

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

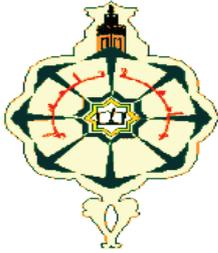
Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE
(GEE)



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER en Télécommunication
Option : Réseaux Mobiles et Services (RMS)

Présenté par

Melle BOUCHENTOUF Hadjer
Mr BOUDGHENE STAMBOULI Riyad

THEME

ETUDE DES PERFORMANCES DES RESEAUX 4G (LTE)

Soutenu en juin 2013 devant un jury composé de :

Mr D. MOUSSAOUI M.A.A. à l'université de Tlemcen
Mr H. ZERROUKI M.A.A. à l'université de Tlemcen
Mr. R. BOUABDELLAH M.A.A. à l'université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année Universitaire : 2012 - 2013



REMERCIEMENT

Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur BOUABDALLAH Réda, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.

Nous remercions les membres du jury, Monsieur MOUSSAOUI Djilali maitre-assistant à l'université Tlemcen d'avoir l'amabilité de présider le jury, Mr ZERROUKI el Hadj maitre-assistant à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous profitons de cette opportunité pour exprimer notre gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à notre formation. Et nous exprimons notre reconnaissance à tous les doctorants avec qui nous avons pu bénéficier de leurs aides.

Nous tenons à remercier nos famille de nous avoir soutenu, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui nous a aidées de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion RMS.



Dédicace

Ce mémoire est dédié à

Nos parents,

Nos familles,

Nos ami(e)s,

Tous ceux qui nous aiment et qu'on aime.

Bouchentouf Hadjer & Boudghene Stambouli Riyad

Résumé

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

Nous avons procédé à la réalisation d'une campagne de mesures afin de simuler les indicateurs de qualité de service en utilisant le simulateur réseau NS3.

Mot clé : 4G, LTE, simulation, QoS, NS3, étude des performances, indicateur de QoS...

Abstract

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

We proceeded to the realization of a campaign of measures to feign the quality indicators of service by using the network simulator NS3.

Keyword: 4G, LTE, simulation, QoS, NS3, study of the performances, the indicator of QoS...

TABLE DES MATIERE

| | |
|-----------------------------|------|
| Remerciement | |
| Dédicace | |
| Résumé..... | I |
| Table des matières..... | II |
| Liste des figures..... | VI |
| Liste des tableaux..... | VII |
| Liste des abréviations..... | VIII |
| Introduction générale..... | 2 |

Chapitre 1 : Différentes Générations de Téléphonie Mobile

| | |
|---|-----------|
| <i>1.1 Introduction.....</i> | <i>4</i> |
| <i>1.2 Historique.....</i> | <i>4</i> |
| <i>1.3 Les différentes normes téléphoniques.....</i> | <i>5</i> |
| 1.3.1 La première génération des téléphones mobiles (1G)..... | 5 |
| 1.3.2 La deuxième génération des téléphones mobiles (2G)..... | 5 |
| 1.3.3 La troisième génération des téléphones mobiles 3G (UMTS)..... | 13 |
| 1.3.4 La quatrième génération des téléphones mobiles 4G (LTE)..... | 16 |
| <i>1.4 Conclusion.....</i> | <i>19</i> |

Chapitre 2 : Etude détaillée des réseaux 4G

| | |
|--|-----------|
| <i>2.1 Introduction.....</i> | <i>21</i> |
| <i>2.2 LTE (4G).....</i> | <i>21</i> |
| <i>2.3 Buts de la 4G.....</i> | <i>22</i> |
| <i>2.4 Architecture.....</i> | <i>23</i> |
| 2.4.1 EPC : Evolved Packet Core..... | 24 |
| 2.4.2 La partie radio eUTRAN..... | 27 |
| 2.4.3 La partie IMS (IP Multimedia Sub-system)..... | 27 |
| <i>2.5 Comparaison entre les réseaux 3G et 4G.....</i> | <i>28</i> |

| | |
|--|----|
| 2.6 Les caractéristiques fondamentales de la 4G..... | 29 |
| 2.6.1 Débits et fréquences du réseau 4G | 29 |
| 2.6.2 Latence | 30 |
| 2.6.3 L'agilité en fréquence | 30 |
| 2.6.4 Codage et sécurité | 31 |
| 2.6.5 Multiplexage | 31 |
| 2.6.6 La mobilité | 32 |
| 2.6.7 Modulation adaptative et codage | 36 |
| 2.6.8 Les types de transmission utilisée dans la 4 G | 38 |
| 2.7 La 4G dans le Monde | 43 |
| 2.7.1 Europe | 44 |
| 2.7.2 Asie..... | 46 |
| 2.7.3 États-Unis..... | 47 |
| 2.8 Conclusion..... | 47 |

Chapitre 3 : Généralités sur la Qualité de Service

| | |
|--|----|
| 3.1 Introduction..... | 49 |
| 3.2 Définition..... | 49 |
| 3.3 But de la QoS..... | 49 |
| 3.4 Paramètres de la QoS..... | 50 |
| 3.4.1 Le Débit | 50 |
| 3.4.2 La perte de paquets | 50 |
| 3.4.3 Le délai de transit (latence) | 50 |
| 3.4.4 La gigue | 50 |
| 3.4.5 La bande passante | 51 |
| 3.4.6 Priorité des paquets..... | 51 |
| 3.5 Les informations utilisées pour assurer la QoS..... | 51 |
| 3.6 Le protocole utilisé par la qualité de service | 52 |
| 3.6.1 DiffServ | 52 |
| 3.6.2 IntServ | 53 |
| 3.7 Qualité de service dans le réseau 4G..... | 53 |
| 3.8 Les Performance des réseaux 4G..... | 54 |
| 3.8.1 Une mobilité à toute épreuve | 54 |

| | |
|--|----|
| 3.8.2 Des temps de réponse rapides | 54 |
| 3.8.3 La voix sur IP | 54 |
| 3.8.4 Débit sur l'interface radio | 54 |
| 3.8.5 Connexion permanente | 55 |
| 3.8.6 Délai pour la transmission de données | 55 |
| 3.8.7 Co-existence et Interfonctionnement avec la 3G | 55 |
| 3.8.8 Flexibilité dans l'usage de la bande | 55 |
| 3.9 Exemple de Qualité de Service | 55 |
| 3.9.1 Contraintes communes aux applications multimédia | 56 |
| 3.9.2 La téléphonie sur IP | 56 |
| 3.9.3 La vidéoconférence | 56 |
| 3.10 Conclusion | 57 |

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

| | |
|--|----|
| 4.1 Introduction | 59 |
| 4.2 Choix du simulateur | 59 |
| 4.2.1 LTE-SIM | 60 |
| 4.2.2 OPNET | 60 |
| 4.2.3 NS-2 | 60 |
| 4.2.4 NS-3 | 61 |
| 4.3 Présentation du simulateur NS-3 | 61 |
| 4.4 Terminologie et abstractions | 61 |
| 4.4.1 Un nœud "Node" | 62 |
| 4.4.2 Une application "Application" | 62 |
| 4.4.3 Un canal de communication "Channel" | 62 |
| 4.4.4 Une interface de communication | 62 |
| 4.5 Installation du simulateur NS-3 | 63 |
| 4.6 Déroulement de la simulation | 66 |
| 4.7 Les indicateurs utilisés dans notre simulation | 68 |
| 4.7.1 Le CQI | 68 |
| 4.7.2 Le SINR | 69 |
| 4.7.3 Le TB | 69 |
| 4.8 Résultats de simulation | 69 |

| | |
|-----------------------------|----|
| <i>4.9 Conclusion</i> | 74 |
| Conclusion Générale..... | 76 |
| Bibliographie | |

Liste des figures

Figure 1.1 : Évolution du nombre d'abonnés mobiles à travers le monde

Figure 1.2 : Architecture réseau GSM.

Figure 1.3 : Architecture du réseau GPRS.

Figure 1.4 : Architecture du réseau UMTS.

Figure 2.1 : Présentation générale sur le système LTE.

Figure 2.2 : Architecture générale du LTE.

Figure 2.3 : Architecture d'EPS (Evolved Packet System).

Figure 2.4 : Architecture du réseau cœur EPC.

Figure 2.5 : Comparaison 3G / 4G.

Figure 2.6 : Le fonctionnement d'une trame radio.

Figure 2.7 : Structure de la trame radio.

Figure 2.8 : Les slots d'une trame radio.

Figure 2.9 : Constellation QAM à 16 états.

Figure 2.10 : Schéma du principe du modulateur QPSK.

Figure 2.11 : Les porteuses de l'OFDMA.

Figure 2.12 : Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA.

Figure 2.13 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA.

Figure 2.14 : Déploiement de la 4G dans le monde.

Figure 4.1 : Architecture du nœud NS-3.

Figure 4.2 : Etapes pour la réalisation d'une simulation.

Figure 4.3 : Etapes pour nos simulations sous NS-3.

Figure 4.4 : Réseau 4G test.

Figure 4.5 : SINR en fonction de la distance UE-eNB.

Figure 4.6 : CQI en fonction de la distance UE-eNB.

Figure 4.7 : TB en fonction de la distance entre UE-eNB.

Figure 4.8 : Valeurs du CQI en fonction de la modulation QPSK.

Figure 4.9 : Valeurs du CQI en fonction de la modulation 64QAM.

Figure 4.10 : Valeurs du CQI en fonction de la modulation 16QAM.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Evolution du GSM au GPRS.

Tableau 1.2 : Différent Paramètre du LTE-Advanced.

Tableau 2.1 : La latence pour chaque multiplexage.

Tableau 2.2 : Les bandes de FDD.

Tableau 2.3 : Les bandes de TDD.

Liste des abréviations

| | |
|-------------|--|
| 1G | 1^{ère} Génération |
| 2G | 2^{ème} Génération |
| 3G | 3^{ème} Génération |
| 4G | 4^{ème} Génération |
| 5G | 5^{ème} Génération |
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |

A

| | |
|--------------|--|
| ADSL | Asymmetric Digital Subscriber Line |
| ARCEP | Autorité de Régulation des Communications Électroniques et Postes |
| AUC | AUthentication Center |

B

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

C

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| CCU | Channel Codec Unit |
| CDMA2000 | Code Division Multiple Access |
| CGF | Charging Gateway Function |

CQI Channel **Q**uality **I**ndicator

D

DFT Transformation de **F**ourier **D**iscrete

DiffServ **D**ifferentiated **S**ervice

DSCP **D**iffServ **C**ontrol **P**rotocol

E

EDGE Enhanced **D**ata **R**ates for **G**SM **E**volution

EIR Equipment **I**ntity **R**egister

eNodeB evolved **N**ode**B**

EPS Evolved **P**acket **S**ystem

EPC Evolved **P**acket **C**ore

E-UTRA Evolved-**U**niversal **T**errestrial **R**adio **A**ccess

eUTRAN evolved **U**TRAN

F

FDD Frequency **D**ivision **D**uplexing

G

GGSN Gateway **G**PRS **S**upport **N**ode

GMSC Gateway **M**SC

GPRS General **P**acket **R**adio **S**ervice

GSM Global **S**ystem for **M**obile **C**ommunication

H

| | |
|--------------|--|
| HLR | Home Location Register |
| HSDPA | High Speed Downlink Packet Access |
| HSOPA | High Speed OFDM Packet Access |
| HSPA | High Speed Packet Access |
| HSS | Home Subscriber Service |

I

| | |
|-------------|--|
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IETF | Internet Engineering Task Force |
| IMEI | International Mobile Equipment Identity |
| IMS | IP Multimedia Sub-system |
| IMSI | International Mobile Subscriber Identity |
| IP | Internet Protocol |
| IPv6 | IP version 6 |

K

| | |
|-----------|--------------------------------|
| KT | Korea Telecommunication |
|-----------|--------------------------------|

L

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

M

| | |
|---------------|-------------------------------------|
| 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 |
| MSISDN | Mobile Station |
| MTS | Mobile TeleSystem |

N

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

O

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

P

| | |
|---------------|---|
| 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 |

Q

| | |
|-------------|--|
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QoS | Qualité de Service |
| QoS | Quality of Service |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |

R

| | |
|-------------|---|
| 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 |

S

| | |
|------------|--------------------------------------|
| 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 |
| T | |
| TB | Transport Block |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TDD | Time-Division Duplex |
| TMN | Telecommunications Management Network |
| U | |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UE | Terminal Mobile |
| UIT | Union Internationale des Télécommunications |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| V | |
| VLR | Visitor Location Register |
| VoIP | Voice over IP |

VSF-OFCDM **V**ariable **S**preading **F**actor **O**rthogonal **F**requency and **C**ode **D**ivision
Multiplexing

W

WAP **W**ireless **A**pplication **P**rotocol

WCDMA **W**ide **C**oding **D**ivision **M**ultiple **A**ccess

WiFi **W**ireless **F**idelity

WIMAX **W**orldwide **I**nteroperability for **M**icrowave **A**ccess

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

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

Les évolutions se poursuivent de partout, tant dans le monde des réseaux spécialisés (capteurs, étiquettes intelligentes, etc.) que des réseaux télécoms. Ceux-ci voient désormais des solutions concurrentes apparaître provenant de divers horizons : monde télécoms classiques avec HS(D)PA, monde des réseaux sans fil avec le WiMAX voire le monde de la diffusion télévision terrestre et satellite (DVB-T, DVB-H, DVB-S). La future génération de réseaux sans fil dite de quatrième génération (4G) apporte un véritablement tournant dans le foisonnement et la disparité des solutions existantes. L'objectif cette fois sera certes d'augmenter les débits et les applications prises en charge par ces réseaux mais encore de construire un cadre permettant leur interopérabilité. Des premières solutions sont déjà disponibles auprès de la plupart des opérateurs de télécommunications mais la plupart d'entre elles sont des solutions spécifiques à un type d'interconnexion et à un opérateur.

Dans ce mémoire on se verra de présenter les différentes normes (générations) de téléphonie mobile, on commencera tout d'abord par l'ancienne génération très connu et très répondu dans le monde la 2G (GSM), c'est la norme la plus utiliser dans le monde de nos jours et est toujours utilisée, ensuite on passera à la 2.5G (GPRS) le réseau issu du réseau GSM, ce réseau et une extension du réseau GSM, après on présentera les réseaux 3G (UMTS).

Notre travail s'est donc concentré sur l'étude les performances des réseaux 4G, pour cela on va étudier ce réseau en détail, présenter et étudier ces performances, présenter les différentes Qualités de Service, et enfin faire une simulation démontrant les performances des réseaux de 4^{ème} génération cellulaire.

Pour effectuer ce travail nous avons choisis de travailler avec le simulateur NS3 à fin de pouvoir faire une bonne simulation et obtenir de bon résultat.

CHAPITRE 1

Différentes Générations de Téléphonie Mobile

1.1 Introduction

Depuis plusieurs années le développement des réseaux mobiles n'a pas cessé d'accroître, plusieurs générations ont vues le jour (1G, 2G, 3G, 4G et prochainement la 5G pas encore mis en œuvre) et connues une évolution remarquable, en apportant un débit exceptionnel et qui ne cesse d'augmenter, une bande passante de plus en plus large et un des avantages d'une telle bande passante est le nombre d'utilisateur pouvant être supportés.

Les réseaux de la 1^{ère} génération (appelée aussi 1G) ont été intégrés au réseau de télécommunication dans les années 80. Ces systèmes ont cependant été abandonnés il y a quelques années laissant la place à la seconde génération, appelée 2G lancée en 1991. Elle est encore active de nos jours. Nous pouvons distinguer deux autres types de générations au sein même de la seconde : la 2.5 et la 2.75. Le principal standard utilisant la 2G est GSM. A la différence de la 1G, la seconde génération de normes permet d'accéder à divers services, comme l'utilisation du WAP permettant d'accéder à Internet, tant dit que pour la 3^{ème} génération connue sous le nom de 3G permet un haut débit pour l'accès à l'internet et le transfert de données. En ce qui concerne la nouvelle génération 4G(LTE), déployer jusque-là que par quelque pays, elle permet le très haut débit, une moindre latence et beaucoup d'autres services qu'on verra par la suite dans le prochain chapitre.

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes générations de téléphones mobiles, leurs architectures ainsi que d'autres services pouvant être utilisés par chacune de ces générations cellulaires.

1.2 Historique

L'usage des services de communications mobiles a connu un essor remarquable, ces dernières années. La figure 1.1 illustre l'évolution du nombre d'abonnés mobiles au regard de la population mondiale. La fin 2012 environs de 6.4 milliards d'abonnés à travers le monde. C'est véritablement un nouveau secteur de l'industrie mondiale qui s'est créé, regroupant notamment constructeurs de circuits électroniques, de terminaux mobiles, d'infrastructures de réseaux, développeurs d'applications et de services et opérateurs de réseaux mobiles.

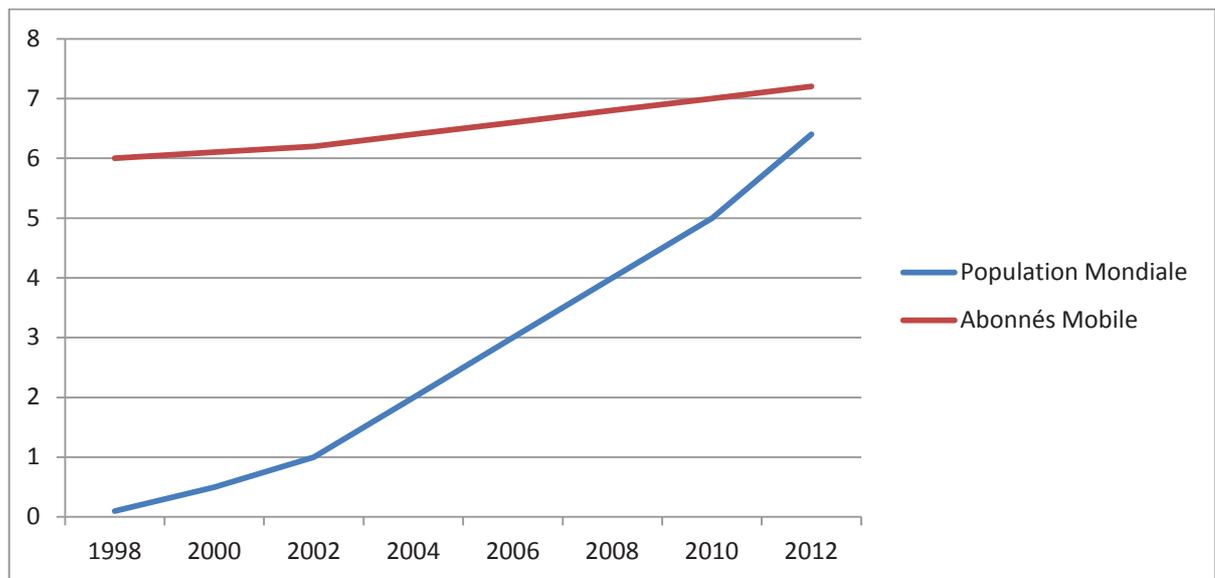


Figure 1.1 : Évolution du nombre d'abonnés mobiles à travers le monde.

1.3 Les différentes normes téléphoniques

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

1.3.1 La première génération des téléphones mobiles (1G)

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

1.3.2 La deuxième génération des téléphones mobiles (2G)

Le GSM est apparu dans les années 90. Il s'agit de la norme 2G. Son principe, est de passer des appels téléphoniques, s'appuyant sur les transmissions numériques permettant une sécurisation des données (avec cryptage), il a connu un succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout lieu avec la possibilité d'émettre des minimessages (SMS, limités à 80 caractères). Ainsi qu'il autorise le roaming entre pays exploitant le réseau GSM.

Devant le succès, il a fallu proposer de nouvelles fréquences aux opérateurs pour acheminer toutes les communications, et de nouveaux services sont aussi apparus, comme le MMS. Le débit de 9.6 kbps proposé par le GSM est insuffisant, dans ce concept, ils ont pensé à développer de nouvelles techniques de modulations et de codages qui ont permis d'accroître le débit pour la nouvelle génération.

1.3.2.1 Le réseau GSM

Le réseau GSM a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC –réseau fixe). Il se distingue par un accès spécifique appelé la liaison radio. La figure 1.2 présente l'architecture du Réseau GSM.

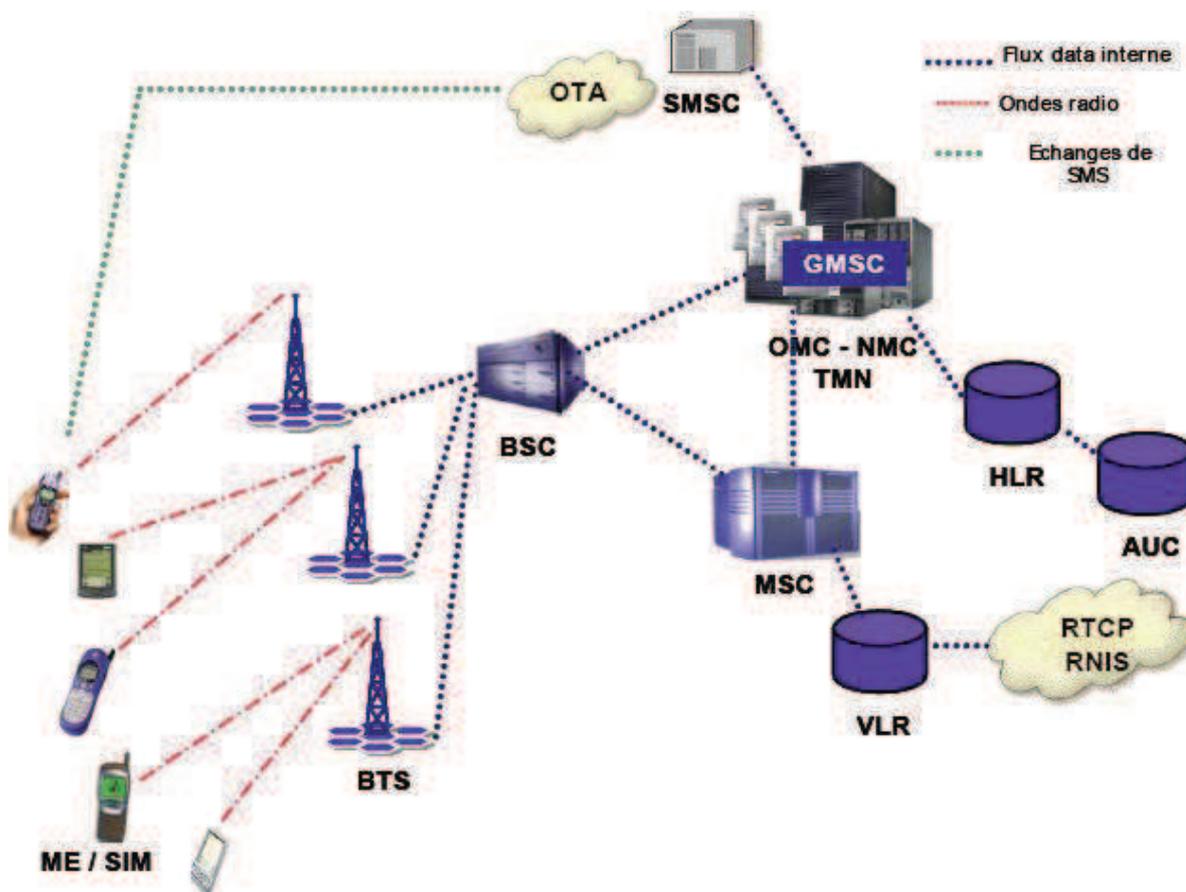


Figure 1.2 : Architecture du réseau GSM [1].

Ainsi le réseau GSM est composé de trois sous-ensembles :

A. Le sous-système radio – BSS

BSS pour base station sub-system, c'est un sous-système de l'architecture GSM qui assure les transmissions radioélectriques et gère la ressource radio.

Le BSS comprend les BTS qui sont des émetteurs-récepteurs ayant un minimum d'intelligence et les BSC qui contrôlent un ensemble de BTS et permettent une première concentration des circuits.

B. Le sous-système d'acheminement – NSS

Son rôle est d'assurer les fonctions de commutations et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS. En plus des fonctions indispensables de commutation, on y retrouve les fonctions de gestion de la mobilité, de la sécurité et de la confidentialité qui sont implantées dans la norme GSM.

Il se compose de plusieurs équipements, en citant quelques-uns :

- **Fonctions du HLR**

Le HLR est une base de données de localisation et de caractéristiques des abonnés. Un réseau peut posséder plusieurs HLR selon des critères de capacité de machines, de fiabilité et d'exploitation. Le HLR est l'enregistreur de localisation nominale par opposition au VLR qui est l'enregistreur de localisation des visiteurs.

Une base de données qui conserve des données statiques sur l'abonné et qui administre des données dynamiques sur le comportement de l'abonné.

Les informations sont ensuite exploitées par l'OMC. L'AUC est une base de données associée au HLR.

- **Fonctions du VLR**

L'enregistreur de localisation des visiteurs est une base de données associée à un commutateur MSC. Le VLR a pour mission d'enregistrer des informations dynamiques relatives aux abonnés de passage dans le réseau, ainsi l'opérateur peut savoir à tout instant

dans quelle cellule se trouve chacun de ses abonnés. Les données mémorisées par le VLR sont similaires aux données du HLR mais concernent les abonnés présents dans la zone concernée.

A chaque déplacement d'un abonné le réseau doit mettre à jour le VLR du réseau visité et le HLR de l'abonné afin d'être en mesure d'acheminer un appel vers l'abonné concerné ou d'établir une communication demandée par un abonné visiteur.

- **Fonction du MSC**

Les MSC sont des commutateurs de mobiles généralement associés aux bases de données VLR. Le MSC assure une interconnexion entre le réseau mobile et le réseau fixe public. Le MSC gère l'établissement des communications entre un mobile et un autre MSC, la transmission des messages courts et l'exécution du handover si le MSC concerné est impliqué. (Le handover est un mécanisme grâce auquel un mobile peut transférer sa connexion d'une BTS vers une autre (handover inter BTS) ou, sur la même BTS d'un canal radio vers un autre (handover intra BTS). On parle de transfert automatique inter/intra cellule.

Le commutateur est un nœud important du réseau, il donne un accès vers les bases de données du réseau et vers le centre d'authentification qui vérifie les droits des abonnés. En connexion avec le VLR le MSC contribue à la gestion de la mobilité des abonnés (à la localisation des abonnés sur le réseau) mais aussi à la fourniture de toutes les télé services offerts par le réseau : voix, données, messageries... Le MSC peut également posséder une fonction de passerelle, GMSC (Gateway MSC) qui est activée au début de chaque appel d'un abonné fixe vers un abonné mobile.

Un couple MSC/VLR gère généralement une centaine de milliers d'abonnés. Les commutateurs MSC sont souvent des commutateurs de transit des réseaux téléphoniques fixes sur lesquels ont été implantés des fonctionnalités spécifiques au réseau GSM.

- **Fonctions de l'AUC**

Le centre d'authentification AUC (Authentication Center) mémorise pour chaque abonné une clé secrète utilisée pour authentifier les demandes de services et pour chiffrer (crypter) les communications. L'AUC de chaque abonné est associé au HLR. Pour autant le HLR fait partie du « sous-système fixe » alors que l'AUC est attaché au « sous-système d'exploitation et de maintenance ».

C. Le sous-système d'exploitation et de maintenance – OSS

OSS (Operation Sub-System) permet à l'opérateur d'exploiter son réseau. 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.

- **Présentation de l'OMC et du NMC**

Deux niveaux de hiérarchie sont définis dans la norme GSM. Les OMC (Operations and Maintenance Center) et les NMC (Network and Management Centre).

Cette organisation a été définie afin de permettre aux opérateurs télécoms de gérer la multiplicité des équipements (émetteurs, récepteurs, bases de données, commutateurs ...) et des fournisseurs.

Le NMC permet l'administration générale de l'ensemble du réseau par un contrôle centralisé. Ainsi que les OMC permettent une supervision locale des équipements (BSC /MSC / VLR) et transmettent au NMC les incidents majeurs survenus sur le réseau. Les différents OMC assurent une fonction de médiation.

1.3.2.2 Le réseau GPRS (2.5G)

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

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 GPRS est en mode paquets. La figure 1.3 présente l'architecture du réseau GPRS.

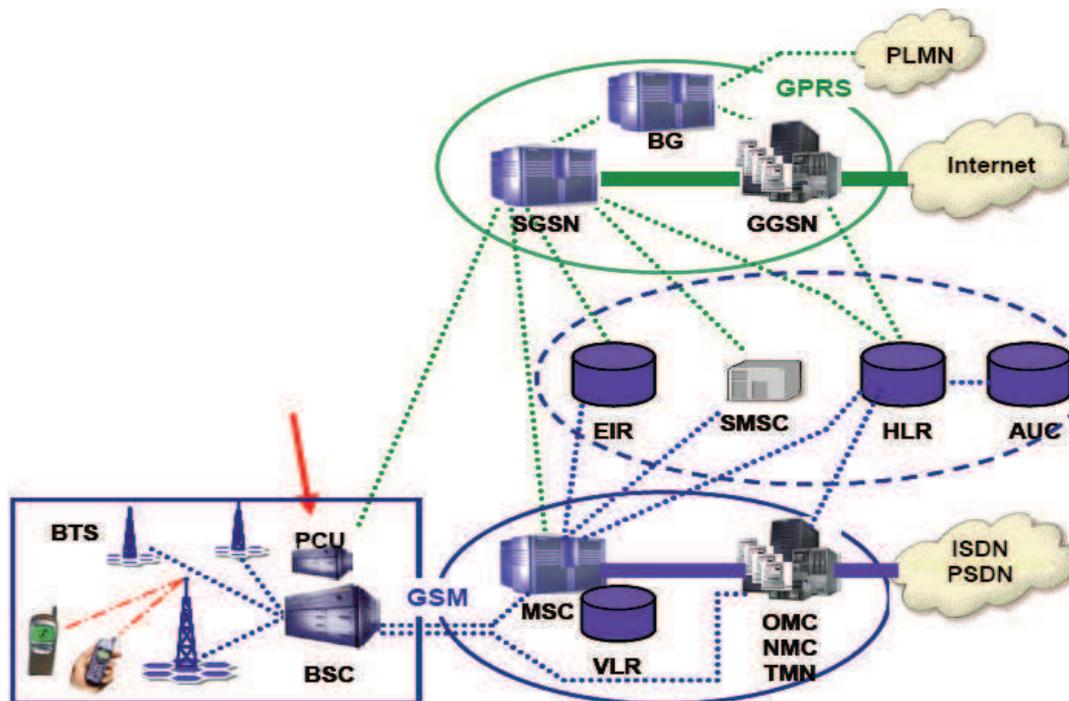


Figure 1.3 : Architecture du réseau GPRS [1].

Un réseau GPRS est un réseau IP. Qui est donc constitué de routeurs IP. L'introduction de la mobilité nécessite par ailleurs la précision de deux nouvelles entités :

A. Le nœud de service (SGSN)

Le nœud de service dénommé SGSN (Serving GPRS Support Node) est relié au BSS du réseau GSM. Le SGSN est en connexion avec l'ensemble des éléments qui assurent et gèrent les transmissions radio : BTS, BSC, HLR ...

Le SGSN joue un rôle de routeur, il gère les terminaux GPRS présents dans une zone donnée. Le SGSN est le « contrôleur » des terminaux GPRS présents dans sa zone de surveillance.

B. Le nœud de passerelle (GGSN)

Le nœud de passerelle dans le GPRS dénommé GGSN (Gateway GPRS Support Node) est relié à un ou plusieurs réseaux de données (Internet, autre réseau GPRS...). Le GGSN 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.

C. Le module BG pour la sécurité

Les recommandations introduisent le concept de BG (Border Gateway) qui permettent de connecter les réseaux GPRS via un réseau fédérateur et qui assurent 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 (Public Land Mobile Network) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux (par exemple entre deux réseaux de deux opérateurs concurrents).

D. 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 abonnés 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. Le réseau GSM constitue donc en effet une base pour la mise en place du réseau GPRS.

Le tableau 1.2 se compose de deux parties : la première partie présente les entités utilisées dans les deux réseaux GSM et GPRS et la deuxième partie présente les nouvelles entités ajoutées au réseau GSM ainsi de constituer le réseau GPRS.

| Entités GSM/GPRS | Logiciel | Matériel |
|--------------------------|-------------------|--|
| BTS | Extension requise | Aucun changement |
| BSC | Extension requise | Interface PCU |
| MSC/VLR | Extension requise | Aucun changement |
| HLR | Extension requise | Aucun changement |
| Nouvelles entités | | |
| MS | | Mobile station |
| SGSN | | Serving GPRS Support Node |
| GGSN | | Gateway GPRS Support Node |
| CGF | | Charging Gateway Function |
| OMC-G | | Operations And Maintenance Centre GPRS |

Tableau 1.1 : Evolution du GSM au 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 (Signal Sémaphore 7) qui est un protocole interne au réseau GPRS.

❖ 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.

❖ 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 modes :

- Etat de « repos », le mobile est éteint.
- Etat de « surveillance », le mobile est localisé au niveau de la zone de routage. Le mobile peut être appelé par le SGSN.
- Etat « prêt », 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 « prêt », le terminal ne monopolise pas de canal radio s'il n'y a pas de transmission ou de réception de données.

1.3.3 La troisième génération des téléphones mobiles 3G (UMTS)

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

1.3.3.1 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. Dans un premier temps le réseau UMTS devrait s'appuyer sur le réseau GPRS.

Le réseau UMTS vient se combiner aux réseaux déjà existants GSM et GPRS, qui apportent des fonctionnalités respectives de Voix et de 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.

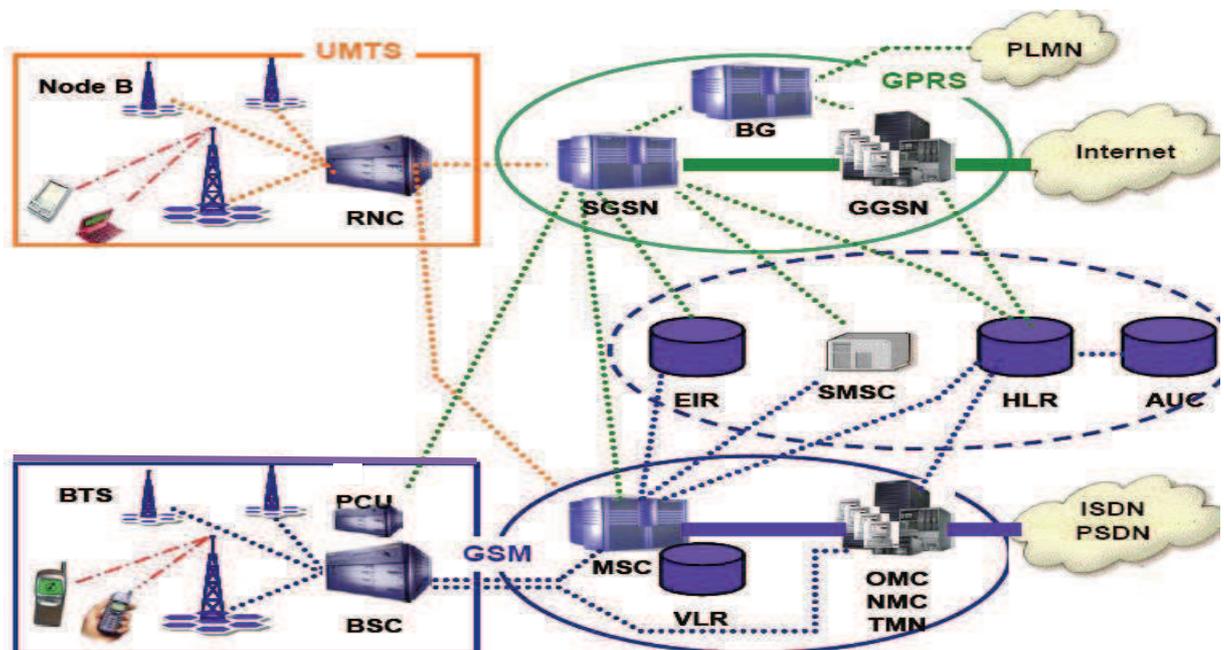


Figure 1.4 : Architecture du réseau UMTS [1].

A. Les fréquences de l'UMTS

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

L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) a désigné des bandes de fréquences pour les différents systèmes de l'UMTS qui sont :

- Duplex temporel TDD (Time Division Demultiplexed) : 1885 à 1920 MHz (uplink bande de 35Mz) et 2010 à 2025 MHz (downlink bande de 15 MHz).
- Duplex fréquentiel FDD (Frenquency Division Demultiplexed) 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.

B. Le débit de l'UMTS

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. Néanmoins, cette vitesse est nettement supérieure au débit de base GSM qui est de 9,6 kbit/seconde.

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. L'UMTS permet en particulier de transférer dans des temps relativement courts des contenus multimédia tels que les images, les sons et la vidéo.

Les nouveaux services concernent surtout l'aspect vidéo : Visiophonie, MMS Vidéo, Vidéo à la demande, Télévision.

1.3.3.2 Le mode de transmission dans le réseau UMTS

Ce réseau repose sur deux modes :

❖ Le mode circuit

Le domaine circuit permettra 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.

❖ Le mode paquet

Le domaine paquet permettra de gérer les services non temps réels. Il 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 2Mbps/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.

1.3.4 La quatrième génération des téléphones mobiles 4G (LTE)

La norme LTE-advanced impose des critères de base sur le débit et sur la latence, comme le résume le tableau suivant :

| | | 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 | 10ms (RTT) |
| | Session | 100 ms | 50ms |
| 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 1.2 : Différents Paramètres du LTE-Advanced.

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

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

1.3.4.1 Définition des réseaux LTE

Les services de communications mobiles sont en train de suivre la même évolution que celle des services fixes, c'est-à-dire une transition accélérée vers l'accès à très haut débit. Ce sont les réseaux 4G qui permettent de répondre aux demandes croissantes des usages mobiles, tant en termes de qualité des services offerts que de capacité d'écoulement du trafic par les réseaux.

Ces fréquences sont destinées au déploiement de réseaux mobiles à très haut débit, pour apporter au consommateur une capacité et une qualité de services supérieures aux offres actuelles d'internet mobile. La technologie LTE « Long Term Evolution » offre aux utilisateurs des débits de plusieurs dizaines de Mbit/s, largement supérieurs aux performances des technologies 3G et 3G+ actuellement déployées, ainsi que des latences plus faibles favorisant une meilleure interactivité.

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

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

1.3.4.2 Historique sur la 4G

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

En 2005, la technologie de transmission OFDMA (Orthogonal frequency-division multiple access) est choisie comme candidat pour la liaison descendante HSOPA, rebaptisée plus tard 3GPP Long Term Evolution (LTE) de l'air l'interface E-UTRA. En Novembre 2005, KT démontre le service mobile WiMAX à Busan, Corée du Sud.

La société japonaise NTT DoCoMo (Nippon Telegraph & Telephone) 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.

1.4 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.

Ainsi, la mise en œuvre du service GPRS implique une évolution matérielle et logiciel s'ajoutant au réseau GSM déjà existants. L'évolution du GSM vers GPRS prépare à l'introduction des Réseaux de troisième génération l'UMTS. En ce qui concerne l'infrastructure, des modifications doivent être effectuées pour l'intégration du GPRS ou l'UMTS par l'ajout d'autres équipements, et le chargement de logiciels.

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

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

CHAPITRE 2

Etude détaillée des réseaux 4G

2.1 Introduction

La planification d'un réseau mobile consiste à déterminer l'ensemble des composantes matérielles et logicielles de ces systèmes, les positionner, les interconnecter et les utiliser de façon optimale, en respectant, entre autres, une série de contraintes de qualité de service. Ce processus qui peut être à la fois long et coûteux a lieu avant la mise en opération du réseau. Pour les réseaux de première génération (1G), de deuxième génération (2G) et de troisième génération (3G),

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

2.2 LTE (4G)

La technologie LTE (Long Term Evolution) ou la 4G s'appuie sur un réseau de transport à commutation de paquet IP. Elle n'a pas prévu de mode d'acheminement pour la voix, autre que la VoIP, contrairement à la 3G qui transporte la voix en mode circuit.

Le 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 bande 20 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « downlink », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s.

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 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 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.

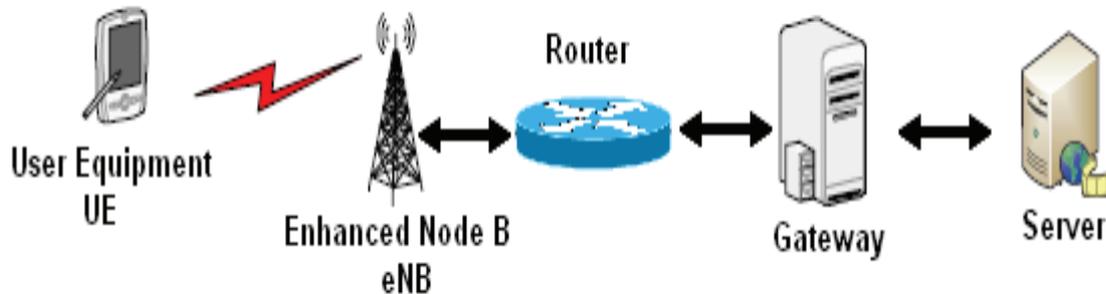


Figure 2.1 : Présentation générale sur le système LTE [2].

2.3 Buts de la 4G

La 4^{ème} génération 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.

Les principaux objectifs visés par les réseaux de 4^{ème} génération sont les suivants :

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

2.4 Architecture

Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences hertziennes, y compris dans les cellules radio mitoyennes, grâce aux codages radio OFDMA et SC-FDMA. La figure 2.2 présente l'architecture du réseau lte

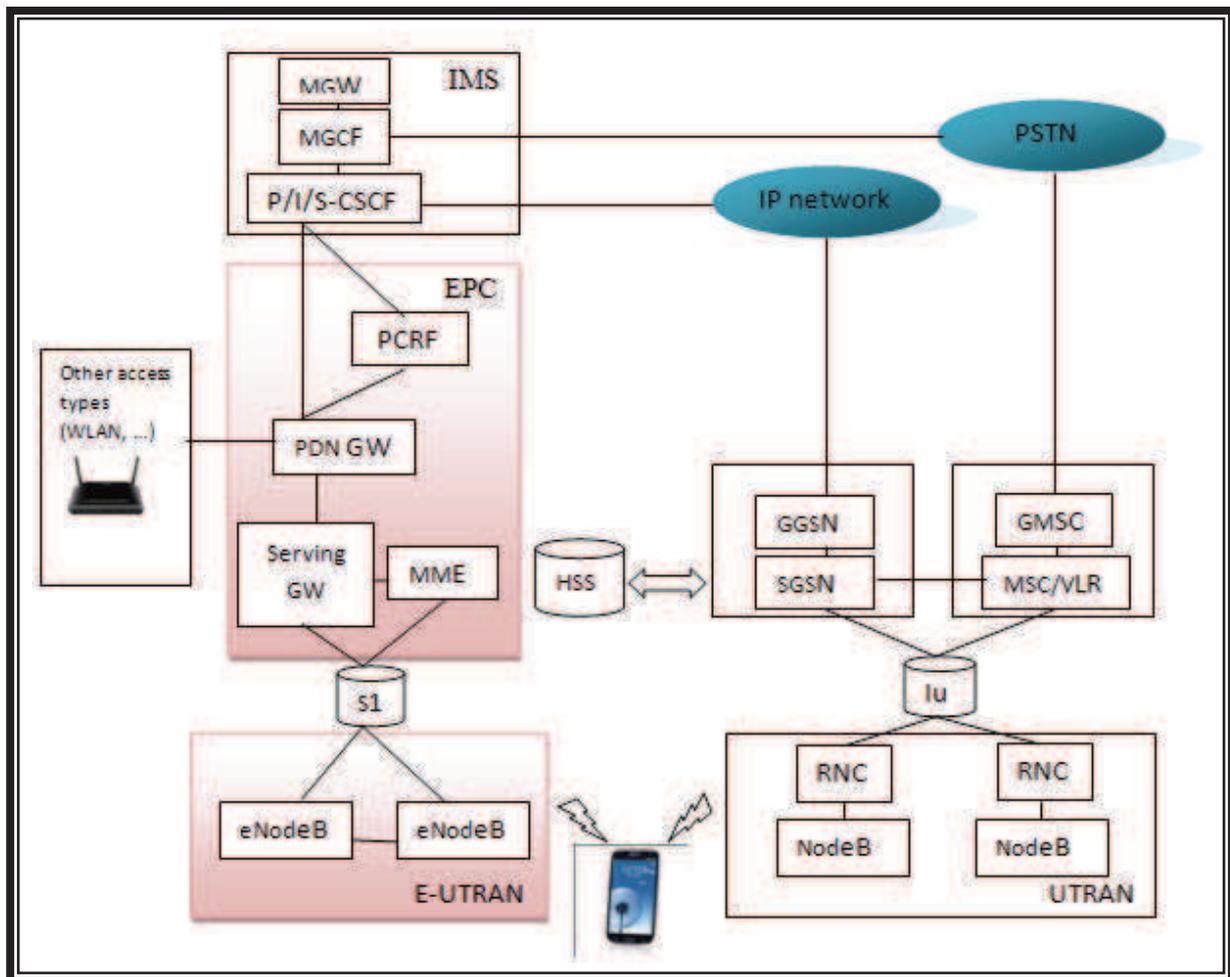


Figure 2.2 : Architecture générale du LTE.

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

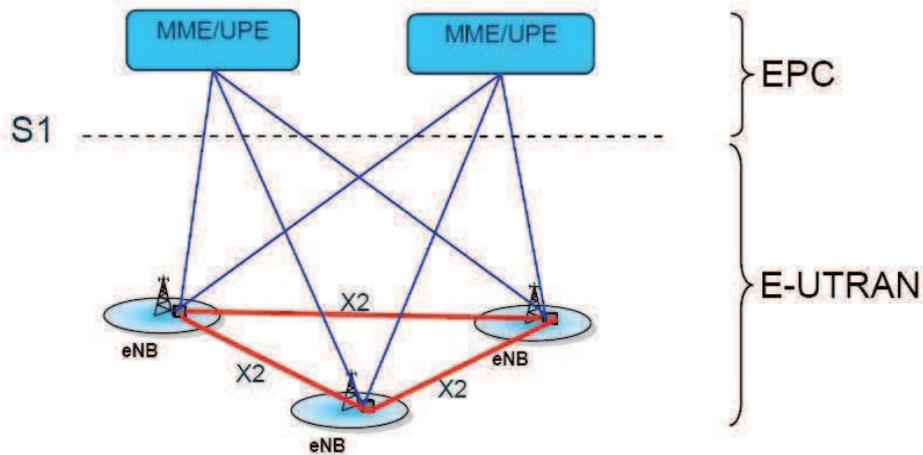


Figure 2.3: Architecture d'EPS (Evolved Packet System) [3].

2.4.1 EPC : Evolved Packet Core

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

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

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

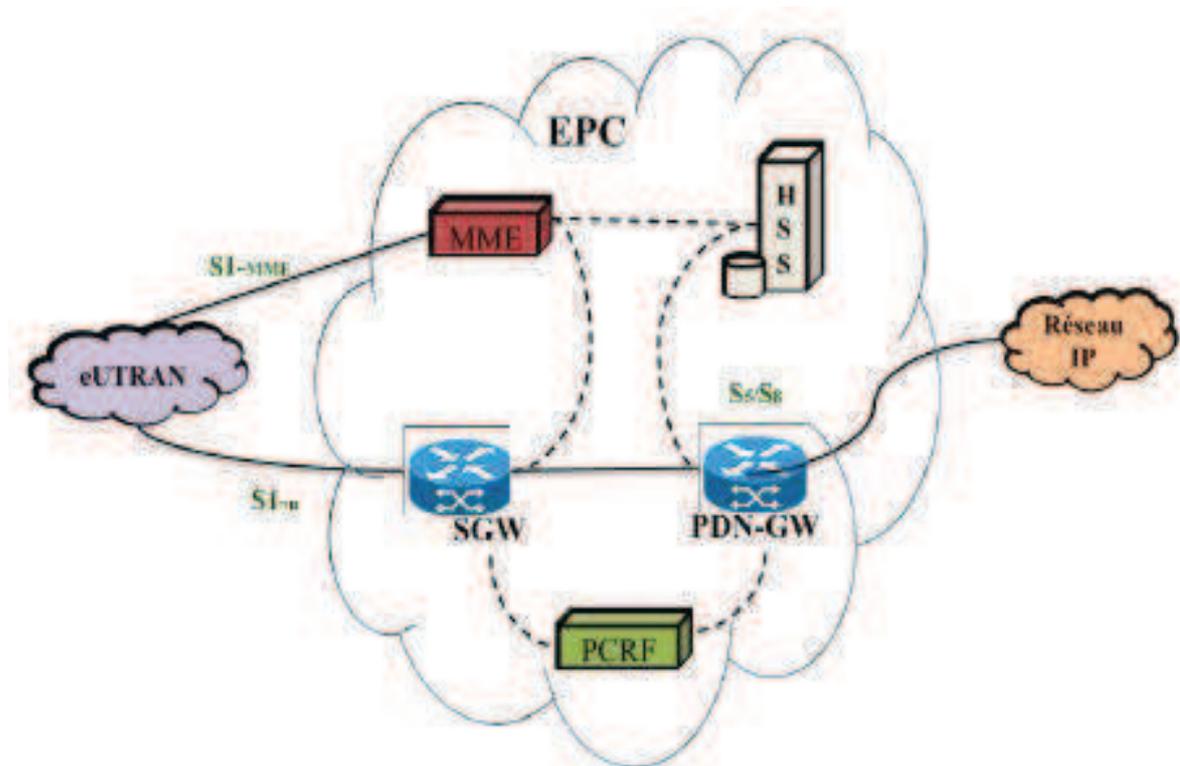


Figure 2.4 : Architecture du réseau cœur EPC [4].

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

Le cœur réseau est composé de deux parties séparées :

2.4.1.1 La partie Signalisation

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

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

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

Cette partie est responsable de la localisation et la poursuite du terminal mobile (UE) entre les appels et la sélection d'une bonne S-GW (Serving-GetWay) à travers une connexion. Comme elle réalise le dernier point de la protection par codage, donc par conséquent c'est le

point qui valide l'interception de signalisation. Ainsi, qu'elle contrôle le signal entre le UE (Utilisateur Equipment) et le réseau cœur, et assure l'établissement, la maintenance, et l'élargissement de la porteuse radio services.

❖ **HSS : Home Subscriber Service**

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

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

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

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

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

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

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

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

❖ **P-GW: Packet-Switch GetWay**

Packet-Switch GetWay (P-GW) Fournit la connectivité au terminal mobile (UE) vers le paquet externe du réseau de l'information et alloue les adresses IP d'un UE, ainsi que les

applications de la QoS, et maintient la connexion mobile entre LTE/UMTS/GSM systèmes et le non 3GPP système.

❖ SGSN : Serving GRPS Support Nom

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

2.4.2 La partie radio eUTRAN

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

❖ eNodeB

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

2.4.3 La partie IMS (IP Multimedia Sub-system)

❖ Définition

L'IP Multimedia Sub-system (IMS) est une architecture standardisée NGN (Next Generation Network) pour les opérateurs de téléphonie, qui permet de fournir des services multimédias fixes et mobiles. Cette architecture utilise la technologie VoIP ainsi qu'une implémentation 3GPP standardisée.

Les systèmes téléphoniques existants (commutation de paquets et commutation de circuits) sont pris en charge. L'objectif 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 s'effectue entre deux utilisateurs IMS, entre un utilisateur IMS et un internaute, ou bien encore entre deux internautes, est établie en utilisant exactement le même protocole. De plus, les interfaces de développement de services sont également basées sur les protocoles IP. C'est pour cela qu'IMS fait véritablement converger l'Internet et le monde de la téléphonie cellulaire ; Il utilise les technologies cellulaires pour fournir un accès en tout lieu, et les technologies Internet pour fournir les services.

❖ Exemples de services de l'IMS

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

2.5 Comparaison entre les réseaux 3G et 4G

Appréhender les évolutions et le fonctionnement des réseaux mobiles en évolution vers des technologies LTE (Long Term Evolution). La figure suivante montre une simple comparaison entre l'architecture du réseau de troisième génération et celui de la quatrième génération.

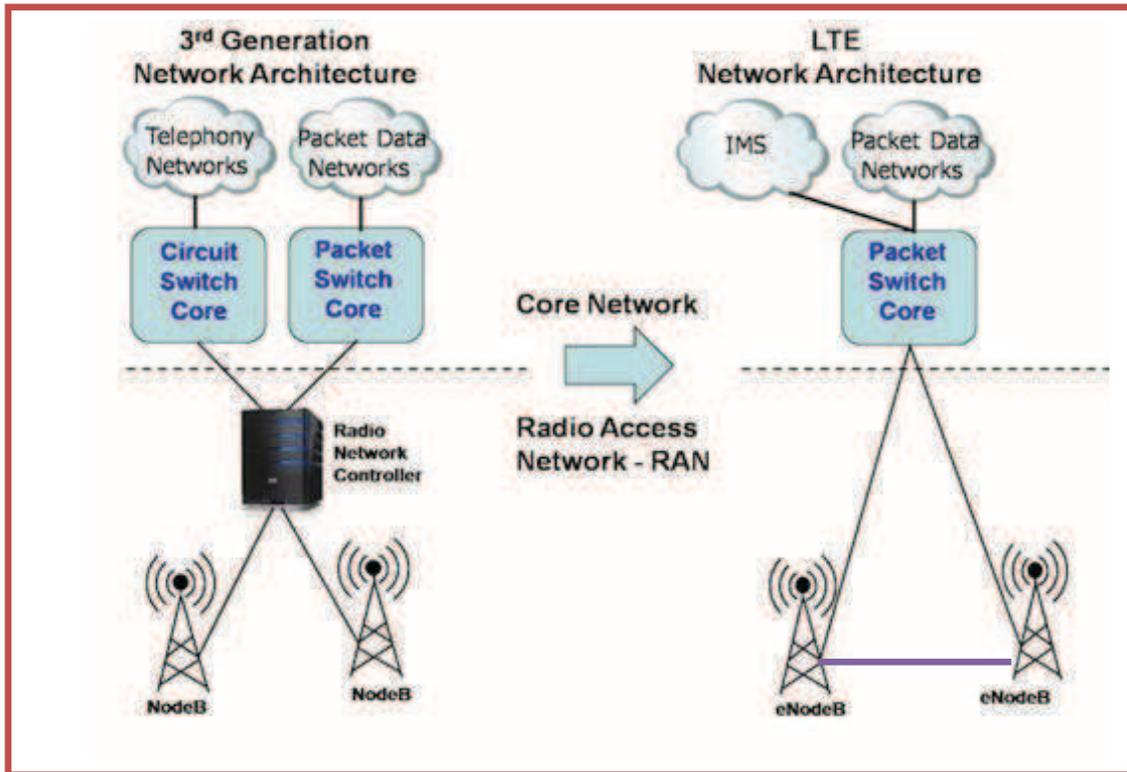


Figure 2.5 : Comparaison 3G / 4G.

Les MME (Mobility Management Entity) remplacent les dispositifs PDSN / SGSN et BCS/RNC.

Les eNodeBs remplacent les BTS / NodeB Serving.

Les PDN (Packet Data Network) remplacent les GGSN.

2.6 Les caractéristiques fondamentales de la 4G

La 4G permet effectivement d'avoir des performances de Qos très fiables, en citant par la suite quelques paramètres :

2.6.1 Débits et fréquences du réseau 4G

L'évolution des débits suit une progression semblable à celle de la capacité de calcul. Chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmente les débits et suscite une attente de débits supérieurs. Il était ainsi également clair dès 2004 que le LTE devrait fournir de très hauts débits. Au-delà des limitations capacitaires, le débit fourni à un utilisateur dépend de ses

conditions radio, liées en particulier à sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la ressource spectrale disponible.

L'établissement des standards de performances communément admis pour les réseaux 4G : 100 Mbit/s sur le lien radio descendant (antenne relais vers mobile), et 50 Mbit/s maximum sur le lien montant (mobile vers antenne relais). La technologie LTE fonctionne dans une variété de fréquences selon la zone géographique couverte : 700 MHz aux Etats-Unis pour le réseau de Verizon Wireless, 2,6 GHz et 800 MHz en Europe, et 2,1 GHz pour le réseau japonais de NTT Docomo (opérateur japonais).

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

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

Ces chiffres supposent un UE de référence comprenant :

- deux antennes en réception.
- une antenne en émission.

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

L'utilisateur peut ainsi accéder à ses services favoris chez lui ou hors de son domicile avec une fluidité homogène. En complément, le débit est jugé comme un facteur de comparaison entre opérateurs et une course aux débits est en marche dans certains pays. Enfin, des débits toujours plus élevés ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services, sources de revenus et/ou de différenciation pour les opérateurs.

2.6.2 Latence

A. Latence du plan de contrôle

L'objectif fixé pour le LTE est d'améliorer la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, via un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager.

B. Latence du plan usager

La latence du plan usager est définie par le temps de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE et la couche IP d'un nœud du réseau d'accès ou inversement. En d'autres termes, la latence du plan usager correspond au délai de transmission d'un paquet IP au sein du réseau d'accès. Le LTE vise une latence du plan usager inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille.

Le tableau 2.1 présente les deux types de latence existante dans le réseau LTE, ainsi que leurs différences dans les domaines de duplexage (FDD et TDD).

| <i>Latence du plan usager (ms)</i> | | <i>Latence du plan de contrôle pour la transition de l'état de veille à actif (ms)</i> | |
|--|----------------------------|--|------------|
| <i>FDD</i> | <i>TDD</i> | <i>FDD</i> | <i>TDD</i> |
| <5 | ≤ 6.2 EN DL ≤ 9.5 EN UL | 80 | 85 |

Tableau 2.1 : La latence pour chaque multiplexage.

2.6.3 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. Notons que le débit crête est proportionnel à la largeur de bande. Les modes de duplexage FDD et TDD doivent être pris en charge pour toutes ces largeurs de bande.

2.6.4 Codage et sécurité

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

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

2.6.5 Multiplexage

Il existe deux modes de multiplexage de fréquences :

Les spécifications LTE prévoient le fonctionnement en mode dual : multiplexage de fréquences (FDD) et multiplexage temporel (TDD). En mode FDD (Frequency Division Duplexing), l'émission et la réception se font à des fréquences différentes. En mode TDD, l'émission et la réception transitent à une même fréquence, mais à des instants différents.

C'est le premier mode (FDD) qui fait l'objet de l'appel à candidatures en France. C'est aussi celui qui est actuellement mis en œuvre dans les équipements télécoms et déployé dans la plupart des premiers réseaux 4G LTE autorisés. Le deuxième mode (TDD) fonctionne sur des bandes de fréquences distinctes qui feront l'objet d'attributions ultérieures.

2.6.5.1 Structure d'une trame LTE

Une trame LTE dure 10 ms. Elle est découpée en 10 sous trames d'une durée de 1 ms. Chaque sous trame est divisée en deux slots de 0,5ms. Un slot dure donc 0,5 ms, durée

pendant laquelle est transmis 7 symboles par bande OFDM. Or, nous avons vu qu'il y avait 12 bandes.

Par conséquent, $7 \text{ symboles} * 12 \text{ bandes} = 84 \text{ symboles}$ sont transmis en 0,5 ms.

La figure 2.6 présente la trame radio dans le réseau LTE.

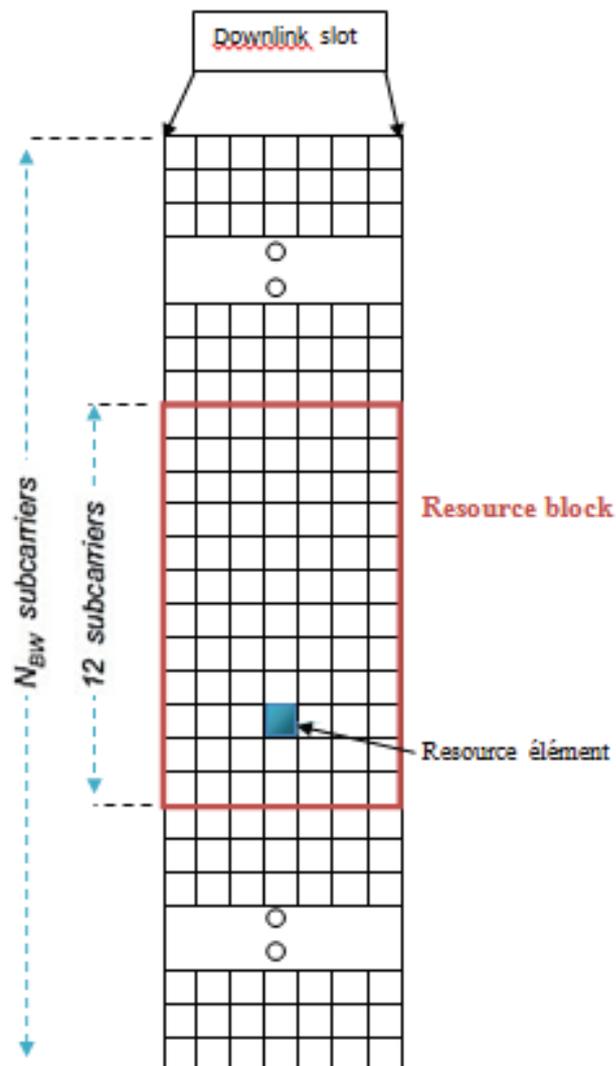


Figure 2.6 : Le fonctionnement d'une trame radio.

1 symbole peut transmettre 1 bit à 6 bits selon la modulation choisie (QPSK à 128 QAM). Par exemple, 1 symbole représente un carton, et dans un carton nous pouvons avoir une boîte ou 6 boîtes. Si nous souhaitons transporter le plus de boîtes, nous avons intérêt à mettre 6 boîtes par carton, ce qui fragilise encore plus le transport, nous favoriserons donc le 128 QAM

(6 bits à transmettre) si le mobile et la station de base sont proches (transport peu éloigné entre le point A et le point B).

Les transmissions downlink et uplink sont organisés en deux types de structures qui sont :

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

A. Structure de type 1 : FDD

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

Cette technique permet d'émettre et de recevoir simultanément, c'est son principal avantage face à l'autre technique majeure de duplexage, le Time Division Duplexing (TDD). La figure 2.7 présente la trame FDD.

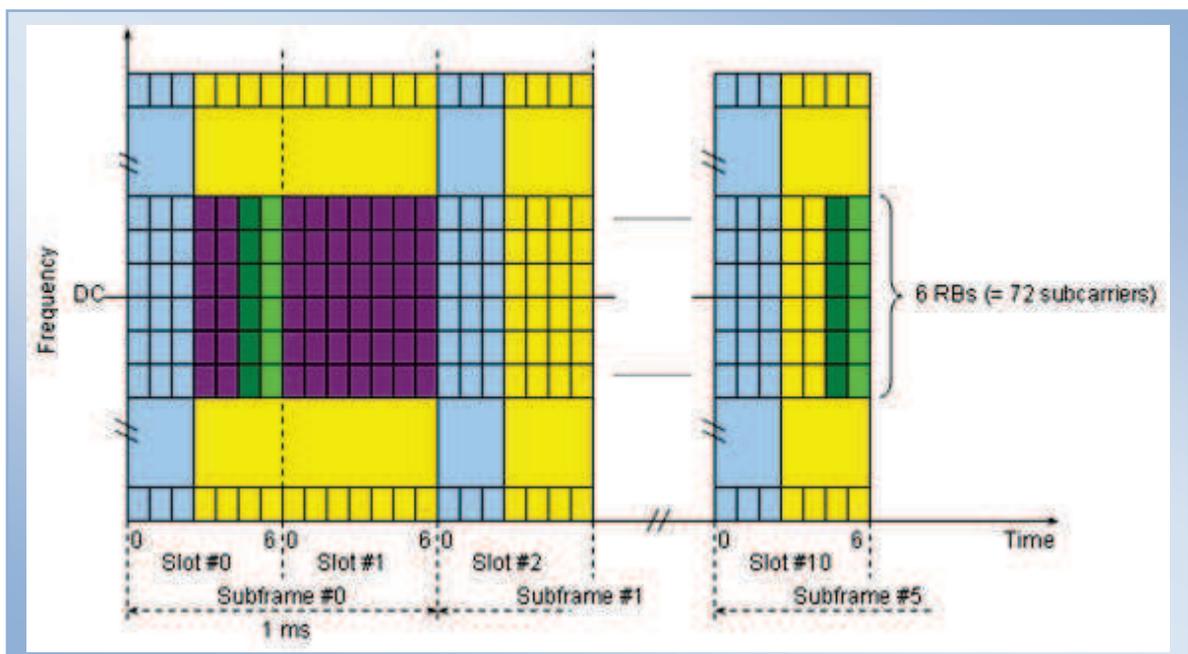


Figure 2.7 : Structure de la trame radio.

Nous pouvons représenter un signal LTE dans une carte à deux dimensionnelle comme indiqué dans la figure 2.7. L'axe horizontal est le domaine de temps et l'axe vertical est le

domaine de fréquence. L'unité minimale sur l'axe vertical est un transporteur sous et l'unité minimale sur l'axe horizontal est le symbole. Tant Pour le domaine de temps que le domaine de fréquence, il y a hiérarchies multiple des unités, signifiant une combinaison multiple d'une unité plus petite devient de plus grandes unités.

B. Structure de type 2 : TDD

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

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

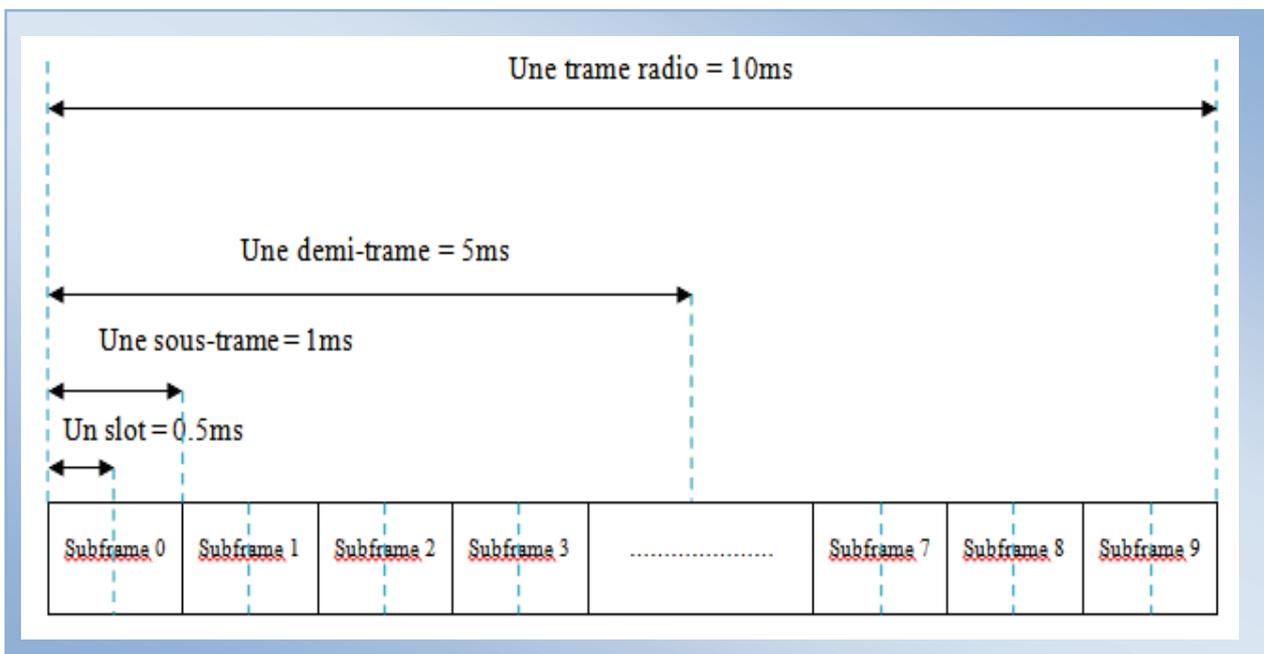


Figure 2.8 : Les slots d'une trame radio.

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

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

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

Tableau 2.2 : Les bandes de FDD.

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

Tableau 2.3 : Les bandes de TDD.

2.6.6 La mobilité

La mobilité est une fonction clé pour les réseaux mobiles. Le LTE vise à rester fonctionnel pour des UE se déplaçant à des vitesses élevées (jusqu'à 350 km/h, et même 500 km/h en fonction de la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour des vitesses de l'UE faibles (entre 0 et 15 km/h). L'effet des handovers intra-système (procédure de mobilité entre deux cellules LTE) sur la qualité vocale est moins qu'en GSM, ou équivalent. Le système intègre également des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets lors d'un handover intra-système [5].

2.6.7 Modulation adaptative et codage

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

Modulations Downlink : QPSK, 16QAM et 64QAM

Modulations Uplink : QPSK et 16QAM

2.6.7.1 La modulation 16QAM

La modulation d'amplitude en quadrature (QAM) est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature (une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée [6].

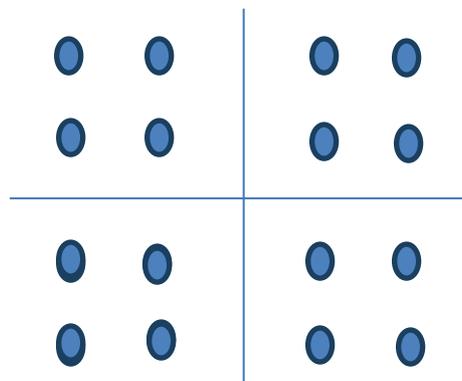


Figure 2.9 : Constellation QAM à 16 états [6].

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

La figure 2.9 montre la constellation, qu'elle est en conséquence le nombre de bits pouvant être transmis en une fois, peut être augmentée pour un meilleur débit binaire, ou diminuée pour améliorer la fiabilité de la transmission en générant moins d'erreurs

binaires. Le nombre de points de la constellation est indiqué avant le type de modulation QAM.

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

2.6.7.2 La modulation QPSK

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

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

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

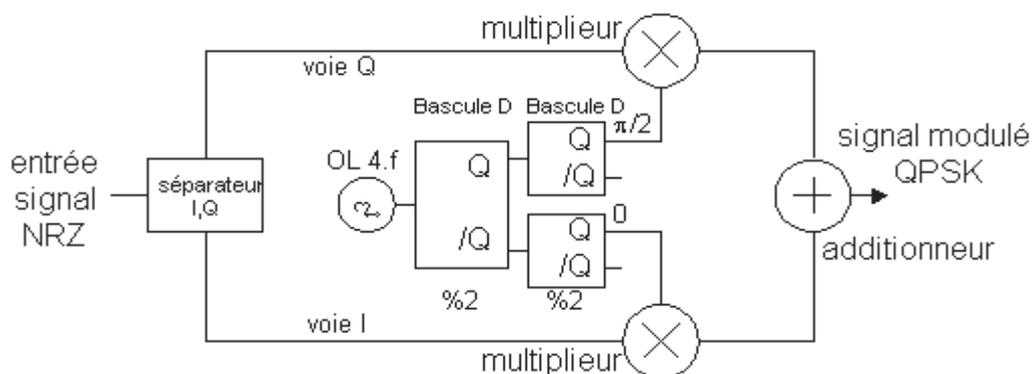


Figure 2.10 : Schéma du principe du modulateur QPSK [6].

Les états de phases du signal modulé se représentent en coordonnées polaires dans le plan I, Q. Suivant les combinaisons de ces derniers, on obtient alors le diagramme de communément constellation [6].

2.6.8 Les types de transmission utilisée dans la 4 G

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

2.6.8.1 OFDMA

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

❖ Origine et avantages

L'OFDMA et sa variante SC-FDMA sont dérivés du codage OFDM (utilisé par exemple sur les liens ADSL et dans les réseaux WiFi), mais contrairement à l'OFDM, l'OFDMA est optimisé pour l'accès multiple, ainsi qu'il est compatible avec la technique des antennes MIMO.

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

❖ Principes

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

Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur

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

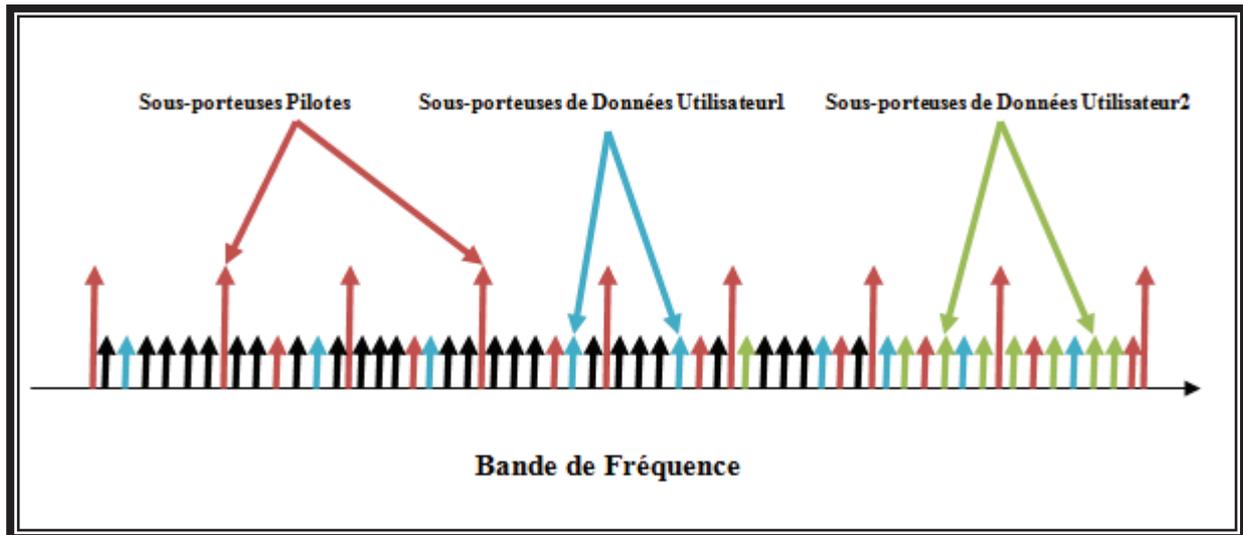


Figure 2.11 : Les porteuses de l'OFDMA.

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

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

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

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

Ce codage est associé dans les réseaux LTE à des modulations de type QPSK ou QAM utilisées sur chacun des canaux, pour s'adapter aux conditions radio locales et à la distance séparant l'antenne de chaque terminal [6].

2.6.8.2 SC-FDMA

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

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

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

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

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

2.6.8.3 Comparaison entre l'OFDMA et le SC-FDMA

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

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

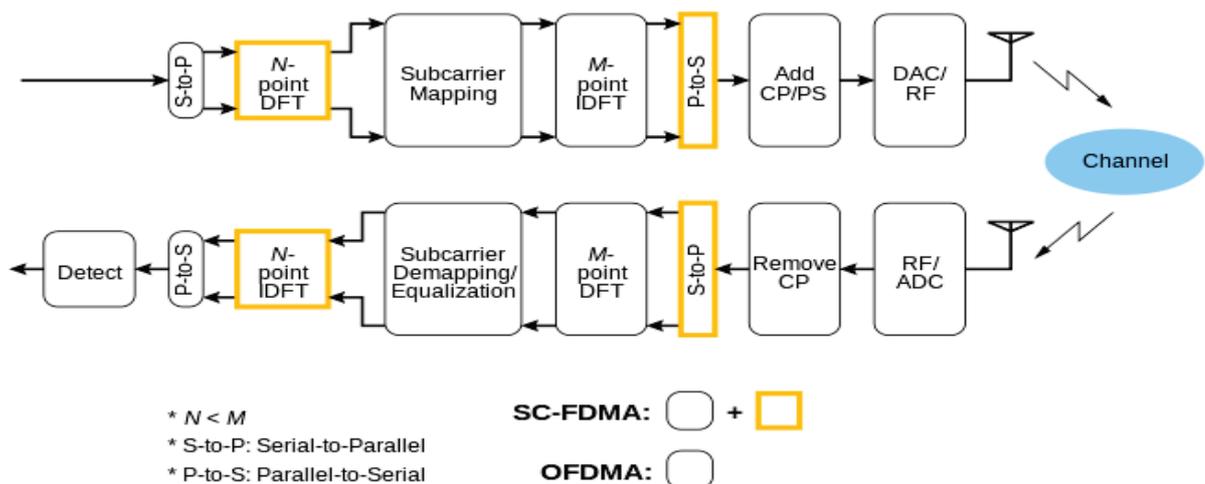


Figure 2.12 : Similitude entre une chaîne OFDMA et SC-FDMA [7].

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

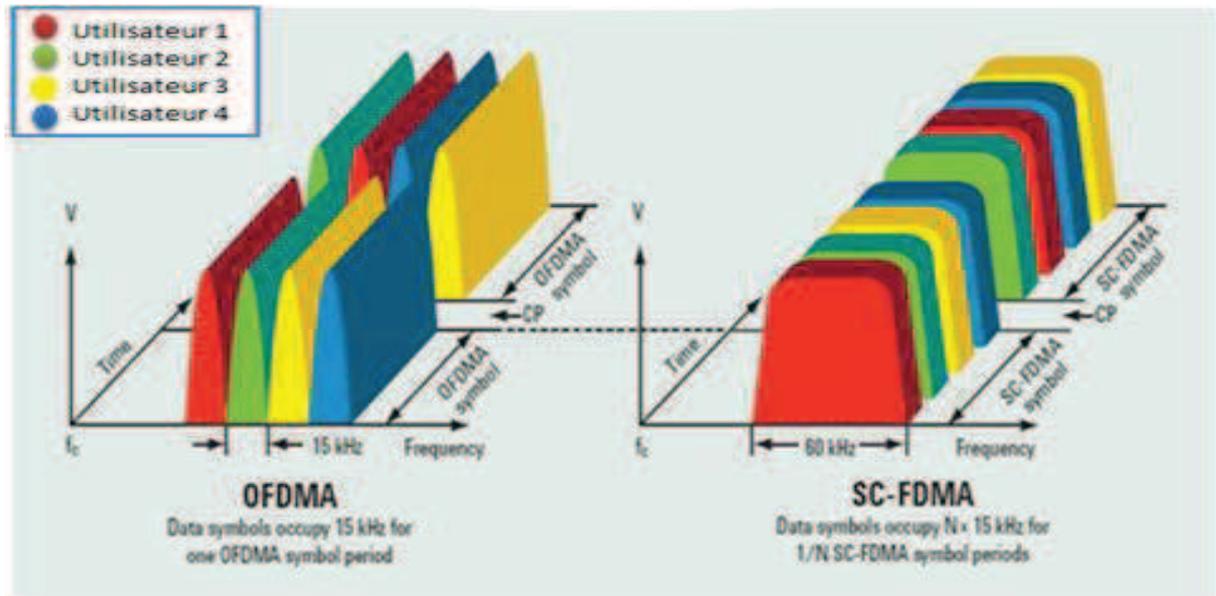
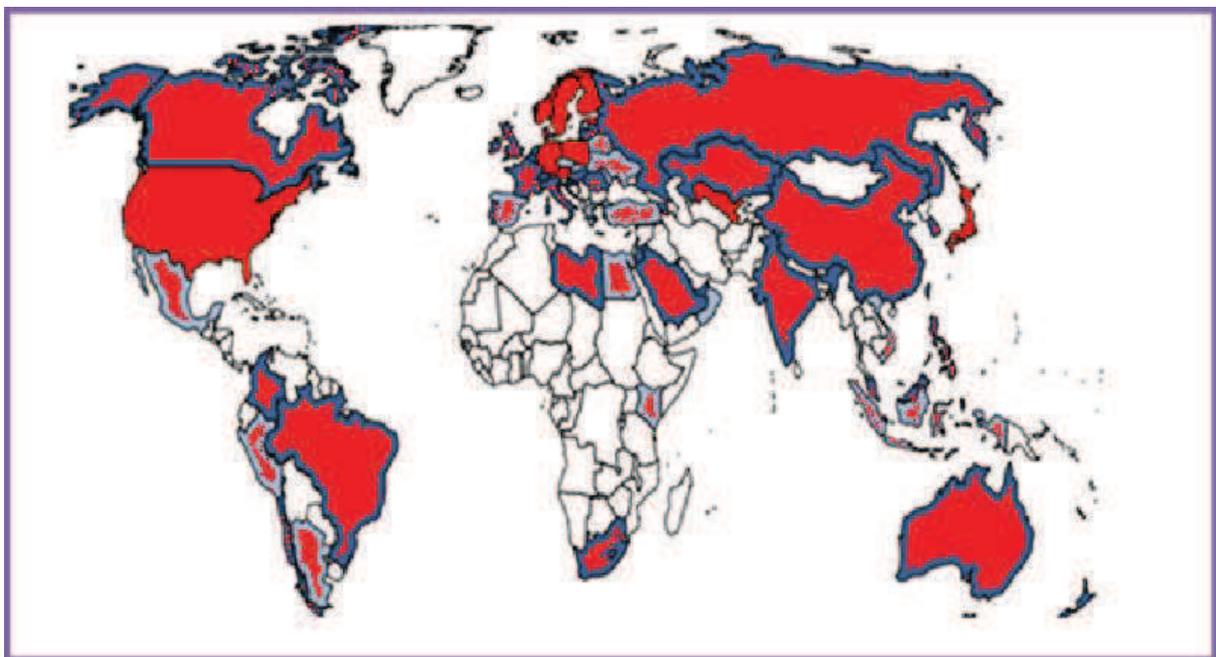


Figure 2.13 : La différence entre OFDMA et SC-FDMA [8].

2.7 La 4G dans le Monde

Avec 4,8 milliards d'utilisateurs GSM et UMTS-HSPA dans le monde, à savoir aussi des systèmes basés sur des normes 3GPP, le LTE est bien placé pour s'imposer face à d'autres normes de radiocommunication mobile, comme le CDMA2000/EV-DO ou l'IEEE/WiMAX.



■ Pays avec réseaux commerciaux de 4G

Figure 2.14 : Déploiement de la 4G dans le monde [9].

2.7.1 Europe

L'Europe (via la CEPT) a fait le choix de réserver les bandes de fréquence des 800 MHz (issue du dividende numérique) et des 2 600 MHz pour les réseaux mobiles 4G, mais dans beaucoup de pays les opérateurs ont aussi la possibilité de réutiliser la bande de fréquence des 1800 MHz initialement attribuée au GSM (2G) ; cette bande de fréquence était la plus utilisée dans les réseaux 4G/LTE européens fin 2012.

La première commercialisation d'une offre mobile en 4G utilisant le standard LTE a été lancée dans les villes de Stockholm (Suède) et Oslo (Norvège) le 15 décembre 2009 par l'opérateur téléphonique TeliaSonera.

Samsung a commercialisé le premier téléphone compatible 4G LTE sous la référence SCH-R900, durant le second semestre 2010. La connexion peut également se faire depuis un ordinateur et une clé 4G LTE fabriquée par Samsung Electronics.

Les déploiements à grande échelle en Europe sont attendus à partir de 2013.

2.7.1.1 Portugal

En mars 2012, les opérateurs télécoms portugais TMN, Optimus et Vodafone France commercialisent leurs offres 4G LTE. Ils annoncent 80 % de la population couverte avant fin 2012.

2.7.1.2 Suisse

Le 29 novembre 2012, Swisscom lance officiellement la 4G/LTE dans 29 grandes villes et stations de sports d'hiver de Suisse : Arosa, Bâle, Berne, Bienne, Crans Montana, Davos, Fribourg, Genève, Grindelwald, Gstaad, Interlaken, Lausanne, Loèche-les-Bains, Locarno, Lugano, Lucerne, Pontresina, SaasFee, Silvaplana, Sion, Saint-Gall, Saint-Moritz, Thoune, Verbier, Wengen, Winterthour, Zermatt, Zoug, Zurich.

Orange et Sunrise devraient suivre dans le courant de l'année 2013.

2.7.1.3 Belgique

Le 5 novembre 2012, Proximus (Belgacom) lance officiellement la 4 G dans 5 grandes villes belges : Namur, Liège, Anvers, Gand et Louvain. Dans une moindre mesure, la 4G de Belgacom est également disponible à Mons, Wavre, Hasselt et Oude-Hervelee.

Les premiers tests par les clients montrent une vitesse record de 53 Mbps.

2.7.1.4 France

En France, l'ARCEP a attribué des licences 4G LTE aux opérateurs en fin 2011. Les enchères ont rapporté à l'État plus de 3,5 milliards d'euros.

Le résultat du premier appel d'offres 4G pour la bande de fréquence des 2 600 MHz se répartit comme suit :

Bouygues Telecom obtient 15 MHz duplex pour 228 011 012 €.

Free Mobile obtient 20 MHz duplex pour 271 000 000 €.

Orange obtient 20 MHz duplex pour 287 118 501 €.

SFR obtient 15 MHz duplex pour 150 000 000 €. La filiale de Vivendi est par ailleurs le seul opérateur à ne pas avoir souscrit d'engagement à accueillir des opérateurs virtuels (MVNO) sur son réseau.

Soit un total de 936 129 513 €.

Le résultat du second appel d'offres 4G pour la bande des 800 MHz, libérée par l'arrêt de la télévision hertzienne analogique (dividende numérique), se répartit ainsi :

Bouygues Telecom obtient 10 MHz duplex pour 683 087 000 €.

Orange obtient 10 MHz duplex pour 891 000 005 €.

SFR obtient 10 MHz duplex (2 blocs de 5 MHz) pour 1 065 000 000 €.

Free Mobile n'obtient pas de fréquences dans cette bande mais a un droit d'accès au roaming sur le réseau 800 MHz de SFR.

Soit un total de 2 639 087 005 €.

Répartition totale des fréquences affectées à la 4G en France : 30 % pour Orange, 25 % pour SFR, 25 % pour Bouygues, 20 % pour Free Mobile.

Après avoir ouvert un premier réseau 4G/LTE au mois de juin 2012 à Marseille puis Lyon, Nantes et Lille en novembre 2012, Bordeaux, La Rochelle, Chartres, Orléans, Dunkerque, Nancy, Metz, Clermont-Ferrand, Grenoble et Annecy devraient être les prochaines villes 4G Orange à partir du 4 avril 2013.

2.7.2 Asie

2.7.2.1 Thaïlande

La Thaïlande a fait le choix des bandes de fréquence 1 800 MHz et 2 300 MHz.

2.7.2.2 Japon

Alors que les réseaux mobiles LTE (Long Term Evolution) commencent à peine à être lancés en tant que réseaux commerciaux, l'opérateur japonais NTT DoCoMo se prépare déjà à expérimenter la génération suivante, LTE-Advanced, hors de ses laboratoires.

L'opérateur DoCoMo a obtenu le feu vert du bureau des télécommunications rattaché au Ministère de l'Intérieur japonais pour mener des expérimentations LTE-Advanced sur le terrain via une pré-licence qui lui permettra d'exploiter des fréquences sur les villes de Yokosuka et Sagami-hara.

Ce pilote permettra de tester des équipements LTE-Advanced en intérieur comme en extérieur. DoCoMo a déjà réalisé une série d'expérimentations en simulant un environnement radio perturbé par des obstacles, modélisant des configurations telles qu'on peut les trouver dans les villes, mais dans ses centres R&D, où il a déjà réussi à obtenir des débits descendant de 1 Gb/s et montant de 200 Mb/s.

2.7.2.3 Singapour

Singapour est précurseur en termes de 4G. Le deuxième opérateur de télécommunications du pays, StarHub, a lancé début juillet 2012 son réseau 4G dans le Central Business District (CBD) ainsi qu'à l'aéroport. Dans la foulée, l'opérateur historique SingTel et le troisième opérateur M1 prévoient tous de lancer leur réseau 4G prochainement.

2.7.3 États-Unis

Les États-Unis ,ont fait le choix des bandes de fréquence duplex (FDD) 700 MHz et 1700-2 100 MHz (fréquences dites « AWS (en) »).

Aux États-Unis, la société Verizon Wireless a lancé une offre commerciale 4G LTE fin 2010 ; elle a déjà, en fin 2012, plus de 16 millions d'abonnés LTE8 ce qui en fait le leader mondial (par le nombre d'abonnés) devant le japonais NTT DoCoMo et les opérateurs coréens KT et SK Telecom. Le 2^e opérateur américain AT&T a lui aussi lancé une offre LTE mi 2011.

2.8 Conclusion

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

Dans le chapitre suivant, nous décrivons les performances de la qualité de service de la technologie LTE. Ainsi, nous présenterons les différentes interactions entre elles.

CHAPITRE 3

Généralités sur la Qualité de Service

3.1 Introduction

Chaque réseau à mettre en place que ce soit en télécommunication, en informatique ou autre, le plus grand objectif est d'avoir les meilleures performances, pour cela le taux de Qualité de Service doit être au minimum au niveau des exigences des utilisateurs, pour leur entière satisfaction.

Le principal objectif d'un opérateur est de regrouper le plus grand nombre d'abonnés pour pouvoir augmenter son chiffre d'affaire, pour cela chaque opérateur mobile devra se focaliser sur les demandes de ces clients ainsi pour augmenter son taux de popularité, pour ça il doit se préoccuper sur l'amélioration de son réseau (couverture, ...) et des paramètres de la Qualité de Service (débit, latence, ...).

A travers ce chapitre, nous allons étudier les différents paramètres de la QoS et les performances des réseaux 4G.

3.2 Définition

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

Elle regroupe un ensemble de technologies mise en œuvre pour assurer des débits suffisants et constants sur tous les types de réseaux [10].

3.3 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 [11].

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.

3.4 Paramètres de la QoS

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

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

3.4.1 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.

3.4.2 La perte de paquets

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

3.4.3 Le délai de transit (latence)

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

3.4.4 La gigue

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

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

3.4.6 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, qui modifie le débit des applications TCP en fonction des conditions de charge du réseau et du niveau de priorité des applications, et la gestion des files d'attente personnalisées, qui affecte les flux entrants aux files d'attentes qui leur correspondent.

3.5 Les informations utilisées pour assurer la QoS

Pour mettre en place la qualité de service, il est nécessaire de ce positionné sur la reconnaissance des différents services qui sont les suivants :

- La source et la destination du paquet.
- Le protocole utilisé (UDP/TCP/etc.).
- Les ports de source et de destination dans le cas TCP et UDP.

- La validité du routage (par ex. gestion des pannes dans un routage en cas de routes multiples)
- La bande passante consommée.
- Le temps de latence.

3.6 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 (lorsque ce n'est pas déjà le cas) des applications multimédia 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.

Or 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 1980, l'IETF 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 (ou QoS, Quality Of Service) que nous allons vous présenter : le modèle INTSERV, et le modèle DIFFSERV [12].

3.6.1 DiffServ

C'est un protocole qui consiste à affecter des priorités au niveau d'un champ de l'entête IP appelé DSCP (DiffServ Control Protol). L'identification et le marquage du paquet est donc fait en entrée de réseau et les nœuds intermédiaires ou de cœur du réseau se contente d'appliquer les politiques de gestion du flux en fonction des priorités des paquets. L'approche DiffServ permet un déploiement et une exploitation simplifiée du réseau.

3.6.2 IntServ

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 réservation 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 (Differentiated Services) est une approche permettant la gestion de la QoS sur un réseau IP [12].

3.7 Qualité de service dans le réseau 4G

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

- **Le bearer EPS**

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

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

Il existe deux types de bearers EPS :

- Le Default bearer, le premier bearer établi lorsque le terminal se connecte à un PDN, il reste actif durant toute la connexion.
- Les Dedicated bearer, tous les bearers additionnels établis avec le même PDN [13].

3.8 Les Performance des réseaux 4G

3.8.1 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 peuplé et s'étendre jusqu'à 100 km dans les zones les plus reculés.

3.8.2 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.

3.8.3 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.

3.8.4 Débit sur l'interface radio

Le début de la 4G est de 100 Mbit/s descendant et 50 Mbit/s montant. 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 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant et SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour le sens montant. Cela correspond à une efficacité du spectre de 5 bit/s/Hz pour le sens descendant et 2,5 bit/s/Hz pour le sens montant.

En considérant HSDPA à 14,4 Mbit/s avec une allocation d'une bande de 5 MHz, l'efficacité spectrale est de 2,9 bit/s/Hz dans le sens descendant.

Avec la 3G il est nécessaire d'allouer une bande de fréquence de 5 MHz. Avec la LTE, il est possible d'opérer avec une bande de taille différente avec les possibilités suivantes : 1.4,

3, 5, 10, 15 et 20MHz, pour les sens descendant et montant. L'intention est de permettre un déploiement flexible en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer.

3.8.5 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.

3.8.6 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.

3.8.7 Co-existence 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 4^{ème} génération.

3.8.8 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, 3, 5, 10, 15 et 20MHz.

3.9 Exemple de Qualité de Service

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

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

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

3.9.1 Contraintes communes aux applications multimédia

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

3.9.2 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.

3.9.3 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.

3.10 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 cellulaires de la nouvelle génération (4G).

Ce qui nous intéresse le plus c'est les réseaux 4G(LTE), c'est pour cela qu'on va consacrer le chapitre suivant pour une simulation des différents paramètres de la QoS existants dans la 4G.

CHAPITRE 4

Résultats et interprétations

4.1 Introduction

Les réseaux informatique connaissent une expansion importante grâce à plusieurs moyens qui ont pu se développer au cours du temps, donc il est coûteux de déployer un banc d'essai complet contenant plusieurs ordinateurs, des routeurs et des liaisons de données pour valider et vérifier un protocole de réseau ou un certain algorithme spécifique. C'est pour cela que les simulateurs de réseaux sont utilisés.

Les simulateurs du réseau offrent beaucoup d'économie, de temps et d'argent pour l'accomplissement des tâches de simulation et 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.

La problématique étudiée dans ce mémoire étant la simulation des performances des réseaux 4G, et en particulier les paramètres de la QoS. Nous présentons dans ce qui suit le déroulement des étapes de simulation que nous avons menée dans ce travail de fin d'études qui consiste à simuler quelques critères de QoS. Notre intérêt est d'évaluer les paramètres qui influencent sur les performances globales du réseau 4G.

4.2 Choix du simulateur

L'étude des performances des systèmes de communications au niveau des réseaux représente une tâche complexe où des outils de simulation spécialisés doivent être utilisés. Dans notre étude de cas, sachant que nous nous intéressons aux systèmes cellulaires actuels et futurs, une prise en charge du modèle LTE est d'une importance primordiale. Nous traiterons par la suite, le choix du simulateur réseau retenu pour produire les résultats et nous exposerons les performances au niveau de ce réseau, selon différents scénarios.

En général, un simulateur de réseau est composé d'un large éventail de technologies et de protocoles réseaux et aide les utilisateurs à construire des réseaux complexes à partir de blocs de construction de base comme des grappes de nœuds et de liens.

Il existe plusieurs simulateurs réseaux, nous allons présenter par la suite quelques un que nous avons travaillé et essayé de travailler avec, tel que :

4.2.1 LTE-SIM

La plupart des fournisseurs d'équipements de communication mobiles ont mis en œuvre leurs propres simulateurs. Par ailleurs, d'autres simulateurs, développés dans les coopérations universitaires-industriel, peuvent être achetés au moyen d'une licence commerciale, et leurs codes sources ne sont pas accessibles au public. Un simulateur LTE basé sur Matlab a été proposé avec la mise en œuvre d'une liaison descendante conforme à la couche physique de la norme LTE, la modulation adaptative, plusieurs utilisateurs, transmission MIMO mais il ne tient pas compte des aspects pertinents de simulation LTE.

Les principales fonctionnalités du simulateur LTE-Sim sont les suivants :

Environnement mono et multicellulaire (macro, micro, femto), Gestion de QOS, Environnement multiutilisateurs, Mobilité, UDP en dans la couche transport, TDD, FDD, Algorithme d'ordonnancement PF EXP, et M-LWDF, Modulation AMC.

4.2.2 OPNET

OPNET est très réputé dans l'industrie pour la modélisation et aussi la simulation des réseaux. Parmi ses avantages, il permet de concevoir et d'étudier des réseaux de communications, des nouvelles technologies, des protocoles et des applications avec facilité et évolutivité. Il est utilisé spécialement par les entreprises des technologies les plus performantes pour accélérer et améliorer leurs procédés de recherches et de développements.

Mais, les versions qui sont compatibles avec le LTE méritent une licence.

4.2.3 NS-2

NS-2 bénéficie d'utilisation répandue dans le milieu de la recherche, le code de simulation a été contribué par plus de cent personnes et organisations, et l'utilisation du simulateur est toujours référencé dans de nombreux travaux de recherche en réseau.

Cependant, une lacune majeure de NS-2 est son évolutivité en termes d'utilisation de la mémoire et du temps d'exécution de la simulation. Ceci est particulièrement un problème en ce qui concerne les nouveaux domaines de recherche dans les réseaux informatiques, ou des architectures maillés qui exigent une simulation de réseaux très larges.

Outre NS-2, plus d'une douzaine de simulateurs des réseaux sont actuellement utilisés dans les universités et l'industrie. Parmi les simulateurs les plus connus nous choisissons le simulateur NS-3 pour réaliser notre travail.

4.2.4 NS-3

Le simulateur NS-3 est un simulateur réseau, utilisant des scripts écrit en C++ ou en Python.

Nous avons choisis de travaillé avec ce simulateur pour la simple raison que ce simulateur possède des scripts dont nous pouvons les utilisés n'importe quand contrairement aux autres simulateurs, par exemple le simulateur OPNET est un simulateur qui n'est pas gratuit donc c'est impossible de l'utiliser ou de travailler avec ce type de simulateur.

4.3 Présentation du simulateur NS-3

Le simulateur NS-3 vise à remplacer NS-2, écrit en C++, python et OTel (version orientée objet de Tel), pour tenter de remédier à ses limites (l'utilisation de multiples interfaces sur un nœud...). Il peut être utilisé sur les plateformes Linux/Unix, OS X (Mac) et Windows.

Son développement a d'abord commencé en juillet 2006, et devait durer quatre ans, il est financé par les instituts comme l'université de Washington, Georgia Institute of Technology et le Centre de l'ICSI pour la recherche sur Internet, la première version majeure publique et stable a été publié en juin 2008.

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 de début [14].

4.4 Terminologie et abstractions

Il est important de bien comprendre le sens des termes employés au sein du simulateur, ainsi que les abstractions qui ont été faites.

NS-3 utilise des termes largement employés dans le domaine des réseaux, mais qui peuvent avoir une signification particulière au sein du simulateur. Voici les principaux :

4.4.1 Un nœud "Node"

Représente tout élément de réseau. La composition d'un nœud peut être gérée (ajout de composants, d'applications et de protocoles).

4.4.2 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 Node.

4.4.3 Un canal de communication "Channel"

Channel est le lien qui relie les NetDevices installés dans les nœuds. Des spécialisations de cette classe sont définies, comme par exemple LTEChannel pour modéliser un réseau LTE.

4.4.4 Une interface de communication

Appelée NetDevice, qui modélise à la fois les équipements et les pilotes de communication. Des spécialisations sont fournies comme par exemple LTENetDevice qui peut être reliée 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).

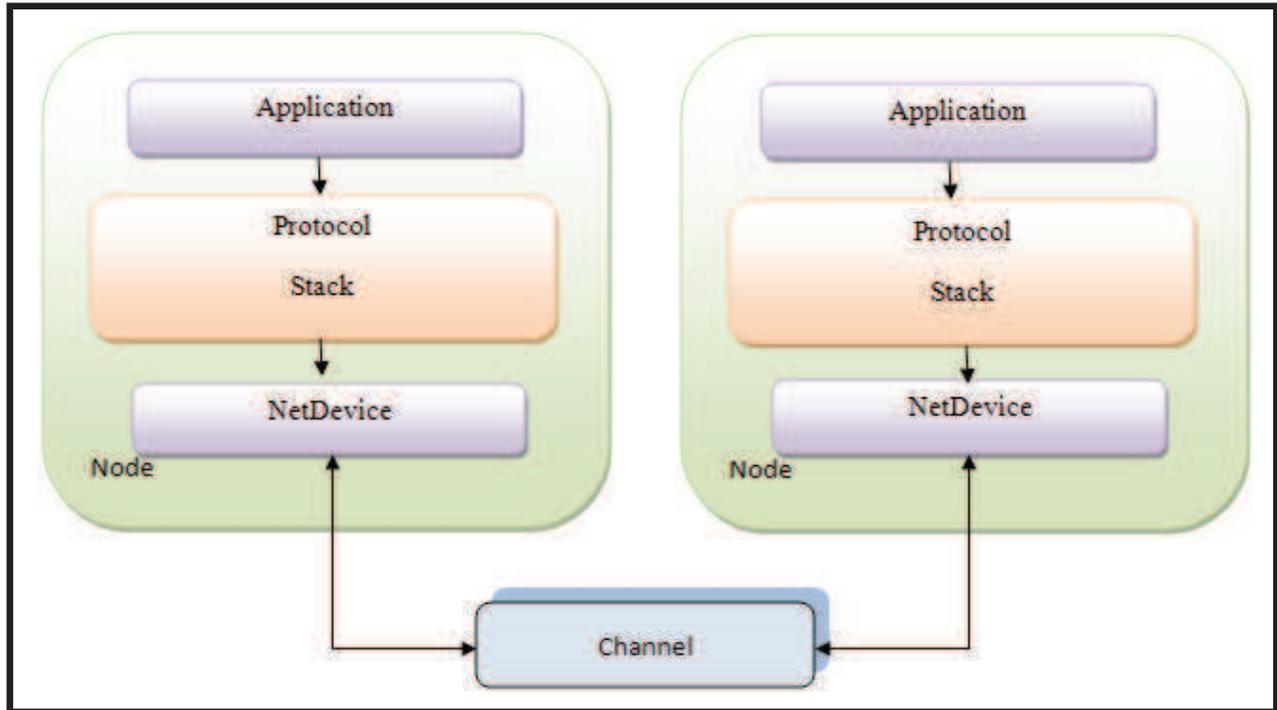


Figure 4.1 : Architecture du nœud NS-3.

4.5 Installation du simulateur NS-3

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), alors on peut utiliser Ubuntu comme interface de Linux, et les étapes suivantes sont des commandes pour télécharger et installer les différents paquets utiliser 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 utiliser pour l'exécution des scripts Python sur ns-3.

```
sudo apt-get install bzip
```

- 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
```

- The Network Simulation Cradle (nsc) requires the flex lexical analyzer and 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
```

- To read pcap packet traces

```
sudo apt-get install tcpdump
```

- Database support for statistics framework

```
sudo apt-get install sqlite sqlite3 libsqlite3-dev
```

- Xml-based version of the config store (requires libxml2 >= version 2.7)

```
sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev
```

- A GTK-based configuration system

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

- To experiment with virtual machines and 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
```

- The ns-3 manual and tutorial are written in reStructuredText for Sphinx (doc/tutorial, doc/manual, doc/models), and figures typically in dia:

```
sudo apt-get install python-sphinx dia
```

- Support for Gustavo Carneiro's ns-3-pyviz visualizer

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

- Support for openflow module (requires some boost libraries)

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

- Support for 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

Pour l'installation de ns-3, nous allons utiliser la commande Build qui se trouve dans le répertoire ns-3.13

- ./build.py [15] [16].

4.6 Déroulement de la simulation

Voici les démarches de déroulement d'une simulation, telles qu'illustrées à la figure 4.2.

Premièrement, il faut définir le problème: comprendre et avoir une vue d'ensemble du problème (conception).

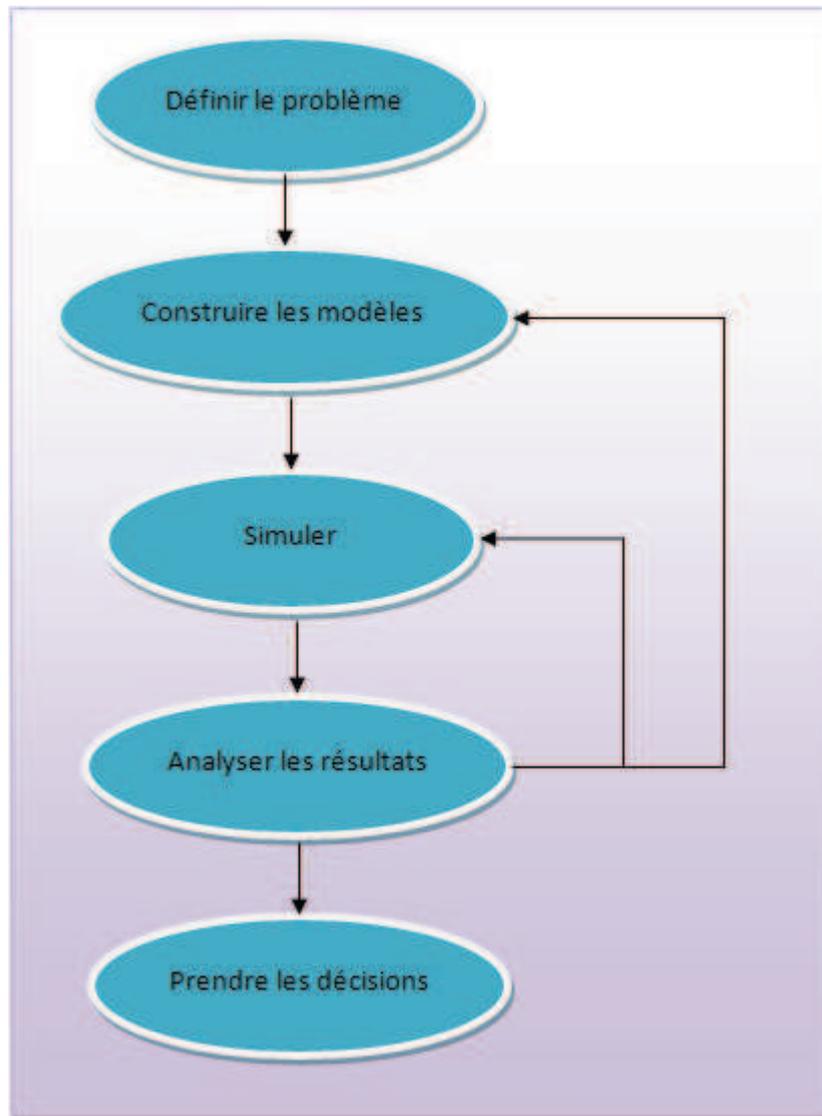


Figure 4.2 : Etapes pour la réalisation d'une simulation.

Premièrement, nous avons utilisé une machine virtuelle (Virtual Box-4.0.4)/(VMware Player), sur laquelle nous avons installé le système linux (Ubuntu 12.04) (voir Figure 4.3 qui nous montre les différentes étapes de démarrage du VMware, Ubuntu et NS-3).

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.

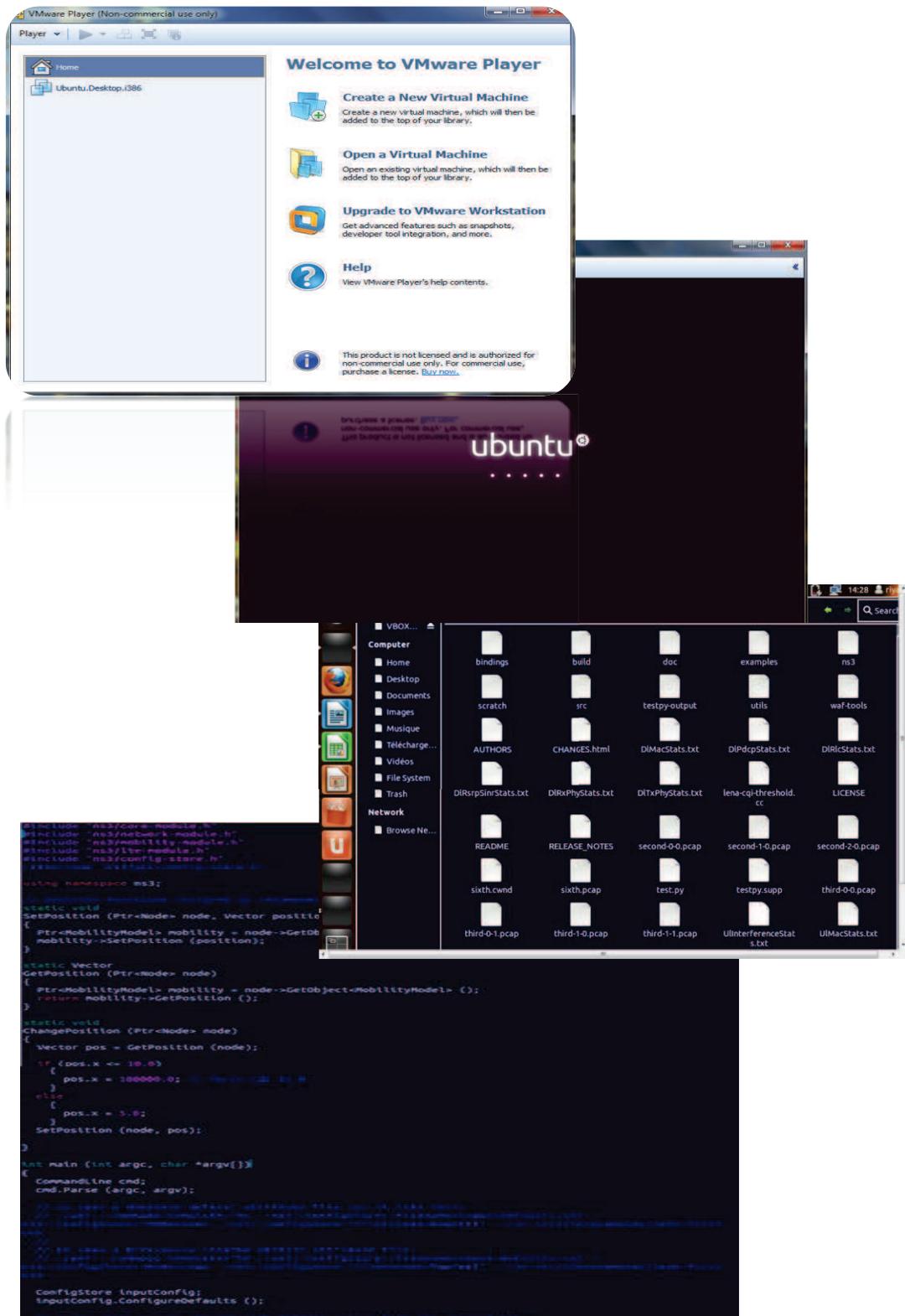


Figure 4.3 : Etapes pour nos simulations sous NS-3.

Nous avons ainsi utilisé l'Excel et LibreOffice Calc, pour la représentation graphique de nos résultats.

Dans notre premier script, nous avons créé un réseau LTE composé d'un UE et un point de communication eNodeB, qui supporte la QoS avec un adressage aléatoire.

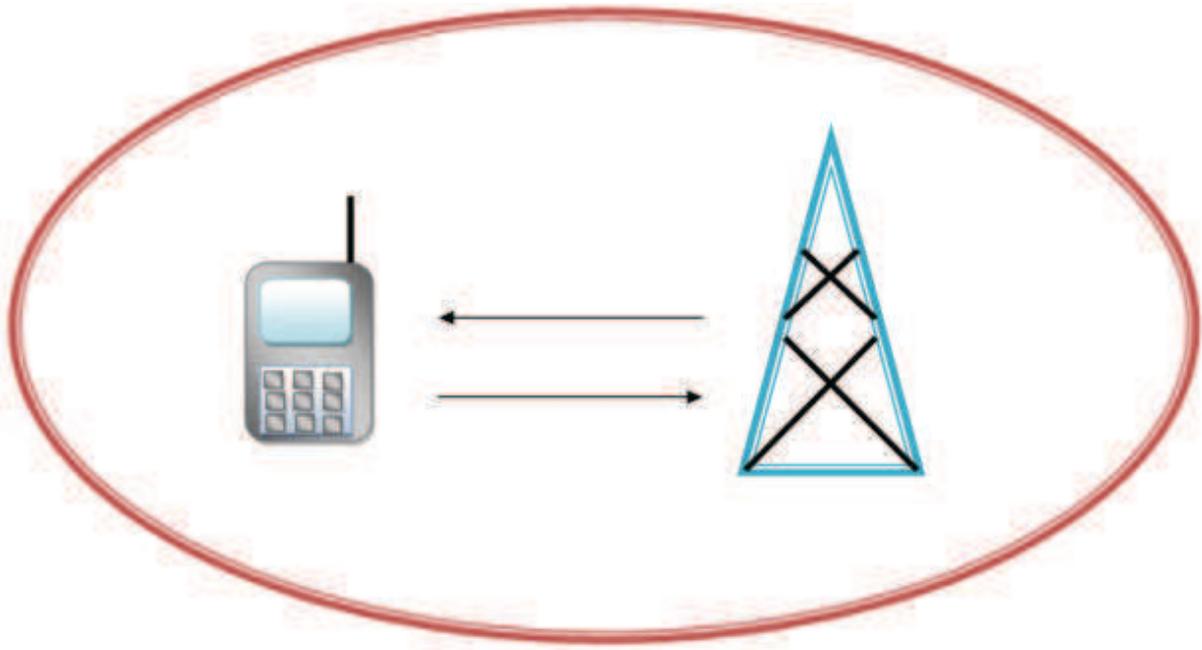


Figure 4.4 : Réseau 4G test.

4.7 Les indicateurs utilisés dans notre simulation

La norme LTE définit des 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 (Channel Quality Indicator) l'indicateur de la qualité du canal mais aussi le SINR (Signal Interference noise Ratio) rapport signal sur bruit et le TB (Transport Block).

4.7.1 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 ainsi pour tester la qualité du canal de transmission, ainsi il est reçu par l'UE, alors que ce dernier le renvoi au eNodeB pour savoir s'il doit l'augmenter pour avoir en final une bonne communication.

4.7.2 Le SINR

Le rapport signal sur bruit est un indicateur de la qualité de la 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.

4.7.3 Le TB

Dans LTE un TB (le Bloc de Transport) est défini comme les données acceptées par la couche physique à être conjointement codé. Le chronométrage (le 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 10ms, ou un multiple de 10ms.

4.8 Résultats de simulation

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

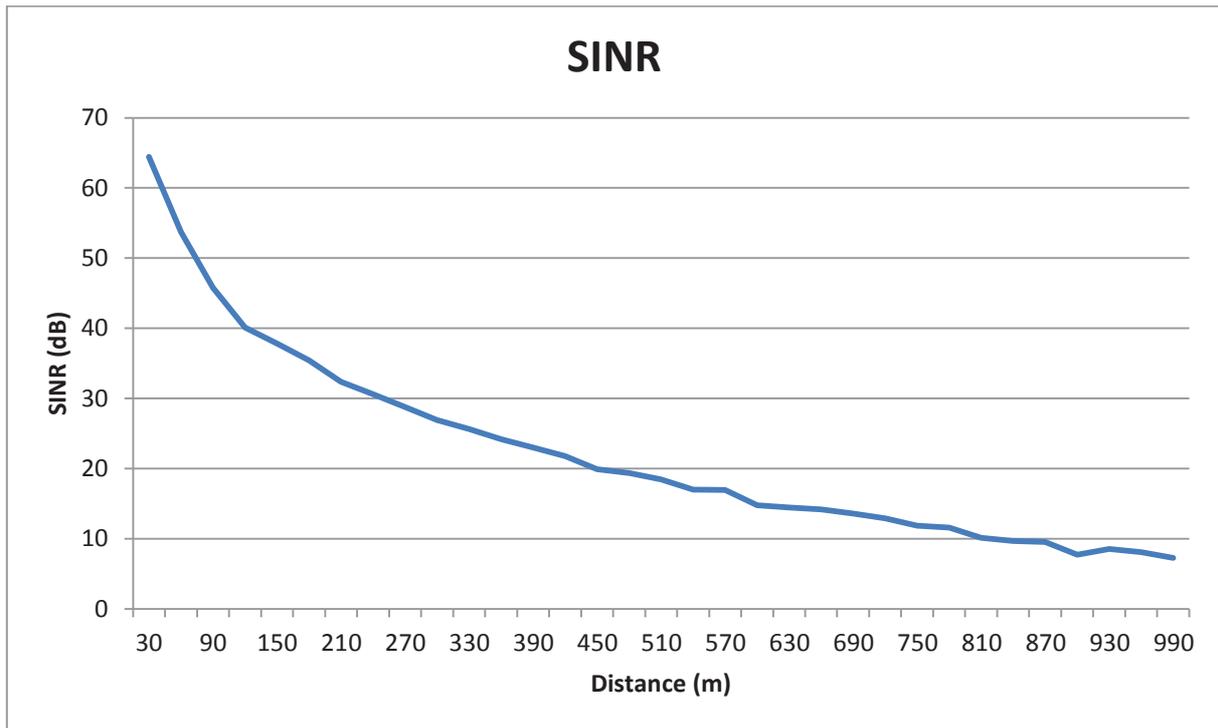


Figure 4.5 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB.

Sur ce graphe on voit clairement une diminution excessive du rapport SINR et qui se rapproche de la valeur 0 a presque 1km de distance séparant l'utilisateur (UE) et 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.

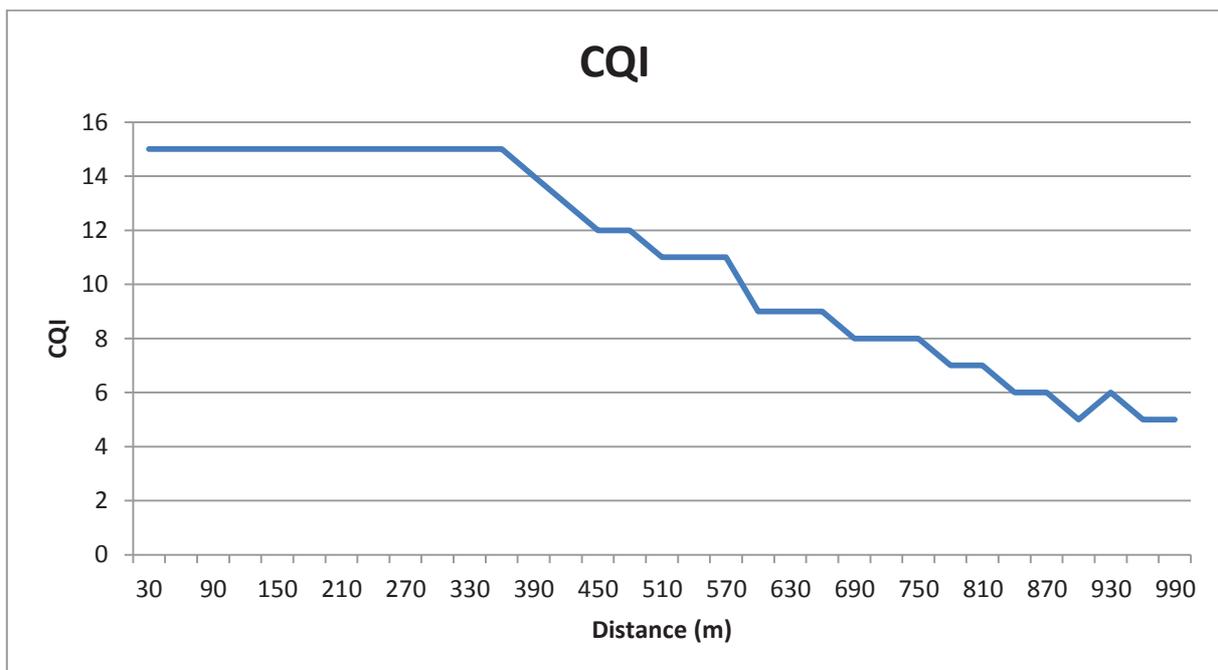


Figure 4.6 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB.

Ce graphe 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 360m, après cette valeur on observe une dégradation en escalier, cette dégradation est due essentiellement à la diminution de l'intensité du signal, l'augmentation du taux d'erreur binaire mais aussi aux interférences.

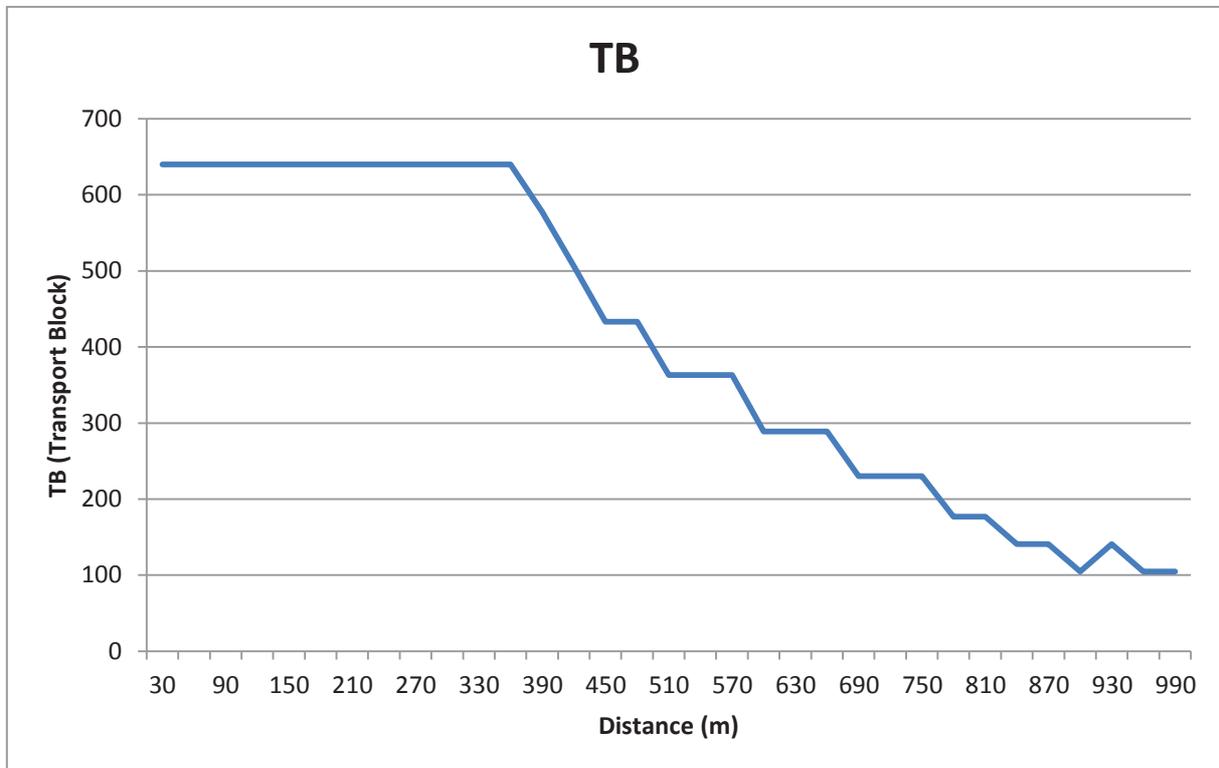


Figure 4.7 : TB en fonction de la distance entre UE-eNB.

Ce graphe 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 360m, après cette valeur on observe une dégradation en escalier, cette dégradation est due essentiellement à la diminution de l'intensité du signal, l'augmentation du taux d'erreur binaire mais aussi aux interférences.

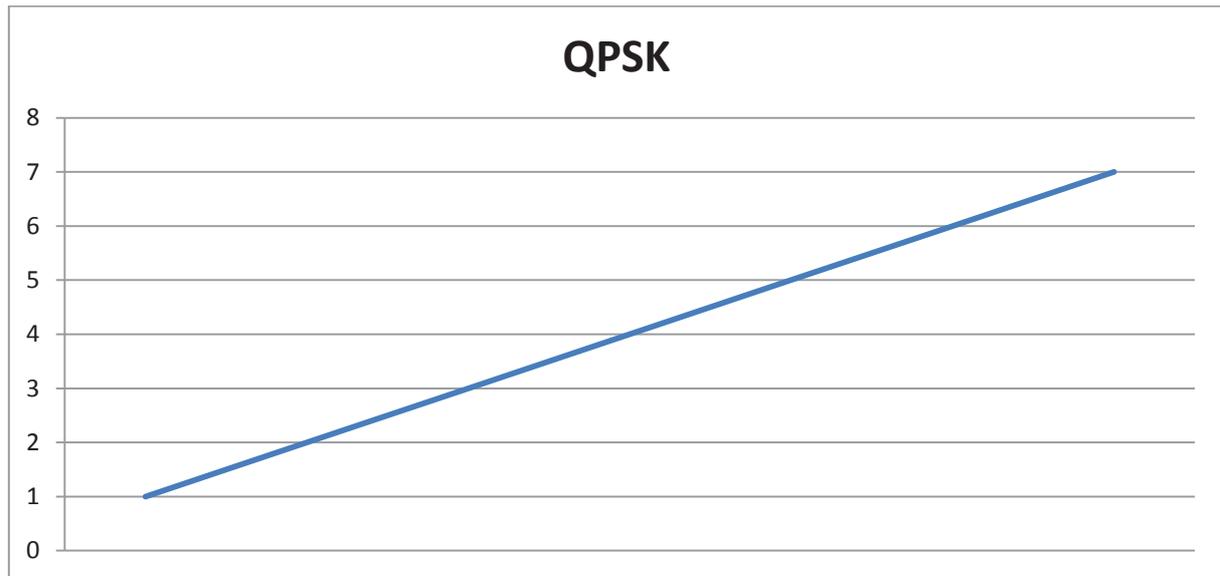


Figure 4.8 : Valeurs du CQI en fonction de la modulation QPSK.

Ce graphe 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 2bit par symbole.

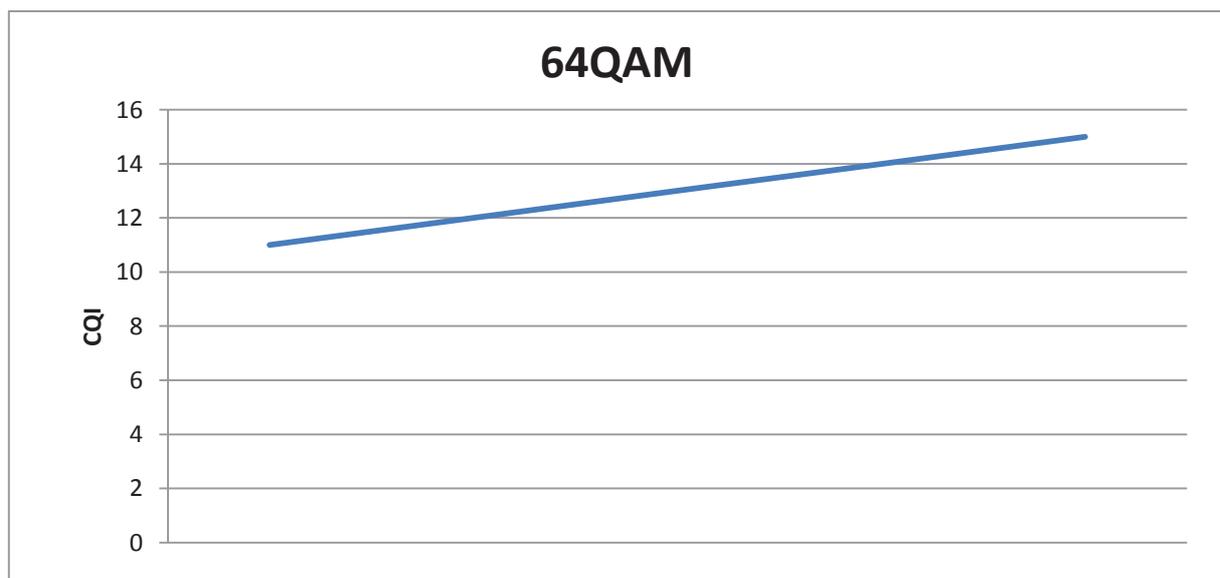


Figure 4.9 : Valeurs du CQI en fonction de la modulation 64QAM.

Ce graphe montre les valeurs du CQI qui varie entre 10 et 14 pour une communication utilisant une modulation 64QAM c'est-à-dire 6bits par symbole.

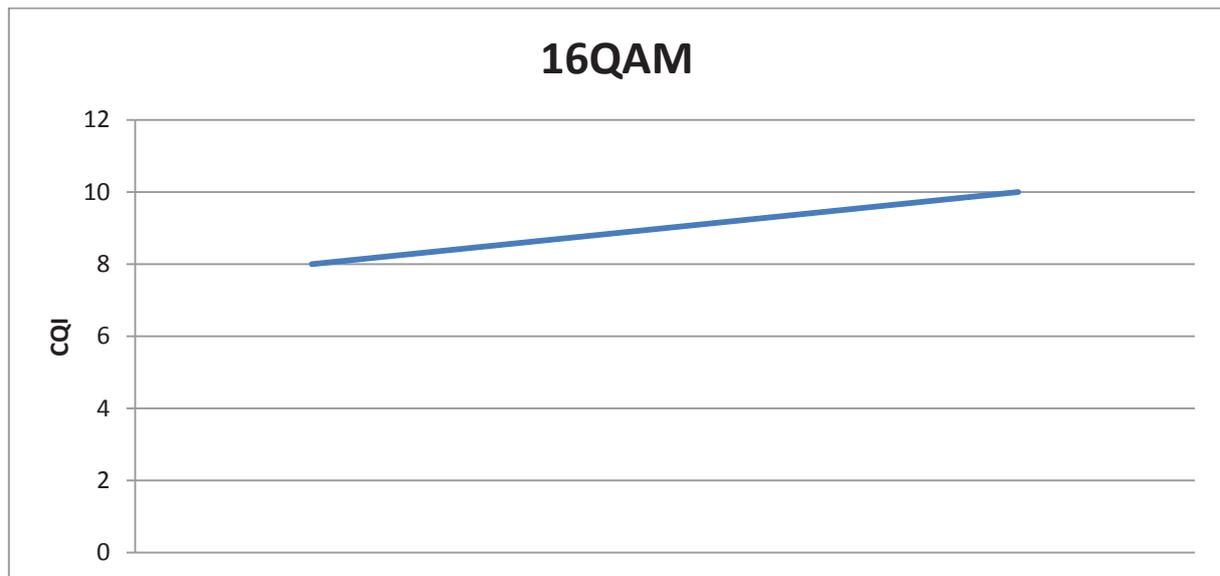


Figure 4.10 : Valeurs du CQI en fonction de la modulation 16QAM.

Ce graphe montre les valeurs du CQI qui varie entre 8 et 10 pour une communication utilisant une modulation 16QAM c'est-à-dire l'envoi de 4 bits par symbole.

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

4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu présenter le simulateur ns-3, en raison de la complexité de la technologie LTE, le module ns-3 est limité dans ces fonctionnalités.

Dans cette étude, on a concentré nos discussions, nos simulations et nos interprétations 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 l'évolution dans le temps et dans l'espace de quelques paramètres existants dans les réseaux 4G à savoir : CQI (Channel Quality Indicator), SINR (Signal Interference Noise Ratio) et TB (Transport Block).

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Durant ce travail on a pu constater que les générations de téléphonie mobile ont été développées pour garantir de meilleure performance en particulier les Qualités de Services, tout ça en apportant de nouvelles applications, de nouveaux services, ainsi qu'une meilleure gestion.

De nos jours la dernière génération est la 4G pas encore mis en œuvre dans le monde entier, mais a fait ses preuves et est connu par la meilleure génération existante permettant le très haut débit ainsi qu'une interopérabilité avec les autres réseaux d'ancienne génération (3G, 2G, ...).

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 important 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 au utilisateur pour leur utilisation au sein de la 4G.

Bibliographie

[1] : TONYE.E et EWOUSSAOUA.L, « Planification Et ingénierie Des Réseau De Télécoms », mémoire pro 2 de télécommunication, Université de Yaounde I, 2011

[2] : GHASSEN.A.A, MAHAMOD.I et KASMIRAN.J, “Modeling and Performance Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants”, Académie mondiale des sciences, 2011.

[3] : URDAREANU.A, « Réseau de 4^{ème} Génération », Rapport bibliographique, Université de RENNES, 2007.

[4] : 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.

[5] : YOES.H et ALWIS, « Evaluation des Performances Des Techniques D’Accès OFDMA et SC-FDMA Dans La Technologie LTE », Mémoire pour l’obtention du diplôme de master en télécommunication, Université de Tlemcen, 2012.

[6] : « <http://sensitive-home.googlecode.com/svn/trunk/Documentation/modulation%20numerique%20QPSK.doc> », Date de consultation juin 2013.

[7] : « <http://www.wireless-techbook.com/blocs-de-systeme-de-liaison-montante-lte/213-lsingle-transporteur-fdma.html> », Date de consultation juin 2013

[8] : « <http://www.wireless-techbook.com/blocs-de-systeme-de-liaison-montante-lte/215-la-difference-entre-ofdma-et-sc-fdma.html> », Date de consultation juin 2013.

[9] : « <http://www.telecom-paristech.fr/formation-lte-long-term-evolution.html> », Date de consultation juin 2013.

[10] : « <http://www.urec.cnrs.fr/IMG/pdf/cours.sf.pdf> », Date de consultation juin 2013.

[11] : « <http://www.commentçamarche.net/contents/wireless/wlintro.php3> », Date de consultation juin 2013.

[12] : « [http://wapiti.telecom-lille1.eu/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2002ttnfa03/NatchiaKoua o-Benlahcen/index.htm](http://wapiti.telecom-lille1.eu/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2002ttnfa03/NatchiaKoua%20o-Benlahcen/index.htm) », Date de consultation juin 2013.

[13] : COUZINET.H, NANFACK.J et NJOUDJIL.R, « Analyse et suivi de la QoS dans le système LTE », Rapport de Stage, Université Telecom Bretagne, 2009.

[14] : « <http://www1.cse.wustl.edu/~jain/cse567-08/ftp/simtools/index.html> », Date de consultation juin 2013.

[15] : « www.nsnam.org », Date de consultation juin 2013.

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