

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة سعيدة. مولاي الطاهر

كلية التكنولوجيا

قسم: الإعلام الآلي

Mémoire de Master

Spécialité : Réseaux Informatiques et Systèmes Réparties

Thème

Etude et analyse des performances
du réseaux cellulaire 4G-LTE

Présenté par :

Hamidat Oussama

Dirigé par :

Dr A.Houacine



Promotion 2021 / 2022

REMERCIEMENT

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

J'adresse mes remerciements à mon encadreur Monsieur HOUACINE ABDELKARIM, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.

Je remercie les membres du jury, Monsieur Latrach.A maitre-assistant à l'université Saida d'avoir l'amabilité de présider le jury, Mr Rahmani.A à l'université de Saida d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je profite de cette opportunité pour exprimer ma gratitude à tous les enseignants qui ont contribué par leur collaboration, disponibilité et sympathie, à mon formation.

Et J'exprime mon reconnaisse à tous les doctorants avec qui nous avons pu bénéficier de leurs aides.

Je tiens à remercier ma famille de m'avoir soutenu, je ne serai jamais assez reconnaissants envers mes parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entre prend. 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 MI.

DÉDICACE

Ce mémoire est dédié à

Mes parents,

Ma famille,

Mes ami(e)s

, Tous ceux qui nous aiment et qu'on aime.

Hamidat Oussama

ملخص

شهدت شبكات الهاتف المحمول واللاسلكية نمواً غير مسبوق في السنوات الأخيرة. من ناحية أخرى ، تم نشر عدة أجيال متتالية من شبكات الاتصالات ، مكرسة بشكل رئيسي للمهاتفة (G2) ، ثم أكثر توجهاً نحو الوسائط المتعددة (G3). من ناحية أخرى ، تحقق شبكات G4 اللاسلكية زيادة حقيقية في الإنتاجية وتتيح إمكانية التشغيل البيئي مع الشبكات الأخرى. في هذا العمل درسنا جودة الخدمة في شبكة خلوية LTE4 G في ظل سيناريوهات مختلفة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة تحت محاكي شبكة NS3 تأثير مسافة المستخدمين (UEs) من الهوائيات (EnbNode) والأشياء المحيطة على QoS مع مؤشرات وهي: SINR (نسبة الإشارة إلى التداخل بالإضافة إلى الضوضاء) ، CQI (مؤشر جودة القناة) و TB (كتلة النقل).

الكلمة الرئيسية: 4G، LTE ، محاكاة ، جودة الخدمة ، NS3 ، دراسة الأداء ، مؤشر جودة الخدمة

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 interopérabilité avec les autres réseaux.

Dans ce travail nous avons étudié la qualité de service QoS dans un réseau cellulaire 4G LTE sous différents scénarios. Les résultats obtenus par la simulation sous le simulateur réseau NS3 montrent l'influence de la distance des utilisateurs(UEs) des antennes (EnbNode) et les objets environnants sur la qualité de service avec ses indicateurs à savoir : SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio), CQI(Channel Quality Indicator) et TB(Transport Block).

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

Abstract

Mobile and wireless networks have experienced an unprecedented growth in recent years. On the one hand, several successive generations of telecommunication networks have been deployed, mainly dedicated to telephony (2G), then more oriented towards multimedia (3G). On the other hand, 4G wireless networks bring a real increase in throughput and allow interoperability with other networks.

In this work we studied the QoS in a 4G LTE cellular network under different scenarios. The results obtained from the simulation under the NS3 network simulator show the influence of the distance of the users (UEs) from the antennas (EnbNode) and the surrounding objects on the QoS with its indicators namely: SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio), CQI(Channel Quality Indicator) and TB(Transport Block).

Keyword: 4G, LTE, simulation, QoS, NS3, Performance study, QoS indicator

Sommaire

Introduction général	1
-----------------------------------	---

Chapitre I : Historique et Généralités.

I. Historique ‘les évolutions de la téléphonie mobile’	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 La Première Génération (1G).....	3
I.3 La Deuxième Génération (2G).....	3
I.4 Le réseau GSM.....	4
I.4.1 Architecture du réseau GSM.....	4
I.4.1.1 Le BSS (Base Station SubSystem).....	6
I.4.1.2 Le NSS (Network SubSystem).....	7
I.4.1.3 L'OSS (Opération Support Subsystem).....	9
I.4.2 Les Interfaces radios:.....	9
I.5 Le réseau GPRS (General Packet Radio Service) (2.5G).....	11
I.5.1 Le SGSN (Serving GPRS Support Node).....	12
I.5.2 Le GGSN (Gateway GPRS Support Node).....	12
I.5.3 Le BG (Border Gateway).....	12
I.5.4 Les équipements GSM utilisés :.....	12
I.5.5 Le type de transmission dans le réseau GPRS.....	13
I.5.6 La gestion d'itinérance.....	13
I.6 La Troisième Génération (3G) ou UMTS.....	14
I.6.1 Architecture du réseau UMTS.....	15
I.6.2 Les fréquences et le débit de l'UMTS.....	16
I.6.3 Le mode de transmission dans le réseau UMTS.....	16
I.7 La Quatrième Génération (4G LTE).....	17
I.7.1 Historique sur la 4G.....	18
I.8 Conclusion.....	19

Chapitre I: Etude détaillées réseau 4GI

II. Généralités sur la technologie 4G LTE	22
II.1 Introduction.....	22
II.2 La 4G LTE.....	22
II.3 Les buts de la 4G LTE.....	23
II.4 Architecture du réseau 4G LTE	24
II.4.1 Le Réseau d'accès (e-UTRAN).....	25
II.4.1.1 Les entités du réseau d'accès (e-UTRAN)	25
II.4.1.1.1 L'eNodeB.....	26
II.4.2 Réseau Cœur, EPC (Evolved Packet Core) :	27
II.4.2.1 Description et rôles des entités du réseau cœur.....	28
II.4.3 La partie IMS (IP Multimedia Sub-system):.....	30
II.5 Architecture en couches	31
II.5.1 Les protocoles de l'interface Radio.....	31
II.6 Les caractéristiques fondamentales de la 4G	33
II.6.1 Débits et fréquences du réseau 4G	33
II.6.2 Latence.....	34
II.6.3 L'agilité en fréquence.....	35
II.6.4 Codage et sécurité.....	35
II.6.5 Multiplexage	35
II.6.5.1 Structure d'une trame LTE	36
II.6.6 La Mobilité	38
II.6.6.1 Le Handover	39
II.6.7 Modulation adaptative et codage.....	39
II.6.8 Les types de transmission utilisée dans la 4G.....	40
II.6.8.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	40
II.6.8.2 L'OFDMA (Technique d'accès multiple en voie descendante).....	40
II.6.8.3 SC-FDMA (Single Carrer - Frequency Division Multiple Access).....	42

II.7	Inconvénients et avantages de LTE.....	43
II.8	La 4G dans le Monde	43
II.9	Conclusion	45

Chapitre III: Généralité sur la qualité de service

III.	La Qualité de service (QoS).....	47
III.1	Introduction.....	47
III.2	Définitions de la Qualité de service (QoS)	47
III.3	Le But de la QoS	47
III.4	Les Paramètres de la QoS.....	48
III.4.1	Le débit	48
III.4.2	Le taux de perte	48
III.4.3	Le délai de transit (Latence).....	49
III.4.4	La Gigue (Jitter ou Delay variation)	49
III.4.5	La bande passante.....	49
III.4.6	Priorité des paquets.....	49
III.5	Les critères utilisés pour assurer la QoS	50
III.6	La gestion de la qualité de service	50
III.7	La notion de Bearer	51
III.8	Efficacité QoS.....	53
III.9	Qualité de service en LTE/EPC	54
III.10	Les Performance des réseaux 4G.....	56
III.10.1	Une mobilité à toute épreuve.....	56
III.10.2	Des temps de réponse rapides	56
III.10.3	La voix sur IP.....	56
III.10.4	Débit sur l'interface radio.....	57
III.10.5	Connexion permanente	57
III.10.6	Délai pour la transmission de données.....	57
III.10.7	Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G	57
III.10.8	Flexibilité dans l'usage de la bande	58

III.11	Exemples de Qualité de Service	58
III.11.1	Contraintes communes aux applications multimédia	58
III.11.2	La téléphonie sur IP	58
III.11.3	La vidéoconférence.....	59
III.12	Conclusion.....	59

Chapitre IV: Simulation,Résults et Implémentation

IV.	Simulation et Implémentation.....	61
IV.1	Introduction.....	61
IV.2	Choix du simulateur	61
IV.3	Présentation du simulateur NS-3.....	61
IV.4	Les Mots Clés	62
IV.5	Installation du simulateur NS-3.....	63
IV.6	Compilation du NS-3.....	65
IV.7	Exécution d'un script de simulation	65
IV.8	Déroulement de la simulation	65
IV.9	Architecture de test.....	66
IV.10	Les critères utilisés dans notre simulation.....	66
IV.10.1	Le SINR :	66
IV.10.2	Le CQI :	67
IV.10.3	Le TB :	67
IV.11	Résultats de simulation :	67
IV.12	Conclusion :.....	72
	Conclusion général.....	73
	Bibliothèque	74

List de Figures

Figure I.1: Architecture du réseau GSM	5
Figure I.2 : Architecture du réseau GPRS.....	11
Figure I.3 : Architecture du réseau UMTS.....	15
Figure II.1: Présentation générale du système LTE[5].....	23
Figure II.2: Architecture du réseau 4G LTE[7].....	24
Figure II.3 : Architecture simplifiée d'EPS.....	25
Figure II.4: Architecture de l'e-UTRAN[11].....	26
Figure II.5: Architecture EPC[7].....	28
Figure II.6: Pile protocolaire [11].....	33
Figure II.7: Structure générique de la trame LTE[8].	36
Figure II.8: Structure de la trame radio FDD	37
Figure II.9:présente le duplexage FDD.	37
Figure II.10: présente la trame TDD.	38
Figure II.11: ModulationLTE.....	39
Figure II.12: Technique OFDM[11].....	40
Figure II.13: Les porteuses de l'OFDMA	41
Figure II.14: La différence entre OFDM et OFDMA[11].....	41
Figure II.15: La différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.....	42
Figure II.16: Les marchés 4G et 4G+ dans le monde.....	44
Figure II.17: Déploiement de la 4G dans le monde	44
Figure III.1: Besoin de mécanismes de QoS lors d'un accès à des ressources partagées[4].....	52
Figure III.2: EPS Bearers	53
Figure III.3: QoS dans LTE/EPC.	54
Figure III.4: Type de Bearer de la QoS dans LTE/EPC.....	55
Figure III.5: Default Bearer.....	55
Figure III.6: Dedicated Bearer.....	56
Figure IV.1: Architecture du nœud NS-3.....	63
Figure IV.2 : Architecture du réseau 4G LTE[20].....	65
Figure IV.3:La réalisation d'une simulation dans NS3	66
FigureIV.4 : Exemple de Début de la simulation d'un Système LTE.....	68
Figure IV.5 : Exemple après des temps de simulation d'un Système LTE.....	68
FigureIV.6 : Communication entre UE-eNodeB.....	69
FigureIV.7 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB.	70
FigureIV.8 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB.....	71
IV.9 :TB en fonction de la distance entre UE-eNodeB.....	72

Liste des Tableau

Tableau I.1 : Différents Paramètres du LTE / LTE-Advanced	19
Tableau II.1: Les deux types de latence dans le réseau LTE	34

Liste des Abréviations

1G : 1ère Génération

2G : 2ème Génération

3G : 3ème Génération

4G : 4ème Génération

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line

ARCEP : Autorité de Régulation des Communications Électroniques et Postes

AUC: AUthentication Center

BG: Border Gateway

BSC: Base Station Controller

BSS: Base Station Sub-system

BTS: Base Transceiver Station

CCU: Channel Codec Unit

CDMA2000: Code Division Multiple Access

CGF: Charging Gateway Function

CQI: Channel Quality Indicator

DFT: Transformation de Fourier Discrète

DiffServ: Differentiated Service

DSCP: DiffServ Control Protocol

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution

EIR: Equipment Identity Register

eNodeB: evolved NodeB

EPS: Evolved Packet System

EPC: Evolved Packet Core

E-UTRA: Evolved-Universal Terrestrial Radio Access

eUTRAN: evolved UTRAN

FDD: Frequency Division Duplexing

GGSN: Gateway GPRS Support Node

GMSC: Gateway MSC

GPRS: General Packet Radio Service

GSM: Global System for Mobile Communication

HLR: Home Location Register

HSDPA: High Speed Downlink Packet Access

HSOPA: High Speed OFDM Packet Access

HSPA: High Speed Packet Access

HSS: Home Subscriber Service

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

KT: Korea Telecommunication

LAN: Local Area Network

LMT: Latvijas Mobilais Telefons

LTE: Long Term Evolution

M2M: Machine To Machine

MAN: Metropolitan Area Network

MIMO: Multi Input Multi Output

MME: Mobility Management Entity

MMS: Multimedia Messaging Service

MS: Mobile Station

MSC: Mobile Switching Centre

MTS: Mobile Tele System

NMC: Network and Management Centre

NS-2: Network Simulator 2

NS-3: Network Simulator 3

NSS: Network Sub System

NTT: Nippon Telegraph & Telephone

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OMC: Operations and Maintenance Center

OSS: Operation Sub-System

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio

PCRF: Policy and Charging Rules Function

PCU: Packet Control Unit

PDN: GW Packet Data Network Gate-Way

PDP: Packet Data Protocol

PGW: Packet Switch-GetWay

PLMN: Public Land Mobile Network

PRB: Physical Resource Blocks

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QoS : Qualité de Service

QoS: Quality of Service

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

RSVP: Resource ReSerVation Protocol

RNC: Radio Network Controller

RNIS : Réseau Numérique à Intégration de Services

RTC: Réseau Téléphonique Commuté

RTCP: Real-time Transport Control Protocol

SAE: System Architecture Evolution

S-GW: Serving-Get Way

SC-FDMA: Single Carrier-Frenquency Division Multiplexing Access

SGSN: Serving GPRS Support Node

SIM: Subscriber Identity Module

SINR: Signal Interference Noise Ratio

SMS: Short Message Service

SMSC: Short Message Service Center

SS7: Signal Semaphore 7

TB: Transport Block

TCP: Transmission Control Protocol

TDD: Time-Division Duplex

TMN : Télécommunications Management Network

UDP : User Datagram Protocol

UE : Terminal Mobile

UIT : Union Internationale des Télécommunications

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

VLR: Visitor Location Register

VoIP: Voice over IP

VSF-OFCDM: Variable Spreading Factor Orthogonal Frequency and Code
Division Multiplexing

Introduction Général

L'accès à l'information a connu d'importants bouleversements. Après l'invention des téléphones analogiques de la Première Génération, la Deuxième Génération (2G) correspond à l'arrivée du nouveau standard de communication pour les mobiles :

La technologie **GSM** a amélioré les conversations vocales internationales et permis la transmission de messages **SMS** par transmission de données numériques. La troisième génération (**3G**), représentée par la technologie **UMTS**, offre des débits de données rapides allant jusqu'à 2Mb/s, ce qui réduit les besoins en matière d'accès à l'internet mobile, de visualisation de vidéos et de communication vocale. Les capacités de transmission de données de ces systèmes de deuxième et troisième générations sont encore limitées. Le système de quatrième génération (**4GLTE**) est aujourd'hui une véritable révolution puisqu'il permet la multiplication des données grâce à deux phénomènes. Le premier consiste à acheminer les appels vocaux directement via l'internet et non plus via le réseau téléphonique (voix sur **IP**). Le deuxième, recourt au multiplexage (plusieurs types d'informations circulent sur un même canal), qui permet d'augmenter la quantité d'informations transmises. Ainsi, la **4GLTE** se définit comme le débit de données mobiles le plus élevé. Il faut noter que la technologie **4G** évolue déjà avec la norme LTE-Advanced, souvent appelée **4G+**, qui permet des débits encore plus élevés sur les réseaux mobiles **LTE**. Cette thèse se concentre sur les performances des réseaux 4G LTE ainsi que sur la modélisation d'une chaîne de transmission. Dans ma simulation, nous intéressons qu'à la partie e-UTRAN du système, avec un accent particulier sur les canaux de transmission et de signalisation. Nous intéressons particulièrement aux indicateurs de qualité qui peuvent être utilisés pour évaluer la qualité de transmission dans les liaisons descendantes et ascendantes (Uplink). Parmi ces indicateurs figurent le CQI (canal quality indicator), ainsi que le SINR (signal-to-noise ratio) et le TB (block transport). L'organisation générale de mon mémoire est articulée sur quatre chapitres :

Le chapitre 1 : Présente un historique sur les différentes Générations de Téléphonie Mobile

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

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

Le chapitre 4 : Simulations, Résultats et implémentation.

Finalement, une conclusion est présentée pour souligner les résultats obtenus dans le cadre de mon travail de thème.

Chapitre I

Historique et Généralités

I. Historique ‘les évolutions de la téléphonie mobile’

I.1 Introduction

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

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

I.2 La Première Génération (1G)

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

Ces cellulaires de 1^{ère} Génération transmettent la voix d’une façon analogique. Les plus importants systèmes sont **AMPS** (Advanced Mobile Phone System), **NMT** (Nordique Mobile Téléphone), et **TACS** (Total Access Communication System).

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

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

I.3 La Deuxième Génération (2G)

Le développement des cellulaires de seconde génération fut dirigé par le besoin d’améliorer la qualité de transmission, la capacité du système ainsi que la couverture réseau. Les technologies

des semi-conducteurs et des dispositifs à micro-ondes ont permis l'utilisation de la transmission digital eau sein des télécommunications mobiles. La transmission de la voix domine toujours, mais les demandes pour le **FAX**, les **SMS** (messages courts) et les transmissions de données ont augmenté rapidement. Des services supplémentaires sont apparus tels que la prévention de fraude et le cryptage des données personnelles. Ces derniers sont devenus comparables aux services disponibles sur les réseaux fixes. Les cellulaires de la 2^{ème} Génération incluent le **GSM**, **D-AMPS**, et **PDC**.

Aujourd'hui de nombreux standards liés aux 1^{ère} et 2^{ème} Génération sont apparus et sont utilisés dans le monde entier. Chaque standard à son propre niveau de mobilité, de capacité et de service.

Certains standards ne sont utilisés que dans un pays ou région et sont pour la plupart incompatibles entre eux. Le **GSM** reste la famille de standard la plus efficace présente dans le monde.

I.4 Le réseau GSM

GSM (Global System for Mobile Communications) très largement utilisé est la première technologie de téléphonie cellulaire qui soit pleinement numérique. C'est la référence mondiale pour les signaux radio mobiles. Avec plus de 400 millions d'utilisateurs à la fin de l'année 2000 dans le monde[1], soit la moitié du nombre total d'utilisateurs de téléphonie mobile.

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

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

I.4.1 Architecture du réseau GSM

Pour gérer les spécificités des communications avec les mobiles, le **GSM** a introduit des équipements qui n'existaient pas dans les réseaux téléphoniques fixes classiques, les **PSTN** (Public Switched Telephone Network) ou **RTC** (Réseau Téléphonique Commuté).

Ces équipements, et plus généralement toutes les fonctions relatives à la gestion des utilisateurs mobiles ont été regroupés dans un type de réseau particulier appelé **PLMN** (Public Land Mobile Network). Ces réseaux se raccordent aux **PSTN** et aux **PLMN** d'autres opérateurs par des passerelles spécifiées dans le standard **GSM**.

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

- **Le BSS** (Base Station SubSystem), Un sous-système radio ;
- **Le NSS** (Network SubSystem), Un sous-système réseau ;
- **L'OSS** (Operation Support SubSystem), Un sous-système d'exploitation et de maintenance.

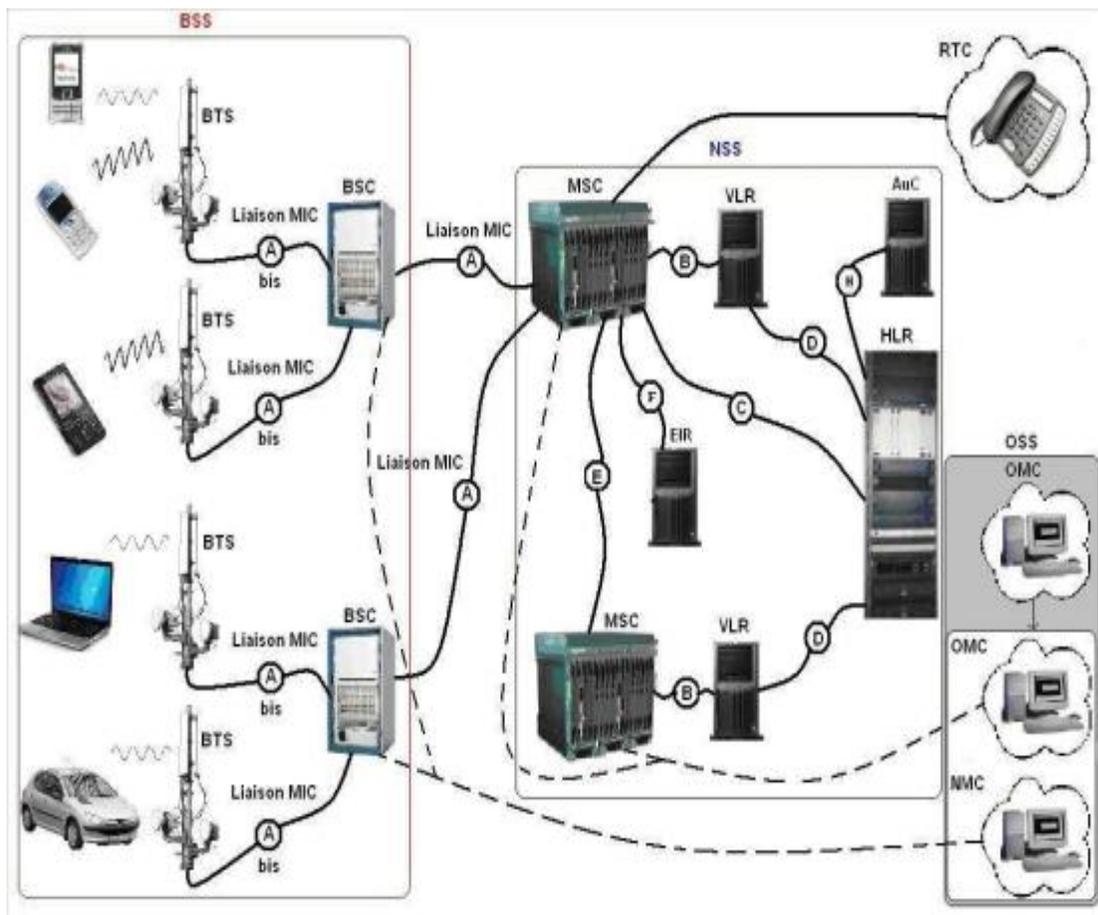


Figure I.1: Architecture du réseau GSM

I.4.1.1 Le BSS (Base Station SubSystem)

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

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

a. Le MS (Mobile Station)

La station mobile ou (**MS**) est composée d'une part d'un terminal qui est la partie visible et d'autre part d'un module d'identification d'abonné qui est la carte **SIM** (Subscriber Identity Module) qui contient les informations relatives à l'abonnement de l'utilisateur telles que ses identités, l'**IMSI** (International Mobile Subscriber Identity) et le **TMSI** (Temporary Mobile Subscriber Identity) et ses algorithmes de chiffrements.

Une carte **SIM** peut être transférée d'un terminal à un autre et peut être protégée par un code **PIN** (Personal Identification Number).

Le terminal possède sa propre identité, l'**IMEI** (International Mobile Equipment Identity) qui permet de connaître l'identité du constructeur du terminal mais aussi d'empêcher l'utilisation des terminaux volés ou non conformes.

b. Les BTS (Base Transceiver Station)

Les **BTS** couvrent des cellules de tailles variables suivant les sites, 30 Km de rayon en zone rurale comme elle peut être réduite jusqu'à 250 m en zone urbaine de fort trafic. Les **BTS** sont matérialisés sous la forme d'antennes sur les toits des immeubles en ville ou sur les bords de routes.

Elles ont en charge l'accès radio des mobiles dans leurs zones de couverture. Elles doivent assurer la modulation, la démodulation, codage correcteur d'erreurs, estimation de canal et égalisation. Elles diffusent des informations générales sur la cellule qui sont utiles aux mobiles et remontent aux **BSC** des mesures sur la qualité de transmission dans la cellule.

c. Le BSC (Base Station Controller)

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

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

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

I.4.1.2 Le NSS (Network SubSystem)

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

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

a. Le MSC (Mobile service Switching Center)

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

En particulier, il assure la localisation, met à jour et applique les procédures prévues pour le transfert des communications entre les cellules. Il assure aussi les fonctions de taxation et peut assurer l'interconnexion avec les autres réseaux mobiles ou **PLMN** (Public Land Mobile Network) et le réseau téléphonique fixe, le **RTC**.

L'interfonctionnement avec d'autres réseaux nécessite la présence des fonctions spécifiques dans ce commutateur qui sont désignées sous le nom de (Inter Working Functions) ou **IWF**.

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

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

b. Le VLR (Visitor Location Register)

Le **VLR** est une base de données de localisation locale dans laquelle sont stockées les informations relatives aux utilisateurs d'une région particulière. On y retrouve les mêmes informations que dans le **HLR**, ainsi l'identité temporaire de l'utilisateur **TMSI** (Temporary Mobile Subscriber Identities) et sa zone de localisation qui n'est autre qu'un ensemble de cellules dans lesquelles se trouve l'utilisateur.

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

c. HLR (Home Location Register)

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

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

d. L'AuC (Authentication Center)

Le centre d'authentification **AuC** qui est associé au **HLR**, contient la clé d'authentification unique **Ki** de l'abonné et génère les triplets (**Kc**, **RAND** **SRES**) utilisés pour l'authentification et le chiffrement.

e. L'EIR (Equipment Identity Register)

L'enregistreur des identités des équipements est une base de données contenant le numéro international de l'équipement **IMEI** (International Mobile Equipment Identity) permettant ainsi son identification.

I.4.1.3 L'OSS (Opération Support Subsystem)

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

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

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

➤ **L'OMC** (Operation and Maintenance Center) :

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

➤ Le **NMC** (Network Management Center):

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

I.4.2 Les Interfaces radios:

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

Elle est constituée de mécanismes permettant l'émission et la réception des signaux radiofréquences de manière efficace et sûre, quelles que soient les conditions de propagation. Cette couche physique inclut des moyens permettant d'établir, de maintenir et de relâcher, mais également de spécifier les différents types de liens établis entre le terminal mobile et le réseau. La notion de canal logique permet de dissocier les fonctions de ces différents liens [2].

✓ **Dans le BSS:**

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

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

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

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

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

❖ Le **Trau** (Transcoder/Rate Adaptator Unit) :

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

✓ **Dans le NSS:**

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

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

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

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

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

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

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

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

Le **GPRS** a ensuite évolué au début des années 2000 vers la norme **EDGE** (Enhanced Data Rates for **GSM** Evolution) **2.75G**, également optimisée pour transférer des données et qui utilise les mêmes antennes et les mêmes fréquences radio.

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

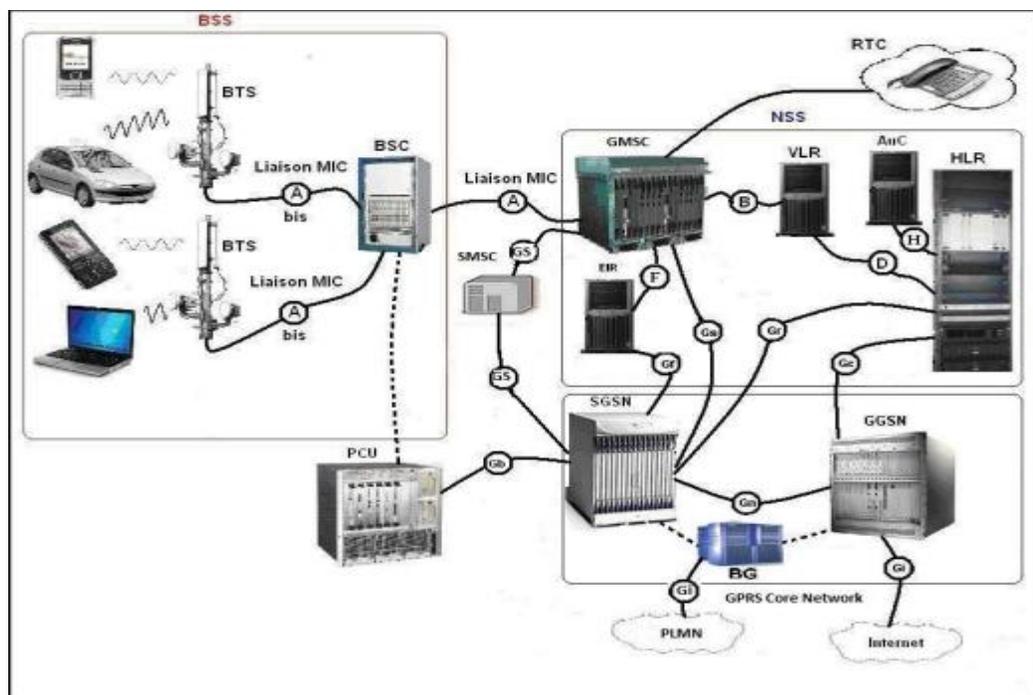


Figure I.2 : Architecture du réseau GPRS.

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

I.5.1 Le SGSN (Serving GPRS Support Node)

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

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

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

I.5.2 Le GGSN (Gateway GPRS Support Node)

Le nœud de passerelle **GGSN** (Gateway GPRS Support Node) est une passerelle d'interconnexion entre le réseau paquet mobile et les réseaux de données externes (Internet, autre réseau **GPRS...**). C'est un routeur qui permet de gérer les transmissions de paquets de données :

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

I.5.3 Le BG (Border Gateway)

Le concept de **BG** (Border Gateway) permet de connecter les réseaux **GPRS** via un réseau fédérateur qui assure les fonctions de sécurité pour la connexion entre ces réseaux. Ces **BG** ne sont néanmoins pas spécifiés par les recommandations mais elles jouent le rôle d'interface avec les autres **PLMN** (Public Land Mobile Network) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux (par exemple entre deux réseaux de deux opérateurs concurrents).

I.5.4 Les équipements GSM utilisés :

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

- Les **BTS** et **BSC** permettent de couvrir un territoire national pour localiser les terminaux.
- Le **MSC** et le **VLR** permettent également de gérer les problématiques d'itinérance des 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**, ce dernier constitue donc en effet une base pour la mise en place du réseau **GPRS**. L'ensemble des éléments **GSM** et **GPRS** sont associés pour fournir un service **GPRS**. Deux protocoles sont alors utilisés :

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

I.5.5 Le type de transmission dans le réseau GPRS

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

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

I.5.6 La gestion d'itinérance

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

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

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

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

La **3G** a été définie dans la release **R99** sous le nom **UMTS** (Universal Mobile Telecommunications System). Certains préfèrent encore l'appeler **W-CDMA** (Wideband Code Division Multiple Access) qui est la technologie d'accès radio permettant à plusieurs utilisateurs de communiquer en même temps.

L'objectif de la **3G** était le haut débit, en théorie 2 Mbps (soit 6*384 kbps) avec une mobilité faible et proche de l'antenne, et un débit de 384 kbps en mouvement, ce qui est proche des offres **ADSL** de l'époque. La **3G** a nécessité la mise en place d'infrastructures radio en parallèle du réseau **EDGE** et du réseau **GPRS** dont le coût a été estimé à quelques milliards d'euros. Il s'agit du coût de la mise en place de nouvelles antennes, nommée « **NœudB** » (**NodeB**) et d'un contrôleur de nœud nommé **RNC**.

Le Node **B** est donc l'équivalent de la **BTS** utilisée en **GSM**, avec une bande de fréquence différente mais en utilisant la technologie de modulation **HPSK** (Hybrid Phase Shift Keying) et une technologie d'accès **W-CDMA** différente.

Le Node **B** et le **RNC** forment l'accès radio **UMTS** dénommé **UTRAN** (UMTS TERRESTRIAL Radio Access Network). Ils se rajoutent donc au **GERAN** (**GSM-EDGERAN**), l'ensemble **UTRAN** et **GERAN** forme donc maintenant le **BSS**. La **3G** a été impulsée pour permettre des applications vidéo sur le mobile et améliorer la **QoS** (Quality Of Service) du Multimédia. Les applications visées étaient la possibilité de regarder des vidéos, de la visiophonie etc.... Outre

l'augmentation de débit, un point complexe à résoudre était de passer d'un service de téléphonie « mode circuit » vers un service **DATA** « mode paquets »[3].

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

I.6.1 Architecture du réseau UMTS

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

Le réseau **UMTS** vient se combiner aux réseaux déjà existants du **GSM** et **GPRS**, qui apportent des fonctionnalités respectives de la Voix et des Données, le réseau **UMTS** apporte ensuite les fonctionnalités Multimédia. Le réseau cœur se décompose en deux parties : le domaine circuit dans un premier temps et le domaine paquet.

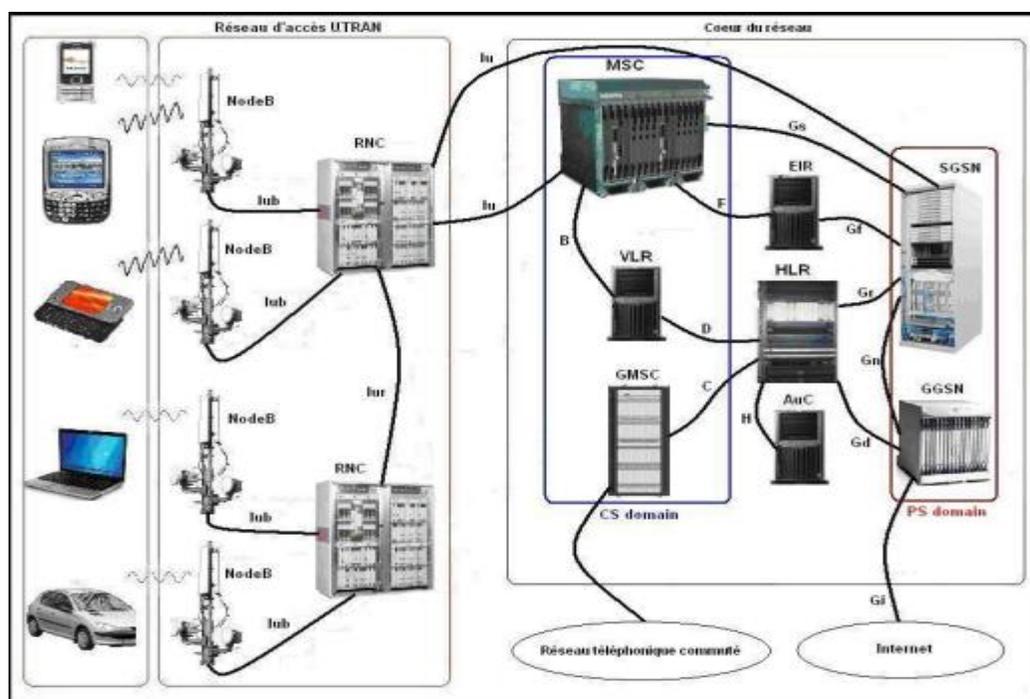


Figure I.3 : Architecture du réseau UMTS

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

Les fréquences allouées à l'UMTS sont 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz. L'UIT (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 35MHz) et 2110 à 2200 MHz (Downlink bande de 15 MHz).
- Duplex fréquentiel **FDD** (Frequency 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. L'UMTS permet théoriquement des débits de transfert de 1,920 Mbit/s, mais fin 2004 les débits offerts par les opérateurs dépassent rarement 384 Kbit/s[3]. Néanmoins, cette vitesse est nettement supérieure au débit de base **GSM** qui est de 9,6 kbit/s.

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

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

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

I.6.3 Le mode de transmission dans le réseau UMTS

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

a. Le mode circuit

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

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

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

b. Le mode paquet

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

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

I.7 La Quatrième Génération (4G LTE)

La technologie LTE (Long Term Evolution), permet le « très haut débit mobile », c'est-à-dire des transmissions de données à des débits théoriques supérieurs à 100 Mbit/s, voir supérieurs à 1 Gbit/s (débit minimum défini par l'UIT pour les spécifications IMT-Advanced pour la technologie LTEAdvanced). En pratique, les débits sont de l'ordre de quelques dizaines de Mbit/s selon le nombre d'utilisateurs, puisque la bande passante est partagée entre les terminaux actifs des utilisateurs présents dans une même cellule radio.

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

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

I.7.1 Historique sur la 4G

En 2002, la vision stratégique pour la **4G**, que l'**UIT** a désigné comme **IMT-Advanced**, a été aménagée. En 2005, la technologie de transmission **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est choisie comme candidat pour la liaison descendante **HSOPA** (High Speed **OFDM** Packet Access), rebaptisée plus tard par **3GPP** Long Term Evolution **LTE**.

En Novembre 2005, **KT** (Korea Telecommunication) démontre le service mobile **WiMAX** à Busan, Corée du Sud[4]. La société japonaise **NTTDoCoMo** (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 **EMTLTE "4G"** travail en réseau dans le régime d'essai. Le 5 Juin 2010, Sprint Nextel a publié le premier Smartphone **4G**, l'Evo **HTC4G**.

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

Le **LTE** permet d'exploiter des largeurs de bande de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz. La norme **LTE-Advanced** impose des critères de base sur le débit et sur la latence, comme le résume le **Tableau I.1** suivant[4]:

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

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

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous présentons d'une façon générale les différentes générations de téléphone mobiles et les principales caractéristiques d'un réseau cellulaire. La mise en œuvre du

service **GPRS** implique une évolution matérielle et logiciel s'ajoutant au réseau **GSM** déjà existants.

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

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

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

Chapitre II

Etude détaillée de réseaux 4G

II. Généralités sur la technologie 4G LTE

II.1 Introduction

La planification d'un réseau mobile consiste à déterminer l'ensemble des composants matériels et logiciels de ces systèmes, à les positionner, à les interconnecter et à les utiliser de la meilleure façon possible tout en respectant un certain nombre de contraintes de qualité de service. Ce Avant que le réseau ne soit opérationnel, un processus long et complexe se déroule. Pour les réseaux de première (**1G**), deuxième (**2G**) et troisième (**3G**) génération.

Les réseaux de la prochaine génération orientent la planification des réseaux cellulaires, nouvelles voies d'investigation En effet, les tendances s'orientent de plus en plus vers une intégration transparente des technologies sans fil existantes telles que le **GSM**, le **LAN** et le Bluetooth

Ad hoc dans un environnement complètement hétérogène. Cette nouvelle vague de pensée se distingue. La 4^{ème} génération des générations précédentes. 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.

II.2 La 4G LTE

La technologie **LTE** (Long Term Evolution) ou **4G** est basée sur un réseau de commutation par paquets de type **IP**. Elle ne prévoit pas de méthode de transmission de 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 de largeur variable. 1,4 MHz x 20 MHz, ce qui donne un bit binaire (pour une bande de 20 MHz).

Le **LTE** est capable d'atteindre 300 Mbit/s en liaison descendante, bien que la "vraie **4G**" offre un débit plus élevé descendant atteignant 1 Gbit/s

La technologie **LTE** repose sur une combinaison sophistiquée de technologies.une amélioration significative des performances (débit et latence très élevés) par rapport aux les réseaux 3G existants. Multiplexage **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

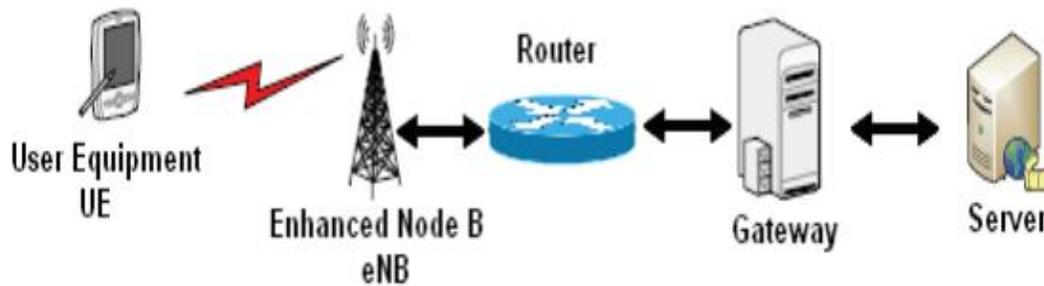


Figure II.1: Présentation générale du système LTE[5]

II.3 Les buts de la 4G LTE

L'objectif de la **4GLTE** est d'améliorer l'efficacité spectrale et d'augmenter le nombre de mobiles pouvant être gérés dans une seule cellule. Elle tente également de fournir des rabais de grande valeur dans les situations de mobilité et d'offrir une mobilité totale aux utilisateurs en établissant l'interopérabilité.

Plusieurs technologies sont disponibles. Elle veut rendre les connexions réseau plus visibles. Pour éviter les interruptions de service pendant la transmission intercellulaire, l'utilisateur doit baisser le volume, usage en direction du Tout-IP[10]

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

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

- Minimiser le coût de signalisation.

II.4 Architecture du réseau 4G LTE

Les réseaux **LTE** sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent les mêmes fréquences Hertziennes grâce aux codages radio **OFDMA** (Orthogonal

Frequency Division Multiple Access) dans le sens descendant « **Downlink** », et le **SC-FDMA**

(Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) dans le sens montant « **Uplink** ».

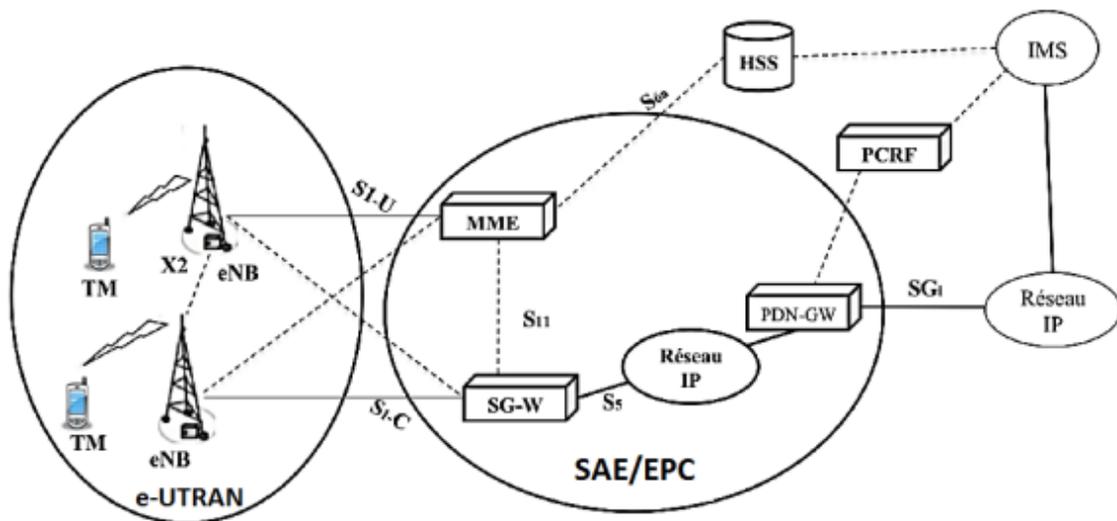


Figure II.2: Architecture du réseau 4G LTE[7]

La technologie **LTE** a amélioré l'efficacité du spectre, la transmission des données, la couverture et le nombre d'appels pris en charge par le téléphone portable.

Elle se distingue, comme les précédentes, par son architecture EPS (Evolved Packet System), qui comprend :

- Un réseau d'accès : l'**e-UTRAN** (evolved **UTRAN**).
- Un réseau cœur : l'**EPC** (Evolved Packet Core), Réseau Tout-**IP**[13].

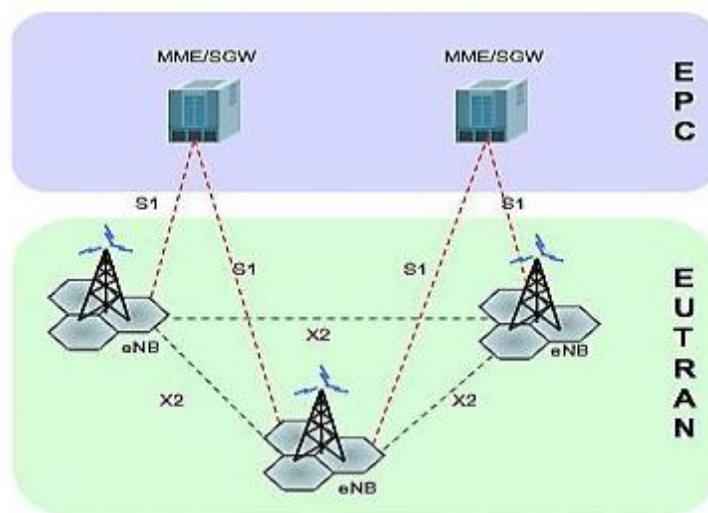


Figure II.3 : Architecture simplifiée d'EPS.

II.4.1 Le Réseau d'accès (e-UTRAN)

La partie radio du réseau, appelée "**eUTRAN a**", est simplifiée par rapport aux réseaux **2G (BSS)** et **3G (UTRAN)** en intégrant dans les **eNodeB** a des stations de base des connexions en fibre optique et des liaisons **IP** reliant les **eNodeB**. (liens **X2**). Ainsi que les fonctions de contrôle qui étaient auparavant implémentées dans le **RNC** (Radio Network Controller) des réseaux **UMTS3G**. Ce groupe est chargé de la gestion des ressources radio, de la transmission, de la compression, de la sécurité et de la connectivité au cœur du réseau.

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

Décrit l'architecture de l'**e-UTRAN** avec ses **eNodeBs**, les interfaces **X2** (entre les **eNodeBs**) et **S1** (entre **eNodeB** et entités du réseau cœur **MME/SGW**).

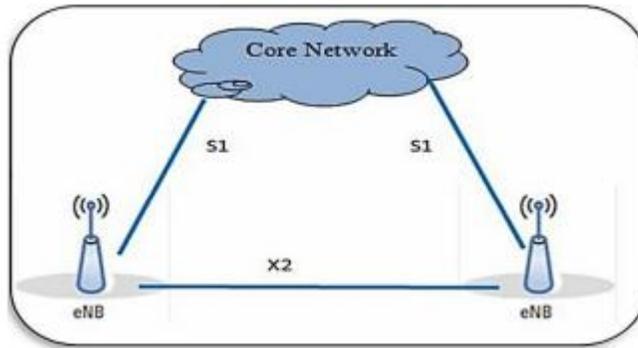


Figure II.4: Architecture de l'e-UTRAN[11].

II.4.1.1.1 L'eNodeB

L'équivalent LTE de la BTS dans le réseau GSM et du NodeB dans le réseau UMTS, la fonctionnalité de transfert est plus robuste dans le LTE. Il s'agit d'antennes qui connectent les UE au cœur du réseau LTE par le biais de l'interface radio. Le résultat est plus efficace, et le réseau est moins latent, puisqu'elles fournissent la fonctionnalité d'un contrôleur radio distant dans l'eNodeB. Par exemple, la mobilité est déterminée par l'eNodeB au lieu du BSC ou du RNC.

Les eNodeBs sont reliés entre eux par une interface X2.

a. L'interface X2

C'est une interface logique qui a été mise en œuvre pour permettre aux eNodeB d'échanger des informations de signalisation pendant le Handover ou la signalisation sans que le cœur du réseau ait à intervenir.

Lorsqu'un utilisateur passe d'une eNodeB à une autre, de nouvelles ressources sont mises à disposition sur la nouvelle eNodeB pour l'UE ; sinon, le réseau continue à envoyer des données à l'ancienne eNodeB puisqu'elle n'a pas été informée du changement. Pour minimiser la perte de données, l'ancienne eNodeB transfère les paquets entrant par l'interface X2 à la nouvelle eNodeB, qui les envoie à l'UE.

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

b. L'interface S1

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

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

Les **eNodeBs** ont offert deux qualités au réseau :

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

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

L'**EPC** (Evolved Packet Core), centre nerveux du réseau, utilise les technologies **IP** pour la signalisation, le transport de la voix et la transmission des données. Ce cœur de réseau permet l'interconnexion via des routeurs avec d'autres **eNodeBs**, d'autres réseaux d'opérateurs mobiles, des réseaux fixes et l'Internet.

Elle assure la gestion des utilisateurs, la gestion de la mobilité, la gestion de **QoS** (la qualité de service) et la gestion de la sécurité grâce à des équipements tels que le **MME**, le **SGW**, le **PDNGW** (Packet Data Network Gateway) et le **PCRF** (Policy and Charging Rules Function)[7].

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

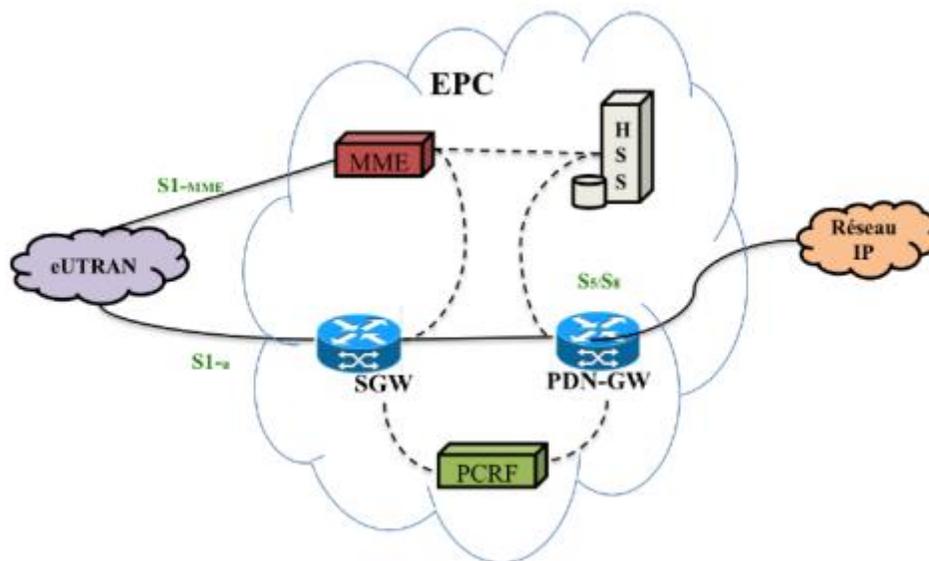


Figure II.5: Architecture EPC[7].

II.4.2.1 Description et rôles des entités du réseau cœur

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

- **MME: (Mobility Manager Entity) “3GPP Release 8”**

C'est une entité de gestion de la mobilité, la **MME** est le contrôleur principal du réseau **LTE/SAE**, elle gère toutes les procédures de l'UE (authentification, cryptage, mobilité, etc.). Les fonctions de l'entité **MME** sont les suivantes :

➤ **Signalisation « EMM » et « ESM » avec l'UE**

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

➤ **Authentification**

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

➤ **Gestion de la liste de « Tracking Area »**

L'UE a été informé des zones de suivi du MME, appelées Tracking Areas. Lorsque l'UE entre dans une zone de suivi qui n'est pas gérée par son MME, il met à jour sa position.

➤ **Sélection du « SGW » et du « PDN GW »**

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

➤ **Sélection du MME lors du Handover avec changement de MME**

Lorsque l'utilisateur est à l'état **ACTIF** et se déplace d'une zone contrôlée par un MME à une autre zone contrôlée par un autre MME, le **Handover** doit impliquer l'ancien et le nouveau MME.

➤ **Roaming avec interaction avec le HSS nominal**

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

▪ **Le SGW (Serving Gateway) “3GPP Release 8”**

Il s'agit du lien principal entre le réseau d'accès radio et le cœur du réseau **SGW** (Serving GateWay). Elle collecte les paquets de données, maintient la connexion de handover inter-eNodeB, puis le handover inter-système entre **LTE** et **GSM/UMTS**. Le **SGW** échange des paquets avec le **PDN-GW** via l'interface **S5**. Le **SGW** est relié à l'**E-UTRAN** via l'interface **S1-U**, qui sert de liaison entre l'utilisateur et l'**EPC**.

▪ **Le P-GW (Packet Data Network Gateway) “3GPP Release8”**

Le commutateur de paquets **GetWay (P-GW)** connecte un terminal mobile (**UE**) au paquet externe du réseau d'information et transmet les adresses **IP** d'un **UE**, ainsi que les applications

QoS, et maintient la connectivité mobile entre les systèmes **LTE/UMTS/GSM** et les systèmes **NON -3GPP**.

▪ **Le HSS (Home Subscriber Server)**

Similaire au **HLR** dans les réseaux **GSM / WCDMA**, la base de données contient des informations relatives aux abonnés (les abonnés voisins) et abrite le contrôle de la gestion des appels et des sessions. Elle désigne principalement l'authentification, l'autorisation, la sécurité et le cryptage des données, et elle fournit la localisation détaillée des utilisateurs.

▪ **La PCRF (Policy and Charging Rules Function) “3GPP Release7”**

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

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

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

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

Le sous-système multimédia IP (IMS) est une architecture NGN (Next Generation Network) normalisée destinée aux fournisseurs de services téléphoniques, qui leur permet de fournir des services multimédias fixes et mobiles. Cette architecture fait appel à la technologie VoIP ainsi qu'à une mise en œuvre conforme aux normes 3GPP. Les systèmes téléphoniques existants (commutation de paquets et de circuits) sont pris en compte. L'objectif de l'IMS n'est pas seulement de permettre l'offre de nouveaux services, existants ou futurs, sur Internet ; les utilisateurs doivent également pouvoir utiliser ces services en déplacement (en roaming situation) ainsi qu'à domicile.

Les normes du protocole IP sont utilisées par l'IMS à cette fin. Par conséquent, une session multimédia est établie en utilisant le même protocole, que ce soit entre deux utilisateurs IMS, entre un utilisateur IMS et un internaute, ou entre deux internautes.

De plus, les interfaces de développement de services sont construites sur des protocoles IP. C'est pourquoi l'IMS fait véritablement converger l'Internet et le monde de la communication par téléphone mobile ; il utilise les technologies du téléphone mobile pour fournir un accès en tout lieu et les technologies de l'Internet pour fournir des services.

❖ Exemples des services de l'IMS

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

II.5 Architecture en couches

II.5.1 Les protocoles de l'interface Radio

L'interface radio se distingue de la transmission directe par le coût et la rareté du spectre, ainsi que par le taux d'erreur extrêmement élevé de la transmission. En raison de ces caractéristiques, la pile de protocoles de l'interface radio est assez spécifique. Elle est composée de plusieurs couches. Le **LTE** fonctionne en couches entre les utilisateurs, les **eNodeBs** et les **MMEs** (Mobile Management Entity)[23].

- **La couche Physique (PHY)**

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

➤ **La couche liaison de données**

Elle se compose du **MAC** (Media Access Control), qui gère l'interface entre les couches supérieure et inférieure, et du **RLC** (Radio Link Control), qui assure la transmission des données en mode paquet.

➤ **La couche PDCP (Packet Data Control Protocol)**

Elle assure la compression et la décompression des données afin de les transporter sur le réseau.

➤ **Le RRC (Radion Resource Control)**

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

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

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

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

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

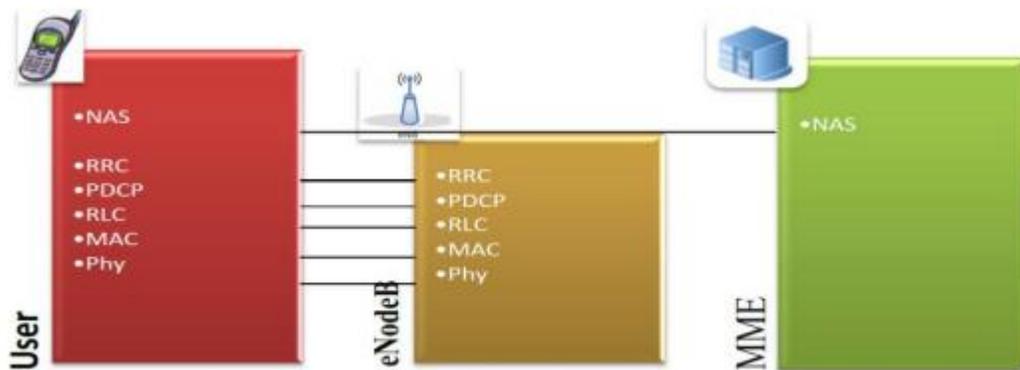


Figure II.6: Pile protocolaire [11]

II.6 Les caractéristiques fondamentales de la 4G

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

II.6.1 Débits et fréquences du réseau 4G

L'évolution des débits suit un schéma similaire à celui de la capacité de calcul. Chaque nouvelle technologie de réseau mobile augmente les débits et crée un besoin de débits supplémentaires. Il était également clair en 2004 que le **LTE** fournirait des débits de données extrêmement élevés. Au-delà des contraintes de capacité, les données envoyées à un utilisateur final sont déterminées par sa situation radio, à savoir sa position dans la cellule, les mécanismes de transmission utilisés et la ressource spectrale disponible.

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

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

II.6.2 Latence

➤ Latence du plan de contrôle

L'objectif défini pour le **LTE** est de réduire la latence du plan de contrôle par rapport à l'UMTS, avec un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état d'alerte de l'UE et un état actif permettant la formation d'un plan de contrôle.

➤ Latence du plan usager

La latence du plan d'utilisateur est définie comme le temps nécessaire à la livraison d'un paquet entre l'adresse **IP** de l'UE et l'adresse **IP** d'un nœud du réseau d'accès, ou vice versa. En d'autres termes, la latence du plan de l'utilisateur correspond au temps nécessaire pour envoyer un paquet **IP** via le réseau d'accès. Dans les scénarios de réseau à faible coût et pour les petits paquets **IP**, le **LTE** vise une latence du plan utilisateur inférieure à 5 millisecondes.

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

<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>
<i><5</i>	<i><= 6.2 EN DL <= 9.5 EN UL</i>	<i>80</i>	<i>85</i>

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

II.6.3 L'agilité en fréquence

Afin de répondre aux différentes attributions de spectre, le **LTE** doit pouvoir fonctionner sur des porteuses de différentes longueurs. Les exigences initiales en matière de largeur de bande ont ensuite été réduites à 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les directions amont et aval. Ainsi que dans les directions de liaison descendante.

II.6.4 Codage et sécurité

L'utilisation du codage **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est un système de codage radio de type Frequency Division Multiple Access (**FDMA**) pour la liaison descendante et **SC-FDMA** (Single-carrier Frequency Division Multiple Access) pour la liaison montante. Pour la liaison montante, **FDMA** est une méthode de codage radio à accès multiple par répartition en fréquence (au lieu de **W-CDMA** dans l'**UMTS**).

L'**OFDMA** et sa variante **SC-FDMA** sont dérivés du codage **OFDM** (utilisé sur les liaisons **ADSL** et dans les réseaux **WiFi**, par exemple), mais contrairement à l'**OFDM**, l'**OFDMA** est optimisé pour l'accès multiple, c'est-à-dire le partage simultané d'une ressource spectrale (bande de fréquences) par plusieurs utilisateurs géographiquement séparés les uns des autres. Les techniques d'antennes **MIMO** sont compatibles avec l'**OFDMA**.

II.6.5 Multiplexage

Les normes **LTE** prévoient un fonctionnement bi mode, notamment le multiplexage par répartition en fréquence (**FDD**) et le multiplexage par répartition temporelle (**TDD**). La transmission et la réception se font à des fréquences distinctes en mode **FDD**

(Frequency Division Duplexing). Le mode **TDD** consiste à émettre et à recevoir sur la même fréquence mais à des moments distincts. Le premier mode (**FDD**) est au centre de l'appel à candidatures français. C'est aussi celui qui est aujourd'hui utilisé dans les équipements télécoms et qui est utilisé dans la majorité des premiers réseaux **4G LTE** autorisés. Le second mode (**TDD**) utilise des bandes de fréquences distinctes qui seront attribuées ultérieurement.

II.6.5.1 Structure d'une trame LTE

La durée des trames génériques LTE est de 10 millisecondes. Elles sont séparées en dix sous-trames, dont chacune a une durée de 1,0 ms.

Chaque sous-trame est divisée en deux créneaux, soit un total de 20 créneaux allant de 0 à 19. Selon que le préfixe cyclique conventionnel ou étendu est utilisé, un slot est composé de 6 ou 7 symboles OFDM[8].

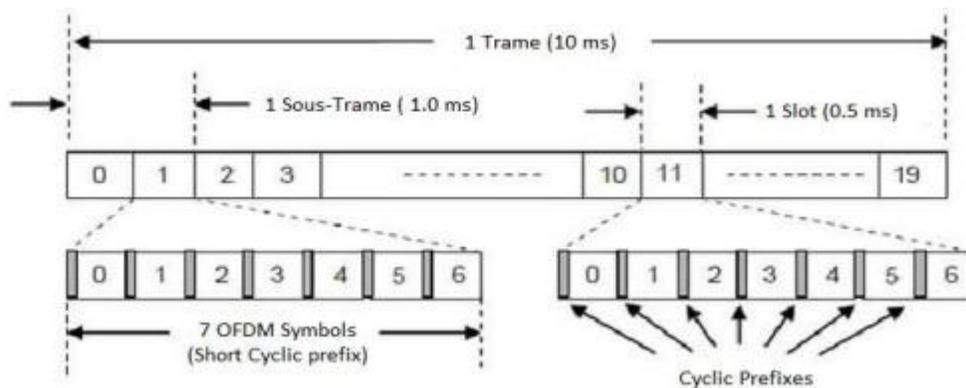


Figure II.7: Structure générique de la trame LTE[8].

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) est une technologie de duplexage utilisée dans les communications sans fil. Les données sont transmises et reçues à des fréquences différentes ; en d'autres termes, la fréquence de la porteuse du signal varie en fonction de la direction de la liaison (montante ou descendante).

Cette technologie permet la transmission et la réception simultanées, ce qui constitue son principal avantage par rapport à l'autre grande technique de duplexage, le **TDD** (Time Division Duplexing).

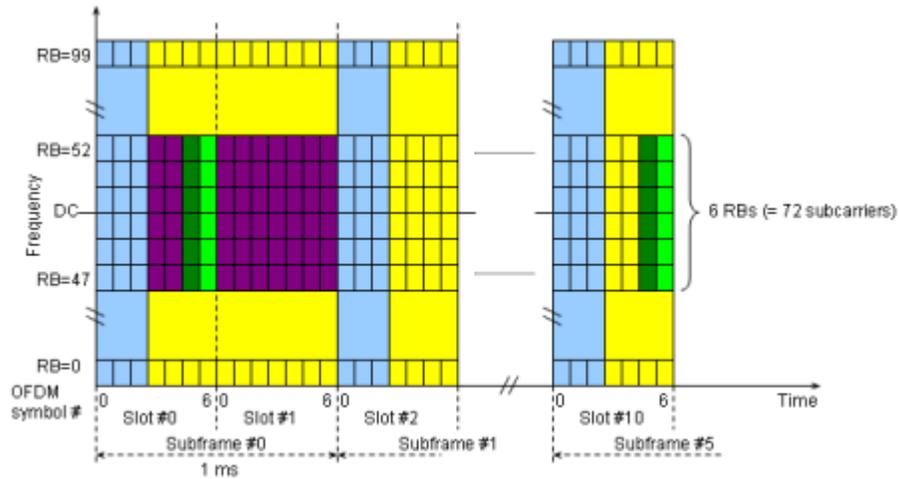


Figure II.8: Structure de la trame radio FDD

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

La **Figure II.8** présente le duplexage **FDD**.

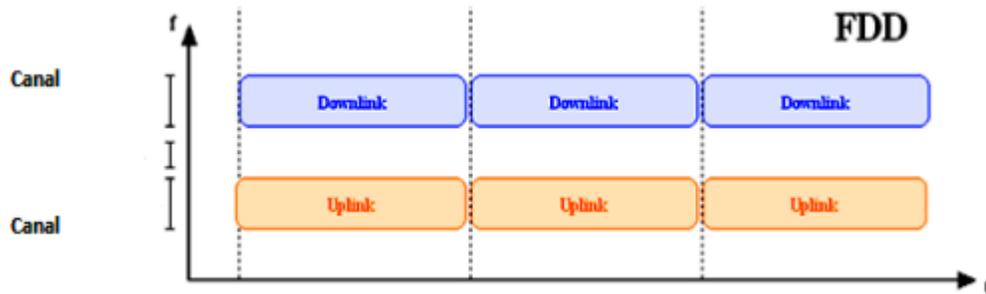


Figure II.9: présente le duplexage FDD.

b. Structure de type 2 : TDD

Le **TDD** est une technologie qui permet à un canal de communication utilisant la même ressource de transmission (par exemple, un canal radio) de diviser la transmission et la réception dans le temps. Lorsque les débits de transmission et de réception sont variés et inégaux, cette approche

présente un avantage évident. Il est possible de fournir une largeur de bande plus ou moins grande en fonction de l'augmentation ou de la diminution du débit de transmission.

Un autre avantage de cette technologie est qu'elle est applicable aux terminaux mobiles qui se déplacent à une vitesse très lente ou qui sont en position stationnaire.

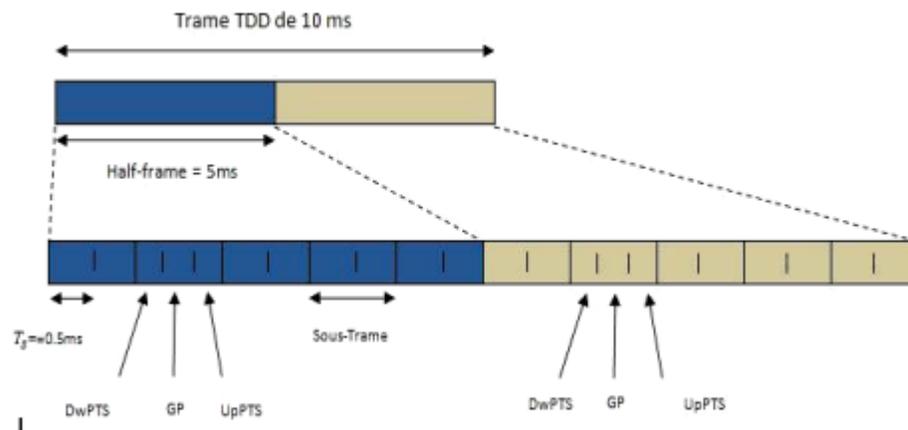


Figure II.10: présente la trame TDD.

Elle a la même durée qu'une trame **LTE** en mode **FDD**, c'est-à-dire 10 ms avec 10 sous-trames de 1 ms, à l'exception des sous-trames (1) et (2), qui contiennent des données de signalisation et Sont [11]:

- ❖ **GP** (Guard Période)
- ❖ **DwPTS** et **UpPTS**

II.6.6 La Mobilité

La mobilité d'un réseau mobile est une fonction essentielle. Le **LTE** entend maintenir la fonctionnalité pour les **UE** se déplaçant à grande vitesse (jusqu'à 350 km/h, voire 500 km/h selon la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour les faibles vitesses des **UE** (entre 0 et 15 km/h). Les services en temps réel tels que la voix doivent être fournis avec le même degré de qualité que dans la version 6 de l'**UMTS**[4].

Dans les cas où l'utilisateur se déplace à des vitesses rapides, le **LTE** ne prend en charge que le "Hard **Handover**" et non le "Soft **Handover**".

II.6.6.1 Le Handover

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

- a. **Hard Handover** : le terminal est servi par une seule station de base.
- b. **Soft Handover** : le terminal est servi par toutes les stations de base.

II.6.7 Modulation adaptative et codage

La modulation et le codage adaptatifs (**AMC**) sont une stratégie opportuniste qui tend à changer la technique de modulation et de codage en fonction de l'état du canal. Le type de modulation pris en charge par LTE est: QPSK, 16QAM, 64QAM. Voir le **Figure II.7[11]** :

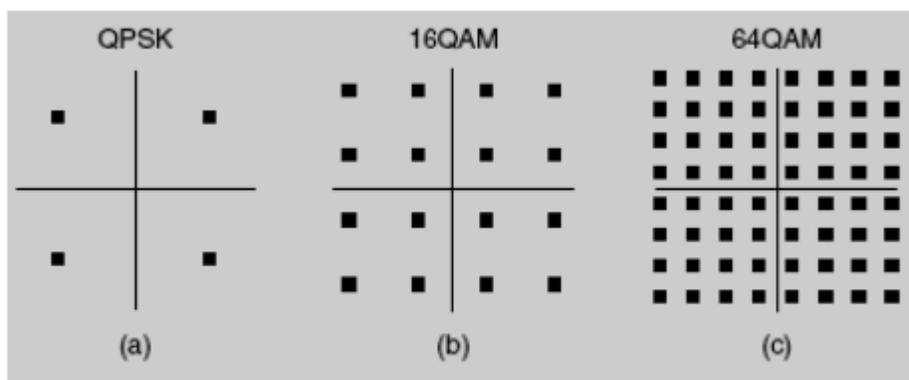


Figure II.11: Modulation LTE

Principalement par la mise en œuvre de la modulation 16 QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation à 16 états). Par rapport à la modulation UMTS, cette modulation double la capacité de transmission. La QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) qui est basée sur deux porteuses de même fréquence déphasées de 90 degrés. Chaque une de ces modulations est utilisée pour un lien précis tel que :

- Modulations **Downlink** : QPSK, 16QAM et 64QAM
- Modulations **Uplink** : QPSK et 16QAM

II.6.8 Les types de transmission utilisée dans la 4G

L'utilisation de ces deux méthodes, **OFDM**, **OFDMA** et **SC-FDMA**, comme mécanismes de support et d'accès au signal, est l'une des caractéristiques fondamentales de l'évolution **LTE**.

II.6.8.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

L'objectif de l'**OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est de distribuer le signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales, avec un préfixe cyclique ajouté entre les signaux **OFDM** pour éviter les interférences[12].

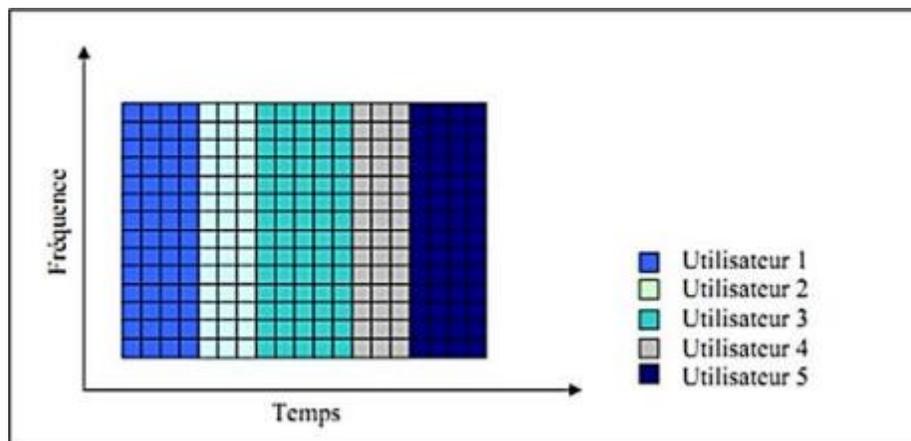


Figure II.12: Technique OFDM[11]

II.6.8.2 L'OFDMA (Technique d'accès multiple en voie descendante)

L'**OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est un système de codage radio qui découle de l'**OFDM** en adoptant la même notion de division de la bande passante en de nombreuses sous-porteuses.

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[11]

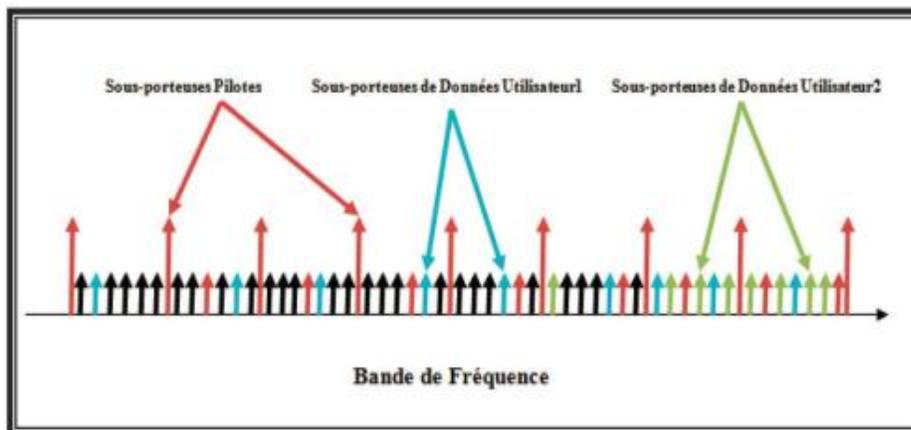


Figure II.13: Les porteuses de l'OFDMA

➤ La différence entre l'OFDM et l'OFDMA est que le premier ne servira qu'un seul utilisateur dans un intervalle de temps, alors que le second peut servir plusieurs utilisateurs dans la même période. Alors que l'OFDMA peut servir plusieurs consommateurs dans le même intervalle de temps.

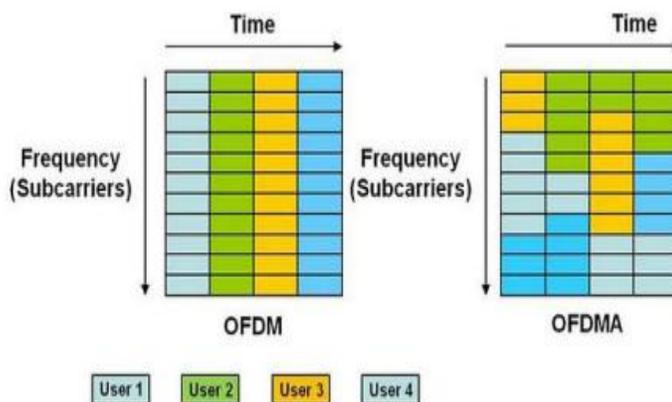


Figure II.14: La différence entre OFDM et OFDMA[11]

II.6.8.3 SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access)

Single-carrier **FDMA** est un système de codage radio à accès multiple par répartition en fréquence que l'on retrouve le plus souvent dans les réseaux de téléphonie mobile **LTE** de 4^{ème} génération.

Comme pour d'autres techniques à schéma d'accès multiples le but est l'attribution et le partage d'une ressource radio commune (bande de fréquence) entre plusieurs utilisateurs. Le codage **SC-FDMA** est une variation linéaire du codage **OFDM** et **OFDMA**.

En **OFDMA**, chaque symbole est diffusé par une sous-porteuse distincte (transmission multiporteuse), mais en **SC-FDMA**, chaque symbole est distribué sur toutes les sous-porteuses.

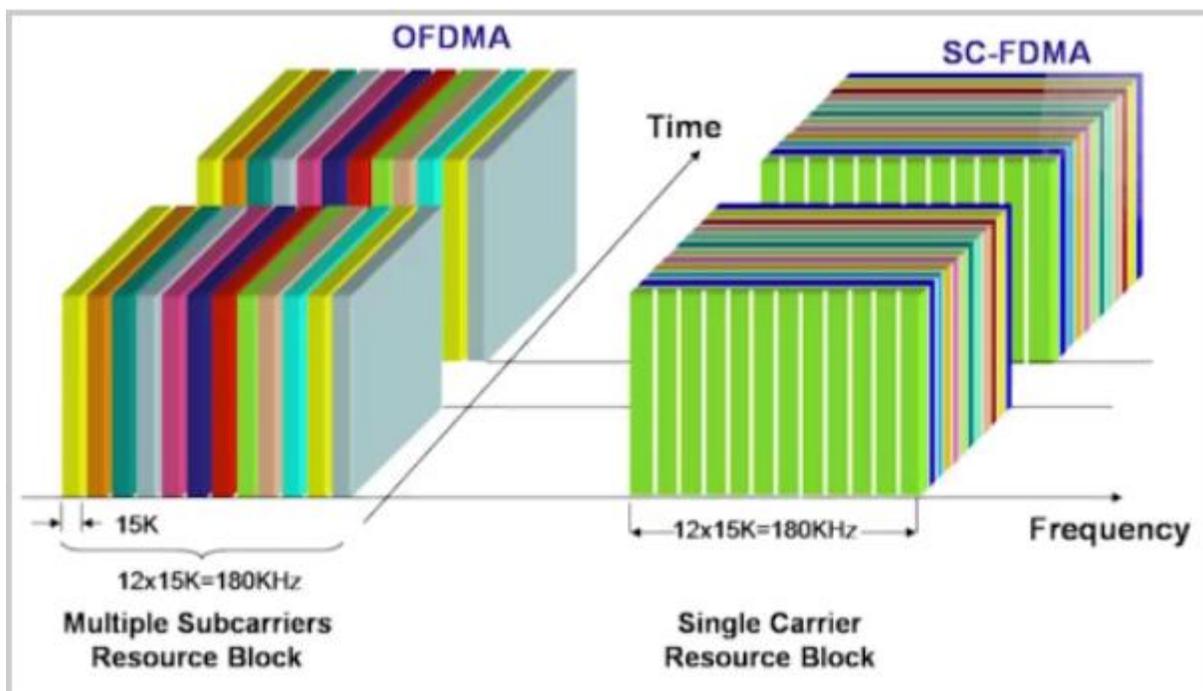


Figure II.15: La différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.

II.7 Inconvénients et avantages de LTE

Les premiers essais indiquent la capacité de la technologie à produire des vitesses mobiles extrêmement rapides dans des environnements fixes et mobiles. Cette technologie devrait permettre aux opérateurs d'optimiser la consommation du spectre, de minimiser les coûts opérationnels et de fournir aux consommateurs une faible latence, une latence très élevée et un débit très élevé.

Selon la norme **3GPP**, le **LTE** doit être capable de fournir des débits descendants de 100Mbps et des débits montants de 50Mbps. Cependant, tous les obstacles techniques n'ont pas été surmontés, notamment l'attribution des ressources du spectre. Pour répondre à la demande, **l'UIT-R** estime que 1GHz de spectre actuellement alloué aux télécommunications mobiles sera nécessaire.

II.8 La 4G dans le Monde

Les chiffres du haut débit mobile continuent d'augmenter rapidement dans le monde entier, reflétant la tendance à l'augmentation des ventes de smartphones, comme le montrent diverses études menées par des organismes tels que **GFK**, Médiamétrie et **IDC**. **L'IDATE** (Institut De L'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe) a publié son bilan de l'année 2014, qui comprend un examen des principales évolutions du marché mobile mondial, des réseaux, des terminaux et des services, ainsi que des estimations de la **4GLTE** pour 2018.

L'IDATE estime qu'il y avait 500 millions d'abonnés 4G dans le monde à la fin de l'année 2014, soit 7 % de l'ensemble des cartes SIM actives. L'IDATE et l'IDATE ont estimé qu'à la fin de 2018, le nombre d'abonnés LTE pourrait atteindre 2,3 milliards, toujours sur la terre entière (soit 29 % de l'ensemble des cartes SIM).

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

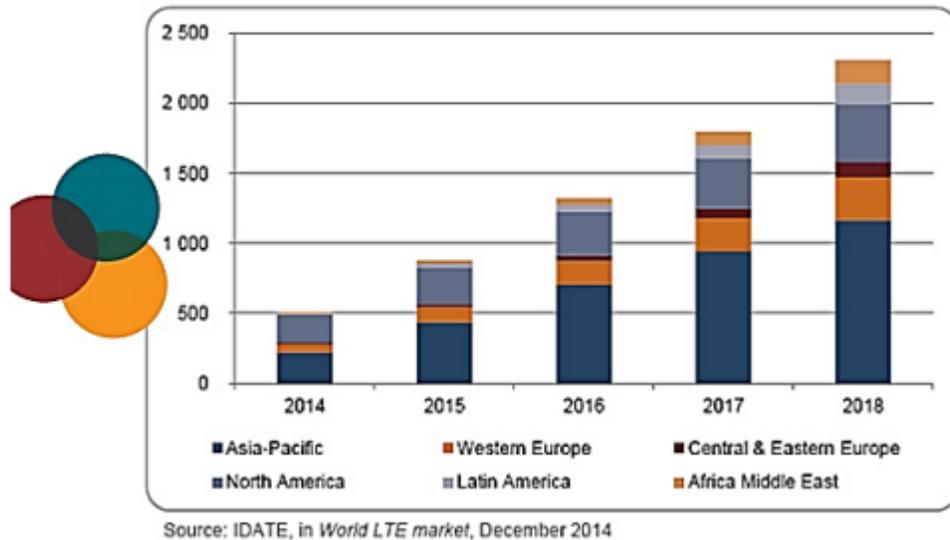


Figure II.16: Les marchés 4G et 4G+ dans le monde.

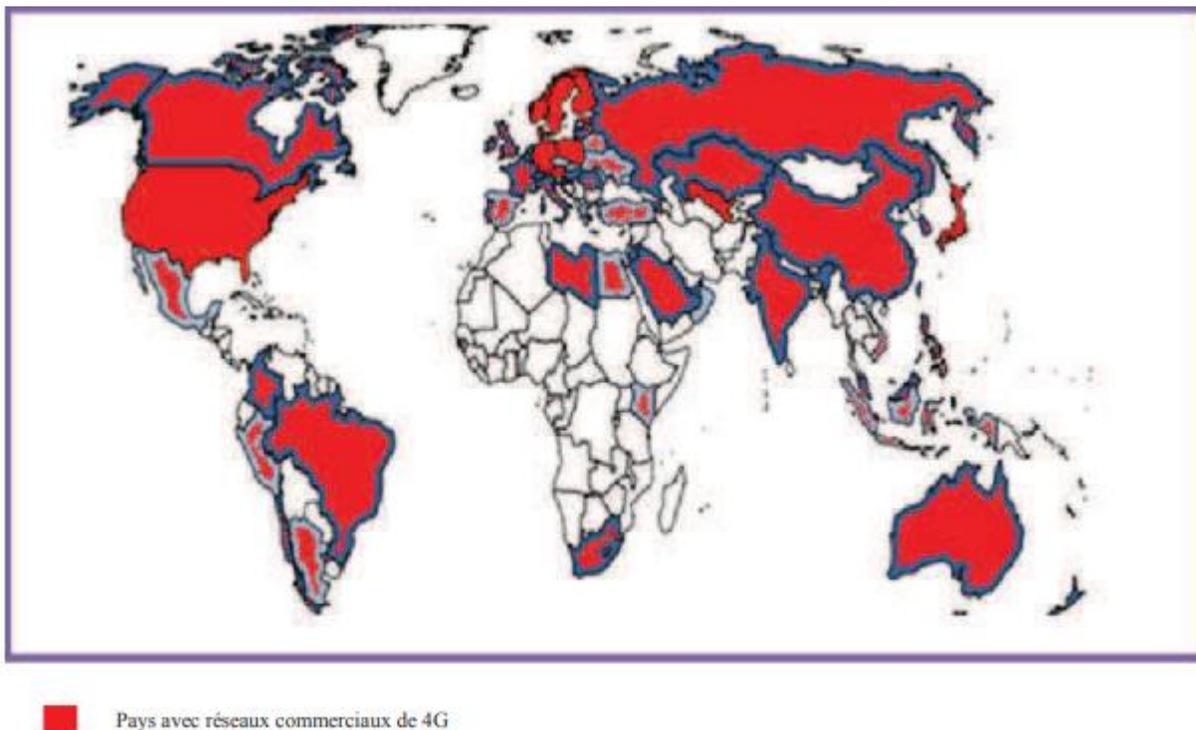


Figure II.17: Déploiement de la 4G dans le monde

II.9 Conclusion

Nous proposons dans ce chapitre un aperçu des nombreux composants et caractéristiques de la technologie **LTE** (quatrième génération) afin d'introduire le langage des mots utilisés dans cette technologie. Le chapitre suivant décrit les performances en matière de qualité de service de la technologie **LTE**. Par conséquent, nous discuterons de leurs nombreuses interactions.

Chapitre III

Généralités sur la Qualité de Service

III. La Qualité de service (QoS)

III.1 Introduction

Le but premier d'un opérateur est d'acquérir le plus grand nombre d'abonnés afin d'augmenter son chiffre d'affaires ; ainsi, chaque opérateur mobile doit se concentrer sur les demandes de ces clients afin d'augmenter son taux de popularité ; ainsi, il doit se préoccuper de l'amélioration de son réseau (couverture,) et des paramètres de Qualité de Service (débit, latence,).

L'objectif premier de tout réseau, que ce soit dans le domaine des télécommunications, de l'informatique ou autre, est de fournir les meilleures performances possibles. Pour cela, le taux de Qualité de Service doit être au moins au niveau des critères des utilisateurs, afin qu'ils soient pleinement satisfaits.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents facteurs de la qualité de service et les performances des réseaux **4G**.

III.2 Définitions de la Qualité de service (QoS)

La capacité à transmettre un certain nombre de paquets dans de bonnes conditions dans une connexion entre un émetteur et un récepteur est appelée qualité de service (**QoS**), et elle peut être exprimée de diverses manières, notamment par la disponibilité, le débit, les délais de transmission, la gigue, le taux de perte de paquets, etc.

Il s'agit d'un ensemble de technologies utilisées pour assurer un débit adéquat et constant sur toutes sortes de réseaux.

III.3 Le But de la QoS

L'objectif de la **QoS** est donc d'optimiser les ressources du réseau et de garantir des performances optimales des applications. La **QoS** sur les réseaux permet d'offrir aux utilisateurs des débits et des temps de réponse variés en fonction des protocoles utilisés au niveau de la couche réseau.

Elle permet aux fournisseurs de services de convenir explicitement avec leurs clients des caractéristiques de transit des données applicatives sur leurs infrastructures **IP**.^[17]

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

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

III.4 Les Paramètres de la QoS

La qualité de service à l'intérieur d'un réseau spécifique est déterminée par les différents équipements qui composent le réseau, ainsi que par le trafic qui y transite, etc.

Outre les applications traditionnelles, les applications multimédias telles que la **VoIP** ou la vidéo à la demande seront de plus en plus utilisées dans ce type de réseau. Ces applications multimédias exigent un degré minimum de qualité de service en termes de bande passante, de latence, de gigue ou de taux de perte de paquets.

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

III.4.1 Le débit

Elle spécifie la quantité maximale d'informations (bits) qui peuvent être transmises par unité de temps (s) dans une communication entre un émetteur et un récepteur.

III.4.2 Le taux de perte

Le taux de perte (taux de perte et taux d'erreur) indique la probabilité maximale de perte de données ou de paquets. Sans unité, ce paramètre est évidemment très inférieur à 1. Nous continuerons à nous efforcer d'obtenir un taux de perte égal à zéro, ce qui dénote une qualité de service exceptionnelle.

III.4.3 Le délai de transit (Latence)

C'est le temps que met un paquet pour aller d'un bout à l'autre du réseau. Les nombreuses applications disponibles sur ce réseau n'auront pas le même degré d'exigence selon leur nature : **faible** s'il s'agit de message électronique ou de fichiers transférés, **fort** s'il s'agit de données "**vocales**". Le délai est déterminé par le temps de propagation (qui varie en fonction du type de support de transmission), le temps de traitement (qui varie en fonction du nombre de dispositifs traversés) et la taille des paquets (temps de sérialisation).

III.4.4 La Gigue (Jitter ou Delay variation)

Elle exprime la variance du délai de transmission en millisecondes (ms) (latence des paquets). L'existence de la gigue dans les flux peut être causée par les fluctuations de l'intensité du trafic sur les connexions de sortie des commutateurs ; plus largement, elle est déterminée par le volume du trafic et le nombre de dispositifs sur le réseau.[15]

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

III.4.6 Priorité des paquets

La gestion du trafic peut être placée au sein du réseau ou à sa périphérie pour arbitrer entre les modes "**rafale**" et "**flux**" décrits précédemment. S'il se trouve à l'intérieur du réseau, les nœuds du réseau servent d'éléments de classification et de priorité pour les paquets qui le traversent. Si l'appareil est situé à l'extérieur, les équipements du réseau sont libérés de toute **QoS**.

Le contrôle de flux **TCP**, qui modifie le flux des applications **TCP** en fonction des circonstances de charge du réseau et du niveau de priorité des applications,

Et la gestion personnalisée des files d'attente, qui distribue les flux entrants dans leurs files d'attente respectives, sont alors à l'œuvre.

III.5 Les critères utilisés pour assurer la QoS

Pour exécuter un excellent service, nous devons d'abord nous placer 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.

III.6 La gestion de la qualité de service

Aujourd'hui, le protocole **IP** s'efforce de s'imposer dans la plupart des infrastructures de réseau, que ce soit dans les réseaux locaux des entreprises, l'Internet bien sûr, qui a vu son origine, mais aussi les **backbones** des fournisseurs.

L'autre tendance est l'entrée imminente des applications multimédia dans les foyers, les entreprises et les sociétés (vidéoconférence, **VoIP**, audio, vidéo, jeux en réseau...). Or, pour un fonctionnement régulier et le bonheur des utilisateurs, ces applications doivent s'appuyer sur un réseau performant et fiable. C'est particulièrement vrai pour les applications audio, qui doivent respecter des délais de transmission très stricts.

Le protocole **IP** assure désormais le même traitement à tous les paquets qu'il voit transiter (notamment sur Internet), sans tenir compte des spécificités des applications émettrices ou de leurs limites (en bande passante, latence...), c'est le fameux **Best-Effort**.

C'est pourquoi, depuis la fin des années 1980, l'**IETF** (Internet Engineering Task Force) tente de remédier au talon d'Achille du protocole **IP**. C'est ainsi que deux groupes de travail ont été

formés, chacun d'entre eux ayant généré deux modèles de gestion de la qualité de service (QoS) : le modèle **IntServ** et le modèle **DiffServ**.

a) Le modèle IntServ

IntServ (Integrated Services) est le processus qui consiste à réserver les ressources appropriées à tous les nœuds du réseau avant la transmission des flux. Cette méthode est basée sur le **RSVP** (Resource Reservation Protocol), qui déclenche ensuite une couche supplémentaire de contrôle d'admission pour garantir que la bande passante appropriée est accessible à tout moment. L'instant est **T**.

Les routeurs **IntServ** doivent tenir des tables pour enregistrer le statut de chaque flux et l'allocation des ressources. **DiffServ** est une méthode de contrôle de la qualité de service (QoS) sur un réseau **IP**.

b) Le modèle DiffServ

Le **DiffServ** (Differentiated Services), est un protocole qui consiste à affecter des priorités au niveau d'un champ de l'entête **IP** appelé **DSCP** (DiffServ Control Protocol). Il offre une gestion différenciée par classes de services en gérant par priorités les files d'attente des routeurs correspondantes à chaque classe de trafic. Il n'est cependant pas question de garantir une **QoS** absolue comme dans **IntServ**, mais juste d'améliorer le **Best-Effort** en proposant une garantie de **QoS** relative. L'approche **DiffServ** permet un déploiement et une exploitation simplifiée du réseau [16].

III.7 La notion de Bearer

Les ressources de traitement au sein des nœuds de tout réseau sont limitées et partagées entre les utilisateurs. Entre les utilisateurs Selon la nature et la technologie du réseau, l'augmentation de ces ressources par l'opérateur peut être difficile et coûteuse. La ressource radioélectrique (spectre), par exemple, est très coûteuse dans un réseau mobile.

Cette préoccupation a donné lieu à l'étude de stratégies visant à optimiser l'utilisation de ces ressources sur l'interface radio, mais aussi sur les autres interfaces réseau incluses dans le plan **UE - Network** user. Ces algorithmes de **QoS** s'efforcent de fournir un service satisfaisant à l'utilisateur tout en limitant les ressources nécessaires pour y parvenir.

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

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

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

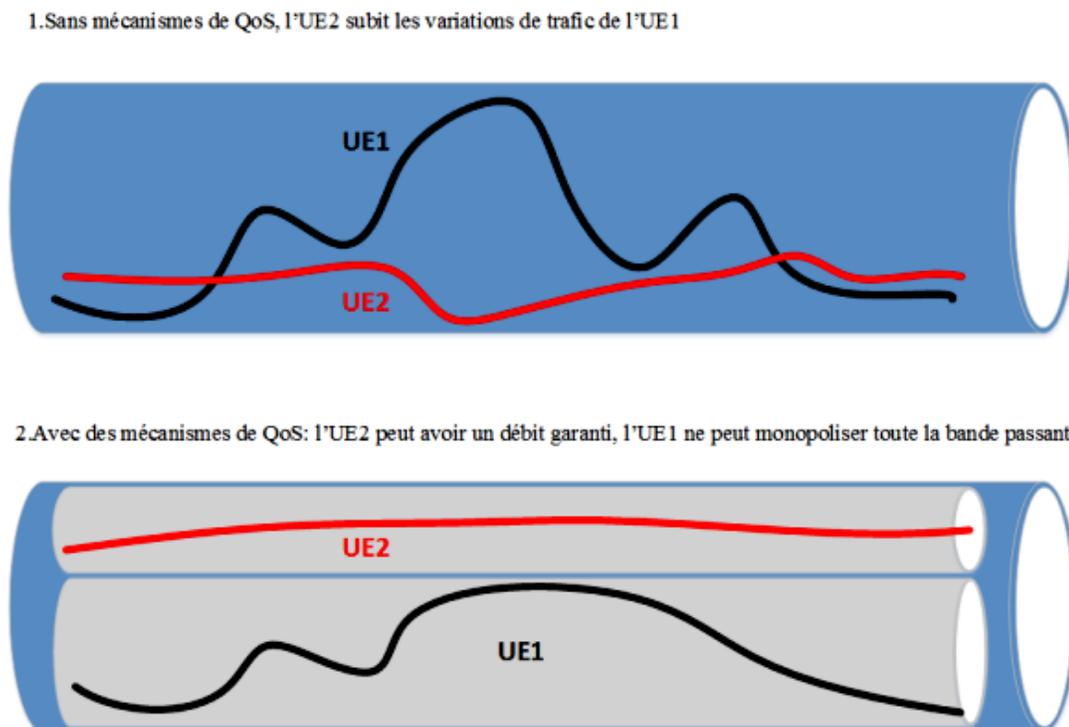


Figure III.1: Besoin de mécanismes de QoS lors d'un accès à des ressources partagées[4].

Le concept de **Bearer** a été établi dans les télécommunications dès la construction du système **GSM** pour distribuer efficacement les ressources aux demandes d'un appel.

Un **Bearer** peut être considéré comme un tuyau entre deux entités du réseau qui communiquent entre elles sur une interface, tuyau dont les caractéristiques sont négociées entre ces entités au cours du entre deux entités du réseau qui communiquent entre elles sur une interface, tuyau dont les caractéristiques sont négociées entre ces entités et qui permet le transfert de données. L'idée du **Bearer** est par conséquent rejetée sur les interfaces réseau où les ressources doivent être préservées, à savoir sur les interfaces :

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

III.8 Efficacité QoS

Ces applications, qui ont des exigences de qualité de service, sont disponibles sur le réseau LTE. Comme il s'agit d'un réseau tout-paquet, il faut trouver un moyen de discriminer les flux de paquets en fonction des besoins de QoS.

La QoS des flux appelés "EPS Bearers" est formée entre l'UE et le P-GW : c'est un support radio qui transmet les paquets d'un EPS Bearer entre un équipement utilisateur et un eNB, comme l'illustre la figure III.2.

Chaque flux IP est attribué à un porteur EPS distinct, et le réseau détermine la priorité du trafic. Lorsque le P-GW reçoit un paquet IP de l'Internet, il le classe en fonction de paramètres prédéterminés et le transmet au porteur EPS approprié.

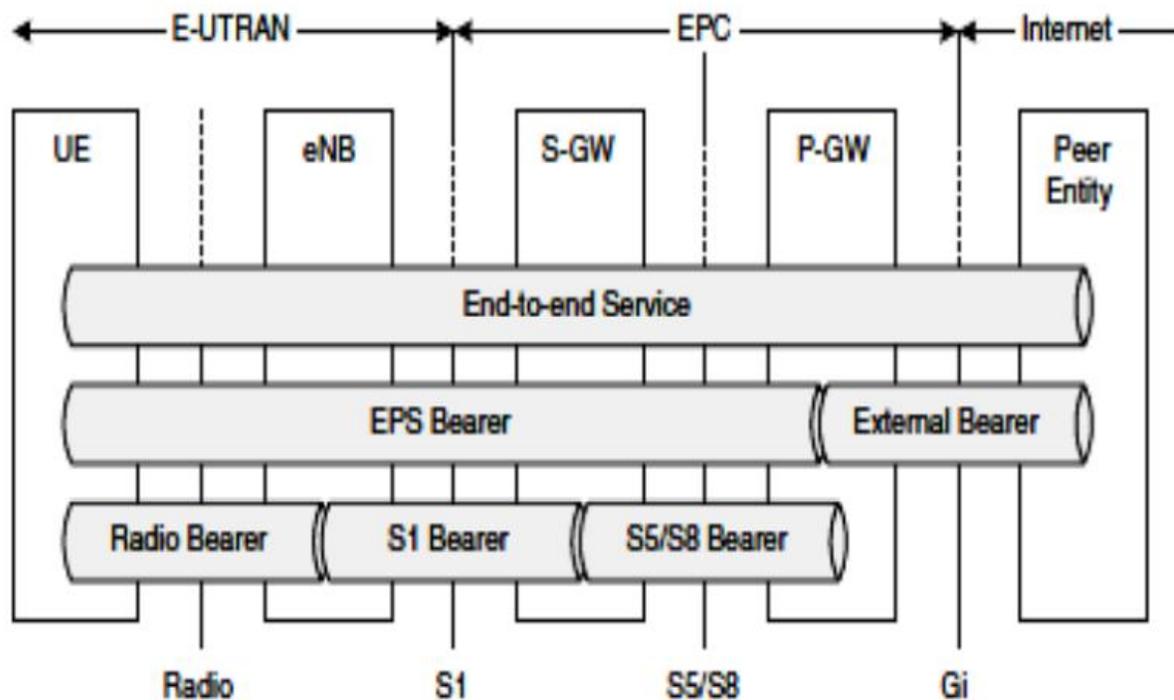


Figure III.2: EPS Bearers

III.9 Qualité de service en LTE/EPC

Le **LTE** a été conçu pour faire la distinction entre les services qui nécessitent un débit binaire garanti (Guaranteed Bit Rate, **GBR**) et ceux qui ne le nécessitent pas (**Non-GBR**). (Guaranteed Bit Rate) des services à débit binaire non garanti (**Non-GBR**).

La qualité de service est obtenue dans le réseau **LTE** entre l'équipement d'utilisateur et la passerelle **P-GW** ou **PDN**, qui est appliquée à un groupe de supports. "**Bearer**".

Le terme "**Bearer**" fait référence à une notion virtuelle qui est une collection de configurations de réseau qui offrent un traitement unique à un certain groupe de trafic. Les paquets de voix sur IP, par exemple, sont traités en priorité par le réseau par rapport à l'activité du navigateur Web[14].

Dans les réseaux **LTE**, la **QoS** est appliqué sur les Radio **Bearer**, **S1Bearer** et **S5/S8**

Bearer, encore appelé **EPSBearer** (Evolved Packet System Bearer) comme le montre la

Figure III.3.

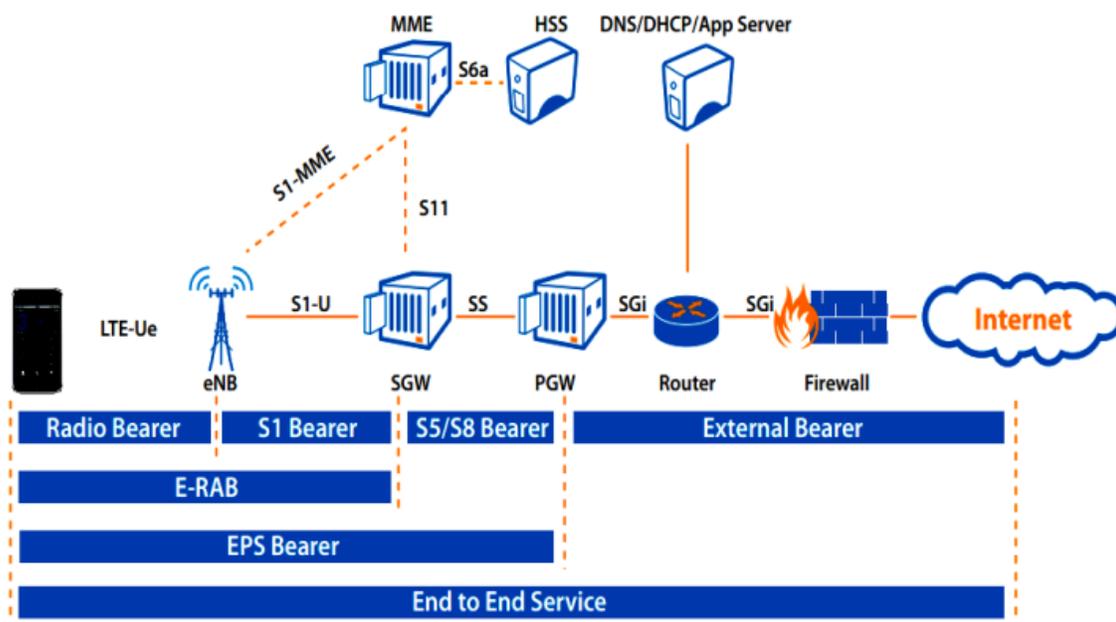


Figure III.3: QoS dans LTE/EPC.

Il Existe deux types de **Bearer** :

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

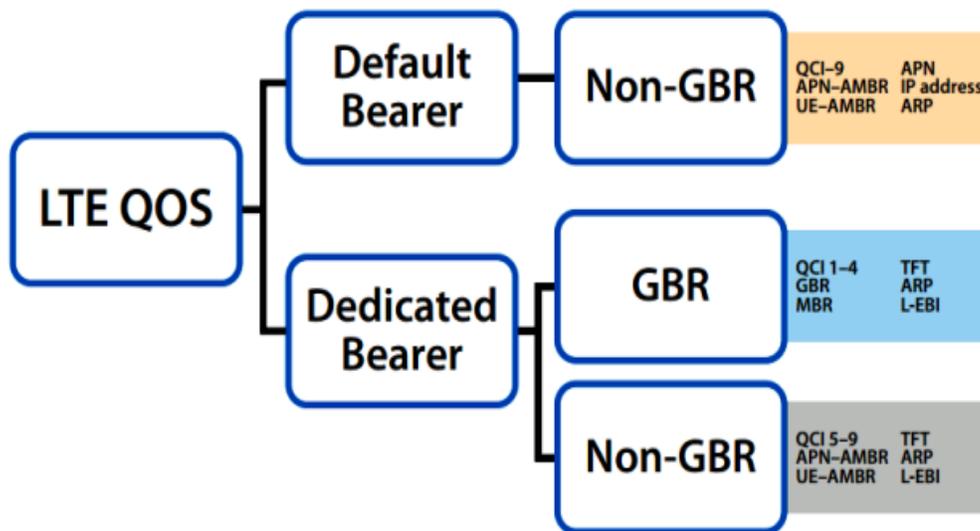


Figure III.4: Type de Bearer de la QoS dans LTE/EPC.

- **Le Default Bearer** : le premier bearer Établi lorsque le terminal se connecte à un PDN, il reste actif durant toute la connexion.

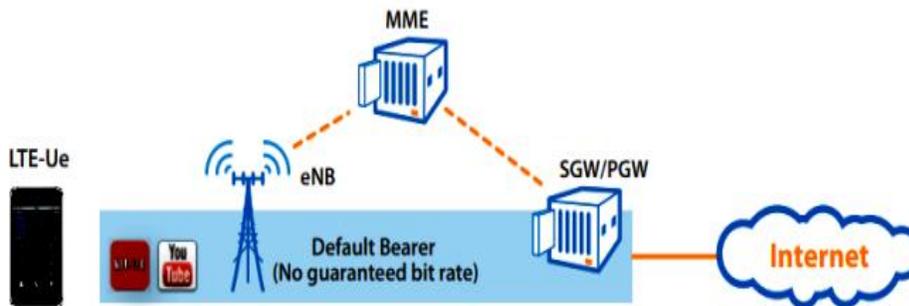


Figure III.5: Default Bearer.

- **Le Dedicated Bearer** : tous les bearers additionnels établis avec le même PDN

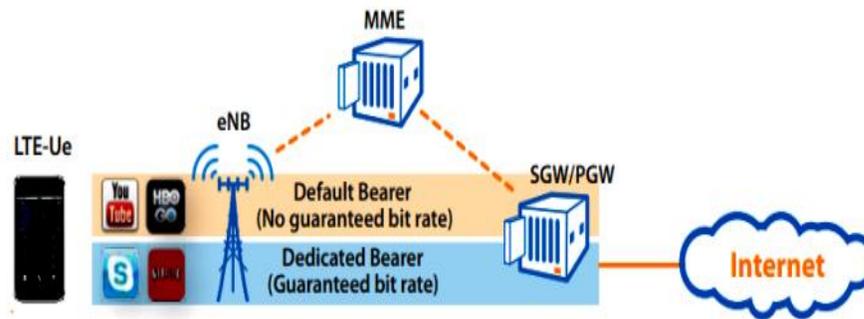


Figure III.6: Dedicated Bearer.

III.10 Les Performance des réseaux 4G

III.10.1 Une mobilité à toute épreuve

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

III.10.2 Des temps de réponse rapides

L'utilisation d'une communication avec des débits toujours plus importants peut ne pas être souhaitable si le transport des données prend un temps anormalement long. Pour cela, la **4G** offre une latence typique de 20 ms, avec une latence maximale de 5 ms.

III.10.3 La voix sur IP

La **4G** offre un service vocal basé sur le protocole **IP**. En fait, cette norme est basée sur un réseau de transport de paquets **IP**. Il n'est pas prévu de disposer d'un mode d'acheminement pour la voix ou la **VoIP**.

III.10.4 Débit sur l'interface radio

Le premier débit **4G** est de 100 Mbit/s pour la "liaison descendante" et de 50 Mbit/s pour la "liaison montante". L'interface radio **e-UTRAN** doit être capable de supporter un instantané descendant maximum (du réseau au terminal) de 100 Mbit/s et un instantané montant maximum (du terminal au réseau) de 50 Mbit/s tout en tenant compte d'un allotissement de fréquences de 20 MHz[23].

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 spectrale de 5 bits/s/Hz pour le sens descendant et de 2,5 bits/s/Hz pour le sens montant.

III.10.5 Connexion permanente

Le principe fondamental de l'accès Internet à haut débit, dans lequel la connectivité est permanente. Même si la connexion au réseau est permanente, le terminal doit passer de l'état **IDLE** à l'état **ACTIF** lorsqu'il envoie ou reçoit du trafic. Ce changement d'état se produit en moins de 100 millisecondes. Comme chaque terminal connecté possède une adresse **IP**, le réseau peut recevoir du trafic de n'importe quel terminal connecté, le stocker en mémoire, effectuer une radiomessagerie pour localiser le terminal et demander que des ressources soient réservées afin de pouvoir relayer son trafic.

III.10.6 Délai pour la transmission de données

Dans un environnement sans charge avec un seul terminal **ACTIF** sur l'interface radio, le délai entre l'**UE** et la passerelle d'accès est inférieur à 5 ms. Dans une condition de charge moyenne, la valeur moyenne du délai de l'interface radio devrait être d'environ 25 ms. Cela permet une prise en charge native des services **IP** en temps réel tels que la **VoIP** et le streaming **IP**.

III.10.7 Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G

Le **handover** doit se produire dans un délai de 300 ms pour les services en temps réel et de 500 ms pour les services en temps non réel entre **e-UTRAN (LTE)** et **UTRAN (3G)**. Il est évident qu'au début du déploiement du **LTE** Il est évident qu'au début du déploiement du **LTE**, seuls quelques endroits seront couverts. Il sera de la responsabilité de l'opérateur de s'assurer que le handover entre le **LTE** et le **2G/3G** est toujours possible. Le transfert entre les réseaux **LTE** et **CDMA-2000** sera également possible. Les opérateurs **CDMA** passeront également au **LTE**, qui

est en train de devenir rapidement la véritable norme de communication mobile de quatrième génération.

III.10.8 Flexibilité dans l'usage de la bande

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

III.11 Exemples de Qualité de Service

À travers ces quelques exemples, il est clair que les exigences de **QoS** peuvent varier. Par exemple, si l'on veut distribuer de la vidéo à la demande, on aura besoin d'une transmission en temps quasi réel avec une très faible latence et une faible gigue ; mais il ne sera pas dramatique de perdre une image de temps en temps ou d'avoir une qualité d'image légèrement dégradée. En fonction de l'application, on sera obligé de faire le meilleur compromis pour fournir la meilleure **QoS** possible, sachant qu'il n'existe pas de solution qui résout tous les problèmes à la fois.

Avec une plus grande largeur de bande disponible pour les utilisateurs, les applications réseau ont évolué, ou plus précisément, de nouvelles applications sont apparues : les applications multimédia. Parmi ces applications, on trouve les appels téléphoniques **IP**, la distribution de musique, les vidéoconférences et la vidéo à la demande. Comme ces nouvelles applications consomment beaucoup de ressources, les réseaux traditionnels doivent disposer de mécanismes de **QoS** pour gérer le flux continu de données. Nous avons examiné ici les limites de ces applications.

III.11.1 Contraintes communes aux applications multimédia

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

III.11.2 La téléphonie sur IP

La principale contrainte de la téléphonie sur **IP** est le délai. Pour qu'une conversation puisse avoir lieu convenablement, il est nécessaire d'avoir une latence inférieure à 35 ms. Pour assurer ce délai, les routeurs ne doivent pas comporter des files d'attente trop longues. En effet, de

longues files d'attente permettent d'obtenir un débit plus élevé puisque moins de paquets sont perdus mais le temps passé dans les files augmente. Dans l'idéal, les routeurs doivent avoir une file prioritaire à faible latence pour les flux de voix sur **IP**.

III.11.3 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[24].

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous définissons la **QoS** et présentons ses nombreux paramètres et critères, suivis d'une brève section décrivant les performances des réseaux sans fil **4G**.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation de divers paramètres de **QoS** observés dans les réseaux **4G LTE**.

Chapitre IV

Simulation, Résultat Et Implémentation

IV. Simulation et Implémentation

IV.1 Introduction

Les simulateurs de réseau permettent de réduire considérablement les délais et les coûts de réalisation des travaux de simulation. Ils sont également utilisés par les concepteurs de réseaux pour tester de nouveaux protocoles ou modifier les protocoles actuels de manière contrôlée et productive.

Dans mon travail de thèse, nous devons être en mesure de décrire et d'analyser les concepts de qualité de service dans les réseaux **4G LTE**. Par conséquent, nous voulons un logiciel de simulation qui non seulement supporte la technologie LTE, mais aussi un logiciel qui inclut des modules ou des fonctionnalités permettant de traiter les difficultés liées à la qualité de service et à l'analyse du trafic.

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

IV.2 Choix du simulateur

Le choix s'est porté sur **NS-3** (Network Simulator 3) qui est un des logiciels qui ont mis à la disposition de ses utilisateurs le module de simulation **LTE**. En outre, le **NS-3** dispose d'un support complet sur la définition et l'analyse des scénarios des réseaux à simuler. Le **NS-3** dispose aussi d'une documentation officielle complète ainsi que d'un riche comité d'utilisateur. Le **NS-3** est un programme open source, librement téléchargeable et écrit en langage **C++** avec des outils en **Python**. Pour pouvoir être fonctionnel, le **NS-3** doit être au préalable compilé. Des outils comme **WAF**, qui est un Framework basé sur **Python**, permettent justement d'installer, compiler et configurer notre simulateur.

IV.3 Présentation du simulateur NS-3

Le **NS-3** est un simulateur de réseaux à événements discrets, ciblé principalement pour la recherche et l'utilisation pédagogique. Le projet **NS-3**, lancé en 2006, est un projet open-source. Les développeurs de **NS-3** ont décidé que l'architecture de simulation devait être remaniée complètement en partant du Zéro. Dans cette optique, l'expérience tirée de **NS-2** doit être associée avec les progrès des langages de programmation et du génie logiciel. L'idée de la rétrocompatibilité avec **NS-2** a été abandonnée dès le départ. Cela libère **NS-3** de contraintes héritées de **NS-2** et permet la construction d'un simulateur qui est bien conçu depuis le début[20].

IV.4 Les Mots Clés

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

- **Un nœud "Node"** : Représente tout élément de réseau. La composition d'un nœud peut être gérée (ajout de composants, d'applications et de protocoles).
- **Une application "Application"** : Représente un code exécuté par un utilisateur. Ce code peut être nécessaire au déroulement d'une simulation. L'échange de paquets durant une simulation nécessite, par exemple, la description d'une application au sein des nœuds participants. Les applications peuvent être attachées à un nœud.

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

- **Un canal de communication "Channel"** : Dans le monde réel, on peut connecter un ordinateur à un réseau. Souvent, les médias sur lesquels les flux de données dans ces réseaux sont appelés canaux. Lorsque vous connectez votre câble Ethernet à la prise dans le mur, vous connectez votre ordinateur à un canal de communication Ethernet. Dans le monde simulé de **ns-3**, on connecte un nœud à un objet qui représente un canal de communication. La communication de base abstraction de sous-réseau est appelé le canal et est représenté en **C++** par la classe `channel`.
- **Une interface de communication** : Appelée `NetDevice`, qui modélise à la fois les équipements et les pilotes de communications. Des spécialisations sont fournies, comme par exemple `LTENetDevice`, qui peut être relié à un `LTEChannel`. S'il s'agit de connecter un grand nombre de nœuds pour un réseau, ce processus peut être très lourd. **NS-3** fournit des `TopologyHelpers` pour faciliter ce genre de tâches ; Exemple : `LTEHelper`"[16].

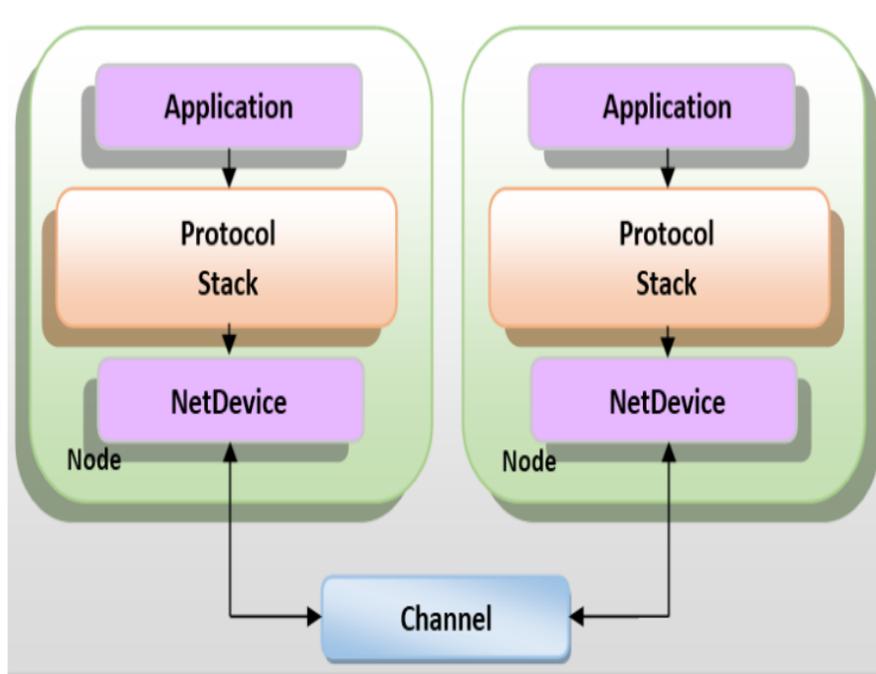


Figure IV.1: Architecture du nœud NS-3.

IV.5 Installation du simulateur NS-3

Pour installer NS-3 nous devons avoir une interface Linux, et cela ce fait soit en installant Linus directement sur la machine ou bien utiliser une machine virtuel (**VirtualBox** ou **VMware**), ce qui implique qu'on peut utiliser « **Ubuntu** » comme interface de **Linux**. Les étapes suivantes sont des commandes pour télécharger et installer les différents paquets utilisés dans **Ubuntu**.

➤ **Ubuntu/Debian (Linux) :**

La liste suivante de paquetage doit être téléchargée pour la version « **Ubuntu 16.04 LTS** ».

- **Package pour C++ :** C'est le package minimal pour le besoin de l'installation de NS-3.
sudo apt-get install gcc g++ python
- **Paquetage pour Python :** sudo apt-get install gcc g++ python python-dev
- **Package pour Mercurial :** sudo apt-get install mercurial
- **Package pour Bazaar utilisé pour l'exécution des scripts Python sur NS-3 :** sudo apt-get install 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

- **Le Network Simulation Cradle (NSC):** Requiert le Flex Lexical Analyzer et Bison Parser Generator. `sudo apt-get install flex bison libfl-dev`
- **Installation des paquets gcc et g++ de la leur dernière version:** `sudo apt-get install g++-4.6 gcc-4.6`
- **Pour lire Pcap Packet Traces :** `sudo apt-get install tcpdump`
- **Database support pour statistics framework:**`sudo apt-get install sqlite sqlite3 libsqlite3-dev`
- **Xml-based version pour la config store (requiert libxml2->= version 2.7):** `sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev`
- **A GTK-based configuration system:** `sudo apt-get install libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev`
- **Pour expérimenté avec virtual machines et le NS-3:** `sudo apt-get install vtun lxc`
- **Support for utils/check-style.py code style check program:** `sudo apt-get install uncrustify Doxygen and related inline documentation: sudo apt-get install doxygen graphviz imagemagick`
`sudo apt-get install texlive texlive-extra-utils texlive-latex-extra`
- **NS-3 Manuel et tutoriel sont écrits en reStructuredText pour Sphinx (doc/tutorial, doc/manual, doc/models et les figures typiques en dia:** `sudo apt-get install python-sphinx dia`
- **Support pour NS-3-pyviz visualisation de Gustavo Carneiro:** `sudo apt-get install python-pygraphviz python-kiwi python-pygoocanvas libgoocanvas-dev`
- **Support pour openflow module (requiert quelques bibliothèques d'accélération):** `sudo apt-get install libboost-signals-dev libboost-filesystem-dev`
- **Support pour MPI-based distributed emulation:**`sudo apt-get install openmpi*`

Après toutes ces étapes nous allons maintenant passer à l'installation de **NS-3**, en commençant par le téléchargement du dossier **NS-3**[19].

Cd

mkdir tarballs

cd tarballs

wget <http://www.nsnam.org/release/ns-allinone-3.28.1.tar.bz2>

tar xjf ns-allinone-3.13.tar.bz2

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

build.py ns-3.13 / pybindgen-0.15.0.795/ util.py

constants.py nsc-0.5.2 / README

IV.6 Compilation du NS-3

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

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

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

IV.7 Exécution d'un script de simulation

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

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

Script en C++

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

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

IV.8 Déroulement de la simulation

Premièrement, nous utilisons une machine virtuelle (**VMware** ® Workstation 16 Pro), sur laquelle nous avons installé le système linux (**Ubuntu** 16.04 LTS)

Ma simulation a été réalisée sous le simulateur **NS-3** (**version** 3.28.1), qui possède un module qui permet de simuler le réseau **LTE** avec une variété de mécanismes de qualité de services.

Nous avons aussi utilisé Office pour la représentation graphique de nos résultats. Dans notre script, nous créons un réseau **LTE** composé un **PGW**, d'un **3UE** et 2 point de communication **eNodeB**, qui supporte la **QoS** avec un adressage aléatoire,[21].

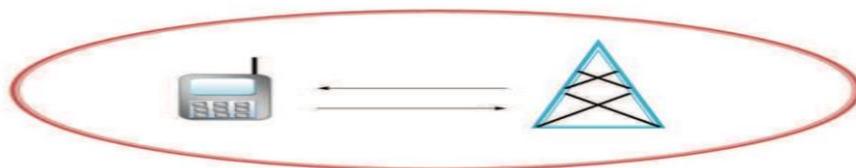


Figure IV.2 : Architecture du réseau 4G LTE[20].

IV.9 Architecture de test

La simulation peut y être alors exécutée afin d'en extraire les résultats comme le montre la **Figure IV.3**

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

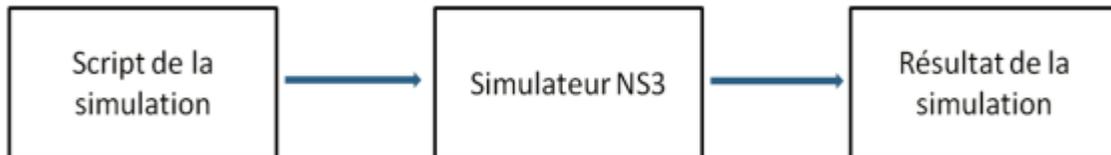


Figure IV.3:La réalisation d'une simulation dans NS3

IV.10 Les critères utilisés dans notre simulation

La norme **LTE** définit des critères de qualité qui sont utilisés pour évaluer la qualité de transmission dans les liaisons descendantes "**Downlink**" et ascendantes "**Uplink**".

Nous utilisons une bande passante de 10 MHz pour les liaisons montantes et descendantes. L'exemple fourni décrit comment la qualité du canal diminue à mesure que la distance entre l'**UE** et l'**eNB** augmente.

Parmi ces critères figurent le **CQI** (Channel Quality Indicator), qui est un indicateur de la qualité du canal, ainsi que le **SINR** (Signal Interference Noise Ratio), qui est un rapport signal/bruit, et le **TB** (Transport Block)[21].

IV.10.1 Le SINR :

Le rapport signal/bruit est une mesure de la qualité de la transmission de l'information qui s'exprime généralement en décibels (**dB**). Il s'agit du rapport de force entre :

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

IV.10.2 Le CQI :

L'**CQI** est un élément essentiel du réseau **LTE** ; cet indicateur est principalement utilisé pour évaluer la qualité de la liaison descendante d'une communication, qui sert à tester la qualité du canal de transmission. Une fois reçu par l'**UE**, ce dernier l'envoie à l'**eNodeB** pour déterminer s'il doit être augmenté afin d'avoir une bonne communication.

IV.10.3 Le TB :

En **LTE**, un **TB** (Bloc de Transport) est défini comme les données acceptées par la couche physique qui doivent être combinées. La chronométrie (choix du moment) de chaque bloc de transmission est alors précisément liée à cette Couche 1, par exemple, chaque bloc de transmission est produit précisément toutes les 10 ms, ou un multiple de 10 ms.

IV.11 Résultats de simulation :

Le script_1 en C++ :

```
#include "ns3/lte-helper.h"
#include "ns3/epc-helper.h"
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include "ns3/config-store.h"
// #include "ns3/gtk-config-store.h"
using namespace ns3;

/**
 * Sample simulation script for LTE+EPC. It instantiates one eNodeB,
 * attaches three UE to eNodeB starts a flow for each UE to and from a remote host.
 * It also instantiates one dedicated bearer per UE
 */
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("BearerDeactivateExample");
int
main (int argc, char *argv[])
{
    uint16_t numberOfNodes = 1;
    uint16_t numberOfUeNodes = 3;
    double simTime = 1.1;
    double distance = 60.0;
    double interPacketInterval = 100;

    // Create a single RemoteHost
    NodeContainer remoteHostContainer;
    remoteHostContainer.Create (1);
    Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
    InternetStackHelper internet;
    internet.Install (remoteHostContainer);

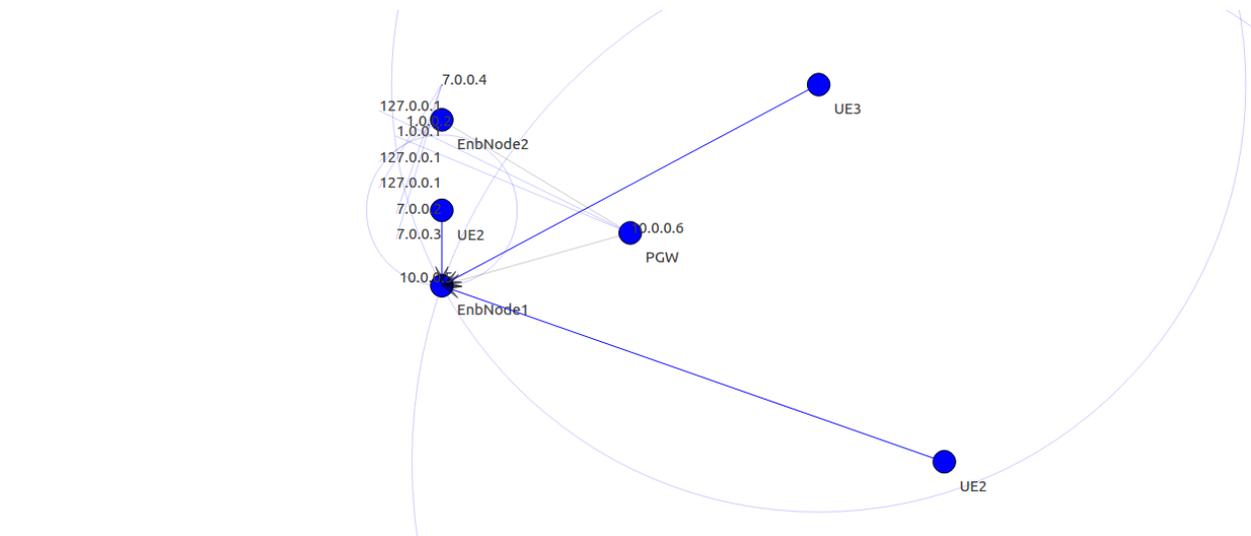
    // Create the Internet
    PointToPointHelper p2ph;
    p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100Gb/s")));
    p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (1500));
    p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.010)));
    NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw, remoteHost);
    Ipv4AddressHelper ipv4h;
    ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
    Ipv4InterfaceContainer internetIpifaces = ipv4h.Assign (internetDevices);
    // interface 0 is localhost, 1 is the p2p device
    Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpifaces.GetAddress (1);

    Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
    Ptr<Ipv4StaticRouting> remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (remoteHost->GetObject<Ipv4> ());
    remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);

    // create nodes user /eNB
    NodeContainer ueNodes;
    NodeContainer eNBNodes;
    eNBNodes.Create (numberOfNodes); // 2 station de base
    ueNodes.Create (numberOfUeNodes); // 3 users

    // Install Mobility Model
    Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
    for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++)
    {

```



FigureIV.4 : Exemple de Début de la simulation d'un Système LTE

Scénario_1 :

Il ya 2 antennes locales, 3 utilisateurs, une passerelle de réseau de données par paquets et un comme indique ci-dessous.

Les antennes marquées comme nœuds EnbNode (1,2) et les utilisateurs comme nœuds UE(1,2,3) parmi lesquels les UE est des utilisateur mobiles et un nœud comme PGW.

- Le scénario considéré est implémenté dans le fichier **lena-simple-epc.cc** présent dans la branche **ns-3-lte**

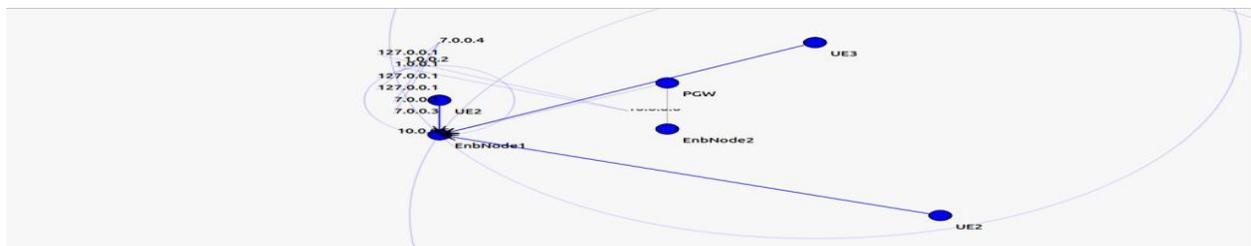
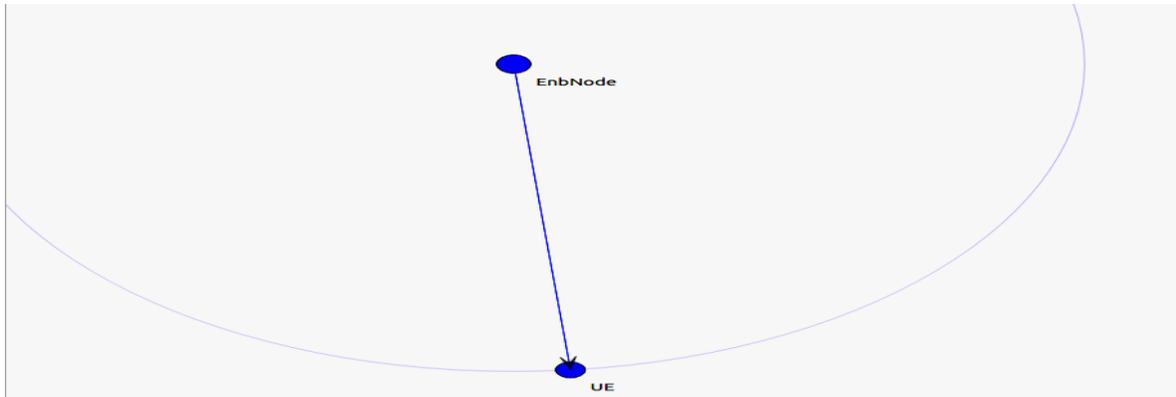


Figure IV.5 : Exemple après des temps de simulation d'un Système LTE

Comme en peut le voir, les utilisateurs UE (1,2,3) est en mouvement et reçoit un signal de l'antenne EnbNode1



FigureIV.6 : Communication entre UE-eNodeB

Scénario_2 :

Le scénario analysé est composé de deux nœuds : un eNB et un seul UE(enregistré auprès l'eNB) . L'UE se déplace dans la cellule à l'aide du **ns3::constantVelocityMobilityModel**, le long d'une direction radiale.

L'exemple proposé décrit comment la qualité du canal diminue à mesure que la distance entre Ue et eNB augmente. Par conséquent, total bit rate(en bits par TTI) disponible pour l'UE diminue à mesure que la distance entre les nœuds augmente, comme prévu

Nous pu tester quelques paramètres de **QoS (CQI, SINR, et TB)** grâce au simulateur **NS-3**. Nous avons fournir tous notre résultats sur des graphiques que nous pu tester afin de voir l'impact de quelques facteurs sur ces paramètres.

- Le scénario considéré est implémenté dans le fichier **lte-amc.cc** présent dans la branche **ns-3-lte**

Le script_2 en C++ :

```
#include "ns3/isotropic-antenna-model.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/building.h"
#include "ns3/buildings-helper.h"
#include "ns3/mobility-building-info.h"
#include <ns3/buildings-module.h>
#include "ns3/hybrid-buildings-propagation-loss-model.h"
#include "ns3/oh-buildings-propagation-loss-model.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
using namespace ns3;

int main (int argc, char *argv[])
{
    double speed = 50.0;
    double initialPosition = 0.0;
    double enbTxPowerDbm = 30.0;
    double ueNoiseFigure = 5.0;

    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("enbTxPowerDbm", "TX power [dBm] (default = 30.0dBm)", enbTxPowerDbm);
    cmd.AddValue ("ueNoiseFigure", "User noise figure [dB] (default = 148.947[0dB])", ueNoiseFigure);
    cmd.Parse (argc, argv);

    ConfigStore inputConfig;
    inputConfig.ConfigureDefaults ();
}
```

```

// Create Nodes: eNodeB and UE
NodeContainer enbNodes;
NodeContainer ueNodes;
enbNodes.Create (1);
ueNodes.Create (1);

// MOBILITY OF ENB
Ptr<ListPositionAllocator> enbPositionAlloc = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
enbPositionAlloc->Add(Vector(0.0,0.0,0.1));
MobilityHelper enbMobility;
enbMobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
enbMobility.SetPositionAllocator(enbPositionAlloc);
enbMobility.Install (enbNodes);
BuildingsHelper::Install (enbNodes);

// MOBILITY OF UE
Ptr<ListPositionAllocator> uePositionAlloc = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
uePositionAlloc->Add(Vector(initialPosition,0.0,0.1));
MobilityHelper ueMobility;
ueMobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantVelocityMobilityModel");
ueMobility.SetPositionAllocator(uePositionAlloc);
ueMobility.Install (ueNodes);
ueNodes.Get(0)->GetObject<ConstantVelocityMobilityModel>()->SetVelocity(Vector (speed,0.0,0.0));
BuildingsHelper::Install (ueNodes);

// SET PARAMETERS OF TX
Config::SetDefault ("ns3::LteEnbPhy::TxPower", DoubleValue (enbTxPowerDbm));
Config::SetDefault ("ns3::LteUePhy::NoiseFigure", DoubleValue (ueNoiseFigure));

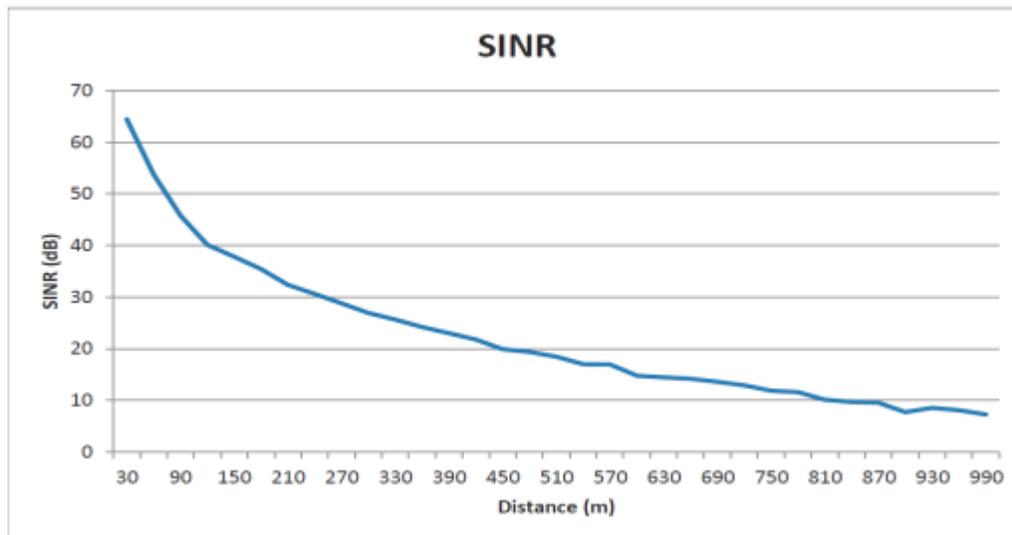
```

Cette script représente les indicateur qui utilisé dans la simulation.

```

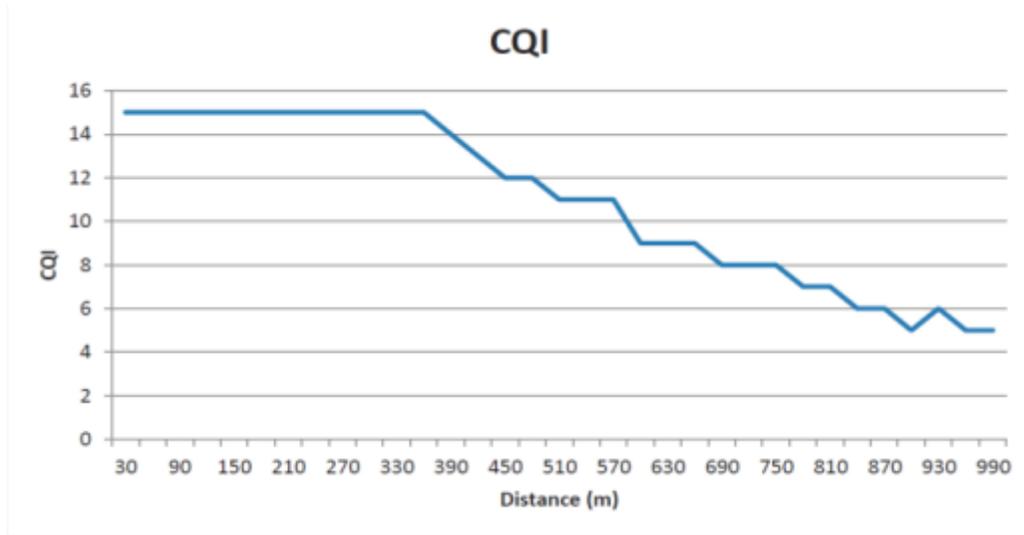
for (it = sinr.ConstValuesBegin (); it != sinr.ConstValuesEnd (); it++)
{
    double sinr_ = (*it);
    if (sinr_ == 0.0)
    {
        cqi.push_back (-1); // SINR == 0 (linear units) means no signal in this RB
    }
    else
    {
        /*
        * Compute the spectral efficiency from the SINR
        * spectralEfficiency = log2 ( 1 + ----- )
        *                               -ln(5*BER)/1.5
        * NB: SINR must be expressed in linear units
        */
        double s = log2 ( 1 + ( sinr_ / ( (-std::log (5.0 * m_ber )) / 1.5 ) ));
        int cqi_ = GetCqiFromSpectralEfficiency (s);
        NS_LOG_LOGIC (" PRB =" << cqi.size ()
                    << ", sinr =" << sinr_
                    << " (s" << 10 * std::log10 (sinr_) << " dB)"
                    << ", spectral efficiency =" << s
                    << ", CQI =" << cqi_ << ", BER =" << m_ber);
        cqi.push_back (cqi_);
    }
}

```



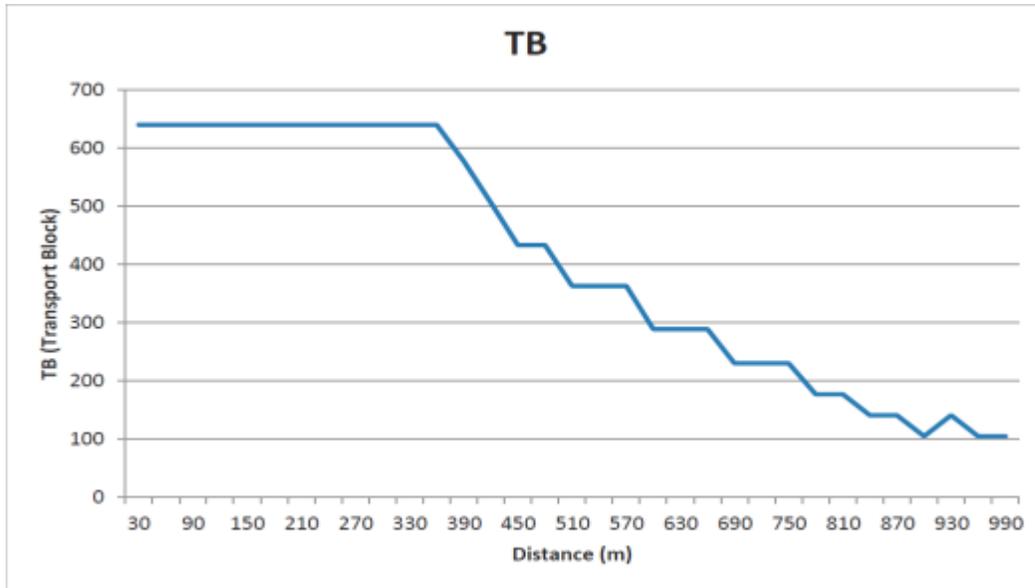
FigureIV.7 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB.

Sur le graphique de la **figure IV.7**, on observe une nette diminution du rapport **SINR**, qui s'approche de zéro à près de 1 km de distance entre l'**UE** utilisateur et l'antenne **eNodeB**, en considérant une valeur de bruit fixe de **-148,947dB**. Cela est dû principalement à l'atténuation des signaux, aux évanouissements, aux dispersions et aux multi-trips.



FigureIV.8 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB

Le graphique de la **Figure IV.8** montre la qualité du canal en fonction de la distance entre l'**UE** et l'**eNodeB**, avec qualité s'améliorant de 0 à 360 m. Après cette valeur, on observe une escalade de la dégradation, due principalement à une diminution de l'intensité du signal, à une augmentation des taux d'erreurs binaires et aussi aux interférences.



IV.9 :TB en fonction de la distance entre UE-eNodeB.

Le graphique de la **Figure IV.9** montre le nombre de blocs transportés lorsque la distance entre l'UE et l'eNodeB augmente. Cette dégradation est due principalement à une diminution de l'intensité du signal, une augmentation du taux d'erreur binaire et des signaux parasites.

IV.12 Conclusion :

Dans cette étude, des simulations ont été effectuées dans la section **e-UTRAN** du système, en mettant l'accent sur les caractéristiques de la transmission et du canal de signalisation. Nous conclu que la fiabilité du réseau est indiquée par l'inclusion de paramètres de performance pour la transmission. À cette fin, nous avons testé plusieurs paramètres de qualité de service inclus dans les réseaux **4G** LTE, notamment **CQI** (Channel Quality Indicator), **SINR** (Signal Interference Noise Ratio) et **TB** (Transport Block).

Conclusion Général

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

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

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

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

Bibliographie

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

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

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

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

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

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

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

[8] LTE : Rapport Nokia Siemens/ INPT.

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

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

- [11] Hiba Mouachi, «Etude et simulation de la norme LTE par 3GPP», Projet de semestre, ENSA Marrakech, Université Cady Ayyad, 19/06/2012.
- [12] Zubeiri Iman, «Etude de la capacité des réseaux LTE», Faculté Des Sciences et Techniques Fès, Projet de semestre, Soutenu le: 18/06/2014.
- [13] Eya Jammazi, «Optimisation d'un réseau pilote 4G pour Tunisie Télécom», Mémoire de Projet de Fin d'Etudes en Réseaux et Communications, 21/Juin/2013.
- [14] Andriamifidy Nalijaona Irina, «Les Réseaux LTE», Université d'Antananarivo, 2013.
- [15] Olivier Dugeon, «Architectures des réseaux pour le contrôle de la QoS», Institut National Polytechnique de Toulouse ,18 décembre 2008.
- [16] Elhoussaini Smail, Wann Ibrahim, « Simulateur interactif de la qualité de Service dans un routeur », 2012.
- [17] Falonne Nday, « Mise au point d'une stratégie de qualité de service dans inter réseau via le protocole BGP »,2013.
- [18] ns-3 project, « ns-3 Tutorial, Release ns-3.28.1 », August 18, 2018.
- [19] «http://www.nsnam.org/wiki/index.php/Installation#Operating_system_and_compiler_support », Date de consultation mai 2022.
- [20] Landry Aguehoude, «Conception d'Algorithme de la couche Physique de Wimax sous NS3», 2014 Montréal.
- [21] Nicola Baldo, Marco Miozzo, «An LTE module for the ns-3 network simulator», Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, Barcelona, Spain. 25 March 2011.
- [22] «<http://sensitivehome.googlecode.com/svn/trunk/Documentation/modulation%20numerique%20QPSK.doc> », Date de consultation juin 2022.
- [23] Yahiaoui Hamza,Lounnas Redouane «Étude des Performances des Réseaux 4G LTE», Mémoire de Projet de Fin d'Etudes en Réseaux et Communications, 13/Juliette/2017.

[24] BOUCHENTOUF Hadjer, BOUDGHENE STAMBOULI Riyad «Étude des Performances des Réseaux 4G LTE», Mémoire de Projet de Fin d'Études en : Réseaux Mobiles et Services (RMS), Juin/2013