5

c. Le BSC (Base Station Controler) 5

I.4.1.2. Le NSS (Network SubSystem) 5

a. Le MSC (Mobile service Switching Center) 5

b. Le VLR (Visitor Location Register) 6

c. HLR (Home Location Register) 6

d. L’AuC (Authentification Center) 6

e. L’EIR (Equipement Identity Register 6

I.4.1.3. L’OSS (Operation Support Subsystem) 7

I.4.1.4. Les Interfaces radios 7

I.5. Le réseau GPRS (2.5G) 8

I.4.1.1.1. Le SGSN 9

I.5.2. Le GGSN 9

I.5.3. Le BG 10

I.5.4. Les équipements GSM 10

I.5.5. Le type de transmission dans le réseau GPRS 10

I.5.6 La gestion d’itinérance 11

I.6. La Troisième Génération (3G) ou UMTS 11

I.6.1. Architecture du réseau 12

I.6.2. Les fréquences et le débit de l’UMTS 13

I.6.3. Le mode de transmission dans le réseau UMTS 13

a. Le mode circuit 13

b. Le mode paquet 14

I.7. La Quatrième Génération (4G LTE) 14

I.7.1. Historique sur la 4G 15

I.8. Conclusion **16**

Sommaire

Chapitre II: Etude détaillée des réseaux 4G.

II.1 Généralités sur la technologie 4G LTE 17

II.2 La 4G LTE 17

II.3. Les buts de la 4G LTE 18

II.4. Architecture du réseau 4G LTE 19

II.4.1. Le Réseau d'accès (e-UTRAN) 20

II.4.1.1. Les entités du réseau d'accès (e-UTRAN) 20

II.4.1.1.1. L'eNodeB 21

a. L'interface X2 21

b. L'interface S1 21

II.4.2. Réseau Cœur, EPC (Evolved Packet Core) 22

II.4.2.1. Description et rôles des entités du réseau cœur 22

II.4.3. La partie IMS (IP Multimedia Sub-system) 24

II.5. Architecture en couches 25

II.5.1. Les protocoles de l'interface Radio 25

II.6. Les exigences pour la 4G LTE 27

II.6.1. La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés 27

II.6.2. L'efficacité spectrale cellulaire 27

II.6.3. Les débits 28

II.6.4. Une faible latence 28

II.6.5. L'agilité en fréquence 29

II.6.6. La mobilité 29

II.6.6.1. Le Handover 29

a. Hard Handover 29

b. Soft Handover 29

II.7. L'Interface Air 29

II.7.1 Principe de l'OFDM, OFDMA ET SC-FDMA 30

II.7.1.1. L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 30

II.7.1. 2 L'OFDMA (Technique d'accès multiple en voie descendante) 30

II.7.1.2.1. Pourquoi l'OFDMA ? 31

II.7.1.2.2. Principe de l'OFDMA 32

II.7.1.2.3. Le débit théorique maximal 34

II.7.1.2.4. Les PRBs (Physical Resource Blocks) 34

II.7.1.2.5. La structure des trames en LTE 35

a. Structure de type 1: FDD 37

b. Structure de type 2 : TDD 38

II.7.1.3. SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) 39

II.7.1.4. La technologie MIMO 40

Sommaire

II.8. La technique du Modulation et codage adaptatifs 40
II.9. Inconvénients et avantages du LTE 41
II.10. Le LTE-Advanced 42
II.11. Résumé sur les Releases 43
II.12. La 4G dans le Monde 44
II.13. Conclusion 45

Chapitre III: Généralités sur la Qualité de service.

III.1 Introduction 46
III.2 Les servivces 4G (LTE) 47
III.3 Définitions de la Qualité de service (QoS) 47
III.4 But de la QoS 47
II.5 Paramètres de la QoS: 48
III.5.1. Le débit 48
III.5.2. Le taux de perte 48
III.5.3. Le délai de transit (Latence) 48
III.5.4. La Gigue (Jitter ou Delay variation) 49
III.5.5. La bande passante 49
III.5.6. Priorité des paquets 49
III.6. Les Classes de service (CoS) 50
III.7. Les critères utilisés pour assurer la QoS 51
III.8. La gestion de la qualité de service: 51
a. Le modèle IntServ 52
b. Le modèle DiffServ 52
III.9. La notion de Bearer 52
III.10. Efficacité QoS 54
III.11. Qualité de service en LTE/EPC: 55
III.11.1. Les Default Bearers 57
III.11.2. Les Dedicated Bearers 57
III.12. Les Performance des réseaux 4G: 59
III.12.1. Une mobilité à toute épreuve 59
III.12.2. Des temps de réponse rapides 59
III.12.3. La voix sur IP 59
III.12.4. Débit sur l'interface radio 59
III.12.5. Connexion permanente 59
III.12.6. Délai pour la transmission de données 60
III.12.7. Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G 60

Sommaire

III.12.8. Flexibilité dans l'usage de la bande....60
III.13. Exemples de Qualité de Service: 60
III.13.1. Contraintes communes aux applications multimédia 61
III.13.2. La téléphonie sur IP....61
III.13.3. La vidéoconférence....61
III.14 Conclusion 61

Chapitre IV: Simulations, Résultats et Interprétations.

IV.1 Introduction 62
IV.2 Choix du simulateur 62
IV.3. Présentation du simulateur NS-3....62
IV.4. Les Mots Clés : 63
a. Un nœud "Node"Une application "Application" 63
b. Un canal de communication "Channel"....63
c. Une interface de communication 63
IV.4. Installation du simulateur NS-3....64
IV.5 Compilation du NS-3....66
IV.6. Exécution d'un script de simulation....66
IV.7. Déroulement de la simulation....67
IV.8 Architecture de test....67
IV.9. Les indicateurs utilisés dans notre simulation : 68
IV.9.1. Le CQI 68
IV.9.2. Le SINR 68
IV.9.3. Le TB 68
IV.10. Résultats de simulation....69

IV.11. Conclusion....72

Conclusion Générale 73
Bibliographie 74

Introduction générale

Introduction

Notre accès à l'information a connu d'importants bouleversements. Après l'invention des téléphones analogiques de la Première Génération, la Deuxième Génération (**2G**) correspond à l'arrivée du nouveau standard de communication pour les mobiles : le **GSM**. Il améliore les communications vocales à l'international et permet grâce à la circulation numérique de données, l'envoi des SMS.

La Troisième Génération (**3G**) représentée par la norme **UMTS**, offre des débits rapides allant jusqu'à 2Mb/s et amorce ainsi l'accès à internet depuis un mobile, le visionnage des vidéos et la visiophonie.

Les capacités en transmission de données de ces systèmes de 2^{eme} et 3^{eme} Génération sont encore limitées. Le système de la 4^{eme} Génération (**4G LTE**), constitue aujourd'hui une véritable révolution puisqu'il propose une multiplication des débits grâce à deux phénomènes ; Le premier consiste à faire circuler les appels vocaux non plus sur le réseau téléphonique, mais directement sur internet (voix sur IP). Le deuxième, recourt au multiplexage (plusieurs types d'informations passent par un même canal), ce qui permet d'augmenter la quantité d'information transmise.

La **4G LTE** se définit ainsi comme le très haut débit mobile ; A noter que la norme **4G** évolue déjà avec le standard **LTE-Advanced**, communément appelé **4G+** et qui permet d'augmenter encore les débits sur les réseaux mobiles **LTE**.

Cette thèse se concentre de près sur les performances des réseaux de la 4G LTE, ainsi que la simulation d'une chaîne de transmission. Dans notre simulation nous nous intéresserons exclusivement à la partie e-UTRAN du système avec une attention très particulière sur les aspects du canal de transmission et de signalisation.

Nous nous intéresserons particulièrement aux indicateurs de qualité qui servent de mesure pour la qualité de transmission en liaison descendante (Downlink) et ascendante (Uplink). Parmi ces indicateurs on trouve notamment le CQI (indicateur de la qualité du canal) mais aussi le SINR (rapport signal sur bruit) et le TB (bloc de transport).

L'organisation générale de notre mémoire est articulée sur quatre chapitres :

Le chapitre 1 : Présente un historique sur l'évolution de la téléphonie mobile.

Le chapitre 2 : Une étude détaillée des réseaux 4G LTE.

Le chapitre 3 : Généralités sur la Qualité de Service (QoS).

Le chapitre 4 : Simulations, Résultats et interprétations.

Finalement, une conclusion est présentée pour souligner les résultats obtenus dans le cadre de notre travail de la thèse.

Chapitre I:

Historique et Généralités

I. Historique ‘’les évolutions de la téléphonie mobile‘’:

I.1. Introduction :

Les ondes électromagnétiques ont été utilisées comme moyen de communication pour la première fois à la fin du 19ème siècle. Le premier système sans fil a été inventé par les **Bell Labs** dans les années 40 aux Etats-Unis, puis en Europe dans les années 50.

Ces cellulaires étaient très contraignants par leur mobilité restreinte, leur faible capacité, leurs services limités et leur qualité d’écoute très faible. Ils étaient également très lourds, très gros, très chers et très sensibles aux interférences. Pour toutes ces raisons on ne comptait que moins d’un million d’abonnés dans les années 80 [1].

I.2. La Première Génération (1G) :

C’est à la fin des années 70 et début des années 80 que les communications mobiles ont fait un saut en avant (au niveau de la mobilité et de la capacité). Les évolutions des technologies des semi-conducteurs et microprocesseurs ont permis la conception de mobiles plus petits, plus légers, plus sophistiqués et surtout accessibles pour un plus grand nombre d’utilisateurs.

Ces cellulaires de 1ère Génération transmettent la voix d’une façon analogique. Les plus importants systèmes sont **AMPS** (**A**dvanced **M**obile **P**hone **S**ystem), **NMT** (**N**ordique **M**obile **T**éléphone), et **TACS** (**T**otal **A**ccess **C**ommunication **S**ystem).

Avec l’introduction de la 1ère Génération de mobiles sur le marché, la vente annuelle a augmenté, atteignant ainsi les 20 millions d’utilisateurs dans les années 90.

Ce système avait des handicaps, le premier était le nombre très limité de communications simultanées dans une même cellule. Le second, vient du fait que chaque pays édicte sa norme, si bien que les systèmes de radiocommunications sont incompatibles d'un pays à l'autre.

I.3. La Deuxième Génération (2G) :

Le développement des cellulaires de seconde génération fut dirigé par le besoin d’améliorer la qualité de transmission, la capacité du système ainsi que la couverture réseau. Les technologies des semi-conducteurs et des dispositifs à micro-ondes ont permis l’utilisation de la transmission digitale au sein des télécommunications mobiles.

La transmission de la voix domine toujours, mais les demandes pour le **FAX**, les **SMS** (messages courts) et les transmissions de données ont augmenté rapidement.

Des services supplémentaires sont apparus tels que la prévention de fraude et le cryptage des données personnelles. Ces derniers sont devenus comparables aux services disponibles sur les réseaux fixes. Les cellulaires de la 2ème Génération incluent le **GSM**, **D-AMPS**, et **PDC.**

Aujourd'hui de nombreux standards liés aux 1ère et 2ème Génération sont apparus et sont utilisés dans le monde entier. Chaque standard à son propre niveau de mobilité, de capacité et de service. Certains standards ne sont utilisés que dans un pays ou région et sont pour la plupart incompatibles entre eux. Le **GSM** reste la famille de standard la plus efficace présente dans le monde.

I.4. Le réseau GSM:

GSM (**G**lobal **S**ystem for **M**obile Communications) très largement utilisé est la première norme de téléphonie cellulaire qui soit pleinement numérique. C'est la référence mondiale pour les systèmes radio mobiles. Avec plus de 400 millions d'utilisateurs à la fin de l'année 2000 dans le monde [1], soit la moitié du nombre total d'utilisateurs de téléphonie mobile.

Le réseau **GSM** offre à ses abonnés des services qui permettent la communication de stations mobiles de bout en bout à travers le réseau. La téléphonie est le plus important des services offerts. Ce réseau permet la communication entre deux stations mobiles où entre une station mobile et un poste fixe. Les autres services Proposés sont la transmission de données à faibles débits et la transmission de messages alphanumériques courts **SMS** (**S**hort **M**essage **S**ervice).

Le **GSM** transporte les informations sans modification en mode circuit ce qui garantit la chronologie des informations échangées. Les données de l'utilisateur et la signalisation du réseau sont transportées dans des canaux de communication différents.

I.4.1. Architecture du réseau GSM:

Pour gérer les spécificités des communications avec les mobiles, le **GSM** a introduit des équipements qui n'existaient pas dans les réseaux téléphoniques fixes classiques, les **PSTN** (**P**ublic **S**witched **T**elephone **N**etwork) ou **RTC** (**R**éseau **T**éléphonique **C**ommuté).
Ces équipements, et plus généralement toutes les fonctions relatives à la gestion des utilisateurs mobiles ont été regroupés dans un type de réseau particulier appelé **PLMN** (**P**ublic **L**and **M**obile **N**etwork). Ces réseaux se raccordent aux **PSTN** et aux **PLMN** d'autres opérateurs par des passerelles spécifiées dans le standard **GSM**.

Un réseau **GSM** se compose de trois ensembles distincts :

- Le **BSS** (**B**ase **S**tation **S**ubSystem), Un sous-système radio ;
- Le **NSS** (**N**etwork **S**ub**S**ystem), Un sous-système réseau ;
- L'**OSS** (**O**peration **S**upport **S**ubSystem), Un sous-système d'exploitation et de maintenance.

La **Figure I.1** présente l'architecture globale du réseau **GSM**.

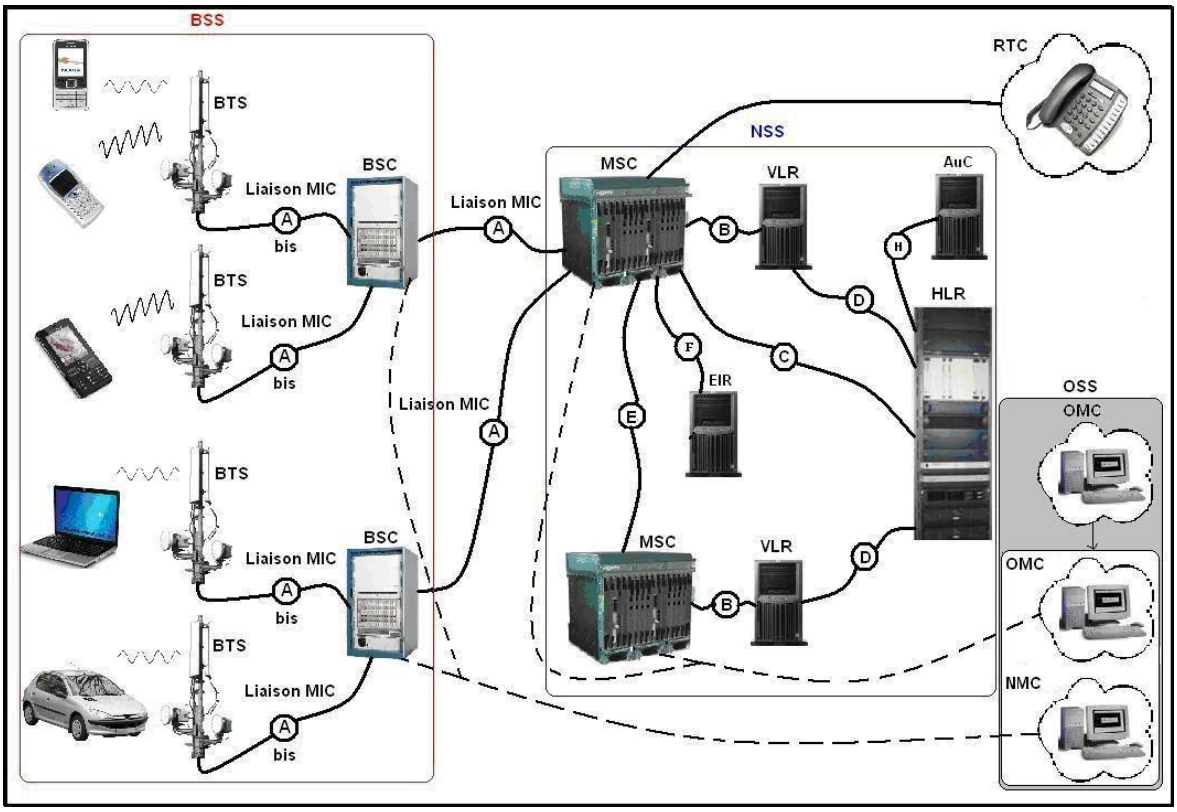


Figure I.1 Architecture du réseau **GSM**.

I.4.1.1. Le BSS (Base Station SubSystem):

Le **BSS** ou le sous-système radio, regroupe tous les équipements qui assurent les transmissions radioélectriques et gère toutes les ressources radios.

Le **BSS** comprend les **MS**, les **BTS** et les **BSC**.

a. Le MS (Mobile Station):

La station mobile ou (**MS**) est composée d'une part d'un terminal qui est la partie visible et d'autre part d'un module d'identification d'abonné qui est la carte **SIM** (**S**ubscriber **I**dentity **M**odule) qui contient les informations relatives à l'abonnement de l'utilisateur telles que ses identités, l'**IMSI** (**I**nternational **M**obile **S**ubscriber **I**dentity) et le **TMSI** (**T**emporary **M**obile **S**ubscriber **I**dentity) et ses algorithmes de chiffrements.

Une carte SIM peut être transférée d'un terminal à un autre et peut être protégée par un code **PIN** (**P**ersonal **I**dentification **N**umber).

Le terminal possède sa propre identité, l'**IMEI** (**I**nternational **M**obile **E**quipement **I**dentity) qui permet de connaître l'identité du constructeur du terminal mais aussi d'empêcher l'utilisation des terminaux volés ou non conformes.

b. Les BTS (Base Transceiver Station):

Les **BTS** couvrent des cellules de tailles variables suivant les sites, 30 Km de rayon en zone rurale comme elle peut être réduite jusqu'à 250 m en zone urbaine de fort trafic. Les **BTS** sont matérialisés sous la forme d'antennes sur les toits des immeubles en ville ou sur les bords de routes. Elles ont en charge l'accès radio des mobiles dans leurs zones de couverture. Elles doivent assurer la modulation, la démodulation, codage correcteur d'erreurs, estimation de canal et égalisation. Elles diffusent des informations générales sur la cellule qui sont utiles aux mobiles et remontent aux **BSC** des mesures sur la qualité de transmission dans la cellule.

c. Le BSC (Base Station Controler):

Les **BSC,** ou contrôleurs de station de base, sont des concentrateurs de **BTS**. Ils gèrent les ressources radioélectriques et le fonctionnement d'un certain nombre de **BSC,** notamment le **Handover,** tandis que les **BTS** ne font qu'appliquer les décisions prises par le **BSC**.

Un **BSC** standard peut contrôler une soixantaine de **BTS**, ce nombre peut être réduit en zone rurale.

Le **BSC** est connecté aux **BTS** par l'interface (**Abis)** et aux **MSC** par l'interface (**A**). La normalisation de ces interfaces garantit l'interfonctionnement des matériels de différents constructeurs.

I.4.1.2. Le NSS (Network SubSystem):

Le sous-système réseau **NSS** s'occupe de l'interconnexion avec les réseaux externes, publics ou privés auxquels est rattaché le réseau mobile. En outre, ce sous-système gère l'établissement des communications avec les utilisateurs mobiles dont il détient un profil.

Les éléments du sous-système réseau **NSS** sont les suivants :

a. Le MSC (Mobile service Switching Center) :

Le **MSC** ou commutateur de services mobiles, est un autocommutateur qui assure toutes les fonctions de commutation nécessaires pour les mobiles situés dans une zone géographique appelée zone de **MSC**. Il prend en compte la nature mobile des usagers.

En particulier, il assure la localisation, met à jour et applique les procédures prévues pour le transfert des communications entre les cellules. Il assure aussi les fonctions de taxation et peut assurer l'interconnexion avec les autres réseaux mobiles ou **PLMN** (**P**ublic **L**and **M**obile **N**etwork) et le réseau téléphonique fixe, le **RTC**.

L'interfonctionnement avec d'autres réseaux nécessite la présence des fonctions spécifiques dans ce commutateur qui sont désignées sous le nom de (**I**nter**W**orking **F**unctions) ou **IWF**.

Ces fonctions dépendent du type de réseau à connecter et du type de services désiré. On parle alors de **GMSC** (**G**ateway-**MSC**).

Le **MSC** est relié aux **BSC** via l'interface (**A**). Les **MSC** sont interconnectées entre eux par l'interface (**E**).

b. Le VLR (Visitor Location Register) :

Le **VLR** est une base de données de localisation locale dans laquelle sont stockées les informations relatives aux utilisateurs d'une région particulière. On y retrouve les mêmes informations que dans le **HLR,** ainsi l'identité temporaire de l'utilisateur **TMSI** (**T**emporary **M**obile **S**ubscriber **I**dentities) et sa zone de localisation qui n'est autre qu'un ensemble de cellules dans lesquelles se trouve l'utilisateur.

En pratique, un **VLR** est souvent attaché à un **MSC**. Grâce aux **VLR**, les informations propres à l'utilisateur le suivent dans ses déplacements. Il n'est ainsi pas nécessaire de contacter le **HLR** à chaque appel issu du mobile, ce qui engendrerait un fort trafic de signalisation. En revanche, les appels vers le mobile doivent rechercher dans le **HLR** d'une part, l'association entre le numéro standard du téléphone mobile et son identité **IMSI** dans le **PLMN**, et d'autre part son **MSC-VLR** courant.

c. HLR (Home Location Register):

Le **HLR** est une base de données de localisation nominale dans laquelle sont stockées les informations relatives aux abonnés d'un **PLMN**. On y trouve les **IMSI** (**I**nternational **M**obile **S**ubscriber **I**dentity), les numéros de téléphones classiques ainsi que les informations de chiffrement et la localisation courante de l'abonné, c'est-à-dire, la référence du **VLR** de la zone dans laquelle il se trouve.

Bien qu'il n'y ait qu'un **HLR** logique par **PLMN**, un **HLR** est pratiquement mis en œuvre au travers de plusieurs bases de données redondantes reliées entre elles.

d. L'AuC (Authentification Center):

Le centre d'authentification **AuC** qui est associé au **HLR,** contient la clé d'authentification unique $\mathbf{K_i}$ de l'abonné et génère les triplets ($\mathbf{K_c}$, **RAND SRES**) utilisés pour l'authentification et le chiffrement.

e. L'EIR (Equipement Identity Register):

L'enregistreur des identités des équipements est une base de données contenant le numéro international de l'équipement **IMEI** (**I**nternational **M**obile **E**quipement **I**dentity) permettant ainsi son identification.

I.4.1.3. L'OSS (Opération Support Subsystem):

Le sous-système d'exploitation et maintenance **OSS** permet à l'exploitant d'administrer son réseau. La diversité des équipements présents dans un réseau **GSM** pousse à adopter une approche structurée et hiérarchique.

La mise en place d'un réseau **GSM** (en mode circuit) va permettre à un opérateur de proposer des services de type « Voix » à ses clients en donnant accès à la mobilité tout en conservant un interfaçage avec le réseau fixe **RTC** existant.

- Deux niveaux de hiérarchie sont définis dans la norme **GSM**:

  - L'**OMC** (**O**peration and **M**aintenance **C**enter) :

    Le centre d'exploitation et de maintenance **OMC,** permet une supervision locale des équipements. Les incidents mineurs sont transmis au **OMC** qui lès filtre à son tour.

  - Le **NMC** (**N**etwork **M**anagement **C**enter):

    Le centre de gestion du réseau **NMC**, permet d'administrer de façon générale l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé. Les incidents majeurs survenus sur le réseau sont transmis au **NMC** pour filtrage.

I.4.2. Les Interfaces radios:

Pour un système de communication mobile, les terminaux doivent pouvoir ne pas être physiquement reliés au réseau. C'est ainsi que la mobilité est assurée à travers l'interface radio ou interface Air qui permet une connectivité sans fils des terminaux au réseau de couverture.

Elle est constituée de mécanismes permettant l'émission et la réception des signaux radiofréquences de manière efficace et sûre, quelles que soient les conditions de propagation.

Cette couche physique inclut des moyens permettant d'établir, de maintenir et de relâcher, mais également de spécifier les différents types de liens établis entre le terminal mobile et le réseau. La notion de canal logique permet de dissocier les fonctions de ces différents liens [2].

✓ **Dans le BSS:**

MS - BTS : Ondes hertziennes (canal voix à 13 kbit/s)

BTS - BSC : Interface **Abis** (liaisons **MIC** à 2 Mbit/s (**E1**)
ou liens Ethernet (**Abis over IP**))

BSC - Trau : Interface **Ater** ou **ASUB** (canaux de trafic à 16 kbit/s)

Trau - MSC : Interface **A** (circuit de parole numérique à 64 kbit/s)

- Au sein de la **BTS**, le débit à 13 kbit/s est adapté pour passer à 16 kbit/s (Complété avec des bits de bourrage).

- Le **Trau** (**T**ranscoder/**R**ate **A**daptator **U**nit) :

  Pour adapter le codage de la voix sur l'interface radio (13 kbit/s) aux circuits de parole (64 kbit/s) du réseau fixe. Donc le transcodeur permet de transporter quatre communications codées à 16 kbit/s (on complète les 13 kbit/s par des bits de cadrage et de bourrage).

✓ **Dans le NSS:**

MSC - VLR : Interface **B** (en pratique inexistante car **VLR** et **MSC** sont intégrés dans un même équipement.

MSC - HLR : Interface **C** qui permet d'interroger le **HLR** lors de l'établissement d'une communication.

VLR - HLR : Interface **D** qui permet la gestion des informations relatives à la localisation des abonnés. L'interface est normalisée pour permettre l'itinérance (**Roaming**).

MSC - MSC : Interface **E** qui sert à l'exécution des **Handovers** et au transport des messages courts.

VLR - VLR : Interface **G** qui permet le transfert d'informations lors de la mise à jour de la zone géographique des abonnés.

I.5. Le réseau GPRS (General Packet Radio Service) (2.5G):

La mise en place d'un réseau **GPRS** va permettre à un opérateur de proposer de nouveaux services de type "Data" à ses clients.

Le réseau **GPRS** vient ajouter un certain nombre de « modules » sur le réseau **GSM** sans changer le réseau existant, ainsi son but est de conserver l'ensemble des modules de l'architecture **GSM** en utilisant le mode de transmission par « Paquets», Cette méthode est plus adaptée à la transmission des données. En effet, les ressources ne sont allouées que lorsque des données sont échangées, contrairement au mode « Circuit » en **GSM** où un circuit est établi – et les ressources associées – pour toute la durée de la communication.

Le **GPRS** a ensuite évolué au début des années 2000 vers la norme **EDGE** (**E**nhanced **D**ata Rates for **G**SM **E**volution) **2.75G**, également optimisée pour transférer des données et qui utilise les mêmes antennes et les mêmes fréquences radio.

Nous verrons par ailleurs que certains modules **GSM** seront utilisés pour le fonctionnement du réseau **GPRS**.

La **Figure I.2** présente l'architecture du réseau **GPRS**.

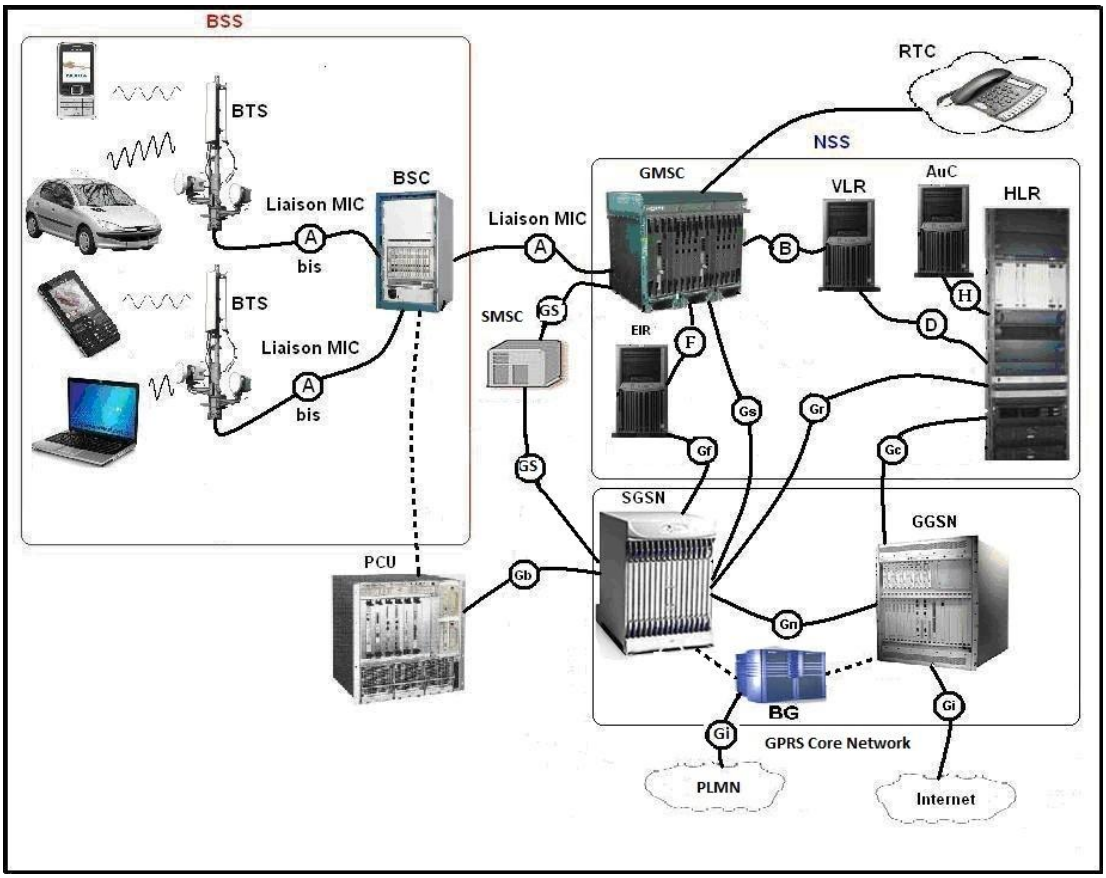


Figure I.2. Architecture du réseau **GPRS**.

Un réseau **GPRS** est un réseau **IP** (**I**nternet **P**rotocol). Qui est donc constitué de routeurs IP. L'introduction de la mobilité nécessite par ailleurs la précision de deux nouvelles entités :

I.5.1. Le SGSN (Serving GPRS Support Node):

Le nœud de service dénommé **SGSN** (**S**erving **G**PRS **S**upport **N**ode) est relié au **BSS** du réseau **GSM** et il est en connexion avec l'ensemble des éléments qui assurent et gèrent les transmissions radio : **BTS**, **BSC**, **HLR** ...

Le **SGSN** joue un rôle d'un routeur, il gère les terminaux **GPRS** et il permet l'acheminement des données dans les réseaux mobiles présents dans une zone donnée.

Le **SGSN** est le « contrôleur » des terminaux **GPRS** présents dans sa zone de surveillance.

I.5.2. Le GGSN (Gateway GPRS Support Node):

Le nœud de passerelle **GGSN** (**G**ateway **G**PRS **S**upport **N**ode) est une passerelle d'interconnexion entre le réseau paquet mobile et les réseaux de données externes (Internet, autre réseau **GPRS**...). C'est un routeur qui permet de gérer les transmissions de paquets de données :

- Paquets entrants d'un réseau externe, acheminés vers le **SGSN** du destinataire.
- Paquets sortants vers un réseau externe, émanant d'un destinataire interne au réseau.

I.5.3. Le BG (Border Gateway):

Le concept de **BG** (**B**order **G**ateway) permet de connecter les réseaux **GPRS** via un réseau fédérateur qui assure les fonctions de sécurité pour la connexion entre ces réseaux. Ces **BG** ne sont néanmoins pas spécifiés par les recommandations mais elles jouent le rôle d'interface avec les autres **PLMN** (**P**ublic **L**and **M**obile **N**etwork) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux (par exemple entre deux réseaux de deux opérateurs concurrents).

I.5.4. Les équipements GSM utilisés

Le réseau **GPRS** appuie son architecture sur les éléments du réseau GSM :

- Les **BTS** et **BSC** permettent de couvrir un territoire national pour localiser les terminaux.
- Le **MSC** et le **VLR** permettent également de gérer les problématiques d'itinérance des abonnées sur les réseaux **GSM** et **GPRS**.
- Le **SMSC** et le **GMSC** permettent la communication interne au réseau par l'envoi de messages courts à destination du terminal **GPRS**.
- Le **HLR** permet de gérer les problématiques liées à la localisation des individus (en mode **GPRS**, fournir une carte de la ville où se trouve l'abonné).
- L'**EIR** permet de gérer les problématiques liées au terminal visé.

Le réseau **GPRS** est totalement dépendant du bon fonctionnement des infrastructures du réseau **GSM**, ce dernier constitue donc en effet une base pour la mise en place du réseau **GPRS**.

L'ensemble des éléments **GSM** et **GPRS** sont associés pour fournir un service **GPRS**. Deux protocoles sont alors utilisés :

- ✓ Le traditionnel protocole **IP** qui assure une ouverture vers les terminaux fixes extérieurs au réseau.
- ✓ Le protocole **SS7** (**S**ignal **S**émaphore **7**) qui est un protocole interne au réseau **GPRS**.

I.5.5. Le type de transmission dans le réseau GPRS:

Ce standard utilise un mode de transmission par paquet. Lorsque le mobile transmet des données vers un terminal fixe, les données sont transmises via le **BSS** (**BTS** + **BSC**) au **SGSN** qui envoie ensuite les données vers le **GGSN** qui les route vers le destinataire.

Le routage vers des terminaux (terminal mobile vers terminal mobile ou terminal fixe vers terminal mobile) utilise le principe de l'encapsulation et des protocoles tunnels. Les données revues par le **GGSN** sont transmises au **SGSN** dont dépend le mobile destinataire.

I.5.6. La gestion d'itinérance:

La gestion de l'itinérance reprend les principes du réseau **GSM** avec le regroupement de cellules en zones. Le terminal **GPRS** peut se trouver dans trois Etats :

- ✓ En « **REPOS** », le mobile est éteint.
- ✓ En « **SURVEILLANCE** », le mobile est localisé au niveau de la zone de routage. Le mobile peut être appelé par le **SGSN**.
- ✓ Etat « **PRET** », le mobile est localisé au niveau de la cellule. Le mobile peut recevoir des informations ; dans cet état le terminal est localisable à la cellule près.

Une zone de routage est un regroupement de cellules (cellules réseau **GSM**). En état de « **SURVEILLANCE** » puis de « **PRET** », le terminal ne monopolise pas de canal radio s'il n'y a pas de transmission ou de réception de données.

I.6. La Troisième Génération (3G) ou UMTS:

La **3G** a été définie dans la release **R99** sous le nom **UMTS** (**U**niversal **M**obile **T**élécommunications **S**ystem). Certains préfèrent encore l'appeler **W-CDMA** (**W**ideband **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) qui est la technologie d'accès radio permettant à plusieurs utilisateurs de communiquer en même temps.

L'objectif de la **3G** était le haut débit, en théorie 2 Mbps (soit 6*384 kbps) avec une mobilité faible et proche de l'antenne, et un débit de 384 kbps en mouvement, ce qui est proche des offres **ADSL** de l'époque.

La **3G** a nécessité la mise en place d'infrastructures radio en parallèle du réseau **EDGE** et du réseau **GPRS** dont le coût a été estimé à quelques milliards d'euros. Il s'agit du coût de la mise en place de nouvelles antennes, nommée « **Nœud B** » (**Node B**) et d'un contrôleur de nœud nommé **RNC**. Le **Node B** est donc l'équivalent de la **BTS** utilisée en **GSM**, avec une bande de fréquence différente mais en utilisant la technologie de modulation **HPSK** (**H**ybrid **P**hase **S**hift **K**eying) et une technologie d'accès **W-CDMA** différente.

Le **Node B** et le **RNC** forment l'accès radio **UMTS** dénommé **UTRAN** (**U**MTS **T**ERRESTRIAL **R**adio **A**ccess **N**etwork). Ils se rajoutent donc au **GERAN** (**G**SM-**E**DGE **RAN**), l'ensemble **UTRAN** et **GERAN** forme donc maintenant le **BSS.**

La **3G** a été impulsée pour permettre des applications vidéo sur le mobile et améliorer la **QoS** (**Q**uality **O**f **S**ervice) du Multimédia. Les applications visées étaient la possibilité de regarder des vidéos, de la visiophonie etc… Outre l'augmentation de débit, un point complexe à résoudre était de passer d'un service de téléphonie « mode circuit » vers un service **DATA** « mode paquets » [3].

L'idée été d'ajouter des amplificateurs avant chaque antenne, ce qui permet d'amplifier le signal pour que celui-ci puisse être reçu par une autre antenne tout en changeant les techniques de modulation. Pour cela il a fallu améliorer les terminaux mobiles (Smartphone, Tablette...) permettant un usage plus confortable de la connexion haut débit.

I.6.1. Architecture du réseau UMTS:

Le réseau cœur de l'**UMTS** s'appuie sur les éléments de base du réseau **GSM** et **GPRS**. Il est en charge de la commutation et du routage des communications (voix et données) vers les réseaux externes.

Le réseau **UMTS** vient se combiner aux réseaux déjà existants du **GSM** et **GPRS**, qui apportent des fonctionnalités respectives de la Voix et des Données, le réseau **UMTS** apporte ensuite les fonctionnalités Multimédia.

Le réseau cœur se décompose en deux parties : le domaine circuit dans un premier temps et le domaine paquet. La **Figure 1.4** présente l'architecture du réseau UMTS.

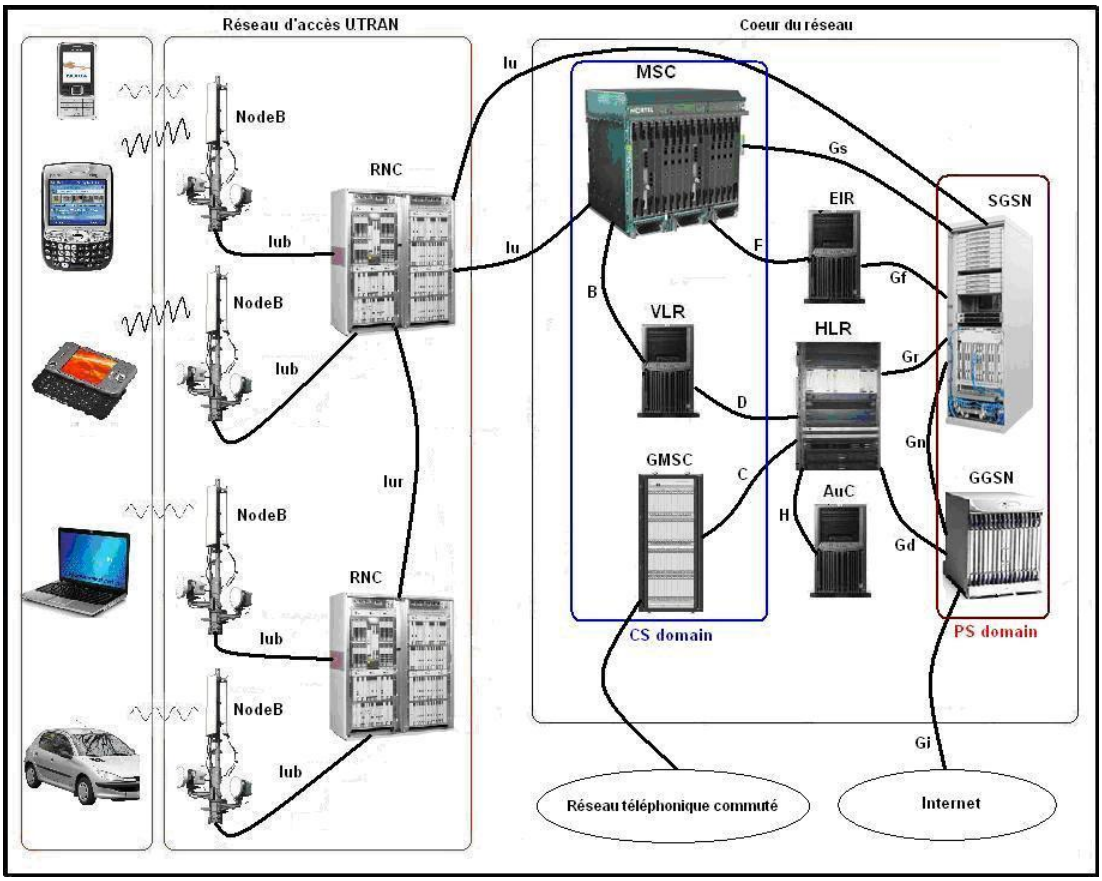


Figure I.3 Architecture du réseau **UMTS.**

I.6.2. Les fréquences et le débit de l'UMTS:

Les fréquences allouées à l'**UMTS** sont 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz.

L'**UIT** (**U**nion **I**nternationale des **T**élécommunications) a désigné des bandes de fréquences pour les différents systèmes de l'**UMTS** qui sont :

- Duplex temporel **TDD** (**T**ime **D**ivision **D**emultiplexed) : 1885 à 1920 MHz (Uplink bande de 35Mz) et 2010 à 2025 MHz (Downlink bande de 15 MHz).
- Duplex fréquentiel **FDD** (**F**renquency **D**ivision **D**emultiplexed) 1920 à 1980 MHz (Uplink bande de 60 MHz) et 2110 à 2170 MHz (Downlink bande de 60 MHz).
- Bandes satellites : 1980 à 2010 MHz (Uplink de 30 MHz) et 2170 à 2200 MHz (Downlink de 30 MHz).

La bande passante d'un canal est de 5MHz avec une largeur spectrale réelle de 4,685 MHz.

L'UMTS permet théoriquement des débits de transfert de 1,920 Mbit/s, mais fin 2004 les débits offerts par les opérateurs dépassent rarement 384 Kbit/s **[3]**. Néanmoins, cette vitesse est nettement supérieure au débit de base **GSM** qui est de 9,6 kbit/s.

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

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

Grâce à son débit, l'**UMTS** ouvre la porte à des applications et services nouveaux, permettant en particulier de transférer, dans des temps relativement courts, des contenus multimédia tels que les images, les sons et les vidéos (Visiophonie, **MMS** Vidéo, Vidéo à la demande, Télévision).

I.6.3. Le mode de transmission dans le réseau UMTS:

Dans l'**UMTS,** la transmission repose sur deux modes :

a. Le mode circuit :

Ce mode permet de gérer les services temps réels dédiés aux conversations téléphoniques (vidéo-téléphonie, jeux vidéo, applications multimédia).

Ces applications nécessitent un temps de transfert rapide. Lors de l'introduction de l'**UMTS** le débit du mode domaine circuit sera de 384 Kbits/s.

L'infrastructure s'appuie alors sur les principaux éléments du réseau **GSM** : **MSC/VLR** (bases données existantes) et le **GMSC** afin d'avoir une connexion directe vers le réseau externe.

b. Le mode paquet :

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

L'infrastructure s'appuie alors sur les principaux éléments du réseau **GPRS** : **SGSN** (bases de données existantes) en mode paquet **GPRS**, équivalent des **MSC/VLR** en réseau **GSM**) et le **GGSN** (équivalent du **GMSC** en réseau **GSM**) qui jouera le rôle de commutateur vers le réseau Internet et les autres réseaux publics ou privés de transmission de données.

I.7. La Quatrième Génération (4G LTE):

La norme **LTE** (**L**ong **T**erm **E**volution)**,** permet le « très haut débit mobile », c'est-à-dire des transmissions de données à des débits théoriques supérieurs à 100 Mbit/s, voir supérieurs à 1 Gbit/s (débit minimum défini par l'**UIT** pour les spécifications IMT-Advanced pour la norme **LTE-Advanced**). En pratique, les débits sont de l'ordre de quelques dizaines de Mbit/s selon le nombre d'utilisateurs, puisque la bande passante est partagée entre les terminaux actifs des utilisateurs présents dans une même cellule radio.

Une des particularités de la **4G** est d'avoir un « cœur de réseau » basé sur **IP** et de ne plus offrir de mode commuté (établissement d'un circuit pour transmettre un appel « voix »), ce qui signifie que les communications téléphoniques utilisent la voix sur **IP** (en mode paquet **VoIP « V**oice **O**ver **IP »**)

Avec la **4G**, on se dirige vers la transmission de toutes les informations « voix et données » par **IP**, le même protocole qu'on utilise sur Internet. Pour les fournisseurs, c'est plus facile et moins cher à gérer. Ça facilite aussi le développement d'applications multimédias. Cette technologie permet des vitesses de téléchargement plus rapides et des temps de latence plus courts.

I.7.1. Historique sur la 4G :

En 2002, la vision stratégique pour la **4G**, que l'**UIT** a désigné comme **IMT-Advanced**, a été aménagé.

En 2005, la technologie de transmission **OFDMA** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) est choisie comme candidat pour la liaison descendante **HSOPA (H**igh **S**peed **O**FDM **P**acket **A**ccess**)**, rebaptisée plus tard par **3GPP** Long Term Evolution **LTE**. En Novembre 2005, **KT** (**K**orea **T**elecommunication) démontre le service mobile WiMAX à Busan, Corée du Sud [4].

La société japonaise **NTT DoCoMo** (**N**ippon **T**elegraph & **T**elephone) a testé, en Février 2007, un prototype de communication **4G** système **MIMO** 4x4 appelé **VSF-OFCDM** à 100 Mbit/s tout en se déplaçant, et 1 Gbit/s à l'arrêt. Un an plus tard, le commissaire européen **Viviane Reding** a proposé de réaffecter des 500-800 MHz pour les communications sans fil.

En Avril 2008, juste après avoir reçu la lettre circulaire, le **3GPP** a organisé un atelier sur les **IMT-Advanced** où il a été décidé que **LTE-Advanced**, une évolution de la norme **LTE** en cours permettra de répondre, voire dépasser les exigences **IMT-Advanced** qui suit l'ordre du jour de **l'UIT-R**.

En Décembre 2009, Sprint a commencé à annoncer "**4G**" de service dans certaines villes des États-Unis, en dépit de la moyenne des vitesses de téléchargement de seulement 3-6 Mbit/s avec une vitesse de pointe de 10 Mbit /s (pas disponible sur tous les marchés).

Le 25 Février 2010, l'Estonie a ouvert **EMT LTE** "**4G**" travail en réseau dans le régime d'essai. Le 5 Juin 2010, **Sprint Nextel** a publié le premier Smartphone **4G**, **l'Evo HTC 4G.**

En Juillet 2010, **MTS** Ouzbékistan à Tachkent déployé **LTE**. Le 25 août 2010, la Lettonie a ouvert **LMT LTE** "**4G**" travail en réseau dans le régime d'essai de 50% du territoire [4].

Le **LTE** permet d'exploiter des largeurs de bande de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz.

La norme **LTE-Advanced** impose des critères de base sur le débit et sur la latence, comme le résume le **Tableau I.1** suivant [4] :

		LTE	**LTE-Advanced**
Débits crêtes maximums	DownLink	300 Mb/s	1 Gb/s
	UpLink	75 Mb/s	500 Mb/s
Bandes de fréquence		1.4 à 20 MHz	100 MHz
Latence	Données	10 ms	10 ms (RTT)
	Session	100 ms	50 ms
Efficacité spectrale (DL/UL)	Max	5.0/2.5 b/s/Hz	30/15 b/s/Hz
	Moyen	1.8/0.8 b/s/Hz	2.6/0.2 b/s/Hz
	En limite	0.04/0.02 b/s/Hz	0.009/0.07 b/s/Hz

Tableau I.1 : Différents Paramètres du **LTE** / **LTE-Advanced**.

I.8. Conclusion:

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté d'une façon générale les différentes générations de téléphone mobiles et les principales caractéristiques d'un réseau cellulaire. La mise en œuvre du service **GPRS** implique une évolution matérielle et logiciel s'ajoutant au réseau **GSM** déjà existants.

L'évolution du **GSM** vers **GPRS** prépare à l'introduction des Réseaux de troisième Génération **UMTS**. Des modifications concernant l'infrastructure doivent être effectuées pour l'intégration du **GPRS** à l'**UMTS** et cela par l'ajout d'autres équipements ainsi que le chargement d'autres logiciels qui vont avec.

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

Pour les réseaux **4G** (**LTE et LTE-Advanced**), nous avons présenté un bref aperçu et dans le prochain chapitre nous allons l'étudier en détail.

Chapitre II:

Etude détaillée des réseaux 4G

II-1. Généralités sur la technologie 4G LTE:

Diverses études du marché prévoient une croissance exponentielle du trafic des données entre 2012 et 2020. Cette croissance est d'autant plus marquante dans quelques pays où le volume des données échangées dans les réseaux mobiles double. Afin de répondre aux besoins de plus en plus persistants, la simple mise à disposition de nouvelles fréquences ne suffit pas.

Développé par l'organisme **3GPP (3**rd **G**eneration **P**artnership **P**roject**)**, la nouvelle norme de radiocommunication **LTE** (**L**ong **T**erm **E**volution), une évolution des technologies **IMT** (**I**nternational **M**obile **T**élécommunications: **UMTS**, **HSPA**, **HSPA+**) vient résoudre l'ensemble des problèmes évoqués.

Le **LTE** vise une efficacité en matière de spectre environ 3 à 4 fois supérieur à l'**UMTS HSPA** (**H**igh **S**peed **P**acket **A**ccess), pour un coût de réseau relativement bas.

Cette technologie est basée sur des techniques radios telles que l'**OFDMA (O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess**)** et le **MIMO** permettant le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule supérieur et un temps de latence plus faible.

II.2. La 4G LTE:

Une des particularités de La technologie **LTE** (**L**ong **T**erm **E**volution) ou la **4G** est d'avoir un « cœur de réseau » basé sur **IP** et de ne plus offrir de mode commuté (établissement d'un circuit pour transmettre un appel "voix"), ce qui signifie que les communications téléphoniques utiliseront la voix sur **IP** (en mode paquet).

LTE utilise des bandes de fréquences Hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une largeur de bande de 20 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en liaison descendante « Downlink ».

La "vraie 4G" est appelée **LTE-Advanced,** offrira un débit descendant pouvant atteindre 1 Gbit/s.

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées à même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et latence) par rapport aux réseaux **3G** existants.

Le multiplexage **OFDMA** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le **Wi-Fi** ou le **WiMax**) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée.

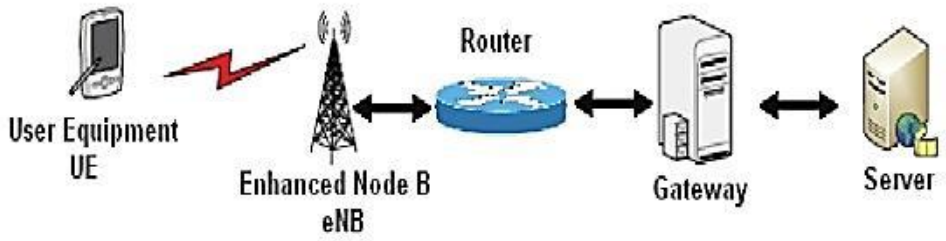


Figure II.1 : Présentation générale du système **LTE** [5].

II.3. Les buts de la 4G LTE:

La **4G LTE** vise à améliorer l'efficacité spectrale et à augmenter la capacité de gestion du nombre de mobiles dans une même cellule. Elle tente aussi d'offrir des débits élevés en situation de mobilité et à offrir une mobilité totale à l'utilisateur en établissant l'interopérabilité entre différentes technologies existantes. Elle vise à rendre le passage entre les réseaux transparent pour l'utilisateur, à éviter l'interruption des services durant le transfert intercellulaire et à basculer l'utilisation vers le **Tout-IP** [10].

Les principaux objectifs visés par les réseaux de la **4G LTE** sont les suivants :

- Assurer la continuité de la session en cours.
- Réduire les délais et le trafic de signalisation.
- Fournir une meilleure qualité de service (**QoS**).
- Optimiser l'utilisation des ressources.
- Réduire le délai de relève, le délai de bout-en-bout, la gigue et la perte de paquets.
- Minimiser le coût de signalisation.

II.4. Architecture du réseau 4G LTE:

Les réseaux **LTE** sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences Hertziennes grâce aux codages radio **OFDMA** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) dans le sens descendant « Downlink », et le **SC-FDMA** (**S**ingle **C**arrier - **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) dans le sens montant « Uplink ».

La **Figure II.2** présente l'architecture globale du réseau **4G LTE**.

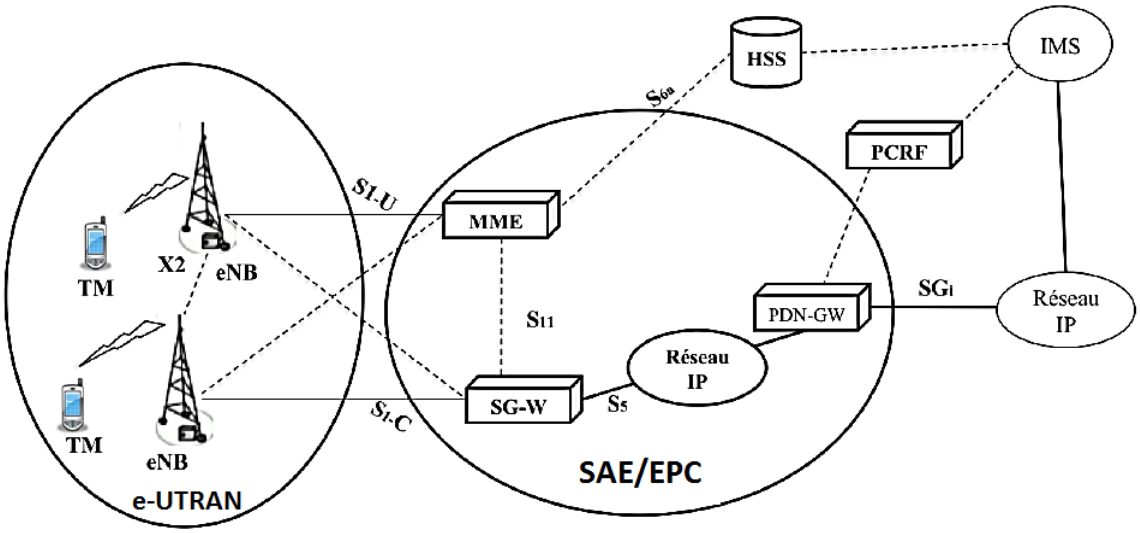


Figure II.2: Architecture du réseau **4G LTE** [7]

La technologie **LTE** a apporté une efficacité spectrale, une amélioration de débit, une augmentation de couverture et du nombre d'appels supporté par la cellule.

De même que ces précédentes, elle est caractérisée par son architecture connus sous le nom d'**EPS** (**E**volved **P**acket **S**ystem), qui comporte:

- Un réseau d'accès : l'**e-UTRAN** (**e**volved **UTRAN**).
- Un réseau cœur : l'**EPC** (**E**volved **P**acket **C**ore), Réseau **Tout-IP** [13].

L'**IMS** (**I**P **M**ultimedia **S**ubsystem) est une architecture récemment appliquée dans les réseaux mobiles qui permettent aux opérateurs de télécommunications d'offrir des services sur **IP** à valeur ajoutée.

La Figure II.3 présente une architecture simplifiée de la partie EPS du réseau LTE.

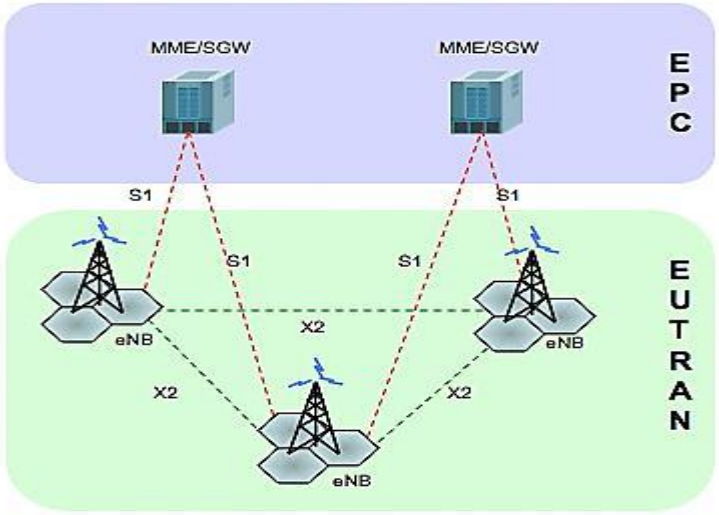


Figure II.3 : Architecture simplifiée d'**EPS**.

II.4.1. Le Réseau d'accès (e-UTRAN):

La partie radio du réseau, appelée « **e-UTRAN** » est simplifiée par rapport à celles des réseaux **2G** et **3G**, par l'intégration des fonctions de contrôle dans les stations de base « **eNodeB** », qui étaient auparavant implémentées dans les **RNC** (**R**adio **N**etwork **C**ontroller) des réseaux **3G UMTS**.

La partie radio d'un réseau **LTE** (voir **Figure II.3**), se compose donc des **eNodeB**s, d'antennes locales ou distantes, de liaisons en fibres optiques vers les antennes distantes et des liens **IP** reliant les **eNodeB**s entre eux (liens **X2**) et avec le cœur de réseau.

II.4.1.1. Les entités du réseau d'accès (e-UTRAN) :

La **Figure II.4** décrit l'architecture de l'**e-UTRAN** avec ses **eNodeB**s, les interfaces **X2** (entre les **eNodeB**s) et **S1** (entre **eNodeB** et entités du réseau cœur **MME/SGW**).

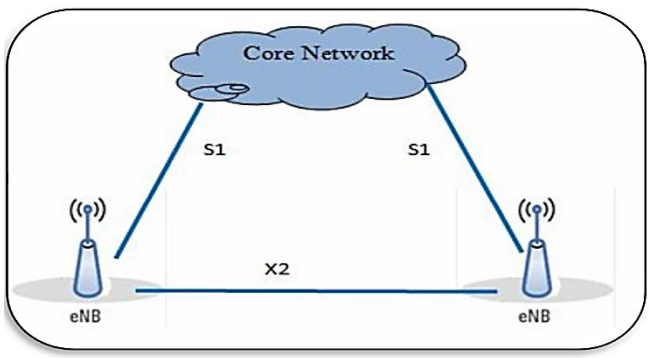


Figure II.4 : Architecture de l'**e-UTRAN** [11].

II.4.1.1.1. L'eNodeB:

L'**eNodeB** est l'équivalent de la **BTS** dans le réseau **GSM** et le **NodeB** dans l'**UMTS**. La fonctionnalité de **Handover** est plus robuste dans le **LTE**. Ce sont des antennes qui relient les **UE (U**ser **E**quipment**)** avec le réseau cœur du **LTE** via les **RF** (**R**adio **F**requency) air interface.

La fonctionnalité du contrôleur radio réside dans **eNodeB**, le résultat est plus efficace, et le réseau est moins latent, par exemple la mobilité est déterminée par **eNodeB** a la place du **BSC** ou **RNC** des réseaux **GSM et l'UMTS**.

Les **eNodeB**s sont reliés entre eux par une interface **X2.**

a. L'interface X2:

C'est une interface logique, elle est introduite dans le but de permettre aux **eNodeB**s d'échanger des informations de signalisation durant le **Handover** ou la signalisation, sans faire intervenir le réseau cœur.

Lorsque l'usager se déplace en mode **ACTIF** (**Handover**) d'un **eNodeB** à un autre **eNodeB**, de nouvelles ressources sont allouées sur le nouvel **eNodeB** pour l'**UE** ; or le réseau continue à transmettre ses données vers l'ancien **eNodeB** tant qu'il n'a pas été informé du changement.

Afin de minimiser la perte de ses paquets de données, l'ancien **eNodeB** relaie les paquets entrants sur l'interface **X2** au nouvel **eNodeB** qui les remet à l'**UE**.

L'**eNodeB** est relié au cœur du réseau à travers l'interface **S1**.

b. L'interface S1 :

C'est l'interface intermédiaire entre le réseau d'accès et le réseau cœur, elle peut être divisée en deux interfaces élémentaires :

- ✓ **S1-U** (**S1-Usager**) entre l'**eNodeB** et le **SGW,**
- ✓ **S1-C** (**S1-Contrôle**) entre l'**eNodeB** et le **MME**.

Les **eNodeB**s ont offert deux qualités au réseau :

- ➢ **La sécurité**: en cas de problème d'un relais.
- ➢ **Un partage des ressources équitable**: partage de ressource en cas de saturation du lien principale [13].

II.4.2. Réseau Cœur, EPC (Evolved Packet Core) :

Le cœur de réseau appelé **EPC** (**E**volved **P**acket **C**ore), utilise des technologies **Tout- IP**, c'est-à-dire basées sur les protocoles Internet pour la signalisation, le transport de la voix et des données. Ce cœur de réseau permet l'interconnexion via des routeurs avec les autres **eNodeBs**, les réseaux des autres opérateurs mobiles, les réseaux de téléphonie fixe et le réseau Internet.

Il assure la gestion des utilisateurs, la gestion de la mobilité, la gestion de la qualité de service **QoS** et la gestion de la sécurité, au moyen des équipements tels que le **MME**, le **SGW**, le **PDN-GW** (**P**acket **D**ata **N**etwork **G**ateway) et le **PCRF** (**P**olicy and **C**harging **R**ules **F**unction) [7].

L'utilisation du protocole **IP** de bout en bout dans le cœur du réseau, permet des temps de latence réduits pour l'accès internet et les appels vocaux **LTE**.

Son architecture est simplifiée, comme montre la **Figure II.5,** en la comparant à celle de **2G/3G**.

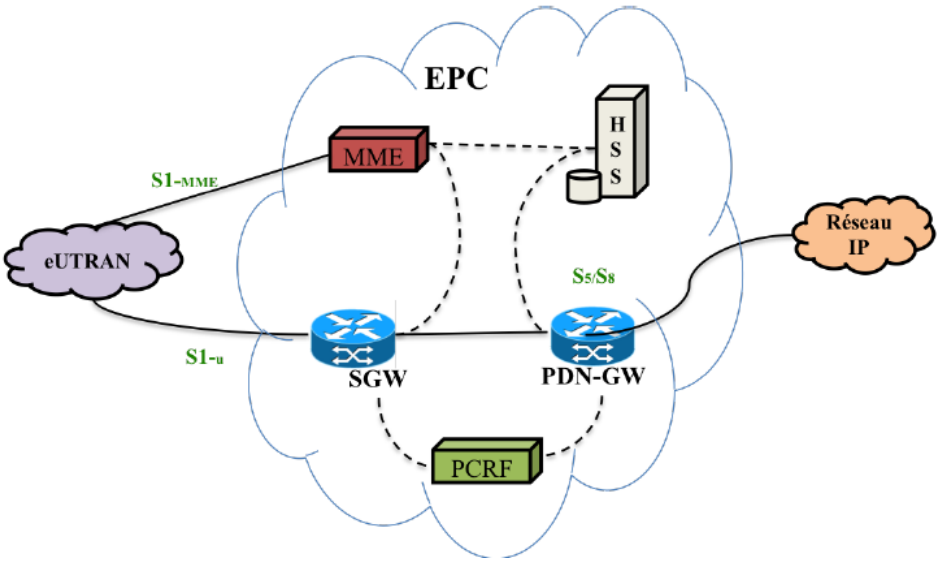


Figure II.5: Architecture **EPC** [7].

II.4.2.1. Description et rôles des entités du réseau cœur:

Voici les différentes entités du réseau cœur ainsi que leur rôle :

MME: (Mobility **M**anager **E**ntity**) "3GPP Release 8":**

C'est une entité de gestion de mobilité, le **MME** c'est le nœud principal de contrôle du réseau d'accès **LTE/SAE**, elle gère toutes les procédures (authentification, chiffrement, mobilité..) des **UE**. Les fonctions de l'entité **MME** incluent:

- **Signalisation « EMM » et « ESM » avec l'UE**:

Les terminaux **LTE** disposent des protocoles **EMM** et **ESM** qui leur permettent de gérer leur mobilité (attachement, détachement, mise à jour de localisation et leur session (établissement/libération de session de données) respectivement. Ces protocoles sont échangés entre l'**UE** et le **MME**.

- **Authentification:**

Le **MME** est responsable de l'authentification des **UE**s à partir des informations recueillies du **HSS**.

- **Gestion de la liste de « Tracking Area »:**

L'UE est informé des zones de localisation prises en charge par le **MME**, appelées **Tracking Area**. L'**UE** met à jour sa localisation lorsqu'il se retrouve dans une **Tracking Area** qui n'est pas prise en charge par son **MME**.

- **Sélection du « SGW » et du « PDN GW »:**

C'est au **MME** de sélectionner le **Serving GW** et le **PDN GW** qui serviront à mettre en œuvre le **Default Bearer** au moment du rattachement de l'**UE** au réseau.

- **Sélection du MME lors du Handover avec changement de MME**:

Lorsque l'usager est dans l'état **ACTIF** et qu'il se déplace d'une zone prise en charge par un **MME** à une autre zone qui est sous le contrôle d'un autre **MME**, alors il est nécessaire que le **Handover** implique l'ancien et le nouveau **MME**.

- **Roaming avec interaction avec le HSS nominal:**

Lorsque l'usager se rattache au réseau, le **MME** s'interface au **HSS** nominal afin de mettre à jour la localisation du mobile et obtenir le profil de l'usager [6].

Le SGW (Serving Gateway) "3GPP Release 8":

C'est la jonction principale entre le réseau radio accès et le réseau cœur **SGW** (**S**erving **G**ate**W**ay). Elle achemine les paquets de données, maintient la connexion de l'inter-**eNodeB Handover**, puis inter-système **Handover** entre **LTE** et **GSM/UMTS**. L'échange des paquets est acheminé par le **SGW** au **PDN-GW** par l'interface **S5**. Le **SGW** est connecté à l'**E-UTRAN** via l'interface **S1-U** qui sert de relai entre l'utilisateur et l'**EPC**.

Le P-GW (Packet Data Network Gateway) "3GPP Release8":

Le **P-GW** est le nœud qui relie l'utilisateur mobile aux autres réseaux **PDN**, tels que les réseaux **IP**, **PSTN** et **NON-3GPP**. L'accès aux réseaux **IP** et **PSTN** se fait par l'intermédiaire de l'**IMS**. Le **PDN Gateway** agit comme un routeur par défaut par lequel transitent les requêtes de l'utilisateur. Il effectue l'allocation d'adresses **IP** pour chaque Terminal Mobile, le filtrage des paquets pour chaque usager et comptabilise les octets échangés dans la session de ce dernier à des fins de facturation.

Le HSS (Home Subscriber Server):

Le **HSS** se présente comme une version évoluée du **HLR**, il permet de stocker des informations d'abonnement pouvant servir au contrôle des appels et à la gestion de session des utilisateurs réalisé par le **MME**. Il entrepose, pour l'identification des utilisateurs, la numérotation et le profil des services auxquels ils sont abonnés. En plus des données d'authentification des utilisateurs, il contient les informations de souscription pour les autres réseaux, comme le **GSM**, le **GPRS**, **3G**, **LTE** et **IMS**.

La PCRF (Policy and Charging Rules Function) "3GPP Release7":

Le **PCRF** est une entité qui exécute principalement deux grandes taches ;

- ✓La première est de gérer la qualité de service **QoS** que requiert le réseau et alloue en conséquence les porteuses **Bearer** appropriées.
- ✓La deuxième tâche se rapporte principalement à la tarification.

En effet, le **PCRF** gère les politiques de facturation qui doivent être prises en compte par le **PDN-GW** et applicables en fonction des actions de l'utilisateur.

II.4.3. La partie IMS (IP Multimedia Sub-system):

L'**IMS** (**I**P **M**ultimedia **S**ub-system), est une architecture standardisée **NGN** (**N**ext **G**eneration **N**etwork) pour les opérateurs de téléphonie, qui permet de fournir des services multimédias fixes et mobiles. Cette architecture utilise la technologie **VoIP** ainsi qu'une implémentation **3GPP** standardisée.

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

Pour cela, l'**IMS** utilise les protocoles standards **IP**. Ainsi, une session multimédia, qu'elle effectue entre deux utilisateurs **IMS**, entre un utilisateur IMS et un internaute, ou bien encore entre deux internautes, est établie en utilisant exactement le même protocole.

De plus, les interfaces de développement de services sont également basées sur les protocoles **IP**. C'est pour cela que l'**IMS** fait véritablement converger l'Internet et le monde de la téléphonie cellulaire ; Il utilise les technologies cellulaires pour fournir un accès en tout lieu, et les technologies Internet pour fournir les services.

❖ **Exemples des services de l'IMS:**

- Echange de fichiers pendant un appel,
- Un usager peut créer une règle qui le montre connecté après une certaine heure et rejette tous les appels en provenance d'un appelant de son groupe professionnel.
- Un usager peut couper lorsque ses collègues professionnels appellent et les rediriger vers une page Web spécifique présentant l'hôtel où il passe ses vacances.
- Un usager peut activer la sonnerie au niveau de tous ses appareils en fonction de L'appelant.
- Messagerie instantanée et vidéo conférence.

II.5. Architecture en couches:

II.5.1. Les protocoles de l'interface Radio:

L'interface radio est distinguée de la transmission filaire par le coût et la rareté du spectre, ainsi le taux d'erreur très élevé de la transmission. A cause de ces caractéristiques, la pile protocolaire de l'interface radio est très spécifique. Il est composé de plusieurs couches. Le **LTE** fonctionne en couches entre utilisateurs, l'**eNodeB** et le **MME** (**M**obile **M**anagement **E**ntity), ces couches sont les suivantes :

- **La couche Physique (PHY)**:

Chargée de la transmission effective des signaux, elle est constituée d'équipements supportant les technologies **OFDMA** et **SC-FDMA**.

- **La couche liaison de données:**

Constituée de **MAC** (**M**edia **A**ccess **C**ontrol) chargée de l'interface entre les couches supérieures et la couche physique et **RLC** (**R**adio **L**ink **C**ontrol) fiabilisant la transmission de données en mode paquet.

- **La couche PDCP (Packet Data Control Protocol):**

Côté utilisateur, elle assure la compression et décompression des données afin de les acheminer dans le réseau.

- **Le RRC (Radion Resource Control):**

Assure une qualité de service **QoS** en contrôlant les ressources. Deux états sont possibles :

1. Le **RRC_IDLE** (pas d'équipement connecté),
2. Le **RRC_CONNECTED** qui est un protocole effectué sur 3 étapes :

Une demande faite par l'utilisateur au réseau **E-UTRAN** (**RRC CONNECTION REQUEST**), qui accepte (**RRC CONNECTION SETUP**) ou refuse la connexion (**RRC CONNECTION REJECT**). En cas d'acceptation, l'utilisateur renvoie un (**RRC CONNECTION SETUP COMPLETE)** et la connexion est établie.

- **La couche Réseau NAS (Non- Access Stratum):**

Gérant tout type d'applications non traitées au niveau de l'**eNodeB** (exemple Tarification) [11].

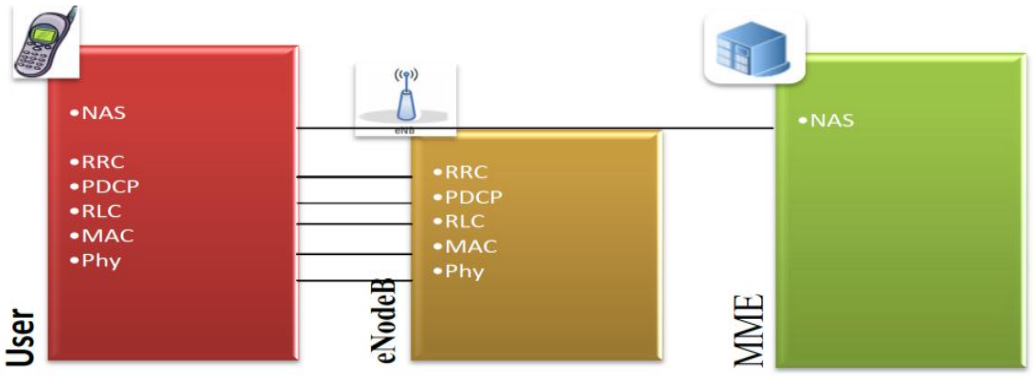


Figure II.6: Pile protocolaire [11]

II.6. Les exigences pour la 4G LTE:

La première étape des travaux de normalisation du **LTE** consista à définir les exigences [4] que ce dernier devait satisfaire. En synthèse, l'objectif majeur du **LTE** est d'améliorer le support des services de données via une capacité accrue, une augmentation des débits et une réduction de la latence. En complément de ces exigences de performance, le **3GPP** a aussi défini des prérequis fonctionnels tels que la flexibilité spectrale et la mobilité avec les autres technologies **3GPP**. Ces exigences sont définies dans le document [**3GPP 25.913, 2006**] et résumées dans cette section.

II.6.1. La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés:

Avec l'explosion des services nécessitant une connexion « **Always-on** », la contrainte appliquée sur la capacité en nombre d'utilisateurs simultanés devient forte.

Le système doit supporter simultanément un large nombre d'utilisateurs par cellule. Il est attendu qu'au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état **ACTIF** pour une largeur de bande de 5 MHz, et au moins 400 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures [4]. Un nombre largement supérieur d'utilisateurs devra être possible à l'état de veille.

II.6.2. L'efficacité spectrale cellulaire:

Le système compte parmi ses objectifs, l'accroissement de l'efficacité spectrale cellulaire (en **bit/s/Hz/cellule**) et l'augmentation de la capacité du système (en termes de débit total). En sens descendant « **Downlink** », l'efficacité spectrale doit être trois à quatre fois supérieure à celle offerte par le **HSPA** « **Release 6** » (**Figure II.7**) au sein d'un réseau chargé, et deux à trois fois supérieure en sens montant «**Uplink** ».

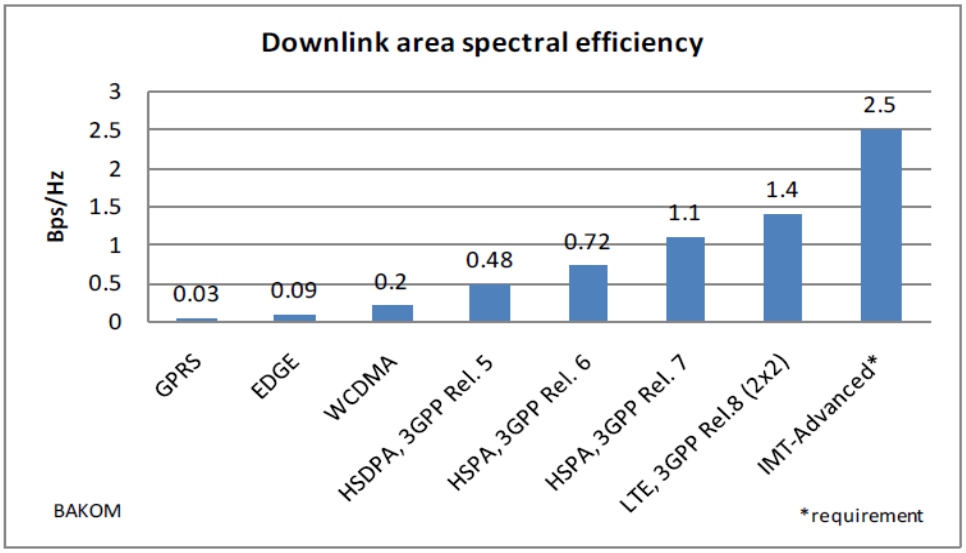


Figure II.7: Le taux de l'efficacité spectrale des technologies du **GSM** à **LTE** [12]

II.6.3. Les débits:

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

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

II.6.4. Une faible latence:

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

➢ Latence du plan de contrôle:

(Le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service) ; L'objectif fixé pour le **LTE** est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à **l'UMTS** (**Tableau II.1**), via un temps de transition inférieur à 100 ms.

➢ Latence du plan usager:

(le délai de transmission d'un paquet **IP** au sein du réseau une fois la connexion établie) ; Le **LTE** vise une latence du plan usager inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets **IP** de petite taille.

Le **Tableau II.1** présente les deux types de latence existante dans le réseau **LTE**, ainsi que leurs différences dans les domaines de duplexage (**FDD** et **TDD**).

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

Tableau II.1: Les deux types de latence dans le réseau **LTE**.

II.6.5. L'agilité en fréquence:

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

II.6.6. La mobilité:

La mobilité est une fonction clé pour un réseau mobile. Le **LTE** vise à rester fonctionnel pour des **UE** se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'**UE** faibles (entre 0 et 15 km/h). Les services temps-réel comme le service voix doivent être proposés avec le même niveau de qualité qu'en **UMTS Release 6** [4].

LTE ne permet que le « **Hard Handover** » et non pas le « **Soft Handover** » dans des conditions où l'usager se déplace à grande vitesse.

II.6.6.1. Le Handover :

Fonction: transfert automatique des communications entre cellules pour assurer une continuité satisfaisante des communications. Il existe 2 types de **Handover** :

a) **Hard Handover** : le terminal est servi par une seule station de base. Le terminal se déconnecte de sa station de base de service avant de se connecter à la station de base cible. Il y a donc une coupure dans la communication.

b) **Soft Handover** : Avec un soft **Handover**, le terminal est servi par toutes les stations de bases. Ce mode se fonde sur la capacité du terminal à communiquer simultanément avec plusieurs stations de base.

Les réseaux **LTE** se distinguent des réseaux **UMTS** par trois grands aspects :

- ✓ Une interface radio, avec les technologies **OFDM** en **DL « Downlink »**,
- ✓ Le **SC-FDMA** en **UL « Uplink »,**
- ✓ **MIMO** « **M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput », ce qui lui permet de supporter une largeur de bande allant de 1.4 à 20 MHz.

II.7. L'Interface Air:

Le **LTE** a introduit un certain nombre de nouvelles technologies, permettant l'emploie efficace du spectre et fournissant des débits beaucoup plus élevés.

Le LTE a utilisé la technologie **OFDM** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplex) en tant que porteur du signal et les régimes d'accès associés, **OFDMA** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess), **SC-FDMA** (**S**ingle **C**arrer - **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) et **MIMO** (**M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput).

II.7.1. Principe de l'OFDM, OFDMA ET SC-FDMA:

II.7.1.1 L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

Le principe de l'**OFDM** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing) consiste à répartir le signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonaux, avec l'ajoute un préfixe cyclique entre symboles **OFDM** pour éviter leurs interférences [12].

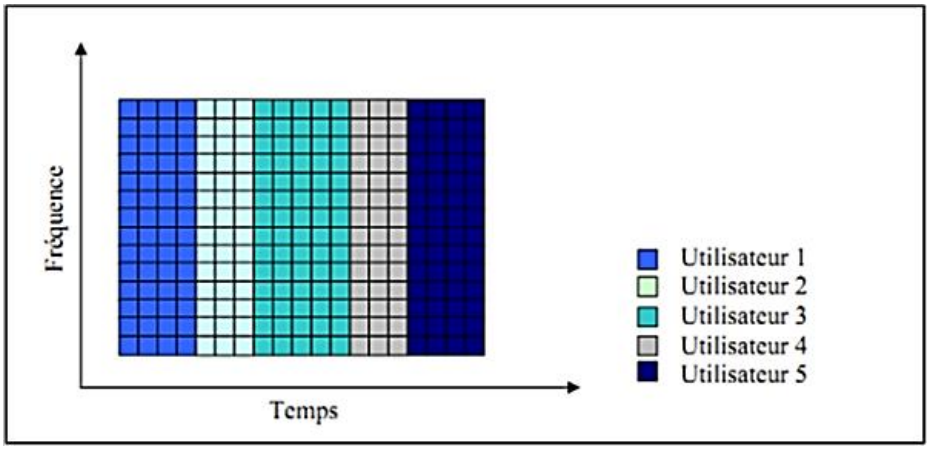
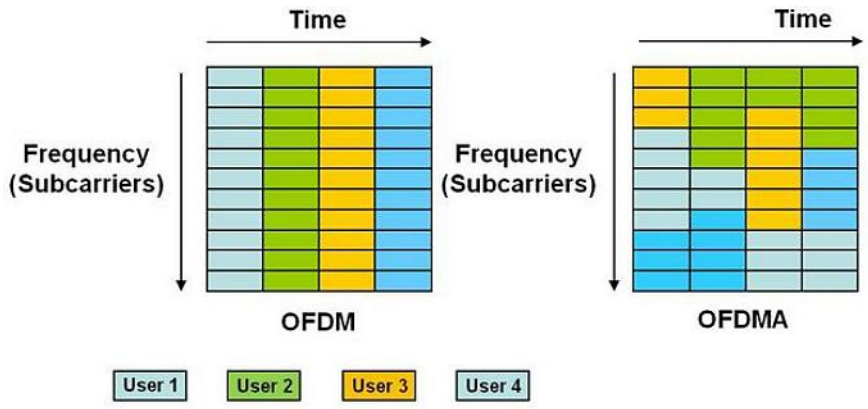


Figure II.8: Technique **OFDM** [11]

II.7.1.2. L'OFDMA (Technique d'accès multiple en voie descendante) :

OFDMA (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess), est une technique de codage radio de type « Accès multiple par répartition en fréquence » qui dérive de l'**OFDM** en utilisant le même principe de division de la bande passante en plusieurs sous-porteuses.

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



II.9: La différence entre **OFDM** et **OFDMA** [11]

II.7.1.2.1. Pourquoi l'OFDMA ?

Le retard induit par le phénomène de trajets multiples (créer par la différence entre les temps d'arrivés des copies du signal qui suivent différentes directions), peut provoquer l'interférence entre un symbole reçu le long d'un chemin d'accès retardé et un symbole ultérieure arrivant au niveau du récepteur grâce à un trajet plus direct. Cet effet est dénommé **IES** (**I**nterférences **E**ntre-**S**ymboles).

Dans un système à une seule porteuse et à des débits très élevés, il est possible pour l'**IES** de dépasser un temps d'un symbole en entier et de causer le déversement d'un symbole dans un symbole ultérieures.

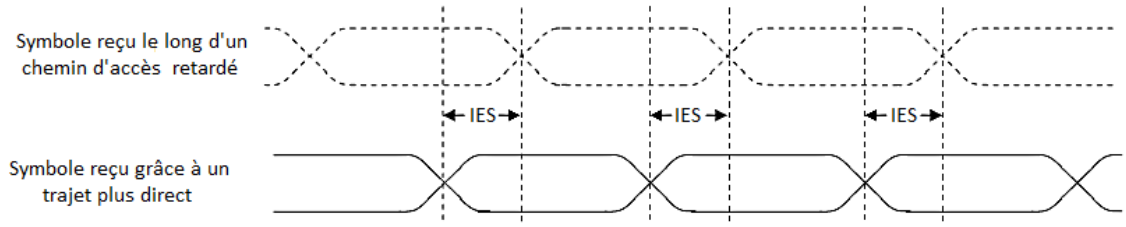


Figure II.10: Exemple d'interférence **IES** causé par le phénomène multi-trajets [8].

Pour les débits du **LTE** (jusqu'à 100 Mbits/s), l'**IES** devient beaucoup plus sévère couvrant éventuellement plusieurs périodes de symbole et l'approche d'égalisation canal devient impraticable, d'où vient l'idée de l'**OFDMA.**

II.7.1.2.2. Principe de l'OFDMA :

L'**OFDMA** est une technologie de transmission sans fil haut débit, capable de composer avec la présence d'obstacles sur le chemin de l'émetteur-récepteur. Elle résout le problème de l'alignement du transmetteur et du récepteur. Pour une liaison à très haut débit (plusieurs dizaines de mégabits par seconde), ces derniers doivent être parfaitement alignés, ce qui est rarement le cas dans un environnement où l'on trouve de nombreux bâtiments et avec l'existence de phénomène Multi-trajet.

Avec un équipement utilisant l'**OFDMA** ce problème est résolu. Le principe de l'**OFDMA** consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

Ces sous-porteuses sont serrées dans le domaine fréquentiel; soit un espacement (l'écart entre les sous-porteuses) de , où est le temps de modulation d'un symbole par une sous-porteuse.

Pour **3GPP LTE**, l'espacement sous-porteuse de base est de 15 kHz. Donc on aura la durée du symbole transporté qui est égale a : .

l'**OFDMA** réparti sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre, ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long (66.7 µs pour le **LTE**), cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de **Fading** liés aux « chemins multiples de propagation » qui existent dans les liaisons radio de moyenne et longue portées (quand le débit binaire sur une porteuse est élevé, l'écho d'un symbole arrivant en retard à cause d'une propagation multi-trajets perturbe le ou les symboles suivants) :

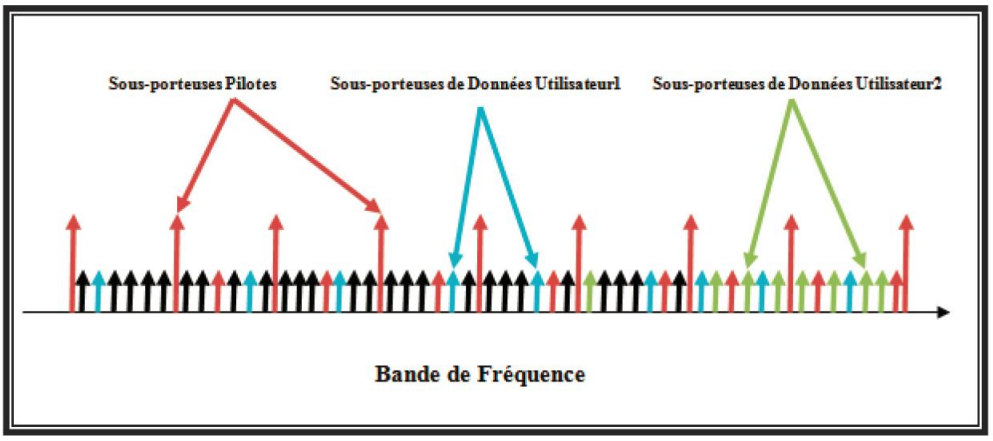


Figure II.11: Les porteuses de **l'OFDMA**.

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

Sachant que la norme **LTE** donne une flexibilité pour le choix de la bande alors on aura différentes configurations pour chacune, ce qui est résumé dans le tableau ci-dessous.

Transmission BW	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Durée sous-trame (Ts)	0.5ms					
Espacement sous-porteuses	15KHz					
Fréquence d'échantillonnage	1.4 MHz	3.84 MHz	7.68 MHz	15 .36MHz	23.04 MHz	30.72 MHz
Taille FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Nombre de sous-porteuses occupées	73	181	301	601	901	1201

Tableau II.2 : Paramètres de l'**OFDM** pour chaque bande passante [11].

L'Orthogonalité: Le terme Orthogonal est dû au fait que lorsque l'amplitude d'une sous porteuse est maximal les amplitudes des autres sous porteuses sont à zéro, comme le montre la figure ci-dessous.

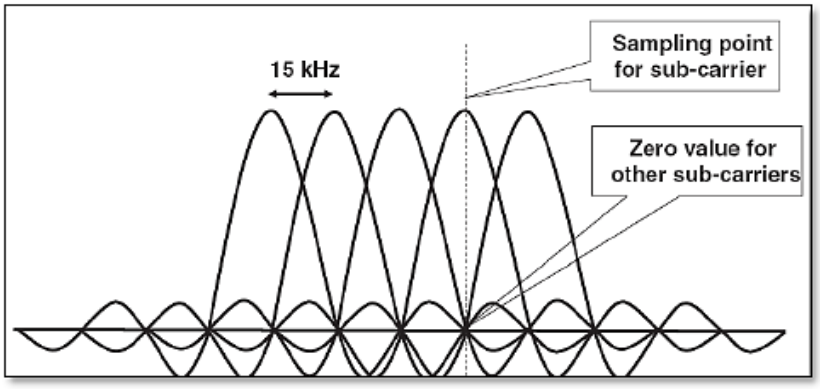


Figure II.12 : Orthogonalité des sous porteuses en **OFDMA.**

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDMA utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles.

Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent que peu.

Chaque sous-porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques. Ce principe permet de limiter l'interférence entre symboles. Pour l'éliminer, on peut ajouter un intervalle de garde (c'est-à-dire une période pendant laquelle il n'y a aucune transmission) après chaque symbole émis.

Un **CP** (préfixe cyclique) est utilisé dans les transmissions OFDMA, afin de conserver l'orthogonalité et les propriétés sinusoïdales du signal pour les canaux à trajets multiples offrant un temps de garde suffisant pour éviter l'interférence entre bloque transmis. Ce préfixe cyclique est ajouté au début des symboles émis.

En LTE, deux longueurs différentes de préfixe cyclique sont prévues pour s'adapter à des temps différents de propagation du canal de transmission qui dépendent de la taille de la cellule radio et de l'environnement : un préfixe cyclique normal de 4,7µs, et un préfixe cyclique étendu de 16,6µs utilisé dans les très grandes cellules radio (ce préfixe représente de 7 à 25 % de la durée d'un symbole).

II.7.1.2.3. Le débit théorique maximal:

En **LTE** on a la liberté de choisir entre les trois types de modulation **QPSK** (2 bits/symbole), **QAM-16** (4 bits/symbole) ou **QAM-64** (6 bits/symbole) aussi bien en **DL « Downlink »** qu'en **UL** « **Uplink** ».

Dans notre cas, on va essayer de calculer le débit descendant maximal, alors les paramètres à choisir sont :

- ✓ Modulation **QAM-64** 6 bits/symbole;
- ✓ Bande passante 20MHz 1200 sous-porteuses.

. (est la bande passante de chaque sous-porteuse) . [11]

II.7.1.2.4. Les PRBs (Physical Resource Blocks):

Les utilisateurs se voient attribuer un nombre précis de sous-porteuses pour un time slot prédéterminé, appelées dans les spécifications **LTE** les blocs de ressources physiques **PRB**s (**P**hysical **R**esource **B**locks).

Les **PRB**s ont chacun une dimension temps et fréquence, et leur répartition est gérée par une fonction de planification à la station de base **3GPP eNodeB**.

Chaque **PRB** est composé de 12 sous-porteuses avec 6 ou 7 symboles **OFDM** selon le préfixe cyclique utilisé.

La **Figure II.13** montre une Grille de ressources temps fréquence en voie montante et descendante.

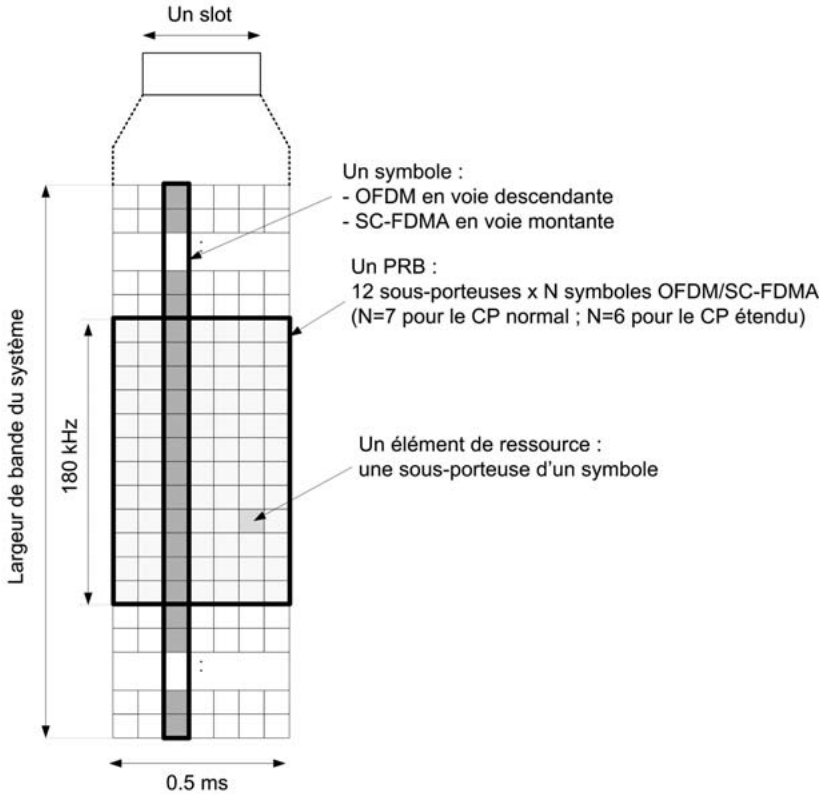


Figure II.13: **PRB** Grille de ressources temps fréquence en voie montante et descendante [4].

Le nombre total des **PRBs** dépend de la bande passante utilisée ce qui est explicité dans le tableau ci-dessous :

Transmission BW	1.4MHz	2.5MHz	5MHZ	10MHz	15MHz	20MHz
Nombre de PRBs Largeur de bande du système en nombre de PRB	6	15	25	50	75	100

Tableau II.3: Largeur de bande du système en nombre de **PRBs** pour chaque **BP** [11].

II.7.1.2.5. La structure des trames en LTE:

Les trames génériques du **LTE** ont une durée de 10 ms. Ils sont divisés en 10 sous- trames, chaque sous-trame de longueur 1,0 ms.

Chaque sous-cadre est divisé en deux slots, donc on a 20 slots de 0,5 ms chacun, numérotés de 0 à 19. Un slot est composé de 6 ou 7 symboles **OFDM**, selon que le préfixe cyclique normal ou étendu est employé [8].

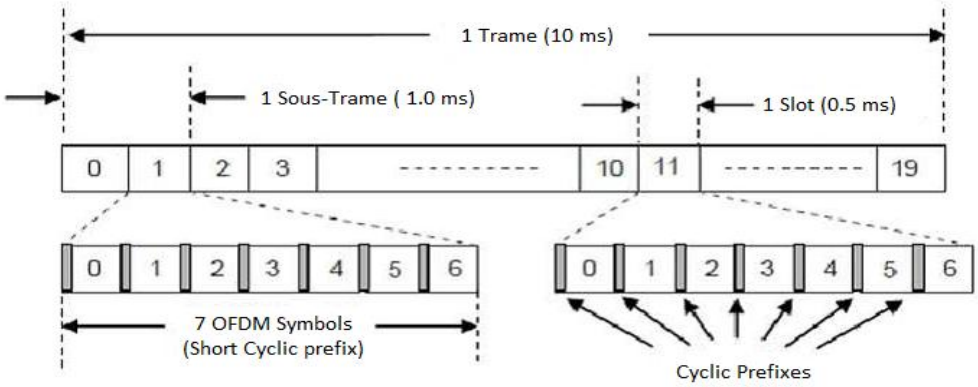


Figure II.14 : Structure générique de la trame **LTE** [8].

Un Time Slot dans la (**Release 8**) de la **3GPP** a une durée de 0.5 ms, alors selon le choix du **CP** (**C**yclic **P**refix) on peut avoir soit :

- 7 symboles **OFDM** pour un **CP** court,
- 6 symboles **OFDM** pour un **CP** long.

Rappelant qu'un symbole **OFDM** a une durée de 66.66 µs.

Deux tailles de **CP** sont permises:

- un court ou normal (5,21µs/4,69µs),
- un long (16,67µs).

Le choix dépend du type de cellule et du temps de propagation à combattre : pour les macros cellules on utilise le **CP** long, tandis que pour les microcellules, le court.

Le Choix du **CP** influence le débit global.

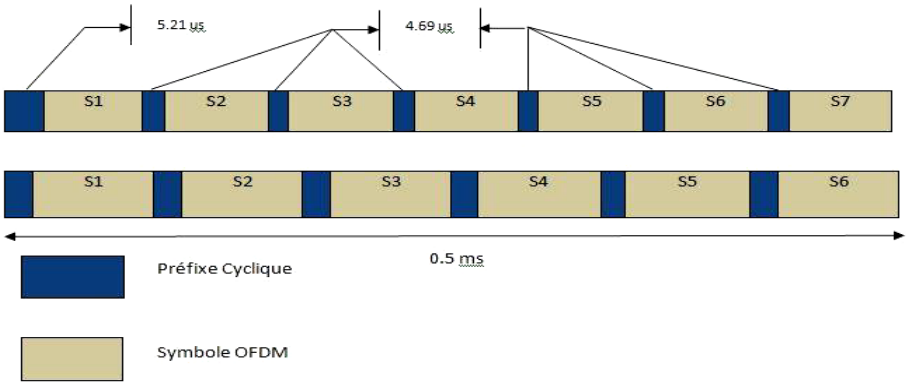


Figure II.15: Les types du préfixe cyclique [11].

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

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

a)Structure de type 1: FDD

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

Cette technique permet d'émettre et de recevoir simultanément, c'est son principal avantage face à l'autre technique majeure de duplexage, le **TDD** (**T**ime **D**ivision **D**uplexing). La **Figure II.16** présente la trame **FDD**.

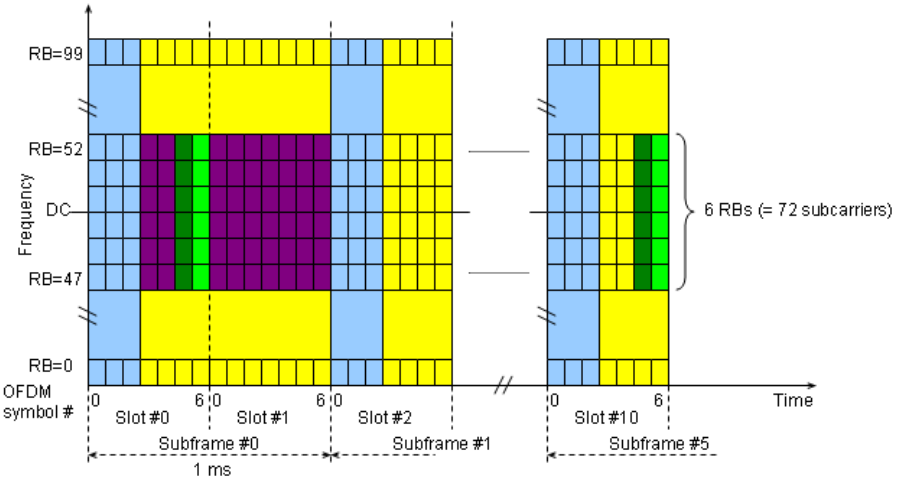


Figure II.16: Structure de la trame radio **FDD**

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

La **Figure II.17** présente le duplexage **FDD.**

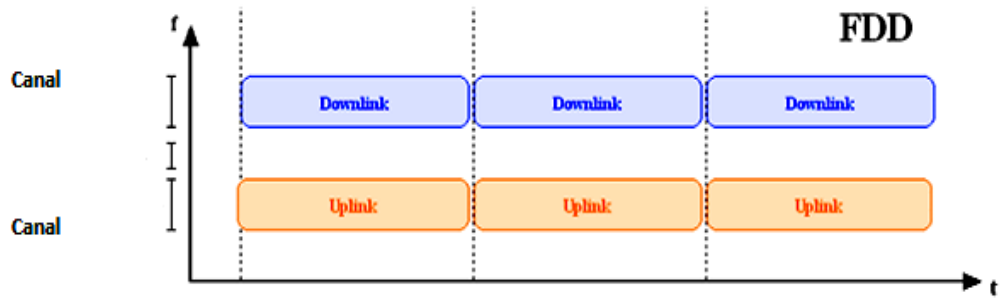


Figure II.17 : Duplexage **FDD**

b) Structure de type 2 : TDD

Le Duplex par séparation temporelle **TDD** (**T**ime-**D**ivision **D**uplex) est une technique permettant à un canal de télécommunication utilisant une même ressource de transmission (un canal radio par exemple), de séparer dans le temps l'émission et la réception.

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

La **Figure II.18** présente la trame **TDD**.

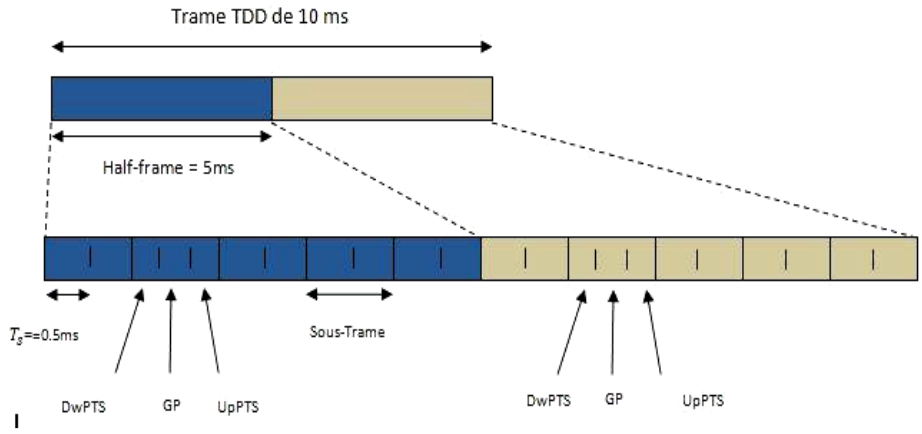


Figure II.18 : Format de la trame **TDD**

Elle a la même durée de la trame **LTE** en mode **FDD**, c'est-à-dire 10 ms avec 10 sous-trames de 1 ms, la différence réside dans les sous-trames (1) et sous-trame (2) qui contiennent des données de signalisation et qui sont [11]:

- **GP (Guard Période)**:

Le temps de garde **GP**, nécessaire au basculement de l'**eNodeB,** entre la réception d'une sous-trame montante et l'émission d'une sous-trame descendante, est créé par l'**eNodeB** en avançant dans le temps les sous-trames montantes par rapport aux sous-trames descendantes.

L'**UE** est informé de ce décalage par la commande d'avance de temps, qui lui indique de démarrer sa transmission un peu plus tôt (ou un peu plus tard). Une avance de temps par défaut de 20 µs est ainsi spécifiée en **TDD**, car cette durée est attendue comme la valeur maximale potentiellement nécessaire aux équipements pour basculer de réception à émission.

❖ **DwPTS et UpPTS :**

Outre le temps de garde, la sous-trame spéciale porte les champs **DwPTS** (**D**o**w**nlink **P**ilot **T**ime **S**lot) et **UpPTS** (**Up**link **P**ilot **T**ime **S**lot), réservés pour les transmissions respectivement en voie descendante et en voie montante.

II.7.1.3. SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access):

Le **S**ingle-**C**arrier **FDMA** est une technologie de codage radio de type accès multiple par répartition en fréquence utilisée notamment dans les réseaux de téléphonie mobile de la **4G LTE**. En **OFDMA**, les symboles sont transmis chacun à travers une sous-porteuse (transmission multi-porteuse), alors qu'en **SC-FDMA** chaque symbole est étalé sur l'ensemble des sous-porteuses allouées (technique mono-porteuse), **Figure II.19.**

Figure II.19 : La différence entre **l'OFDMA** et le **SC-FDMA.**

Comme pour d'autres techniques à schéma d'accès multiples (**TDMA**, **FDMA**, **CDMA**, **OFDMA**), le but est l'attribution et le partage d'une ressource radio commune (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs. Le **SC-FDMA** peut être considéré comme une variante linéaire des codages **OFDM** et **OFDMA**, dans le sens où il consiste aussi à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses du signal numérique, mais il utilise en complément, une **DFT** (**T**ransformation de **F**ourier **D**iscrète) supplémentaire pour pré-coder **l'OFDMA** conventionnel.

Il a été adopté pour les liaisons « **Uplink** » de certaines normes **3GPP**, plus particulièrement pour la partie radio **eUTRAN** des réseaux mobiles **LTE**, car ce codage permet de diminuer la consommation électrique du terminal et donc d'augmenter l'autonomie de sa batterie.

Pour les liaisons radio « **Downlink** » des réseaux **LTE**, pour lesquelles il y a moins de contraintes énergétiques, c'est **l'OFDMA** qui est utilisé car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé.

II.7.1.4. La technologie MIMO:

Les **MIMOs** (**M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput), se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes du côté de l'émetteur et du côté du récepteur **Figure II.20.**

La mise en place d'une telle structure permet à **LTE** d'atteindre des hauts débits et une grande capacité. Les systèmes **MIMO** exploitent les techniques de :

- Diversité d'espace: Diversité d'antenne.
- Diversité fréquentielle: Cette technique demande l'envoi du même signal sur des fréquences différentes.
- Diversité temporelle : Lorsque on sépare l'envoi du même signal par le temps cohérence du canal

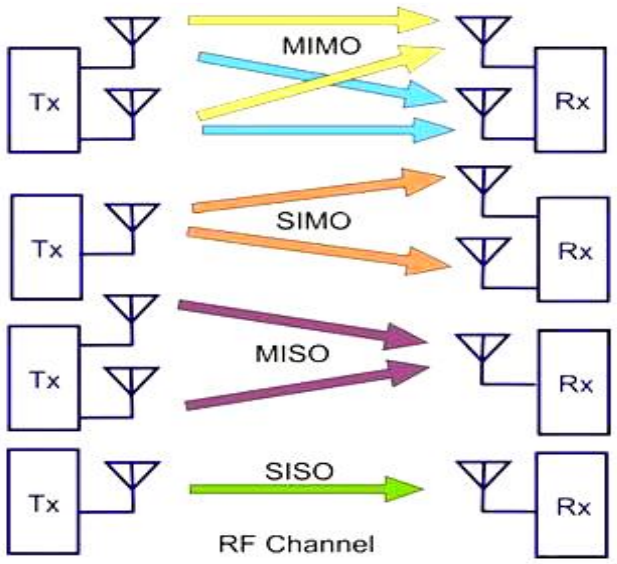


Figure II.20: Différente type d'antennes [12]

II.8. La technique du Modulation et codage adaptatifs :

La modulation et le codage adaptatifs **AMC** (**A**daptive **M**odulation & **C**oding), est une approche opportuniste qui tend à adapter la technique de modulation et de codage en fonction de l'état du canal.

Pour les transmissions « **DownLink »** en **LTE**, l'**UE** envoie le **Feedback** de **CQI** (**C**hannel **Q**uality **I**nformation) vers l'**eNodeB** pour que cette dernière lui sélectionne un **MCS** (**M**odulation & **C**oding **S**chema), un schéma de modulation et de codage qui maximise l'efficacité spectrale tout en gardant le **BER** (taux d'erreurs par bloc) inférieur à un certain seuil. Le type de modulation pris en charge par **LTE** est: **QPSK**, **16QAM**, **64QAM**. Voir **Figure II.21.**

Les modulations (**16QAM et 64QAM**) offrent des débits plus élevés et une haute efficacité spectrale [11].

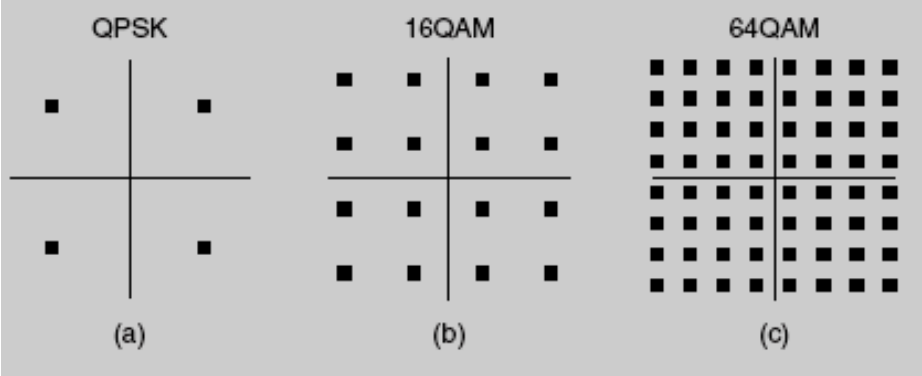


Figure II.21: Modulation **LTE**

La modulation **16QAM** (**16 Q**uadrature **A**mplitude **M**odulation) à 16 états permet de doubler la capacité de transfert par rapport à la modulation utilisée pour l'**UMTS**, la **QPSK** (**Q**uadrature **P**hase **S**hift **K**eying) qui est basée sur deux porteuses de même fréquence déphasées de 90° (degrés), soit $2^2 = 4$ états d'information.

Pour sa part, la **16QAM** combine deux niveaux d'amplitude avec deux porteuses en quadrature, soit $2^4 = 16$ états d'information. Chacune de ces modulations est utilisée pour un lien précis tel que :

- ✓ Modulations « Downlink » : **QPSK**, **16QAM** et **64QAM**
- ✓ Modulations « Uplink » : **QPSK** et **16QAM**.

II.9. Inconvénients et avantages de LTE:

Les premiers tests confirment la capacité de cette technologie à fournir de très hauts débits mobiles dans des contextes fixes et de mobilité. Cette technologie doit permettre d'optimiser l'utilisation du spectre, de réduire les coûts de fonctionnement pour les opérateurs et d'offrir des temps de latence réduits ainsi que de très haut débit pour les utilisateurs.

Selon la définition du **3GPP**, **LTE** doit être en mesure de fournir des débits descendants de 100Mbps et montants de 50Mbps. Cependant, tous les obstacles techniques ne sont pas levés et parmi ceux-ci l'allocation des ressources spectrales. Selon l'**ITU-R**, il faudra trouver 1GHz supplémentaire, en plus du spectre déjà attribué aux télécommunications mobiles, pour répondre aux besoins.

II.10. Le LTE-Advanced:

LTE-Advanced est donc une évolution de la norme **LTE** avec des compléments fonctionnels qui permettent une introduction progressive des nouvelles fonctions dans les réseaux LTE préexistants. Les stations de base **eNodeB**, compatibles avec les normes LTE-Advanced restent compatible avec les terminaux simplement LTE, y compris pour les bandes de fréquences agrégées (utilisées en mode « **Carrier Aggregation** »).

Les réseaux LTE-Advanced utilisent, comme le LTE, un « cœur de réseau » basé sur les protocoles **IPv6** utilisé pour transmettre la voix (protocole **VOLTE**) et les données. Pour la partie radio **e-UTRAN**, le **LTE-Advanced** utilise les codages **OFDMA** (liaison descendante) et **SC-FDMA** (liaison montante) associés à des algorithmes de récupération d'erreur de type **HARQ** et à des Turbo codes.

HARQ (**H**ybrid **A**utomatic **R**epeat re**Q**uest) ou **H**ybrid **ARQ**, est une technologie qui permet la transmission fiable de données sur un canal de communication qui peut engendrer des erreurs de transmission. **HARQ** combine les principes de la retransmission, **ARQ** et de la correction d'erreurs **FEC** (**F**orward **E**rror **C**orrection).

Le LTE-Advanced prévoit aussi que les antennes puissent utiliser les modes de multiplexage **FDD** (**F**requency **D**ivision **D**uplexing) qui utilise 2 bandes de fréquences distinctes pour l'émission et la réception, ou **TDD** (**T**ime-**D**ivision **D**uplex) qui utilise une seule bande de fréquences avec allocation temporelle des ressources radio pour l'émission ou pour la réception des données.

Quelles sont les nouveautés apportées par le réseau 4G+ ?

Le réseau **4G+** basé sur la norme **LTE-Advanced** permet d'atteindre des débits descendants de l'ordre du 1Gbits/s. Une telle expérience utilisateur est possible grâce à l'introduction du « **carrier aggregation** » (aggrégation de porteuses) qui permet d'atteindre une largeur de bande de 100 Mhz maximum contre 20 pour la norme **LTE**.

Concrètement, deux bandes de fréquences différentes (2600 Mhz et 800 Mhz par exemple) sont mixées afin d'offrir une plus grande capacité et donc de meilleurs débits. La technologie **MIMO**, déjà présente dans la précédente norme, connait une évolution : il est possible d'utiliser jusqu'à 8 antennes côté base de transmission. Le **MIMO** est utilisé pour écouler plus de trafic.

Avec le réseau **4G+** et la norme **LTE-Advanced**, de nouvelles catégories de terminaux font leurs apparitions. Il faut investir dans un terminal de catégorie 6 minimum pour profiter du réseau **4G+**.

Catégorie	1	2	3	4	5	6	7	8
Débit descendant (Mbits/s)	10	50	100	150	300	300	300	3000
Débit montant (Mbits/s)	5	25	50	50	75	50	100	1500
MIMO	Non	2×2	2×2	2×2	4×4	2×2 / 4×2	2×2 / 4×2	8×8

Tableau II.4 Les catégories de terminaux **4G LTE**

Le « **carrier aggregation** » a ses limites; en effet, de tels débits peuvent être atteints à condition d'être dans une zone couverte par les 2 bandes de fréquences. Exemple : si l'utilisateur sort du rayon de couverture 2600 Mhz, et qu'il ne reste qu'une couverture **4G** 800 Mhz, le mobile repassera en **4G LTE** avec un débit moindre.

II.11. Résumé sur les Releases :

Ci-dessous les différentes versions (**Releases**) que nous avons eu à rencontrer lors de nos recherches :

- Release 97 : Définition du **GPRS** ;
- Release 99 : introduction de l'**UMTS** ;
- Release 4 : ajout de fonctionnalités au sein du réseau cœur, notamment la séparation des couches média et contrôle pour le réseau cœur circuit ;
- Release 5 : introduction de l'évolution **HSDPA** pour le réseau d'accès **UMTS** ;
- Release 6 : introduction de l'évolution **HSUPA** pour le réseau d'accès **UMTS** ;
- Release 7 : introduction du HSPA+ MIMO ;
- Release 8 : introduction des évolutions **HSPA+, CPC** et **DC-HSDPA**, et première Release du réseau d'accès **LTE** et du réseau cœur **EPC**.

Au-delà de la release 8 :

- 3GPP release 8 : les premières idées du **LTE** ;
- 3GPP release 9 : l'idée de l'auto-organisation et de nouvelles cellules (**eNodeB** et **Home eNodeB**). Le standard **LTE** introduit aussi les nouvelles interfaces **OFDM** permettant d'atteindre les débits de 50-100 Mb/s ;
- 3GPP release 10 : **LTE-Advanced** (2010) propose les solutions afin de répondre les exigences **IMT** (International Mobile Télécommunications Advanced) ;
- 3GPP release 11 : en 2011 (septembre) comprend un certain nombre d'améliorations basées sur les fonctionnalités existantes, comme des améliorations d'agrégation de support **LTE** ou d'autres extensions renforcées.
- 3GPP release 12 : en septembre 2012, concerne les récentes extensions notamment **LTE Public Safety**, qui répond à la Release 12, sera complètement validée en termes de normes en juin 2014.

Les travaux en cours dans la version 12 des normes **3GPP LTE** permettront d'améliorer **LTE** pour répondre aux exigences des applications de sécurité publique.

II.12. La 4G dans le Monde:

Les chiffres du très haut débit mobile dans le monde continuent à progresser rapidement, suivant bien sûr la tendance des ventes de Smartphones, elles aussi en forte hausse, comme en témoigne plusieurs études de cabinets comme **GFK**, Médiamétrie ou **IDC**. L'**IDATE** (**I**nstitut **D**e L'**A**udiovisuel et des **T**élécommunications en **E**urope) a publié son bilan de l'année 2014, avec une analyse des tendances clés du marché mondial du mobile, réseaux, terminaux et services ainsi que ses prévisions **4G LTE** à l'horizon 2018.

Au niveau mondial, l'IDATE estime le nombre d'abonnements 4G à 500 millions à fin 2014, ce qui représente 7% du total des cartes SIM actives. La marge de progression est encore très importante, et l'IDATE dévoile des prévisions à fin 2018 qui pourraient atteindre les 2,3 milliards d'abonnements LTE, toujours sur l'ensemble de la planète (soit alors 29% du total des cartes SIM).

Avec les USA et l'Asie qui ont un déploiement de la 4G plus mature, ce sont bien sûr les pays européens et les pays africains qui auront la plus forte progression dans les 3 années à venir.

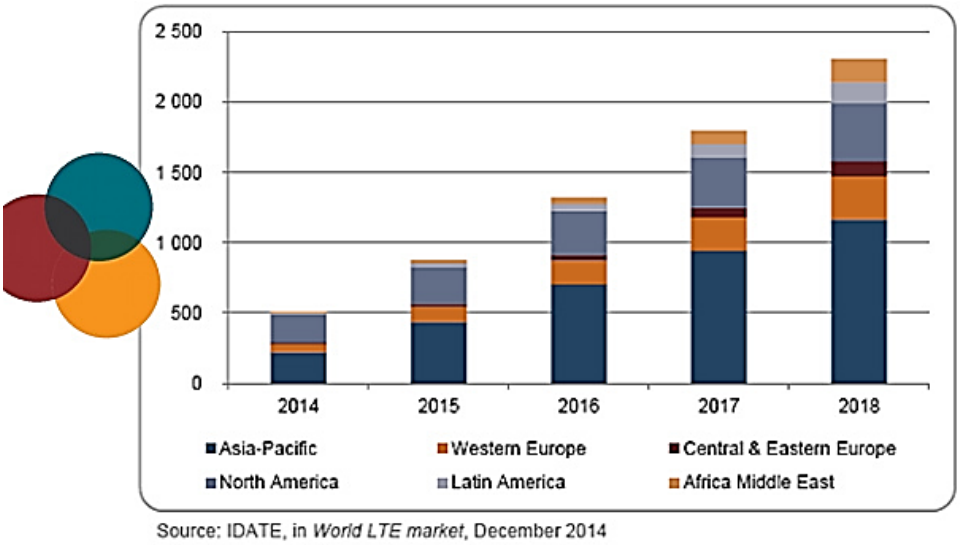


Figure II-22 : Les marchés **4G** et **4G+** dans le monde.

II.13. Conclusion:

Ce chapitre a introduit de façon générale la norme **LTE** par **3GPP**. Nous avons présenté un aperçu des différents composants et caractéristiques de la technologie **LTE** afin de présenter par la suite la terminologie des termes utilisés dans cette technologie.

Le **LTE** est déjà sur le marché et les performances de cette technologie sont déjà prouvées. Elles reviennent en grande partie aux techniques d'accès de sa couche physique.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons les performances de la Qualité de Service **Qos** de la technologie **LTE**. Ainsi, nous présenterons les différentes interactions entre elles.

Chapitre III:

Généralités sur la Qualité de service

III.1. Introduction:

Le réseau a pris une place vraiment importante autant dans l'utilisation habituelle que dans l'utilisation commerciale. Il est même devenu indispensable car de lui dépendent les activités économiques, les activités administratives, les activités quotidiennes, la santé des personnes, les relations diplomatiques…

Etant donnés ces enjeux, l'utilisateur peut de moins en moins se contenter d'un service sans garantie et cherche des garanties de services. La garantie des services pose cependant le problème qui est basé sur la considération que les différents services au sein du réseau ne possèdent pas les mêmes exigences. A l'exemple :

- ✓ Les transferts de fichiers requièrent la fiabilité des données et une rapidité (débit élevé),
- ✓ Le streaming Vidéo nécessite une fiabilité relative et l'absence de gigue,
- ✓ La voix nécessite un faible délai (car en temps réel), une fiabilité relative et l'absence de gigue,
- ✓ les jeux en réseau et les services interactifs requièrent la fiabilité des données avec un faible délai.

De plus, dans un contexte de réseaux de la quatrième génération qui se base sur l'architecture « **Tout IP** », c'est-à-dire tous les flux de trafics transitent sur le réseau **IP** basé sur la commutation de paquets contrairement aux générations précédentes qui différencient la commutation de circuits pour la « voix » et la commutation de « paquets » pour les données ; la notion de garantie de service prend alors une importance encore plus grande.

Les solutions apportées à ces problèmes sont les mécanismes de qualité de service implémentés au sein de la technologie **LTE**, cette technologie offre des mécanismes dits de qualité de service différenciée afin de faciliter la prise en compte des contraintes de services différents.

A travers ce chapitre, nous allons étudier les différents paramètres du **QoS** (**Q**uality **o**f **S**ervice) et les performances des réseaux **4G LTE**.

III.2. Les services 4G (LTE):

Une nouvelle génération de systèmes mobiles permet habituellement une introduction de nouveaux services et une amélioration de certains services vis-à-vis les générations précédentes.

Le premier changement apporté par le LTE en termes d'expérience utilisateur est donc un confort d'utilisation des services en ligne :

- **Navigation Web**: naviguer sur Internet.
- **Vidéo streaming** : les applications streaming ; regarder les vidéos.
- **Transfert de fichiers**: téléchargement de fichiers à partir d'Internet.
- **Voix:** la voix sur **IP** « **VoIP** » comme «**Skype**», « **Whatsapp »** ou « **Viber »**: envoyer et recevoir des appels vocaux sur Internet.

III.3. Définitions de la Qualité de service (QoS):

La qualité de service (**QDS**) ou Quality of Service (**QoS**), est la capacité de transmission d'un certain nombre de paquet, dans de bonnes conditions, entre un émetteur et un récepteur, et cela peut être présenté sous plusieurs termes tels que :

- La disponibilité,
- Le débit,
- Les délais de transmission,
- La gigue,
- Le taux de perte de paquets.

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

III.4. But de la QoS:

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

Elle permet ainsi aux fournisseurs de services de s'engager formellement auprès de leurs clients sur les caractéristiques de transport des données applicatives sur leurs infrastructures **IP** [17].

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

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

III.5. Paramètres de la QoS:

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

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

Les paramètres du **QoS** associés à un flux de données sont principalement :

III.5.1. Le débit:

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

III.5.2. Le taux de perte:

Le taux de perte (**Loss Rate** et **Error Rate**) qui désigne la probabilité maximale de perte de données ou de paquets. Ce paramètre, sans unité, est bien entendu très inférieur à 1. On cherchera toujours à se rapprocher d'un taux de perte égal à 0 qui désigne une **QoS** excellente.

III.5.3. Le délai de transit (Latence):

Le délai de transit, exprimé en (**ms**), est mesuré de bout en bout ou entre deux points de référence comme étant le temps nécessaire à l'acheminement d'une unité de volume, en général un paquet, entre les deux points de mesure.

Les différentes applications présentes dans un réseau, n'auront pas le même degré d'exigence en fonction de leur nature : « **Faible** », s'il s'agit d'une messagerie électronique ou de fichiers échangés, ce degré d'exigence sera « **Fort** » s'il s'agit des donnés « **Voix** ».

La latence dépend du temps de propagation (en fonction du type de média à transmettre), du temps de traitement (en fonction du nombre d'équipements traversés) et de la taille des paquets.

III.5.4. La Gigue (Jitter ou Delay variation):

Exprimée en (**ms**), elle désigne la variation du délai de transmission (latence des paquets). La présence du **Gigue** dans les flux peut provenir des changements d'intensité de trafic sur les liens de sorties des commutateurs, plus globalement, elle dépend du volume de trafic et du nombre d'équipements sur le réseau [15].

III.5.5. La bande passante:

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

- Le mode **Stream** (débit constant), majoritairement utilisé par les applications audio/vidéo et par les applications interactives.
- Le mode **Burst** (débit immédiat), privilégié par les applications de type transfert de fichiers.

III.5.6. Priorité des paquets:

Afin d'arbitrer entre les modes « **Burst** » et « **Streaming** » précédemment cités, une gestion du trafic peut, soit être installée au sein du réseau, soit à ses extrémités. S'il s'agit de l'intérieur du réseau, les nœuds de ce réseau opèrent alors comme étant des éléments de classification et de priorisation des paquets qui y circulent.

Si le dispositif se trouve à l'extérieur, les équipements constituant le réseau se trouvent déchargés de toute **QoS**. Deux mécanismes sont alors à l'œuvre :

- Le contrôle de débit **TCP (T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol**)**, qui modifie le débit des applications **TCP** en fonction des conditions de charge du réseau et du niveau de priorité des applications,
- la gestion des files d'attente personnalisées, qui affecte les flux entrants aux files d'attentes qui leur correspondent.

A ces paramètres, s'ajoutent des critères de disponibilité du transfert des données dans le réseau :

- La disponibilité du réseau qui se traduit par la probabilité qu'un élément tombe en panne,
- La durée d'interruption de service qui complète la disponibilité,
- La probabilité de refus de transfert qui est lié à la notion d'admission d'appel.

L'opérateur peut en effet décider, en fonction du trafic présent, si son réseau a les capacités suffisantes ou non pour acheminer ce nouveau service. Cette probabilité sera maintenue la plus faible possible.

A titre d'exemple, le réseau téléphonique commuté est dimensionné pour garantir un taux de rejet inférieur à 0,05 %.

III.6. Les Classes de service (CoS):

Ces paramètres sont ensuite regroupés entre eux en fonction des besoins des applications et des services. Ces groupes forment alors des « **Classes de Services » CoS** (**C**lass **o**f **S**ervices).

Les requetés du **QoS** des applications ou des services seront toujours affectés à une classe de service **CoS** donnée. A chaque classe, correspond un ensemble de paramètres de **QoS** avec des objectifs quantifiés.

Plusieurs modelés de **CoS** ont été standardisés et peuvent être utilisés indifféremment. Dans la suite du mémoire, il ne s'agira plus de se référer au concept de classes de services qui consiste à regrouper entre-elles les applications ayant des exigences du **QoS** similaires, plutôt qu'à se référer explicitement à tel ou tel modèle. Cependant, une classification des principales applications est fournie afin de faciliter la lecture de ce mémoire :

- **Voix** : Regroupe toutes les applications du type conversationnel (Voix, Visio, Conférence, ...) ayant pour contrainte forte des objectifs sur le délai et la gigue. Elles sont également sensibles au taux de perte bien qu'il ne soit pas possible de retransmettre les données et requièrent des débits assez faibles,
- **Vidéo** : Regroupe toutes les applications multimédia diffusées ou non (Vidéo à la Demande **VoD**, la télévision sur **IP** – **IP-TV**, ...) ayant pour contrainte forte le taux de perte et le débit et dans une moindre mesure le délai et la gigue,

- **Donnée** : Regroupe toutes les applications de transfert de données ayant pour seule contrainte un taux de perte nul et qui s'accommodent d'un délai et d'une gigue quelconque. Un débit garanti caractérise cette classe sans toutefois en faire une contrainte stricte,

- **Défaut** : Désigne toutes les applications n'exigeant aucune garantie de **QoS**. Bien connu sous l'anglicisme **Best-Effort** ; C'est le mode de transport du protocole **IP** [15].

III.7. Les critères utilisés pour assurer la QoS:

La mise en place de la qualité de service nécessite en premier lieu la reconnaissance des différents services. Celle-ci peut-se faire sur la base de nombreux critères :

- La source et la destination du paquet.

- Le protocole utilisé (**UDP/TCP/ICMP**/etc…).

- Les ports de source et de destination dans le cas des protocoles **TCP** et **UDP**.

- La validité du routage (gestion des pannes dans un routage en cas de routes multiples par exemple.)

- La bande passante consommée.

- Les temps de latence.

En fonction de ces critères, différentes stratégies peuvent ensuite être appliquées pour assurer une bonne qualité de service.

III.8. La gestion de la qualité de service:

Aujourd'hui le protocole **IP** tend à s'imposer dans la plupart des infrastructures réseaux, que ce soit dans les réseaux locaux des entreprises, l'Internet bien sûr qui l'a vu naître, mais aussi les **Backbones** des providers.

L'autre tendance concerne l'arrivée imminente des applications multimédias dans les foyers comme dans les entreprises (visioconférence, **VoIP**, audio, vidéo, jeux en réseaux...). Or pour un fonctionnement normal et une satisfaction des utilisateurs, ces applications ont besoin de reposer sur un réseau performant et fiable. C'est notamment le cas des applications audio qui nécessitent le respect des délais de transmission strictes.

Actuellement le protocole **IP** assure le même traitement pour tous les paquets qu'il voit transiter (notamment dans l'Internet), sans tenir compte des spécificités des applications émettrices, ni de leur contraintes (en bande passante, délai…), il s'agit du fameux **Best-Effort**.

Voilà pourquoi depuis la fin des années 80, l'**IETF** (**I**nternet **E**ngineering **T**ask **F**orce) a lancé des travaux en vue de combler ce talon d'Achille d'**IP**. Cela s'est traduit par la constitution de deux groupes de travail, qui ont mis au point deux modèles de gestion de la qualité de service (**QoS**): Le modèle **IntServ** et le modèle **DiffServ.**

a) Le modèle IntServ:

L'**IntServ** (**Int**egrated **Serv**ices), consiste à réserver les ressources nécessaires au niveau de tous les nœuds du réseau avant de faire transiter les flux. Cette approche repose sur l'utilisation du protocole **RSVP** (Ressource Reservation Protocol) qui induit alors une couche de contrôle d'admission supplémentaire pour s'assurer que la bande passante requise est bien disponible à un instant **T**.

Dans **IntServ**, les routeurs doivent maintenir des tables pour mémoriser l'état de chaque flux et des allocations de ressources. **DiffServ** est une approche permettant la gestion de la **QoS** sur un réseau **IP**.

b) Le modèle DiffServ:

Le **DiffServ** (**Diff**erenciated **Serv**ices), est un protocole qui consiste à affecter des priorités au niveau d'un champ de l'entête **IP** appelé **DSCP** (DiffServ Control Protol). Il offre une gestion différenciée par classes de services en gérant par priorités les files d'attentes des routeurs correspondantes à chaque classe de trafic.

Il n'est cependant pas question de garantir une **QoS** absolue comme dans **IntServ**, mais juste d'améliorer le **Best-Effort** en proposant une garantie de **QoS** relative.

L'approche **DiffServ** permet un déploiement et une exploitation simplifiée du réseau [16].

III.9. La notion de Bearer:

Dans tout réseau, les ressources de traitement au sein des nœuds sont limitées et partagées entre les utilisateurs. Selon la nature et la technologie du réseau, l'accroissement de ces ressources par l'opérateur peut être complexe et coûteux. Dans un réseau mobile par exemple, la ressource radio (spectre) est particulièrement onéreuse.

Cette préoccupation a conduit à considérer des mécanismes optimisant l'utilisation de ces ressources sur l'interface radio, mais également sur les autres interfaces du réseau impliquées dans le plan usager **UE** - Réseau. Ces mécanismes de **QoS** visent à offrir à l'utilisateur le service demandé avec une qualité satisfaisante, tout en minimisant les ressources utilisées pour y parvenir.

La **Figure III.1** illustre l'importance de tels mécanismes. Dans cet exemple, l'**UE2** a un appel voix en cours, avec un débit assez stable. L'**UE1** navigue sur Internet et démarre un téléchargement.

En l'absence de mécanisme approprié de partage de ressources, l'**UE1** monopoliserait à partir de cet instant la bande passante du système, privant l'**UE2** de ressources pour recevoir des données.

En revanche, en autorisant un débit instantané maximal à l'**UE1** et en garantissant un débit minimal à l'**UE2** pour son appel voix, le trafic de l'**UE1** sera lissé, tandis que l'**UE2** pourra recevoir des données au rythme auquel elles sont produites, sans subir les variations de débit de l'**UE1**.

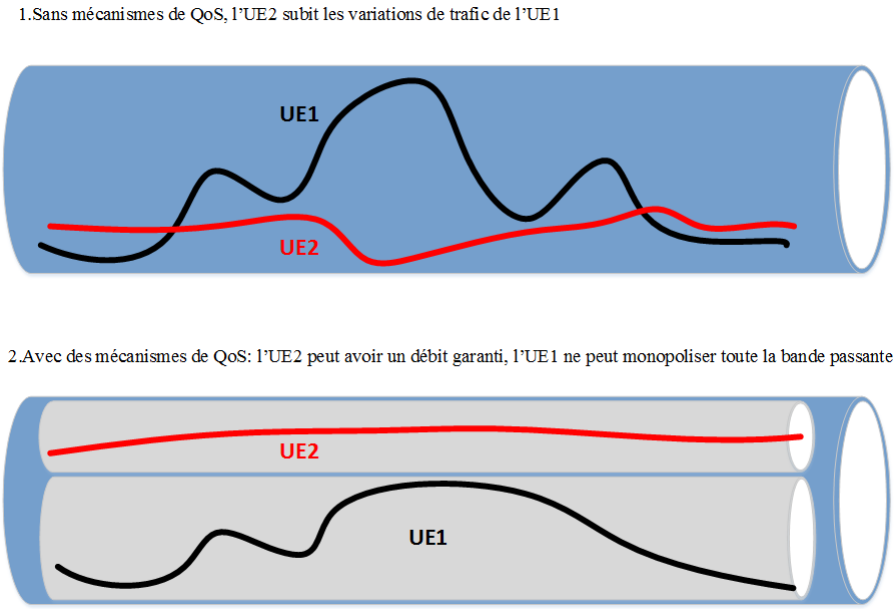


Figure III.1: Besoin de mécanismes de **QoS** lors d'un accès à des ressources partagées [4]

Pour affecter efficacement des ressources aux besoins d'un appel, la notion de **Bearer** a été introduite dans les Télécommunications dès la conception du système **GSM**.

Un **Bearer** peut être vu comme un tuyau entre deux entités du réseau qui communiquent entre elles sur une interface, un tuyau dont certaines caractéristiques sont négociées entre ces entités lors de son établissement et qui permet le transfert de données. Le concept de **Bearer** est ainsi décliné sur les interfaces du réseau dont les ressources doivent être économisées, et en particulier sur :

- L'interface radio, entre l'**UE** et l'**eNodeB** ;
- L'interface **S1** entre **E-UTRAN** et le réseau cœur **CN** ;
- Les interfaces du réseau cœur [4].

III.10. Efficacité QoS:

Le réseau **LTE** offre ces applications citées, qui ont des besoins **QoS**. Puisque c'est réseau tout-paquet, il est nécessaire de disposer un mécanisme pour faire la différenciation entre les flux de paquet selon exigences de qualité de service.

Le **QOS** des flux appelés porteurs **EPS** sont établies entre l'**UE** et le **P-GW** : c'est un support radio qui transporte les paquets d'un porteur **Bearer - EPS** entre un équipement utilisateur et un **eNB**, comme le montre la **Figure III.2** ci-dessous.

Chaque flux **IP** est associé à un porteur différent **EPS** et le réseau décide la priorité du trafic. Lors de la réception d'un paquet **IP** à partir d'Internet, **P-GW** effectue la classification des paquets en fonction de certains paramètres prédéfinis et lui envoie un porteur approprié **EPS**.

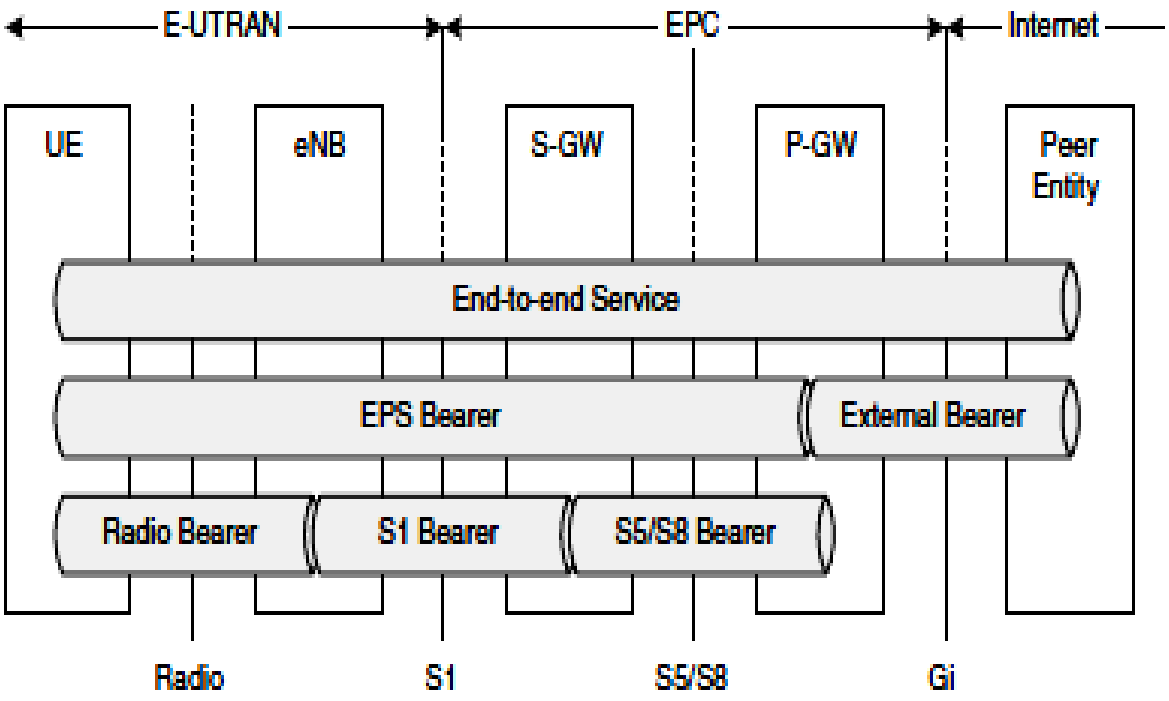


Figure III.2: EPS Bearers

III.11. Qualité de service en LTE/EPC:

La technologie **LTE** offre des mécanismes dits de qualité de service différenciée afin de faciliter la prise en compte des contraintes de services différents. Les services mobiles peuvent être distingués selon deux critères principaux, souvent intimement liés.

- Le service est-il temps-réel ou non temps-réel ?
- Le service tolère-t-il des erreurs de transmission ?

Ces caractéristiques de service impliquent une prise en charge différenciée de la part du réseau. On comprend aisément que le traitement d'un appel voix n'imposera pas les mêmes contraintes que le téléchargement d'un fichier.

D'une manière générale, les services temps-réel (par exemple, un appel voix ou un appel de streaming vidéo) requièrent des délais de transmission courts mais peuvent tolérer des erreurs de transmission. En revanche, les services non temps-réel (par exemple, un téléchargement de courrier électronique ou de fichier) revêtent des contraintes de délais relâchées mais ne tolèrent pas d'erreurs de transmission.

Le **LTE** a ainsi été conçu pour distinguer les services nécessitant un débit garanti ou **GBR** (**G**uaranteed **B**it **R**ate), des services ne requérant pas de débit garanti (**Non-GBR**).

Dans le réseau **LTE**, la qualité de service est implémentée entre l'équipement utilisateur et le **P-GW** ou « **PDN Gateway »** (**P**acket **D**ata **N**etwork **G**ate**W**ay) est appliquée à un groupe de « **Bearer** ».

Le terme « **Bearer** » est un concept virtuel qui est un ensemble de configuration réseau permettant de fournir un traitement spécial à un ensemble de trafics. Par exemple, les paquets **VoIP** sont priorisés par le réseau comparés aux trafics des navigateurs Web [14].

Dans les réseaux **LTE**, la **QoS** est appliqué sur les **Radio Bearer**, **S1 Bearer** et **S5/S8 Bearer**, encore appelé **EPS Bearer** (**E**volved **P**acket **S**ystem **Bearer**) comme le montre la **Figure III.3**

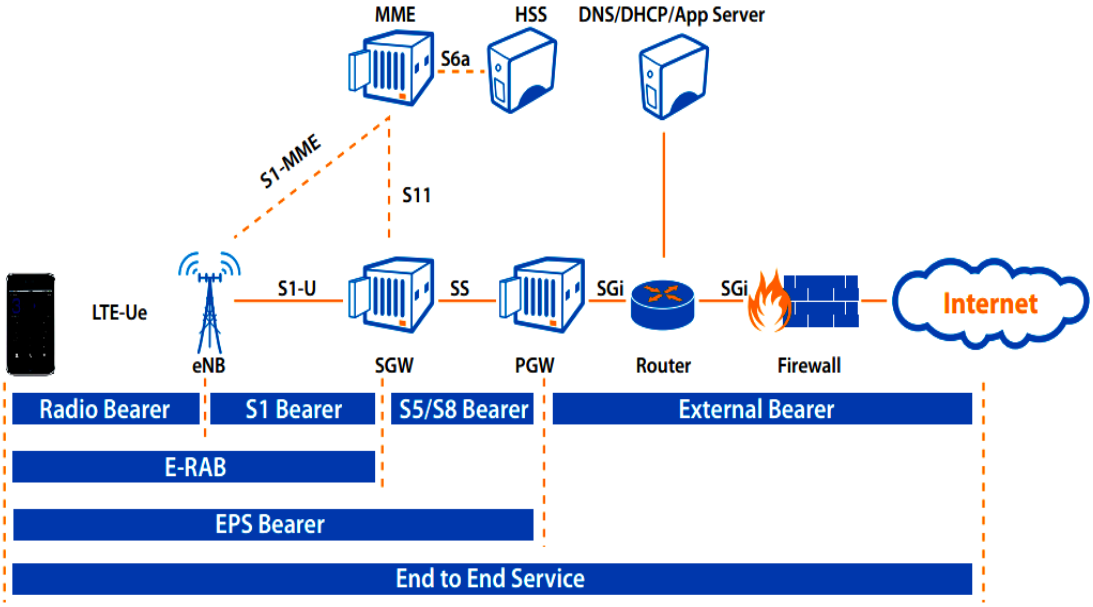


Figure III.3 : QoS dans LTE/EPC.

Il Existe deux types de Bearer :

- Le **Default Bearer**,
- Le **Dedicated Bearer**.

Le **Default Bearer** est établi quand un équipement utilisateur est initialement attaché au réseau **LTE** alors que le **Dedicated Bearer** est toujours établi quand il y a nécessité de fournir une qualité de service à un service particulier (comme **VoIP**, vidéo, etc…) comme le montre La **Figure III.4**.

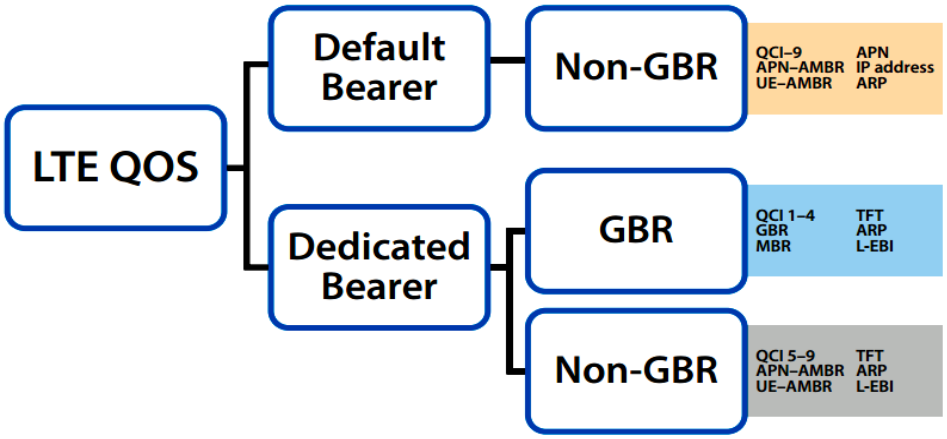


Figure III.4 : Type de **Bearer** de la **QoS** dans **LTE/EPC.**

Les **Bearers** déterminent à l'avance comment les données des utilisateurs finaux seront traitées lors de leurs passages à travers le réseau **LTE**. Le réseau peut traiter certains types de données en priorité ou de manière différente et traiter les autres normalement.

A des flux de données peuvent associés des débits garantis tandis qu'à d'autres des débits inférieurs. Dans une explication simpliste, les **LTE Bearers** sont des ensembles de paramètres qui définissent des traitements spécifiques pour les données.

III.11.1. Les Default Bearers:

Quand un équipement utilisateur initie des connections au réseau pour la première fois, il est assigné à un **Default Bearer** dépendant du service souscrit et y reste connecté jusqu'à ce que le service change ou se termine. Le **Default bearer** est un service au mieux (**Best-Effort**) dont la vitesse et la qualité dépendent de l'utilisation du réseau et l'heure du jour. Chaque **Default Bearer** va obtenir une adresse **IP** séparée.

Les **Bearers** sont organisés en **QCI** (**Q**oS **C**lass **I**dentifier) qui définissent les caractéristiques du niveau des paquets **IP** et les **Default Bearers** sont associés aux **QCI** 5 à 9 (**NON-GBR**).

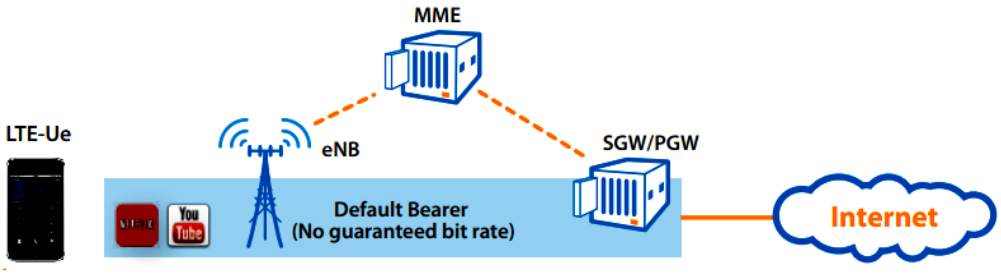


Figure III.5: Default Bearer.

III.11.2. Les Dedicated Bearers:

Les **Dedicated Bearers** fournissent un tunnel dédié à un ou plusieurs trafics spécifiques (Ex : **VoIP**, Vidéo, etc…). Les **Dedicated Bearers** sont des **Bearers** secondaires qui sont créés sur les **Default Bearers** existant. Ils partagent les adresses **IP** précédemment établies par les **Default Bearers,** toutefois les **Dedicated Bearers** ne requièrent pas à occuper des adresses **IP** additionnels.

Les **Dedicated Bearers** sont fréquemment utilisés comme des services **GBR** (**G**uaranteed **B**it **R**ate) cependant ils peuvent également être des services **NON-GBR**. De l'autre côté, les **Default Bearers** ne peuvent être que **NON-GBR** (Pas de débits minimum garantis par **EPS Bearer**).

Pour des services tels que **VoLTE** (**V**oice **o**ver **LTE**), il est nécessaire de fournir une meilleure expérience utilisateur et cela fait partie de l'utilité des **Dedicated Bearers**. Les **Dedicated Bearers** utilisent le **TFT** (**T**raffic **F**low **T**emplates) pour donner un traitement spécial à un service spécifique.

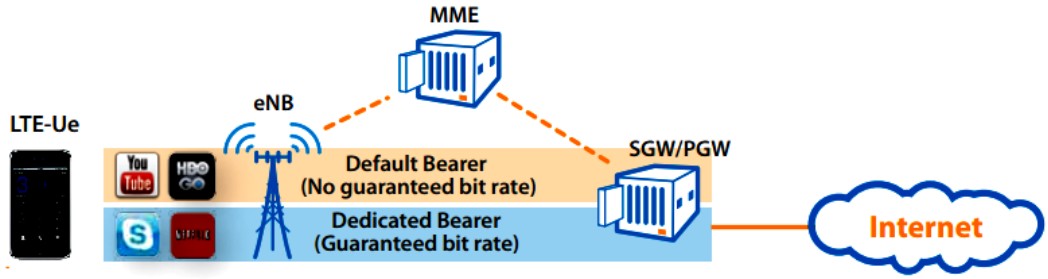


Figure III.6: Dedicated Bearer.

Le tableau ci-dessous montre les correspondances des paramètres **QCI**.

QCI	Type de Bearer	Priorité	Délai de paquets	Perte de paquets	Exemple
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Appel VoIP
2		4	150 ms	10^{-3}	Appel Vidéo
3		3	50 ms		Jeu en ligne (temps réel)
4		5	300 ms	10^{-5}	Streaming Vidéo
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-3}	Signal IMS
6		6	300 ms	10^{-5}	Vidéo, services TCP (email, chat, ftp, etc.)
7		7	100 ms		Voix, vidéo, jeu interactif
8		8	300 ms	10^{-3}	Vidéo, services TCP (email, chat, ftp, etc.)
9		9		10^{-5}	

Tableau III.1: Correspondances des paramètres **QCI** [14]

III.12. Les Performance des réseaux 4G:

III.12.1. Une mobilité à toute épreuve:

L'un des challenges des réseaux mobiles est d'être disponible partout et tout le temps, pour cela les réseaux **4G** ont été prévus pour fonctionner aussi bien dans les zones denses que dans les zones rurales. Une cellule **4G** peut couvrir 5km de diamètre dans les zones fortement peuplées et s'étendre jusqu'à 100 km dans les zones les plus reculées.

III.12.2. Des temps de réponse rapides:

L'utilisation d'une communication à des débits toujours plus élevé ne peut être plus optimale si le transfert de données se fait dans un délai trop long. La **4G** propose pour cela une latence moyenne de 20ms et peut descendre en dessous de 5ms.

III.12.3. La voix sur IP:

La **4G** propose un service de voix sur IP. En effet ce standard s'appuie sur un réseau de transport de paquet **IP**. Il n'est pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre la **VoIP**.

III.12.4. Débit sur l'interface radio:

Le début de la **4G** est de 100 Mbit/s descendant « **Downlink** » et 50 Mbit/s montant « **Uplink** ». L'interface radio **e-UTRAN** doit pouvoir supporter un débit maximum descendant instantané (du réseau au terminal) de 100 Mbit/s en considérant une allocation de bande de fréquence de 20 MHz pour le sens descendant et un débit maximum montant instantané (du terminal au réseau) de 50 Mbit/s en considérant aussi une allocation de bande de fréquence de 20 MHz.

Les technologies utilisées sont **OFDMA** (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) pour le sens descendant et **SC-FDMA** (**S**ingle **C**arrier - **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) pour le sens montant. Cela correspond à une efficacité du spectre de 5 bits/s/Hz pour le sens descendant et 2,5 bit/s/Hz pour le sens montant.

III.12.5. Connexion permanente:

Principe des accès haut débit où la connectivité est permanente pour l'accès à Internet. Même si la connexion est permanente au niveau du réseau, il est nécessaire pour le terminal de passer de l'état **IDLE** à l'état **ACTIF** lorsqu'il s'agira d'envoyer ou recevoir du trafic. Ce changement d'état s'opère en moins de 100 ms. Le réseau pourra recevoir le trafic de tout terminal rattaché puisque ce dernier dispose d'une adresse IP, mettre en mémoire ce trafic, réaliser l'opération de paging afin de localiser le terminal et lui demander de réserver des ressources afin de pouvoir lui relayer son trafic.

III.12.6. Délai pour la transmission de données:

Moins de 5 ms entre l'**UE** et l'Access Gateway, ceci dans une situation de non-charge où un seul terminal est **ACTIF** sur l'interface radio. La valeur moyenne du délai devrait avoisiner les 25 ms en situation de charge moyenne de l'interface radio. Ceci permet de supporter les services temps réel **IP** nativement, comme la voix sur **IP** et le streaming sur **IP**.

III.12.7. Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G:

Le **Handover** entre **e-UTRAN** (**LTE**) et **UTRAN** (**3G**) doit être réalisé en moins de 300ms pour les services temps-réel et 500 ms pour les services non temps-réel. Il est clair qu'au début du déploiement de la **LTE** peu de zones seront couvertes. Il s'agira pour l'opérateur de s'assurer que le **Handover** entre **LTE** et la **2G/3G** est toujours possible. Le Handover pourra aussi s'effectuer entre **LTE** et les réseaux **CDMA-2000**. Les opérateurs **CDMA** évolueront aussi vers la **LTE** qui devient le vrai standard de communication mobile de 4ème génération.

III.12.8. Flexibilité dans l'usage de la bande:

Comme indiqué précédemment **e-UTRAN** doit pouvoir opérer dans des allocations de bande de fréquence de différentes tailles incluant 1.4 MHz, 3 MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz et 20MHz.

III.13. Exemples de Qualité de Service:

On voit à travers ces quelques exemples que les besoins en **QoS** peuvent être différents. Par exemple si l'on veut diffuser de la vidéo à la demande, on aura besoin d'un transfert quasi temps-réel avec une latence très faible et une gigue faible, en revanche il ne sera pas dramatique de perdre une image de temps en temps ou alors d'avoir une qualité d'image un peu dégradée. Selon l'application utilisée, on s'efforcera de faire le bon compromis pour assurer la meilleure **QoS** possible, sachant qu'il n'existe pas de solution qui résolve tous les problèmes à la fois.

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

III.13.1. Contraintes communes aux applications multimédia:

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

III.13.2. La téléphonie sur IP:

La principale contrainte de la téléphonie sur **IP** est le délai. Pour qu'une conversation puisse avoir lieu convenablement, il est nécessaire d'avoir une latence inférieure à 35 ms. Pour assurer ce délai, les routeurs ne doivent pas comporter des files d'attente trop longues. En effet, de longues files d'attente permettent d'obtenir un débit plus élevé puisque moins de paquets sont perdus mais le temps passé dans les files augmente. Dans l'idéal, les routeurs doivent avoir une file prioritaire à faible latence pour les flux de voix sur **IP**.

III.13.3. La vidéoconférence:

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

III.14. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons défini la **QoS**, présenter ses différents paramètres et ses différents critères, suivis d'une petite partie dans laquelle nous avons décrit les performances des réseaux cellulaire **4G**.

Le chapitre suivant sera consacré pour une simulation des différents paramètres de la **QoS** existants dans les réseaux **4G LTE**.

Chapitre IV:

Simulations, Résultats et Interprétations

IV.1. Introduction :

Les simulateurs du réseau offrent beaucoup d'économie, de temps et d'argent pour l'accomplissement des tâches de simulation. Ils sont également utilisés pour que les concepteurs des réseaux puissent tester les nouveaux protocoles ou modifier les protocoles déjà existants d'une manière contrôlée et productrice.

Dans notre travail de mémoire de fin d'études, on doit pouvoir expliquer et analyser les principes de qualité de service dans les réseaux **4G LTE**. Il faut donc un logiciel de simulation qui supporte en premier lieu la technologie **LTE** mais également un logiciel qui dispose des modules ou des fonctionnalités pouvant traiter les questions de qualité de service et d'analyse de trafic.

Nous présentons dans ce qui suit le déroulement des étapes de simulation que nous avons mené dans ce travail de fin d'études, qui consiste à simuler quelques critères du **QoS**. Notre intérêt est d'évaluer les paramètres qui influencent sur les performances globales du réseau **LTE**.

IV.2. Choix du simulateur :

Le choix s'est porté sur **NS-3** (**N**etwork **S**imulator **3**) qui est un des logiciels qui ont mis à la disposition de ses utilisateurs le module de simulation **LTE**. En outre, le **NS-3** dispose d'un support complet sur la définition et l'analyse des scénarios des réseaux à simuler. Le **NS-3** dispose aussi d'une documentation officielle complète ainsi que d'un riche comité d'utilisateur.

Le **NS-3** est un programme open source, librement téléchargeable et écrit en langage **C++** avec des outils en **Python**. Pour pouvoir être fonctionnel, le **NS-3** doit être au préalable compilé. Des outils comme **WAF**, qui est un **Framework** basé sur **Python**, permettent justement d'installer, compiler et configurer notre simulateur.

IV.3. Présentation du simulateur NS-3 :

Le **NS-3** est un simulateur de réseaux à événements discrets, ciblé principalement pour la recherche et l'utilisation pédagogique. Le projet **NS-3**, lancé en 2006, est un projet open-source. Les développeurs de **NS-3** ont décidé que l'architecture de simulation devait être remaniée complètement en partant du Zéro. Dans cette optique, l'expérience tirée de **NS-2** doit être associé avec les progrès des langages de programmation et du génie logiciel.

L'idée de la rétrocompatibilité avec **NS-2** a été abandonnée dès le départ. Cela libère **NS-3** de contraintes héritées de **NS-2** et permet la construction d'un simulateur qui est bien conçu depuis le début [20].

IV.4. Les Mots Clés :

Dans cette section, nous passerons en revue quelques termes qui sont couramment utilisés dans les réseaux, mais ont une signification particulière dans **NS-3**.

- **Un nœud "Node" :** Représente tout élément de réseau.

La composition d'un nœud peut être gérer (ajout de composants, d'applications et de protocoles).

- **Une application "Application" :** Représente un code exécuté par un utilisateur.

Ce code peut être nécessaire au déroulement d'une simulation. L'échange de paquets durant une simulation nécessite, par exemple, la description d'une application au sein des nœuds participants. Les applications peuvent être attachées à un nœud.

Dans **NS-3** l'abstraction de base, pour un programme utilisateur qui génère une activité à simuler, est l'application. Cette abstraction est représentée en **C++** par la classe Application.

- **Un canal de communication "Channel" :** Dans le monde réel, on peut connecter un ordinateur à un réseau.

Souvent, les médias sur lesquels les flux de données dans ces réseaux sont appelées *canaux.* Lorsque vous connectez votre câble Ethernet à la prise dans le mur, vous connectez votre ordinateur à un canal de communication Ethernet. Dans le monde simulé de *ns-3,* on connecte un nœud à un objet qui représente un canal de communication. La communication de base abstraction de sous-réseau est appelé le canal et est représenté en C + + par la classe canal.

- **Une interface de communication : A**ppelée **NetDevice**, qui modélise à la fois les équipements et les pilotes de communications.

Des spécialisations sont fournies, comme par exemple **LTENetDevice,** qui peut être relié à un **LTEChannel**. S'il s'agit de connecter un grand nombre de nœuds pour un réseau, ce processus peut être très lourd. **NS-3** fournit des **TopologyHelpers** pour faciliter ce genre de tâches ; Exemple : **LTEHelper**"[16].

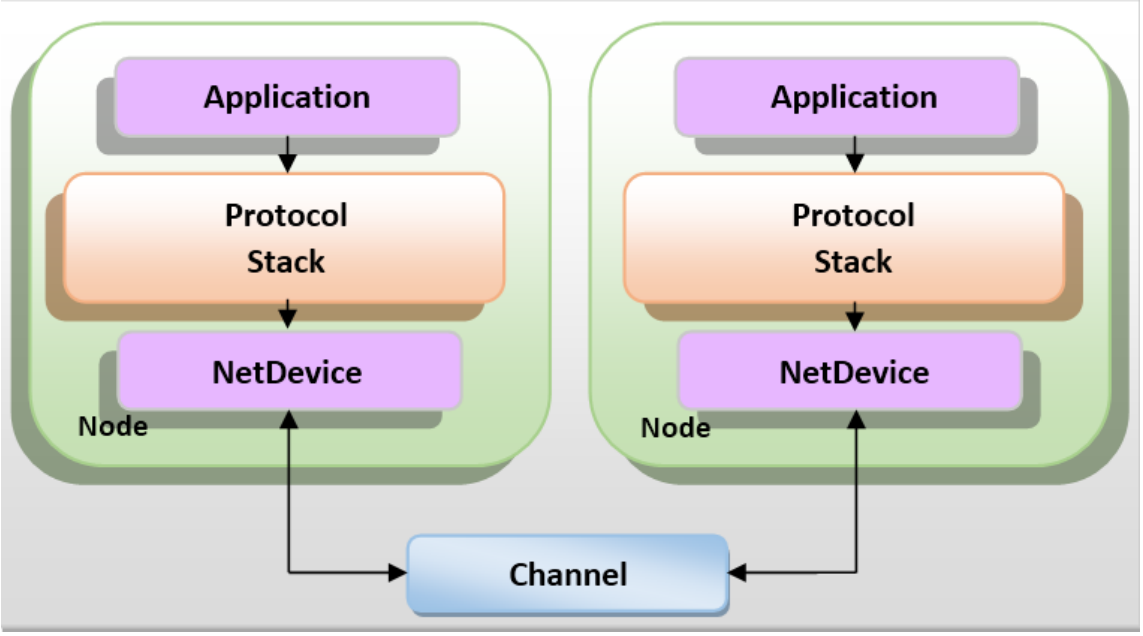


Figure IV.1: Architecture du nœud **NS-3**.

IV.5. Installation du simulateur NS-3

Le **NS-3** peut être installé sur la plupart des systèmes d'exploitation comme Linux, Mac OS ou Windows, suivant trois étapes : le téléchargement, la compilation et la validation.

Son fonctionnement est assez simple. En effet, il consiste en la réalisation d'un script contenant la topologie définie à travers : les nœuds, le canal et les interfaces réseaux, la configuration des piles de protocoles et des applications ainsi que les attributs choisis.

Une fois le script mis en place, son exécution est effectuée ; on pourra alors procéder à l'analyse des résultats.

Pour installer **NS-3** nous devons avoir une interface Linux, et cela ce fait soit en installant Linus directement sur la machine ou bien utiliser une machine virtuel (**VirtualBox** ou **VMware**), ce qui implique qu'on peut utiliser « **Ubuntu »** comme interface de **Linux**.

Les étapes suivantes sont des commandes pour télécharger et installer les différents paquets utilisés dans **Ubuntu**.

- **Ubuntu/Debian (Linux) :**

La liste suivante de paquage doit être téléchargée pour la version « **Ubuntu 12.04** ».

- **Package pour C++ :**

C'est le package minimal pour le besoin de l'installation de **NS-3**.

```
sudo apt-get install gcc g++ python
```

- **Paquage pour Python :**

  sudo apt-get install gcc g++ python python-dev

- **Package pour Mercurial :**

  sudo apt-get install mercurial

- **Package pour Bazaar utilisé pour l'exécution des scripts Python sur NS-3 :**

  sudo apt-get install bzr

- **Debugging:**

  sudo apt-get install gdb valgrind

- **GNU Scientific Library (GSL) pour éviter les erreurs dans les modèles du réseau WiFI :**

  sudo apt-get install gsl-bin libgsl0-dev libgsl0ldbl

- **Le Network Simulation Cradle (NSC):**

Requiert le Flex Lexical Analyzer et Bison Parser Generator.

  sudo apt-get install flex bison libfl-dev

- **Installation des paquets gcc et g++ de la leur dernière version:**

  sudo apt-get install g++-4.6 gcc-4.6

- **Pour lire Pcap Packet Traces :**

  sudo apt-get install tcpdump

- **Database support pour statistics framework:**

  sudo apt-get install sqlite sqlite3 libsqlite3-dev

- **Xml-based version pour la config store (requiert libxml2 >= version 2.7):**

  sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev

- **A GTK-based configuration system:**

  sudo apt-get install libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev

- **Pour expérimenté avec virtual machines et le NS-3:**

  sudo apt-get install vtun lxc

- **Support for utils/check-style.py code style check program:**

  sudo apt-get install uncrustify

- **Doxygen and related inline documentation:**

  sudo apt-get install doxygen graphviz imagemagick

  sudo apt-get install texlive texlive-extra-utils texlive-latex-extra

- **NS-3 Manuel et tutoriel sont écrits en reStructuredText pour Sphinx (doc/tutorial, doc/manual, doc/models et les figures typiques en dia:**

  sudo apt-get install python-sphinx dia

- **Support pour NS-3-pyviz visualisation de Gustavo Carneiro:**

  sudo apt-get install python-pygraphviz python-kiwi python-pygoocanvas libgoocanvas-dev

- **Support pour openflow module (requiert quelques bibliothèques d'acceleration):**

  sudo apt-get install libboost-signals-dev libboost-filesystem-dev

- **Support pour MPI-based distributed emulation:**

  sudo apt-get install openmpi*

Après toutes ces étapes nous allons maintenant passer à l'installation de **NS-3**, en commençant par le téléchargement du dossier **NS-3**.

```
Cd
mkdir tarballs
cd tarballs
wget http://www.nsnam.org/release/ns-allinone-3.13.tar.bz2
tar xjf ns-allinone-3.13.tar.bz2
```

Si vous allez dans le répertoire ns-3.13-allinone vous devriez voir un certain nombre de fichiers:

```
build.py      ns-3.13      / pybindgen-0.15.0.795      / util.py
constants.py      nsc-0.5.2      / README
```

IV.6. Compilation du NS-3 :

Pour l'installation de **NS-3**, nous allons utiliser la commande « build.py » qui se trouve dans le répertoire allinone-3.13.

```
./build.py --enable-examples --enable-tests
```

Une fois le projet créé, nous pouvons arrêter de travailler avec les scripts **NS-3-ALLinONE**. Nous avons ce qu'on a besoin d'eux et maintenant interagir directement avec la commande **Waf** [18] [19].

IV.7. Exécution d'un script de simulation :

En général, nous exécutons des scripts sous le contrôle de **Waf**. Cela permet au système de construction de s'assurer que les chemins des bibliothèques partagées sont correctement définis et que les bibliothèques sont disponibles lors de l'exécution.

Pour exécuter un programme, il suffit d'utiliser l'option **- run dans Waf.**

Script en C++

```
./ waf --run<name of script>
```

Waf vérifie d'abord et s'assure que le programme est correctement construit et exécuté.

IV.8. Déroulement de la simulation :

Premièrement, nous avons utilisé une machine virtuelle (VMware® Workstation 12 Pro), sur laquelle nous avons installé le système linux (Ubuntu 12.04).

Nos simulations ont été réalisées sous le simulateur NS-3 (version 3.13), qui possède un module qui permet de simuler le réseau **LTE** avec une variété de mécanismes de qualité de services.

Nous avons aussi utilisé **Office** pour la représentation graphique de nos résultats.

Dans notre script, nous avons créés un réseau **LTE** composé d'un **UE** et un point de communication **eNodeB**, qui supporte la **QoS** avec un adressage aléatoire, [21].

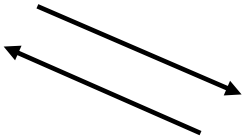


Figure IV.2 Architecture du réseau **4G LTE** [20].

IV.9. Architecture de test :

La simulation avec **NS-3** débute par la modélisation du test à effectuer. Une fois celle-ci réalisée, le système modélisé est transformé en script utilisé pour sa transmission au simulateur.

La simulation peut y être alors exécutée afin d'en extraire les résultats comme le montre la **Figure IV.4**.

Le script est réalisé à partir de deux langages : le **C++** ou le **Python**. Pour des considérations de flexibilité, notre choix s'est porté sur le langage **C++.**

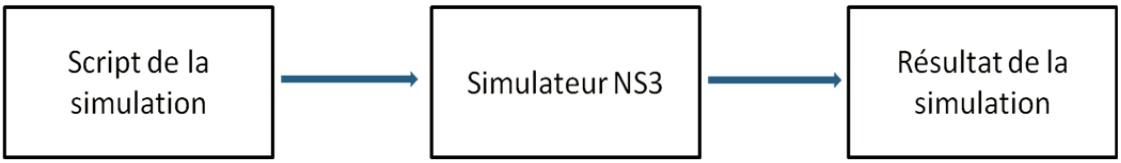


Figure IV.3 La réalisation d'une simulation dans NS3

IV.10. Les critères utilisés dans notre simulation :

La norme **LTE** définit des critères de qualité qui servent de mesure pour la qualité de transmission en liaison descendante « **Downlink** » et ascendante « **Uplink** ».

Nous avons Utilisez une bande passante de 10 MHz pour la liaison montante et la liaison descendante. L'exemple proposé décrit comment la qualité du canal diminue à mesure que la distance entre UE et eNB Augmente.

Parmi ces critères on trouve notamment le **CQI** (**C**hannel **Q**uality **I**ndicator), qui est l'indicateur de la qualité du canal mais aussi le **SINR** (**S**ignal **I**nterference **N**oise **R**atio) rapport signal sur bruit et le **TB** (**T**ransport **B**lock) [21].

IV.10.1. Le CQI :

Le **CQI** est un élément très important dans le réseau **LTE**, cet indicateur est principalement évalué sur le lien descendant dans une communication, et cela pour tester la qualité du canal de transmission, ainsi il est reçu par l'**UE**, ce dernier le renvoi à l'**eNodeB** pour savoir s'il doit l'augmenter pour avoir en final une bonne communication.

IV.10.2. Le SINR :

Le rapport signal sur bruit est un indicateur de la qualité de transmission d'une information qui s'exprime généralement en décibels (**dB**). C'est le rapport des puissances entre :

- Le signal d'amplitude maximale, déterminée par la valeur maximale admissible pour que les effets restent à une valeur admissible.
- Le bruit de fond, information non significative correspondant en général au signal présent à la sortie du dispositif en l'absence d'une information à l'entrée.

IV.10.3. Le TB :

Dans **LTE**, un **TB** (**B**loc de **T**ransport) est défini comme les données acceptées par la couche physique à être conjointement codées. Le chronométrage (choix du temps) de bloc de transmission est alors lié exactement à cette Couche 1, par exemple chaque bloc de transmission est produit précisément chaque 10 ms, ou un multiple de 10 ms.

IV.11. Résultats de simulation :

Grace à ce simulateur **NS-3,** nous avons pu tester quelques paramètres du **QoS** (**CQI**, **SINR**, **TB**). Pour voir ainsi l'influence de quelques facteurs sur ces paramètres, nous allons présenter tous nos résultats sur des graphes que nous avons pu tester.

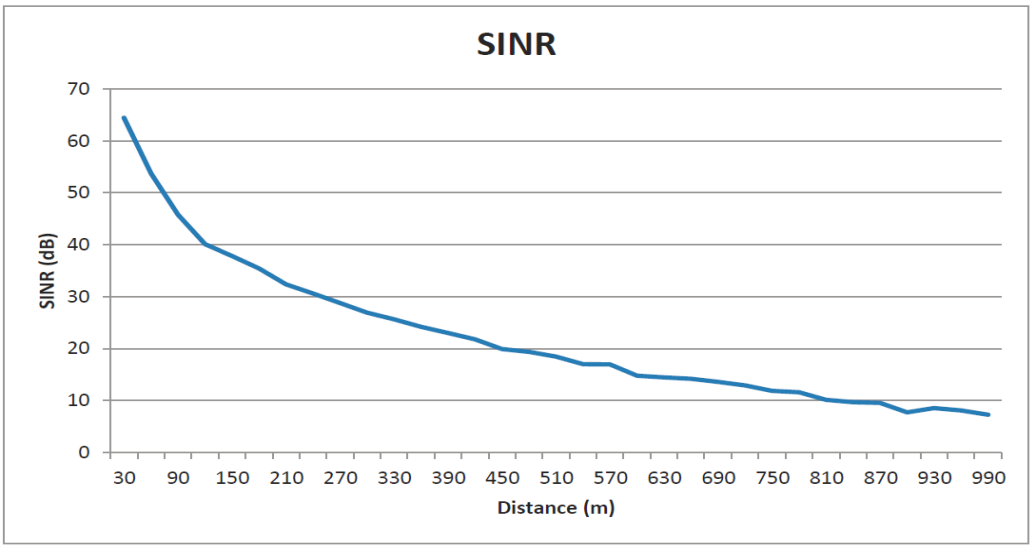


Figure IV.4: **SINR** en fonction de la distance **UE-eNodeB**.

Sur le graphe de la **Figure IV.5**, on voit clairement une diminution excessive du rapport **SINR** et qui se rapproche de la valeur 0, à presque 1km de distance séparant l'utilisateur **UE** du l'antenne **eNodeB** tout en considérant une valeur fixe du bruit à -148,947 dB, ceci est due principalement aux atténuations du signal, le Fading, les dispersions et les multi trajets.

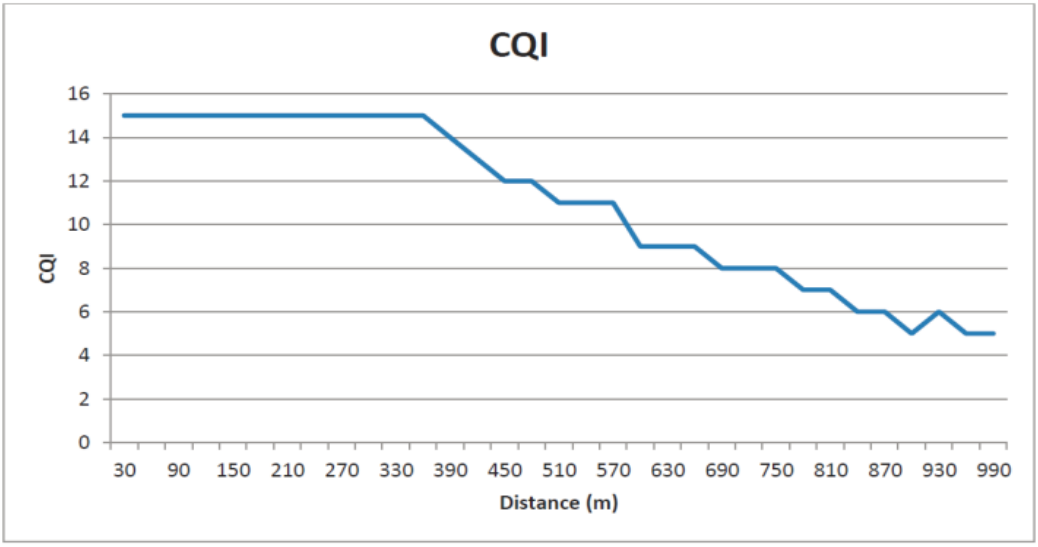


Figure IV.5: CQI en fonction de la distance **UE-eNodeB**.

Le graphe de la **Figure IV.6,** nous indique la qualité du canal suivant la distance séparant **l'UE** du **eNodeB**, ainsi on remarque que la qualité est meilleur de 0 jusqu'à 360 m. Après cette valeur on observe une dégradation en escalier, due essentiellement à la diminution de l'intensité du signal, l'augmentation du taux d'erreurs binaires mais aussi aux interférences.

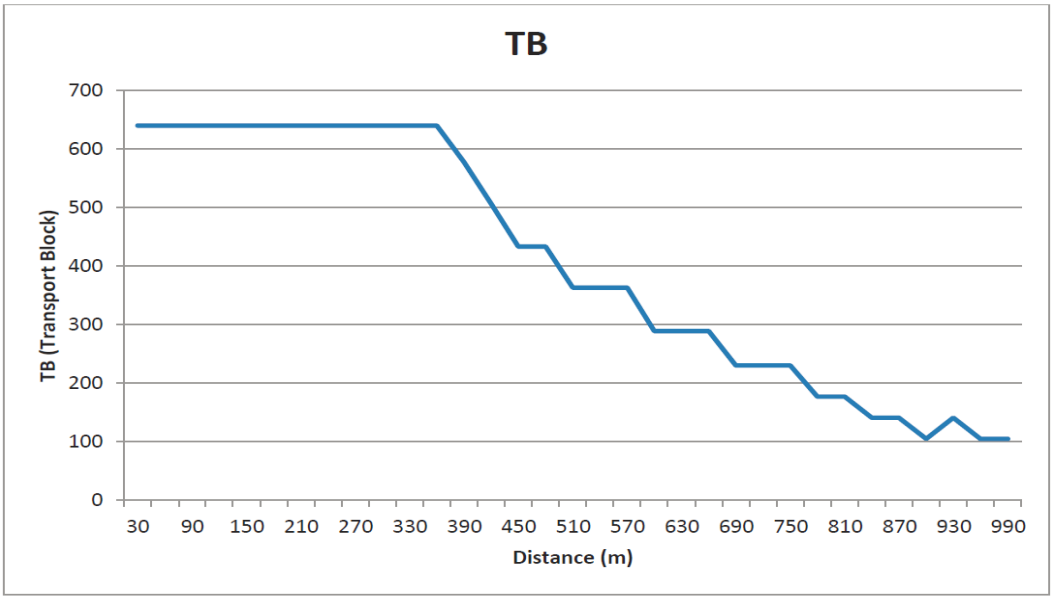


Figure IV.6: TB en fonction de la distance entre **UE-eNodeB**.

Le graphe de la **Figure IV.7,** nous indique le nombre de block transporté suivant la distance séparant l'**UE** du **eNodeB**, ainsi on remarque que le transport est meilleur de 0 jusqu'à 360 m, après cette valeur on observe une dégradation en escalier, cette dégradation et due essentiellement à la diminution de l'intensité du signal, l'augmentation du taux d'erreur binaire mais aussi aux interférences.

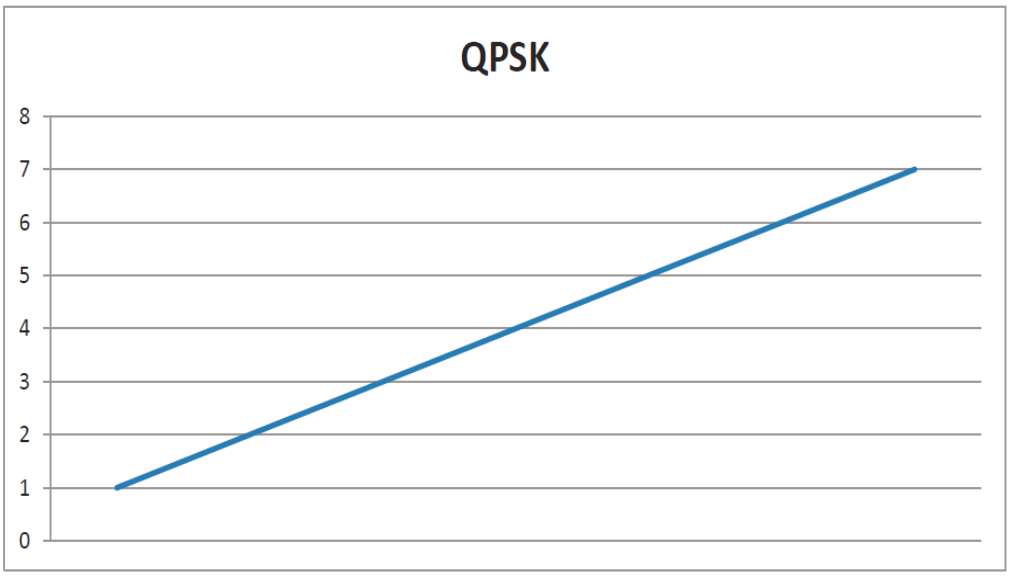


Figure IV.7: Valeurs du **CQI** en fonction de la modulation **QPSK**.

Le graphe de la **Figure IV.8,** nous montre que le **CQI** varie entre 1 et 7 dans une communication utilisant une modulation de type **QPSK**, ce type de modulation permet de transmettre 2 bits par symbole.

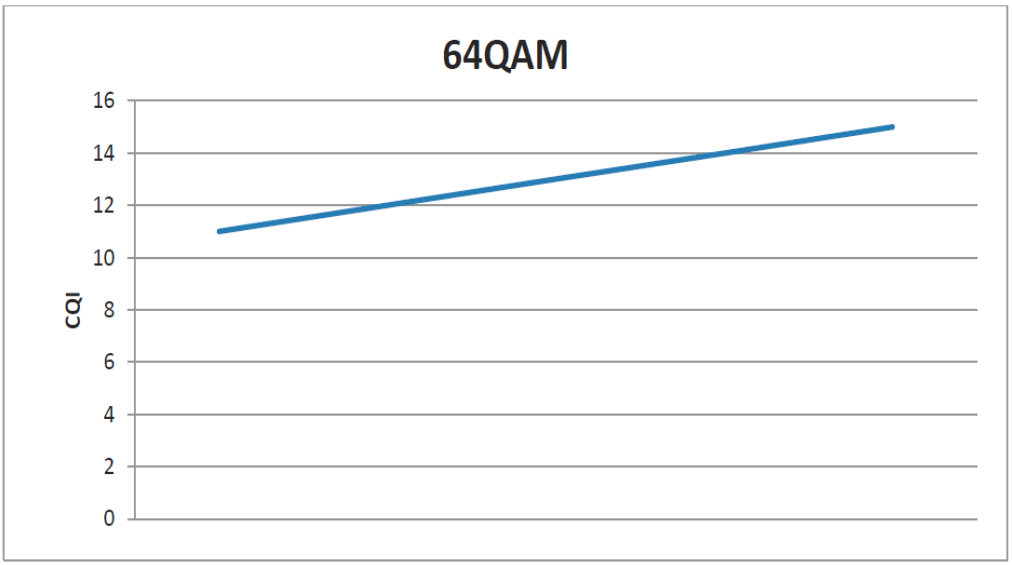


Figure IV.8: Valeurs du **CQI** en fonction de la modulation **64QAM**.

Le graphe de la **Figure IV.9,** montre les valeurs du **CQI** qui varient entre 10 et 14 pour une communication utilisant une modulation **64QAM**, c'est-à-dire 6 bits par symbole.

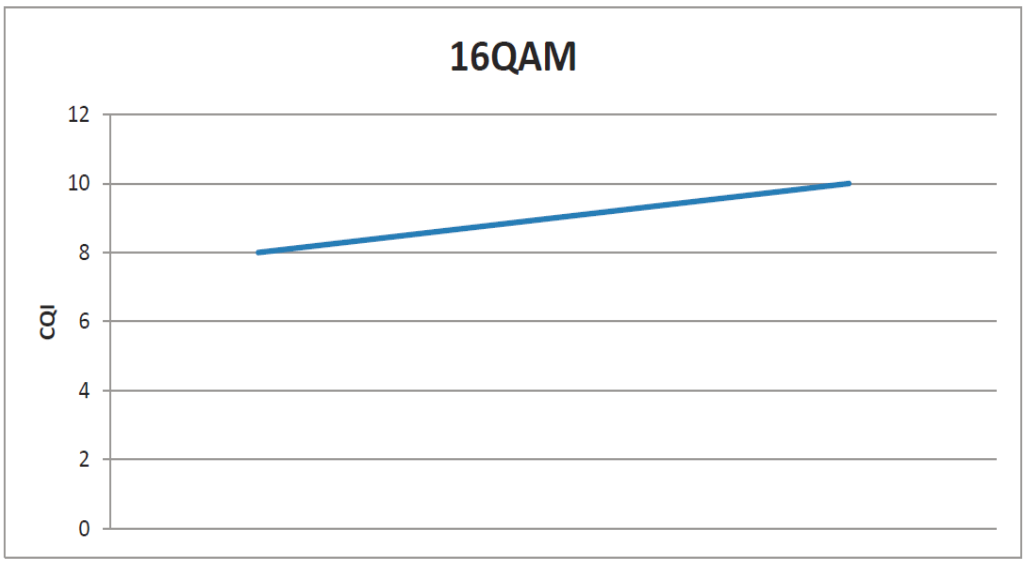


Figure IV.9: Valeurs du **CQI** en fonction de la modulation **16QAM**.

Le graphe de la **Figure IV.10,** montre les valeurs du **CQI** qui varient entre 8 et 10 pour une communication utilisant une modulation **16QAM**, c'est-à-dire l'envoi de 4 bits par symbole.

On remarque que la modulation **64QAM** donne le meilleur **CQI** que les autres types de modulation utilisés dans les réseaux **LTE** (**16QAM** et **QPSK**), Ce type de modulation permet l'envoi de 6 bits par symbole et donc un débit plus important.

IV.12. Conclusion :

Dans cette étude, des simulations ont été réalisées dans la partie **e-UTRAN** du système avec une attention très particulière sur les aspects du canal de transmission et de signalisation. On a déduit que la qualité de service indique la fiabilité du réseau en impliquant des paramètres performants pour la transmission, pour cela nous avons testé quelques paramètres de la **Qos** existants dans les réseaux **4G LTE** à savoir : **CQI** (**C**hannel **Q**uality **I**ndicator), **SINR** (**S**ignal **I**nterference **N**oise **R**atio) et **TB** (**T**ransport **B**lock).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre travail a consisté à réaliser une étude des différentes étapes à franchir pour une mise en place de la LTE, mais le principal apport de cette étude est avant tout un apport personnel car elle nous a permis de naviguer d'une technologie à une autre, d'une génération à une autre. Nous avons eu à voir entre autres une description générale des technologies GSM, GPRS, UMTS et LTE ; par la suite, nous avons illustré les caractéristiques de cette technologie et ses différentes composantes.

Pour ce faire, Nous avons commencé par une étude générale de la technologie Radio Mobile LTE, les innovations apportés par rapport aux technologies précédentes, les caractéristiques de l'architecture LTE ainsi que ses interfaces, aussi bien les canaux radio, les exigences LTE et les QOS offert.

Dans la dernière partie, nous avons présenté l'outil de simulation NS3 pour simuler quelques critères de la qualité de service qui servent de mesure pour la qualité de transmission en liaison descendante (downlink) et ascendante (uplink). Parmi ces indicateurs on trouve notamment le CQI (indicateur de la qualité du canal) mais aussi le SINR (rapport signal sur bruit) et le TB (bloc de transport).

Ce projet nous a permis de montrer que les principaux paramètres du réseau 4G qui ont faits que ce réseau soit le meilleur et le plus cher sont son très haut débit utilisé, la latence beaucoup moins importante que dans le réseau 3G, une large bande passante, une bande de fréquence flexible, et une interopérabilité avec les autres réseaux ainsi ce paramètre donne le choix à l'utilisateur pour leur utilisation au sein de la 4 G.

Bibliographie

Bibliographie

[1] : Xavier Lagrange, Philippe Godlewski, Sami Tabbane, «Réseaux GSM-DCS: des principes à la norme Réseaux et télécommunications, ISSN 1272-0917», Hermes Science Publications, 1999.

[2] : Maxime Maiman, Claude Servin, «Autoformation en télécoms et réseaux: communications d'entreprise Informatiques. Série Réseaux et télécoms», ISBN : 2100048511, 9782100048519, Dunod, 1999.

[3] : Harri Holma, Antti Toskala, «UMTS: les réseaux mobiles de troisième génération Micro pro. Puissance 2», ISBN:2746403706, 9782746403703, Osman Eyrolles Multimedia, 2001.

[4] : Y. Bouguen, E. Hardouin, F.X. Wolff, « LTE et les réseaux 4G », Eyrolles, 2012.

[5] : Ghassen.A.A, Mahamod. I et Kasmiran. J «Modeling and Performance Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants», Académie mondiale des sciences, 2011.

[6] : «LTE + SAE = EPS, Principes et Architecture», Efort 2009.

[7] : Seide.G, « Planification d'un réseau de quatrième génération à Partir D'un Réseau De Troisième Génération », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des Sciences appliquées (génie informatique), Université de MONTREAL, 2011.

[8] : LTE : Rapport Nokia Siemens/ INPT.

[9] : Mr Driss Kohkoh, «Système 4G : Étude et simulation de l'interface radio LT E-Advanced dans un environnement monocellulaire et multicellulaires», Mémoire de projet de fin d'étude, 21 Juin 2013.

[10] : Tarek Bchini, «Gestion de la Mobilité, de la Qualité de Service et Interconnexion de Réseaux Mobiles de Nouvelle Génération», Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, Le 10/06/2010.

[11] : Hiba Mouachi, «Etude et simulation de la norme LTE par 3GPP», Projet de semestre,

ENSA Marrakech, Université Cady Ayyad, 19/06/2012.

[12] : Zubeiri Iman, «Etude de la capacité des réseaux LTE», Faculté Des Sciences et Techniques Fès, Projet de semestre, Soutenu le: 18/06/2014.

Bibliographie

[13] : Eya Jammazi, «Optimisation d'un réseau pilote 4G pour Tunisie Télécom», Mémoire de Projet de Fin d'Etudes en Réseaux et Communications, 21/Juin/2013.

[14] : Andriamifidy Nalijaona Irina, «Les Réseaux LTE», Université d'Antananarivo, 2013.

[15] : Olivier Dugeon, «Architectures des réseaux pour le contrôle de la QoS», Institut National Polytechnique de Toulouse ,18 décembre 2008.

[16] : Elhoussaini Smail, Wann Ibrahima, « Simulateur interactif de la qualité de Service dans un routeur », 2012.

[17] : Falonne Nday, « Mise au point d'une stratégie de qualité de service dans inter réseau via le protocole BGP »,2013.

[18]: ns-3 project, « ns-3 Tutorial, Release ns-3.13 », December 23, 2011.

[19] : «http://www.nsnam.org/wiki/index.php/Installation#Operating_system_and_ compiler_support », Date de consultation juin 2013.

[20] : Landry Aguehounde, «Conception d'Algorithme de la couche Physique de Wimax sous NS3», 2014 Montréal.

[21] : Nicola Baldo, Marco Miozzo, «An LTE module for the ns-3 network simulator», Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, Barcelona, Spain. 25 March 2011.

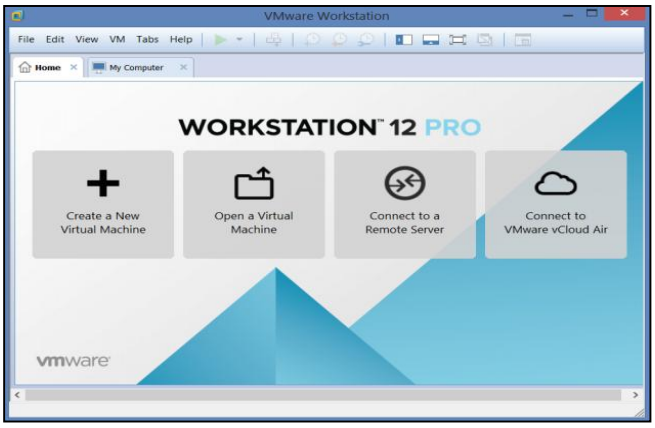
Annexe

Annexe

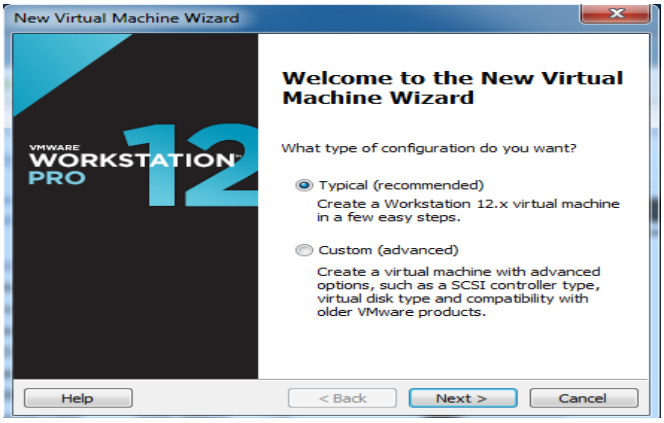
Mise en place d'une machine virtuelle :

❖ Installation d'Ubuntu 12.04 sur la VMware Workstation 12 Pro:

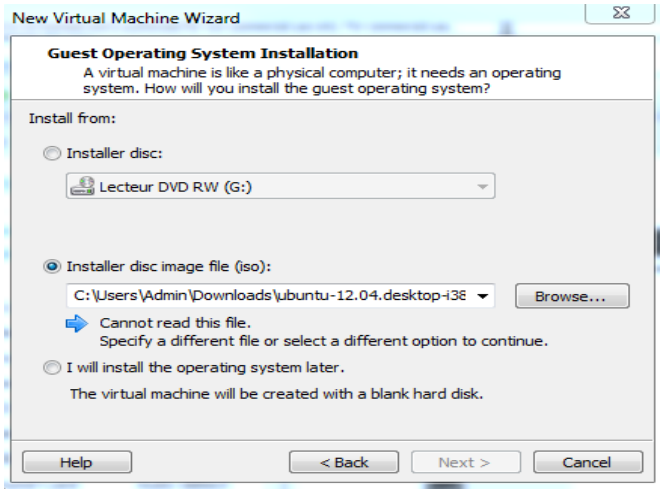
1- Ouvrez Vmware et cliquez sur « Create New Virtual Machine ».



2- Sélectionner le premier choix « Typical (recommended)»

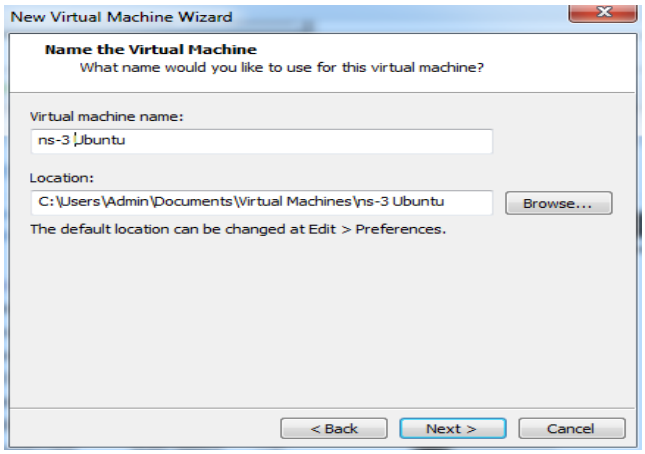


3- Sélectionnez « Installer disc image file (iso) », ensuite sélectionnez le fichier ISO de Ubuntu 12.04 que vous avez téléchargé. Cliquez sur « Next ».

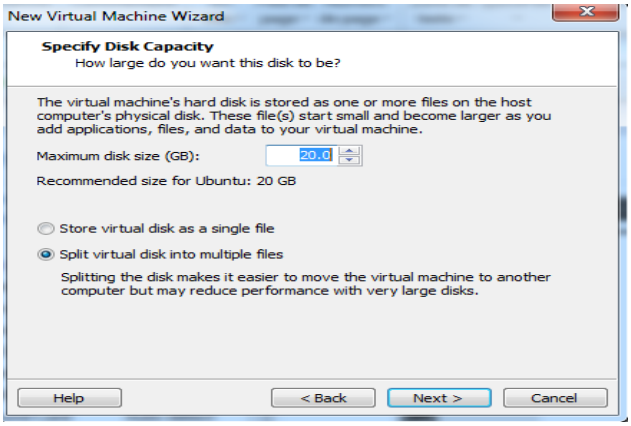


Annexe

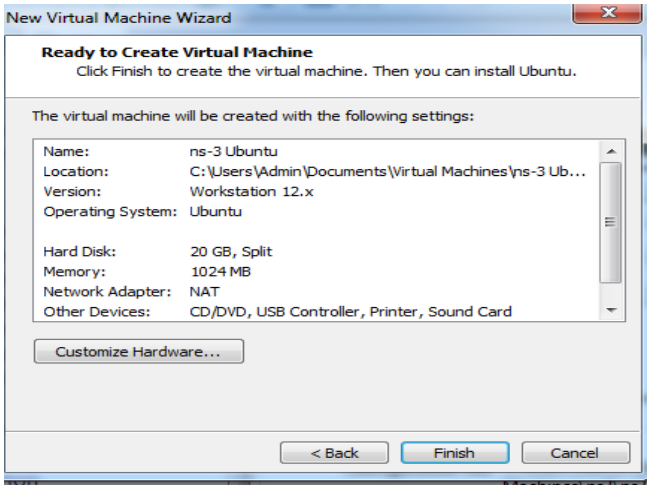
4-Dans cette étape, sélectionnez le nom de la machine virtuelle. Dans mon cas, je vais le nommer «ns3-Ubuntu». Choisissez aussi la location, je vous recommande de créer un dossier nommé « Virtual machines » dans mes Documents. Ensuite cliquez sur Next.



5- Après il faut sélectionnez la taille maximum de l'espace de stockage que vous souhaitez utiliser pour Ubuntu linux. Je recommande d'utiliser 20 GB. Apres changer l'option suivante à « Store virtual disk as a single file » et cliquez sur Next.



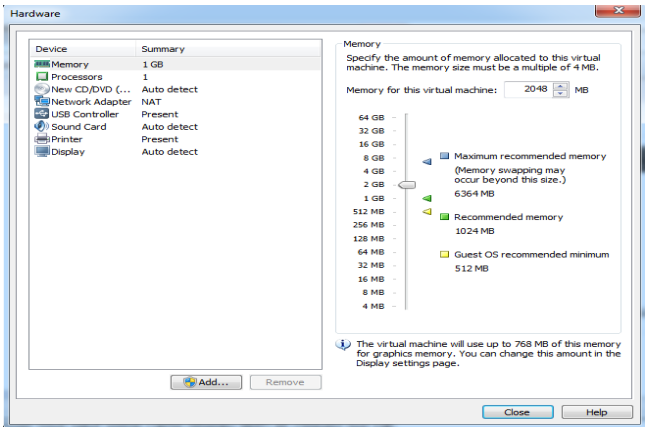
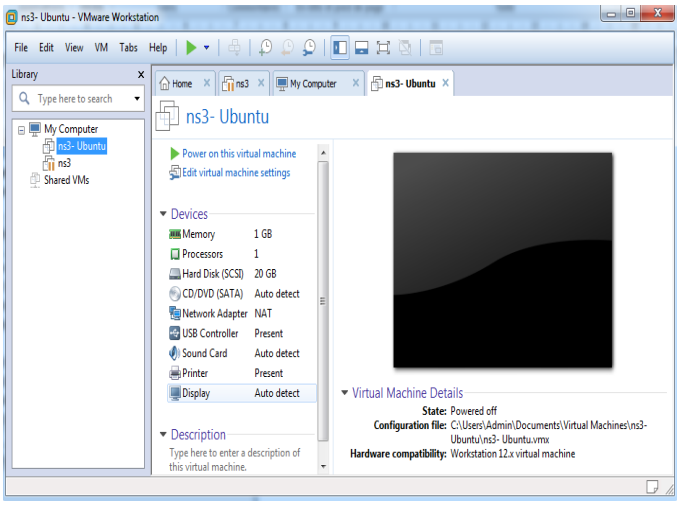
6- Dans la fenêtre suivante, il faut configurer le matériel virtuelle que nous allons utiliser dans Ubuntu. Donc cliquez sur le bouton « the Customize Hardware.



Annexe

7- Sélectionnez « Memory », et choisissiez la taille de mémoire que vous souhaitez donner au système Ubuntu. Pour moi, comme je dispose 4 go dans mon ordinateur, je vais choisir 2 go.

Cliquer sur Fermer au bas de la fenêtre du matériel et cliquez sur Terminer.



8-cliquez sur le nom de la machine virtuelle nouvellement créée, puis cliquez sur Play virtual machine.