

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de Technologie
Département d'Automatique, Télécommunications, Électronique



**Mémoire de fin de cycle
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en Réseau et Télécommunication**

Thème :

**ANALYSE ET OPTIMISATION DES INDICATEURS QOS
DE RESEAUX 4G / LTE**

Réalisé par :

TOURE IDRISSE OUMAR

DIARRA WOULEYMATOU

Soutenu devant le jury composé de :

M. K. KHIREDINE	Professeur	Président
Mme. S. BOUNCER	M.A.A	Examinatrice
M. M. TOUNSI	M.C.B	Promoteur

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Au terme de ce travail, nous exprimons notre profonde gratitude à l'endroit de toutes ces personnes qui de près ou de loin ont contribué d'une quelconque manière au bon déroulement de ce travail.

Nous adressons plus particulièrement nos vifs remerciements à l'égard de notre encadreur M. Mohamed Tounsi qui n'a ménagé aucun effort dans le partage de son savoir tant par sa présence, que par son sérieux mais également par son soutien indéfectible.

Notre sincère reconnaissance va à l'endroit du département ATE et Génie électrique de l'université Abderhamane Mira de Bejaia, à tous les enseignants qui ont daigné partager leur savoir avec nous tout au long de notre cursus universitaire.

A nos amis, à notre famille, nous vous en saurons éternellement gré.

Dédicace

Ce travail est dédié

A nos parents,

A nos familles (Touré & Diarra),

A nos amis (plus particulièrement à nos frères de cœur de la promotion 2013),

A tous nos proches,

A la mémoire de tous ceux que l'on aime mais qui nous ont quittés trop tôt,

1G : Première Génération

2G :Deuxième Génération

3G :Troisième Génération

3GPP :3rd Génération Partnership Project

4G :Quatrième Génération

A

AMPS : Advanced Mobile Phone System

ARP : Allocation and Retemption Priority

APN-AMBR : Access Point Name – Agregated Maximal Bite Rate

AS : Access Stratum

B

BPSK : Binary Phase Shift Keying

BLER : Block Error Ratio

BCCH : Broadcast Control Channel (canal de contrôle de diffusion)

BCH : Broadcast Channel (canal de diffusion)

C

C-NETZ: Funktelefonnetz-C

CDMA: Code Division Multiple Access accès.

CQI : Channel Quality Index

CRC : Cyclic Redundancy Check

CCCH : Common Control Channel (canal de contrôle commun)

D

DL: Downlink

DSP : Densité Spectral de Puissance

DSCP : Differentiated Services Code Point

DiffServ : Differenciated Service

DCCH : Dedicated Control Channel (canal de contrôle dédié)

DTCH : Dedicated Traffic Channel (canal de trafic dédié)

DL-SCH : DownLink Shared Channel

E

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM

EPC: Evolved Packet Core

EPS: Evolved Packet System.

E-UTRAN : Evolved Universal Terrastrial Access Network

ENodeB: evolved NodeB

E-RAB: E-utran radio access bearer

F

FDMA : Frequency Division Multiple Access

FDD : Frequency Division Duplex

E-RAB : Evolved-RAB

E-RAB ID : E-RAB Identifier

G

GSM : Global System for Mobile communications

GPRS : General Packet Radio Service

GTP-C : GPRS Tunneling Protocol-
Control plane

GBR : Guaranteed Bit Rate

H

HD: High Definition

HSPA: High Speed Packet Access

HSPA+: High Speed Packet Access+

HSUPA: High Speed Uplink Packet
Access

HSDPA: High Speed Downlink Paquet
Access

HSS: Home Subscriber Server

HLR: Home Location Register

I

IP: Internet Protocol

IMT : Institut Mines Telecom

IS-95 : Interim Standard

IETF : Internet Engineering Task Force

IMS : IP Multimedia Sub-system

IUT: Union International Of
Télécommunications

IMSI : International Mobile Subscriber
Identity (identité d'abonné mobile
international

ISP : Internet Service Provider

K

KPI: Key Performance Indicator.

P

L

LTE: Long Term Evolution

LTE-A: Long Term Evolution Advanced

LAN : Local Area Network

M

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MISO: Multiple Input Single Output

MAC : Medium Access Control

MMS: Multimedia Messaging Service

MBMS: Multimedia Broadcast Multicast
Service

MEI: Mobile Equipment Identity

MM : Mobility Management (gestion de la
mobilité)

MBR : Maximal Bite Rate

MSISDN : Mobile Station

MSC : Mobile Switching Server

N

NMT: Nordic Mobile Telephone

NAS: Non Access Stratum

N-GBR : Non-GBR

MME: Mobility Manager Entity

O

OFDM: Orthogonal Frequency Division
Multiplexing.

OFDMA: Orthogonal Frequency Division
Multiple Access

PCRF : Policy and Charging Rules Function

PCEF : Policy and Charging Enforcement Function

PRB : Physical Resource Block

PDN : Packet Data Network

PCI : Physical Cell Identifier

PDC : Personal Digital Communications

PCRF (Policy & Charging Rules Function)

PCEF : Policy Control Enforcement function

PDCP : Packet Data Compression Protocol

PCCH : Paging Control Channel (canal de contrôle de paging)

PCH : Paging Channel (canal paging)

PDSCH : Physical Downlink Shared Channel

PDCCH : Physical Downlink Control Channel

PBCH : Physical Broadcast Channel

PCFICH : Physical Control Format Indicator Channel

PUSCH : Physical Uplink Shared Channel

PUCCH : Physical Uplink Control Channel

PRACH : Physical Random Access Channel (canal physique d'accès aléatoire)

Q

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying

QoS : Quality of Service

QCI : QoS Class Identifier

R

RRC : Radio Resource Control

RLC : Radio Link Control

RSSI : Reference Signal Intensity

RSRP : Reference Signal Received Power

RSRQ : Reference Signal Received Quality

RSVP : Ressource Reservation Protocol

RNC : Radio Network Controller

RAN : Radio Access Network

RAB : Radio Access Bearer

RBS : Radio Bearer Service

RAT : Radio Access Technology

RACH : Random Access Channel (canal d'accès aléatoire)

S

SC-FDMA : Single Carrier – Frequency Division Multiple Access

SMS : Short Message Service

SAE : System Architecture Evolution

SISO : Single Input Single Output

SIMO : Single Input Multiple Output

SGW : Serving Gateway

PDN-GW : Packet Data Network Gateway

S1-UP : S1-User Plan

S1-CP : S1-Control Plan

STCP : Stream Control Transmission Protocol

SRB : Signalling Radio Bearer

T

TACS: Total Access Communication System

TDD: Time Division Duplex

TDMA: Time Division Multiple Access

TCP : Transmission Control Protocol

TTI : Transmission Time Interval

U

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

UTRAN : UMTS Terrestrial Radio Access Network (réseau radio UMTS)

UE: User Equipment

UL:UpLink

UL-SCH : UpLink Shared Channel

UE-AMBR : User Equipment - AMBR

UDP : User Datagram Protocol

UL-SCH : Uplink Shared Channel

V

VoD : Video On Demand

VoIP : Voice on IP

W

W-CDMA: Wideband Code Division Multiple Access (large bande multiple par repartition en code)

Listes des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Évolution des différentes générations de réseaux mobiles	2
Figure I.2 : Architecture d'un réseau LTE	6
Figure I.3 : Architecture E-UTRAN [3].	7
Figure I.4 : Architecture EPC.	7
Figure I.5 : Pile protocolaire plan usager	9
Figure I.6 : Pile protocolaire défini entre le MME et l'UE.	10
Figure I.7: Pile protocolaire défini entre entité du réseau cœur.	10
Figure I.8 : Représentation du signal OFDM en temps et fréquence.	12
Figure I.9 : Allocation des sous-porteuses en mode OFDMA	13
Figure I.10: Allocation de sous-porteuses en OFDM et OFDMA.	13
Figure I.11 : Codage radio OFDMA et SC-FDMA.	14
Figure I.12 : Différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.	14
Figure I.13 : Structure trame LTE Type1 [10].	15
Figure I.15 : Modèle d'un système MIMO	16
Figure I.16 : Association entre les différents canaux en UL et DL [1].	18
Figure I.14: Transfert d'appel voix LTE-IMS vers le domaine CS	19

Chapitre II

Figure II.1 : Perception de la QoS.	22
Figure II.3 : Les bearers au sein des interfaces	27

Chapitre III

Figure III.1 : Configuration d'une connexion RRC	36
Figure III.2 : Procédure de rétablissement d'une connexion RRC	38
Figure III.3 : Phase d'établissement de l'interface S1	38
Figure III.4 : Procédure de configuration de l'ERAB	39
Figure III.5 : Les points de mesure du taux d'appel.....	42

Chapitre IV

Figure IV.1 : Taux de succès d'établissement RRC.....	48
Figure IV.2 : Taux de succès de signalisation S1	50
Figure IV.3 : Taux de succès d'établissement ERAB.	50
Figure IV.4 : Taux de coupure de support E-RAB	51

Figure IV.5 : Débit utilisateur en Uplink	52
Figure IV.6: Débit utilisateur en Downlink	53
Figure IV.7: Taux réussite handover intra fréquence.	54

Tables des Tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques QCI.....	29
Tableau III.1 : Les 5 classes de mesure de KPI de la LTE	35

Tables des matières

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
<i>Chapitre I : Réseaux mobiles 4G</i>	
I.1.Introduction	2
I.2. Rétrospective des réseaux mobiles	2
I.2.1.Resaux mobiles de première génération	2
I.2.2. Réseaux mobiles de deuxième génération (2G) / Réseau GSM	3
I.2.2.1. La 2.5G (GPRS)	3
I.2.2.2. La 2.75G (EDGE)	3
I.2.3. Réseaux mobiles de troisième génération (3G) / Réseau UMTS	3
I.2.3.1. Le HSPA (3.5G)	4
I.2.3.2. Le HSPA+ (3.75G)	4
I.2.4. Réseaux mobiles de quatrième génération (4G)	5
I.3. Étude détaillée de la 4G (LTE)	5
I.3.1. Architecture de LTE	6
I.3.1.1. User Equipment (UE)	6
I.3.1.2. E-UTRAN (Evolved UTRAN)	6
I.3.1.3. Réseau cœur EPC (Evolved Packet Core)	7
I.3.1.4. Les interfaces de communication de LTE	9
I.3.2. Architecture protocolaire	9
I.3.2.1. Le plan usager	9
I.3.2.2. Le plan de contrôle.....	10
I.3.2.3. Les couches de l'interface Radio	10
I.3.3. Techniques D'accès et Technologies utilisées dans le LTE	11
I.3.3.1. L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	11
I.3.3.2. L'OFDMA	12
I.3.3.3. Le SC-FDMA	13
I.3.3.4. Structure de la trame LTE	15
I.3.3.5. MIMO (Multiple Input Multiple Output)	16
I.3.4. Les canaux radios	16
I.3.4.1. Les canaux Logiques.....	16
I.3.4.2. Les canaux de transport	17
I.3.4.3. Les canaux physiques	17
I.4. Le mécanisme CS Fallback	18
I.4.1.Principe	18
I.4.2. Procédure de transfert d'appel voix LTE-IMS vers le domaine CS	19
I.5. Conclusion	20
<i>Chapitre II : Gestion de la QoS en 4G/LTE</i>	
II.1.Introduction	21
II.2. Notions de QoS	21
II.2.1. Contraintes de la QoS	22

II.2.2. Les informations utilisées pour assurer la QoS	23
II. 2.2. Modèles de gestion de la QoS	23
II. 2.2.1. Modèle Intserv	23
II. 2.2.2. Modèle Diffserv	24
II.2.3. Procédés d'évaluation de la QoS	24
II.2.3.1. Le drive test	24
II.2.3.2. Les plaintes clientèles	25
II.2.3.3. Enquête de consommateurs	26
II.2.3.4. Benchmarking	26
II.2.3.5. Mesures KPI	26
II.3. Mécanismes de QoS dans LTE	26
II.3.1. Les bearers	26
II.3.1.1. Le bearer par défaut	27
II.3.1.2. Le bearer dédié	28
II.3.1.3. Paramètres QoS des bearers	28
II.3.2. Le scheduling	30
II.3.2.1. Les Algorithmes de scheduling	31
II.3.2.2. Types de scheduling	32
II.4. Conclusion	33

Chapitre III: Qualité de service dans le Réseau LTE

III.1. Introduction	34
III.2. Notions d'indicateurs clés de performance	34
III.3. Les différents types de KPI d'Ericsson	34
III.3.1. Accessibility (Accessibilité)	34
III.3.1.1. Ressource Radio Control (RRC)	35
III.3.1.1.1 RRC Connection Establishments Success Rate	36
III.3.1.1.2 RRC Connection Reestablishment	37
III.3.1.2. S1SIG Establishment Success Rate	38
III.3.1.3. E-RAB Establishment Success Rate	39
III.3.1.3.1. Initial E-RAB Establishment Success Rate	39
III.3.1.3.2. Initial E-RAB Establishment Success Rate per QCI	40
III.3.1.3.3. Added E-RAB Establishment Success Rate	41
III.3.1.3.4. Added E-RAB Establishment Success Rate per QCI	41
III.3.2. Retainability (Continuité)	41
III.3.2.1. CALL DROP	41
III. 3.2.2. E-RAB Retainability - Session Time normalized	42
III.3.2.3. E-RAB Retainability-Percentage	42
III.3.3. Integrity (Intégrité)	42
III.3.3.1. Latency	43
III.3.3.1.1. Downlink Latency (Latence de la liaison descendante)	43
III.3.3.1.2. Downlink Latency per QCI (Latence de liaison descendante par QCI)	43
III.3.3.2. Throughput	43
III.3.3.2.1. Downlink Throughput (Débit de liaison descendante)	43
III.3.3.2.2. Uplink Throughput (Débit en liaison montante)	44
III.3.3.3. Packet Error Loss Rate	44

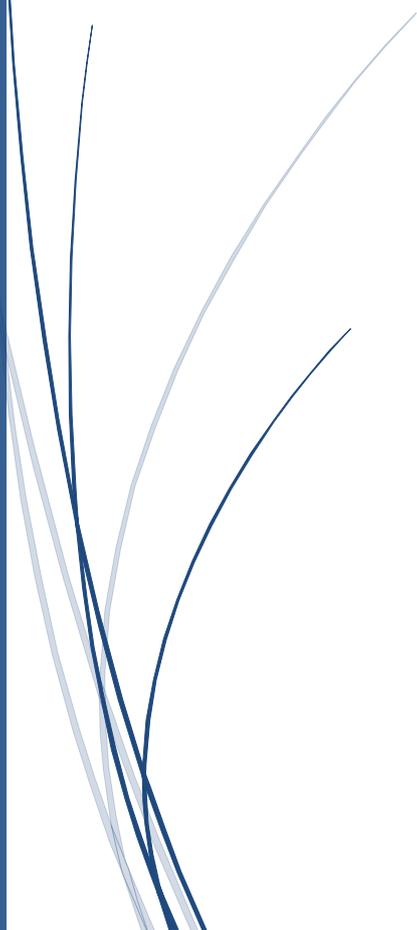
III.3.3.3.1. Downlink Packet Error Loss Rate (Taux de perte de paquets erronés en DL)	44
III.3.3.3.2.Uplink Packet Loss Rate (Taux de perte de paquets en liaison montante)	45
III.3.4.Mobility (mobilité)	45
III.3.4.1.Mobility Success Rate	45
III.3.5.Availability(Disponibilité)	46
III.3.5.1 Partial Cell Availability (node restarts excluded)	47
III. 4. Conclusion	47

Chapitre IV : Analyse de KPI et Optimisation réseau

IV.1. Introduction	48
IV.2. Analyse de statistiques KPI et Optimisation réseau	48
IV.2.1. Accessibilité	48
IV.2.2. Continuité	51
IV.2.3. Intégrité	52
IV.2.4. Mobilité	53
IV.3. Conclusion	55
Conclusion générale	56
Bibliographie	
Annexes	



INTRODUCTION GENERALE



En l'espace d'une vingtaine d'années, l'usage des services de télécommunications a connu un essor assez fulgurant. Conçues à l'origine pour offrir uniquement un service de téléphonie mobile (à savoir la voix), les technologies de communications radio mobiles ont considérablement évolué et permettent désormais une connexion à haut-débit en toute mobilité. Les équipementiers ainsi que les opérateurs mobiles ont su accompagner cette évolution en introduisant de nouveaux types de modulations et de technologies d'accès de réseau.

L'histoire des télécom (réseaux mobiles) est jalonnée par trois 3 étapes essentielles qui sont en l'occurrence la 1G, 2G, et la 3G ces trois générations diffèrent entre autre par les moyens mis en œuvre pour l'accès à la ressource radio. L'évolution de ces techniques a été guidée par la volonté d'accroître la capacité ainsi que les débits offerts par le système. Nous détaillerons un peu plus loin les caractéristiques de ces différentes générations.

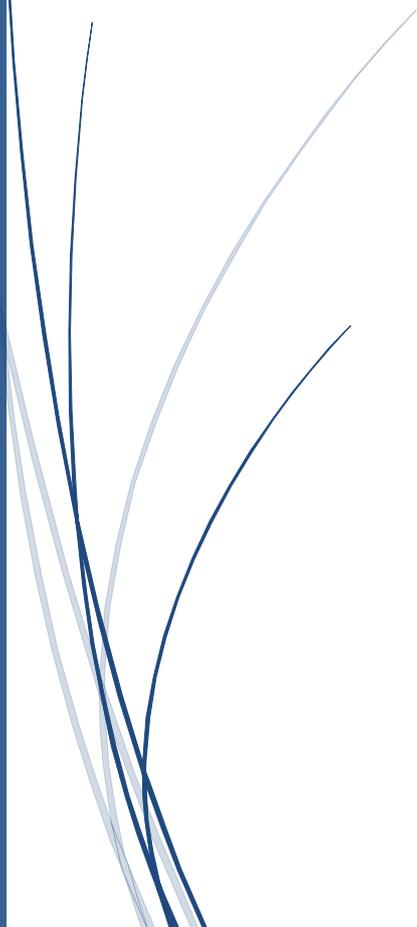
Cependant la demande croissante de débit et de qualité de service, la nécessité d'assurer la continuité de la compétitivité face à d'autres technologies, la réduction de la complexité ont nécessité l'élaboration par le consortium 3GPP une nouvelle technologie plus performante à savoir la 4G LTE.

L'avènement de cette technologie ouvrit la porte à de grandes possibilités d'applications telles que la visioconférence, mais aussi la mise en œuvre de débits plus importants, ainsi que l'utilisation d'un réseau tout IP permettant aux opérateurs d'offrir de meilleures qualités de services à leur clientèle. Dans le souci d'assurer une meilleure couverture et d'offrir une qualité de service à leurs abonnés, qu'il est devenu vital pour les opérateurs de téléphonie de mettre en œuvre des mécanismes pour le control et le suivi de la qualité de service.

Et c'est dans cette optique là que notre travail suivra son cours c'est à dire comment évaluer la QoS ? Quels sont les facteurs qui entrent en jeu dans la QoS mais également les perspectives pour une évolution future ?

Pour ce faire notre travail est divisé comme suit ; dans le chapitre1 une synthèse de l'évolution des réseaux mobiles (1G, 2G, 3G) ensuite nous détaillerons le réseau 4G ; dans le chapitre2 il sera question de la QoS; le chapitre3 décrira les indicateurs clés de performance (KPI) d'Ericsson pour le LTE ; le chapitre4 portera sur l'analyse et l'interprétation des données KPI.

Chapitre I. Réseaux mobiles 4G



I.1. Introduction

La technologie 4G LTE, représente une évolution majeure dans le domaine des réseaux mobiles. Le LTE constitue le prolongement du GSM (2G) et de l'UMTS/HSPA (3G/3G+) avec pour objectifs :

- d'accroître les débits offerts aux utilisateurs ;
- d'augmenter la capacité des réseaux ;
- d'améliorer l'interactivité grâce à une réduction de la latence.

Dans ce chapitre nous allons synthétiser l'évolution des réseaux mobiles à savoir la 1G, 2G, 3G, 4G, ensuite nous détaillerons le réseau 4G, son architecture, son fonctionnement.

I.2. Rétrospective des réseaux mobiles :

L'évolution des réseaux mobiles a donné naissance aux différentes générations de la téléphonie mobile à savoir la 1G, 2G, 3G, 4G. La figure suivante illustre ces différentes évolutions.

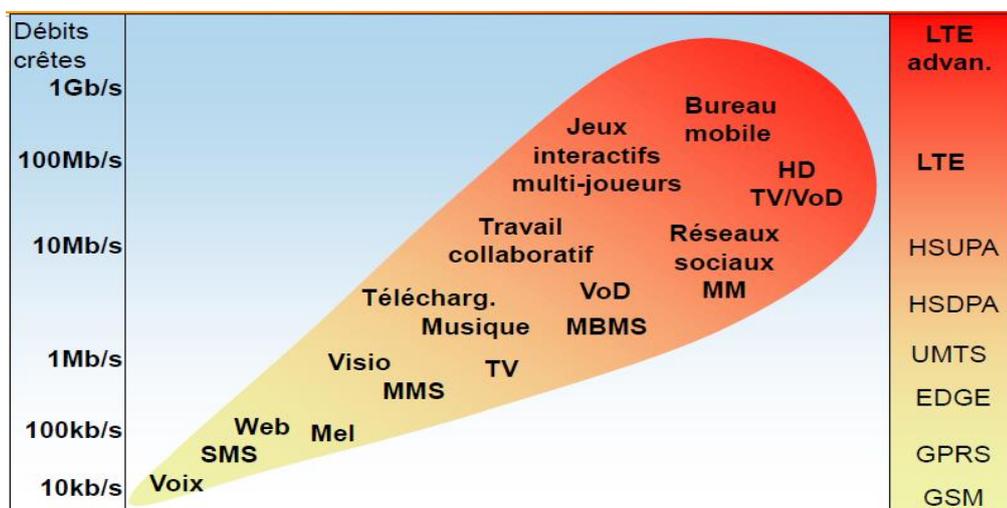


Figure I.1 : Évolution des différentes générations de réseaux mobiles

I.2.1. Réseaux mobiles de première génération (1G)

La première génération a vu le jour en 1980 et est caractérisée par une multitude de technologies introduites en parallèle à travers le monde. On peut citer les technologies suivantes:

- AMPS aux États-Unis;
- TACS au Japon et au Royaume-Uni;
- NMT dans les pays scandinaves ;
- Radiocom2000 en France;
- C-NETZ en Allemagne.

Ces systèmes opérant sous la bande 900 Mhz, étaient basés sur une commutation de cellules, un codage et une modulation de type analogique. Ils utilisaient une technique d'accès multiples FDMA associant un canal à un utilisateur. La capacité de ces systèmes demeurait très limitée, de l'ordre de quelques appels voix simultanés par cellule. Cette contrainte de capacité, ainsi que les dimensions importantes des terminaux - limitant leur portabilité [1]-, leurs coûts élevés et des tarifs de communication ont restreint l'utilisation de la 1G.

I.2.2. Réseaux mobiles de deuxième génération (2G) / Réseau GSM

Cette génération a été déployée à l'aube des années 1990 à travers le monde : GSM en Europe, le PDC au Japon, l'IS-95 aux États-Unis.... Ces systèmes, dans leurs versions initiales, donnaient accès au service voix en mobilité, mais aussi aux messages textes courts plus connus sous le nom de SMS (Short Message Service).

Les systèmes 2G ont connu plusieurs évolutions à l'instar de la technologie GSM caractérisée par :

- Une transmission numérique et une commutation de circuits ;
- Un duplexage FDD (une bande de fréquences par lien) :
 - ↪ voie montante UL: 890 – 915 Mhz
 - ↪ voie descendante DL : 935 – 960 Mhz
- Des services voix et data à très faible débits : 14 kbps jusqu'à 64 kbps ;
- Une technique d'accès de type F/TDMA

I.2.2.1. La 2.5G (GPRS)

- Débit théorique 171.2 kbps (jusqu'à 114 kbps en pratique) ;
- Technique d'accès de type F/TDMA ;
- Commutations de circuits /commutations de paquets ;
- Service voix et data (accès internet etc.)

I.2.2.2. La 2.75G (EDGE)

- Débit théorique 384 kbps (jusqu'à 150 kbps en pratique) ;
- Même technique d'accès que les deux précédentes ;
- Quatre fois plus rapides que le GPRS ;
- Ouverture aux mondes des applications multimédias.

I.2.3. Réseaux mobiles de troisième génération (3G) / Réseau UMTS

L'avènement de la 3G ouvrit la porte aux applications Multimédia et à l'amélioration de la QoS. Les applications visées étaient le streaming, la visiophonie, la vidéo conférence... Outre l'augmentation des débits, un point complexe à résoudre était de passer d'un service de téléphonie (à commutation de circuit) vers un service DATA (commutation de paquets).

Cette génération de réseaux mobiles regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS, issu du GSM et largement déployé autour du globe, et le CDMA2000, issu de l'IS-95 et déployé principalement en Asie et en Amérique du Nord.

Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches, notamment un schéma d'accès multiples à répartition par les codes (CDMA).

Dans ce qui suit, nous donnons quelques-unes des évolutions de l'UMTS, car c'est cette famille de technologies qui va donner naissance au LTE. L'UMTS a été normalisé par l'IUT par le groupe IMT 2000, utilisant deux modes de duplexage :

- ❑ FDD (W-CDMA) : Utilisant les bandes 1920-1980 Mhz /UL et 2110-2170 Mhz/DL avec des canaux de largeur de 5 Mhz pouvant atteindre un débit de 384 kbps jusqu'à 2 Mbps, une largeur de bande de 3.84 MHz. Le W-CDMA autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules, renforçant la qualité des communications lors du changement de cellule en mobilité ;
- ❑ TDD (TD-SCDMA) : Utilisant une même bande pour les deux liens (1900-1920Mhz ou 2010 - 2025 Mhz), une largeur de bande de 1.28 MHz.

I.2.3.1. Le HSPA (3.5G)

Les évolutions HSPA, aujourd'hui connues commercialement sous le nom de 3G+, furent introduites:

- ↳ HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) pour la voie descendante ;
- ↳ HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) pour la voie montante.

Ces évolutions ont été définies par le 3GPP respectivement en Release 5 (2002) et Release 6 (2005) afin d'accroître les débits possibles et de réduire la latence du système [1].

- Débit de 5.8Mbps sur la voie montante avec les modulations QPSK et BPSK
- Débit de 14.4Mbps sur la voie descendante avec les modulations QPSK et 16QAM
- Technique d'accès : W-CDMA

L'innovation majeure du HSPA demeure la transition vers la commutation de paquets permettant une gestion dynamique des ressources radio entre utilisateurs.

I.2.3.2. Le HSPA+ (3.75G)

Normalisé par le 3GPP en 2007 dans les releases 7 et 8, connu sous le nom de 3G++.

- Débit de 42 Mbps sur la voie descendante avec la modulation 64-QAM ;
- Débit de 11 Mbps sur la voie montante avec la modulation 16-QAM ;
- Technique d'accès par codes W-CDMA ;
- L'adoption de la technologie MIMO ;
- Prise en charge des utilisateurs always-on ;

I.2.4. Réseaux mobiles de quatrième génération (4G)

Dans le début des années 2000, plusieurs opérateurs mobiles et équipementiers télécoms et organisations se sont réunies dans le but de développer un réseau mobile dit de nouvelle génération basé sur la 3G et appelée LTE (*Long Term Evolution*). Le principal avantage de ce nouveau standard est de permettre des débits pouvant aller jusqu'à 1 Gbps en vitesses fixes (stable), et 100 Mbps pour les utilisateurs mobiles [2].

Au-delà de la LTE, nous avons la LTE-Advanced (4G), dénommée LTE-A, déployée à partir de 2012 et définie par la release 10/3GPP dans le but d'augmenter le débit en utilisant plusieurs porteuses (agrégations porteuses). Dans ce qui suit, nous allons détailler en profondeur la 4G.

I.3. Étude détaillée de la 4G (LTE)

L'arrivée de la 4G/LTE a consacré le passage à une structure tout IP (Internet Protocol) pour le transport des communications sous forme de paquets de données. Elle permet le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule supérieur et une latence plus faible.

La technologie LTE fonctionne dans une variété de fréquences avec des modes de duplexage FDD et TDD, selon la zone géographique couverte : 700 MHz aux États-Unis, 2,6 GHz et 800 MHz en Europe, et 2,1 GHz au Japon. Elle opère sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs de bande normalisées sont : 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les sens montant et descendant. Notons que le débit crête est proportionnel à la largeur de bande. En théorie, les débits peuvent atteindre 50 Mbps en lien ascendant et de 100 Mbps en lien descendant, à partager entre les utilisateurs mobiles d'une même cellule. Les systèmes à antennes multiples MIMO (Multiple Input Multiple Output) améliorent significativement le débit de données et la capacité de canal [6].

Par ailleurs, d'autres éléments clés de la LTE sont l'utilisation de la technologie OFDM et des techniques d'accès qui y sont associées (OFDMA/SC-FDMA), un handover possible même à grande vitesse (jusqu'à 350 km/h), une latence du plan de contrôle (*temps nécessaire pour mettre en place une connexion et accéder au service*) fixée à moins de 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif, et une latence du plan usager (*délai de transmission d'un paquet IP au sein du réseau d'accès*), est fixé à moins de 5 ms dans des conditions de faible charge et des paquets IP de petites tailles.

La qualité de service est nettement améliorée vis-à-vis des générations précédentes. Le premier changement apporté par le LTE en termes d'expérience utilisateur est donc un confort d'utilisation des services en ligne : navigation web, vidéo streaming, applications streaming, VoIP....

I.3.1. Architecture de LTE [3]

L'architecture du réseau 4G/LTE ou Evolved Packet System (EPS), se divise en trois parties essentielles comme illustrée par la figure I.2 :

- ↪ L'équipement usager UE (User Equipement).
- ↪ Le réseau d'accès E-UTRAN (Evolved Universal Terrastrial Access Network).
- ↪ Le réseau cœur EPC (Evolved Packet Core).

I.3.1.1. User Equipment (UE)

Il regroupe les éléments suivants :

- L'équipement mobile (ME ou Mobile Equipment) assure la gestion de la connexion avec le réseau mobile (établissement, reconfiguration, relâche) et la continuité de service en mobilité, de façon transparente pour l'équipement terminal. C'est donc cet équipement qui met en œuvre les protocoles et les mécanismes propres à la technologie mobile utilisée.
- L'équipement terminal (TE ou Terminal Equipment) désigne l'élément physique sur lequel l'utilisateur accède aux services du réseau mobile. Il peut s'agir d'un ordinateur personnel, d'un appareil photo ou de tout autre équipement domestique utilisant un équipement mobile externe ou intégré pour l'accès au réseau mobile. Il échange donc essentiellement des paquets de données IP avec le ME.

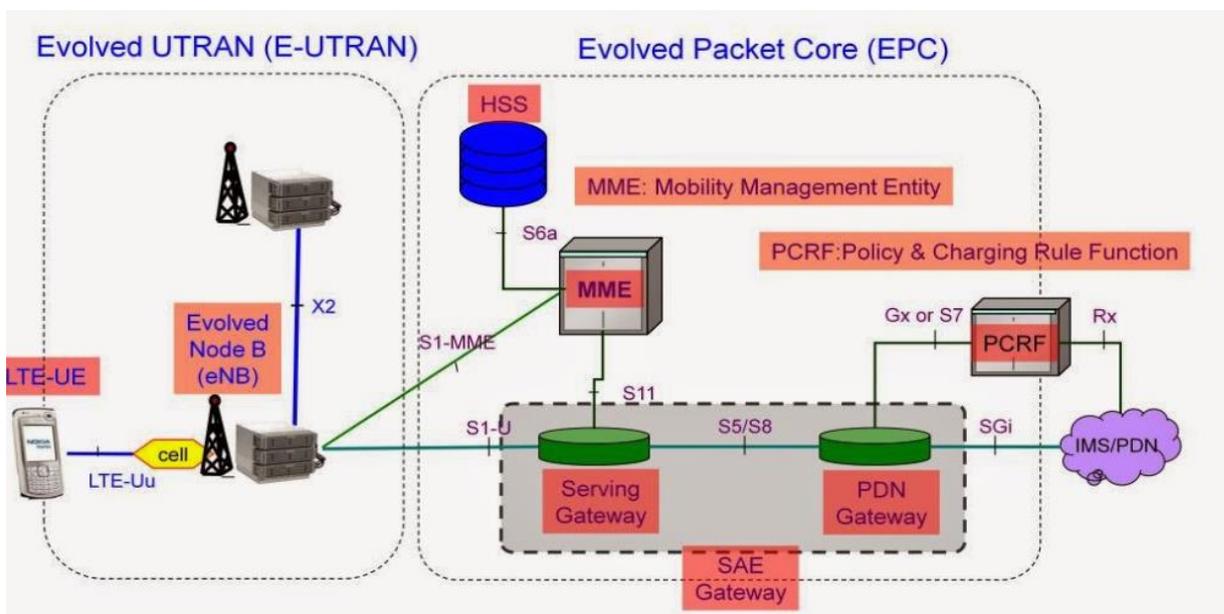


Figure I.2 : Architecture d'un réseau LTE.

I.3.1.2. E-UTRAN (Evolved UTRAN)

Il constitue la partie radio du réseau et comprend (cf. figure I.3) :

- L'eNodeB qui est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE, regroupe les entités NodeB et RNC de l'UTRAN 3G. Les fonctions supportées par le RNC ont été réparties entre l'eNodeB et les entités du réseau cœur MME/Serving GW.

- L'interface S1 qui consiste en S1-C (S1-Contrôle) entre l'eNodeB et le MME et S1-U (S1-Usager) entre l'eNodeB et le Serving GW.
- L'interface X2 définie entre eNodeBs adjacents.

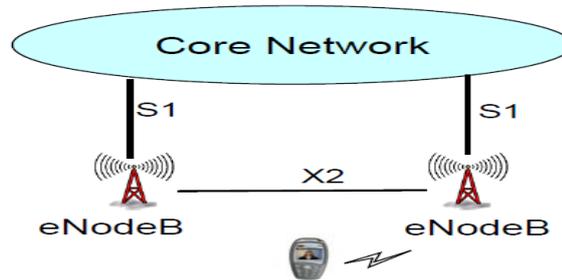


Figure I.3 : Architecture E-UTRAN [3].

I.3.1.3. Réseau cœur EPC (Evolved Packet Core)

Ce réseau cœur, dit aussi SAE, se compose des équipements supportant la connectivité tout IP entre les domaines multi technologies dans l'architecture 4G. Il assure la gestion des utilisateurs, de la mobilité, de la qualité de service et de la sécurité, au moyen des équipements tels que le MME, le SGW, le HSS le PDN-GW et le PCRF [4].

Les différentes entités qui composent le réseau cœur sont illustrées suivant la figure ci-dessous :

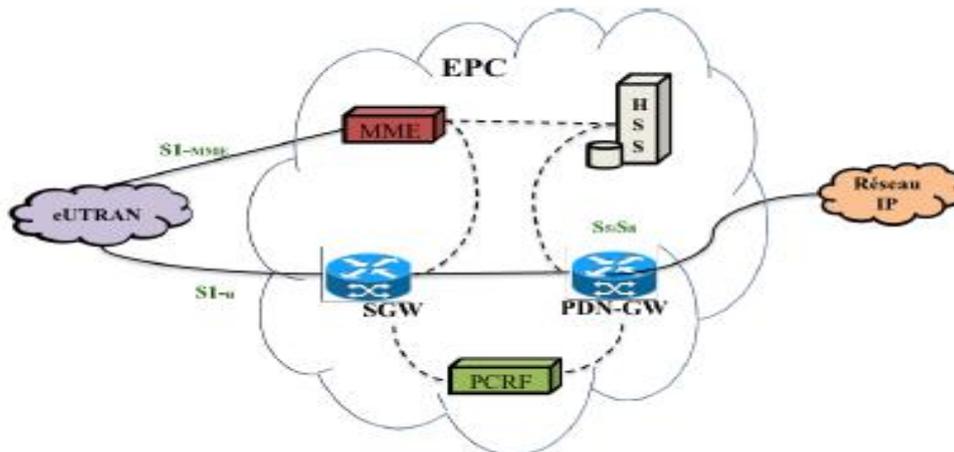


Figure I.4 : Architecture EPC.

- L'entité MME (*Mobility Manager Entity*) comporte les fonctionnalités de base de la signalisation dans la connexion du terminal mobile au réseau. Il fournit les informations nécessaires à l'identification de l'utilisateur au moment de son authentification dans le système, en se servant des informations provenant du HSS. Grâce aux fonctions du plan de contrôle, il fait la gestion des sessions des utilisateurs authentifiés. Il est responsable des fonctions de gestion de la mobilité telles que la coordination de la signalisation pour les relèves inter-SGW, et négocie la qualité de service à offrir. Le MME est responsable aussi de la diffusion des messages de paging quand l'UE est dans l'incapacité de recevoir les paquets qui lui sont destinés. Il fait la mise à jour des paramètres de localisation de l'UE se trouvant dans une zone qui n'est pas prise en charge par

le MME [5]. C'est également au MME d'établir pour le compte de l'utilisateur les default bearer et dedicated bearer nécessaires pour la prise en charge de ses communications.

- La passerelle SGW (*Serving Gateway*) est définie pour gérer les données utilisateurs et est impliquée dans le routage et la transmission de paquets de données entre les eUTRAN et le réseau cœur. L'échange des paquets est acheminé par le SGW au PDN-GW par l'interface S5. Le SGW est connecté à l'eUTRAN via l'interface S1-U qui sert de relais entre l'utilisateur et l'EPC. Il opère comme une ancre locale qui sert pour la mobilité inter-eNodeB et permet de faire la relève entre les systèmes mobiles de différentes générations, comme LTE et UMTS.
- La passerelle P-GW (*Packet Data Network Gateway*) a pour premier rôle d'allouer une adresse IP à l'UE. Elle permet également de mettre en application la qualité de service. Elle supporte la fonction appelée Deep Packet Inspection (en français, inspection approfondie des paquets), qui analyse les paquets du plan usager, identifie la nature des flux, applique les règles prédéfinies pour tous les clients ou par un client en fonction de l'offre souscrite.

La P-GW alloue des paquets IP transférés au sein des bearers de QoS différentes et joue ainsi un rôle déterminant dans le cadre de la gestion de la qualité de service, notamment pour les bearers à débit garanti. Par ailleurs, la P-GW permet de mettre en œuvre la facturation par flux de données, conformément aux règles définies par le PCRF. Enfin, elle sert de point d'ancrage pour l'interfonctionnement avec d'autres technologies d'accès (non 3GPP) telles que CDMA2000 et WiMax.

- Le serveur HSS (*Home Subscriber Server*) se présente comme une version évoluée du registre HLR des réseaux antérieurs. Il permet de stocker des informations d'abonnement pouvant servir au contrôle des appels et à la gestion de session des utilisateurs réalisé par le MME. Il entrepose, pour l'identification des utilisateurs, la numérotation et le profil des services auxquels ils sont abonnés. de plus des données d'authentification, il contient les informations de souscription pour les autres réseaux, comme le GSM, le GPRS, 3G et IMS.
- Le PCRF (*Policy & Charging Rules Function*) est équipement réalisant les fonctions :
 - ↳ fournir au PDN-GW les règles de taxation lorsqu'un default bearer ou un dedicated bearer est activé ou modifié pour l'utilisateur. Ces règles de taxation permettent au PDN-GW de différencier les flux de données de service et de les taxer de façon appropriée.
 - ↳ permettre de demander au PDN-GW (qui abrite la fonction PCEF) d'établir, de modifier et de libérer des dedicated bearer sur la base de QoS souhaitée par l'utilisateur [3].

I.3.1.4. Les interfaces de communication de LTE

Les différentes entités du réseau LTE sont reliées entre elles par diverses interfaces à savoir :

- ↪ Uu : entre le terminal mobile et l'eNodeB ;
- ↪ X2 : entre les eNodeBs du réseau d'accès E-UTRAN, pour gérer le handover d'un mobile d'une cellule radio vers une autre ;
- ↪ S1-U : entre l'eNodeB et le S-GW, pour le transport de données utilisateurs ;
- ↪ S1-MME : entre l'eNodeB et le MME, pour le transport de la signalisation ;
- ↪ S11 : entre le S-GW et le MME, pour les fonctions de gestion de session ;
- ↪ S5 : entre le S-GW et le P-GW du même réseau, pour le transport des données des utilisateurs plus quelques messages de signalisation ;
- ↪ S8 : entre le S-GW et le P-GW d'un autre réseau ;
- ↪ S6a : entre MME et HSS, utilisée par le MME pour chercher les souscriptions et les informations d'authentification dans le HSS ;
- ↪ S10 : entre les MME, pour l'échange de contexte et d'autres informations ;
- ↪ S7 ou Gx : entre le P-GW et le PCRF ;
- ↪ SGu : entre le P-GW et le réseau externe (internet) [5].

I.3.2. Architecture protocolaire

L'architecture LTE/EPC fait appel à une série de protocoles pour son fonctionnement. On distingue les protocoles du plan usager et les protocoles du plan de control. Ces deux plans sont matérialisés par des piles protocolaires partageant un tronc commun (la partie inférieure) et qui se distinguent notamment dans les interactions avec les couches supérieures : alors que la signalisation NAS est véhiculée par le plan de contrôle de l'interface radio, son plan usager permet de transporter sur celle-ci les paquets délivrés ou à destination de la couche IP.

I.3.2.1. Le plan usager

Un paquet IP destiné à un UE est encapsulé par la P-GW et est transféré vers l'eNodeB au sein d'un tunnel, avant d'être transmis par celui-ci à l'UE. La fonction de tunnel est assurée par un protocole 3GPP dit GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol-User plane*) et utilisé au sein des interfaces S1, S5 et S8. La figure suivante présente la pile protocolaire du plan usager.

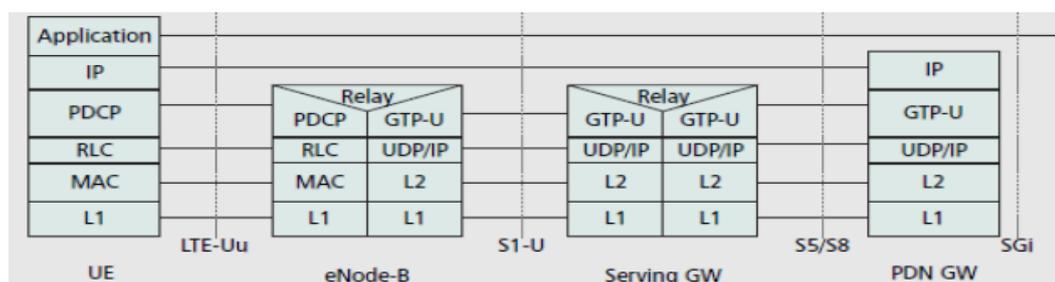


Figure I.5 : Pile protocolaire plan usager

I.3.2.2. Le plan de contrôle

On distingue sur la figure suivante la pile protocolaire définie entre le MME et l'UE.

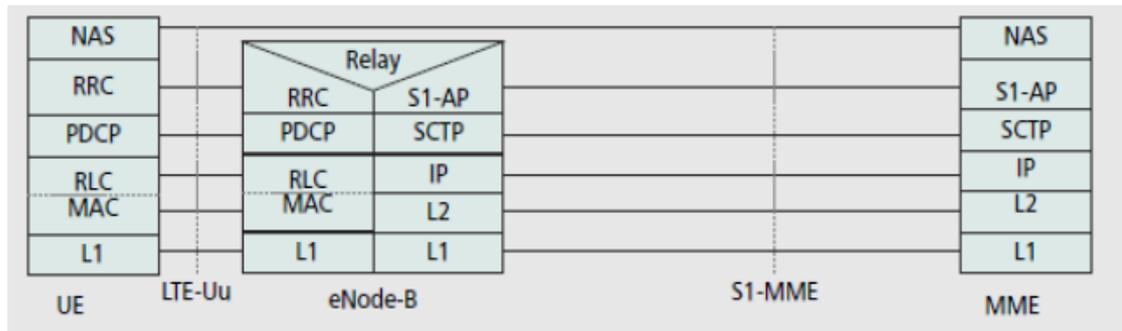


Figure I.6 : Pile protocolaire définie entre le MME et l'UE.

La figure suivante donne la pile protocolaire définie entre les entités du réseau cœur.

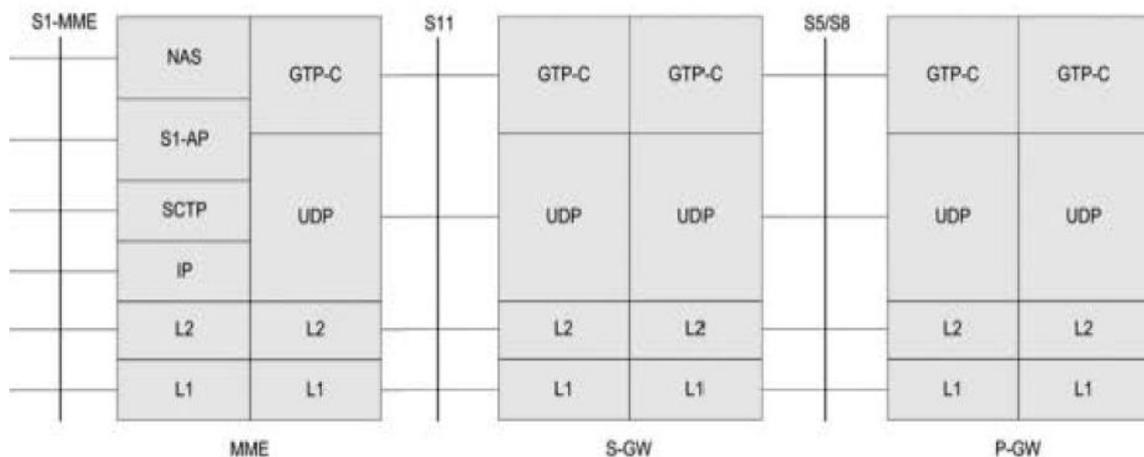


Figure I.7: Pile protocolaire définie entre entité du réseau cœur.

Cette pile fait appel au protocole GTP-C (*GPRS Tunneling Protocol-Control plane*) utilisé pour permettre les échanges de signalisation pendant l'établissement de bearer EPS et pour le transfert d'informations propres à chaque UE (contexte de l'UE) lors du changement de MME [1].

I.3.2.3. Les couches de l'interface Radio

Cette interface fournit des connexions entre le UE et l'eNodeB ; elle se compose de trois couches : la couche RRC, la couche2 et la couche Physique.

- **La couche RRC** : permet de réaliser la fonction de contrôle de l'interface radio. RRC est connectée à la couche MAC et PHY afin de les configurer via des points d'accès de contrôle. C'est la spécificité de cette couche, véritable chef d'orchestre de l'interface radio.

L'Envoi des messages paging pour localiser un UE.

- ↪ La gestion des connexions RRC (établissement, reconfiguration et relâchement) ;
- ↪ Le contrôle de mobilité en mode veille (sélection et ré sélection de cellule) ;
- ↪ La transmission de signalisation de la couche supérieure NAS ;
- ↪ La diffusion des informations du système et le transfert de contexte vers un autre eNodeB.

- **La couche 2 :** constituée de trois sous-couches : PDCP, MAC et RLC. Ces sous-couches interviennent pour le transfert des données, du plan usager comme du plan de contrôle. Seule la sous-couche PDCP est conçue pour traiter différemment les données de ces deux plans. Pour RLC et MAC, c'est la configuration qui détermine les éventuelles différences de traitement à appliquer aux flux.
 - ↳ **PDCP (*Packet Data Compression Protocol*) :** assure des fonctions de sécurité et de transfert des données, la compression d'en-tête, le chiffrement des données et de la signalisation RRC, la protection de l'intégrité de la signalisation RRC, la détection et suppression des doublons (unité de données PDCP reçues deux fois) et la remise en séquence des paquets.
 - ↳ **MAC (*Medium Acces Control*) :** permet l'accès et l'adaptation au support de transmission grâce au mécanisme d'accès aléatoire sur la voie montante, à la correction d'erreurs par retransmission HARQ lors de la réception d'un acquittement HARQ négatif, et aux allocations dynamique et semi-statique de ressources radio (scheduling).
 - ↳ **RLC (*Radio Link Control*) :** assure les fonctions de contrôle du lien de données dévolues à la couche 2 du modèle OSI (*Data Link Control*) : détection et retransmission des PDU manquantes (en mode acquitté) permettant la reprise sur erreur ; la remise en séquence des PDU pour assurer l'ordonnancement des SDU à la couche supérieure (PDCP); l'utilisation de fenêtres d'émission/réception pour optimiser la transmission de données.
- **La couche physique :** C'est la couche I, appelée également Layer I (LI) ou couche PHY. Son rôle est d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations inhérentes au canal radio mobile. D'un point de vue fonctionnel, elle offre un service de transport sur l'interface air à la couche MAC.

I.3.3. Techniques D'accès et Technologies utilisées dans le LTE

Deux technologies sont intégrées dans le LTE, notamment l'OFDM et le MIMO, cependant les techniques d'accès sont : L'OFDMA (en DownLink), Le SC-FDMA(en UpLink).

I.3.3.1. L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

L'OFDM offre plusieurs avantages pour les systèmes radio mobiles. Entre autres, il bénéficie d'une grande immunité contre l'interférence entre symboles créée par les multi-trajets, et permet de gérer simplement des largeurs de bande variables et potentiellement grandes.

Le principe de l'OFDM consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand

nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes. Le diagramme dans la figure ci-dessous met en évidence les caractéristiques d'un signal OFDM en temps et fréquence.

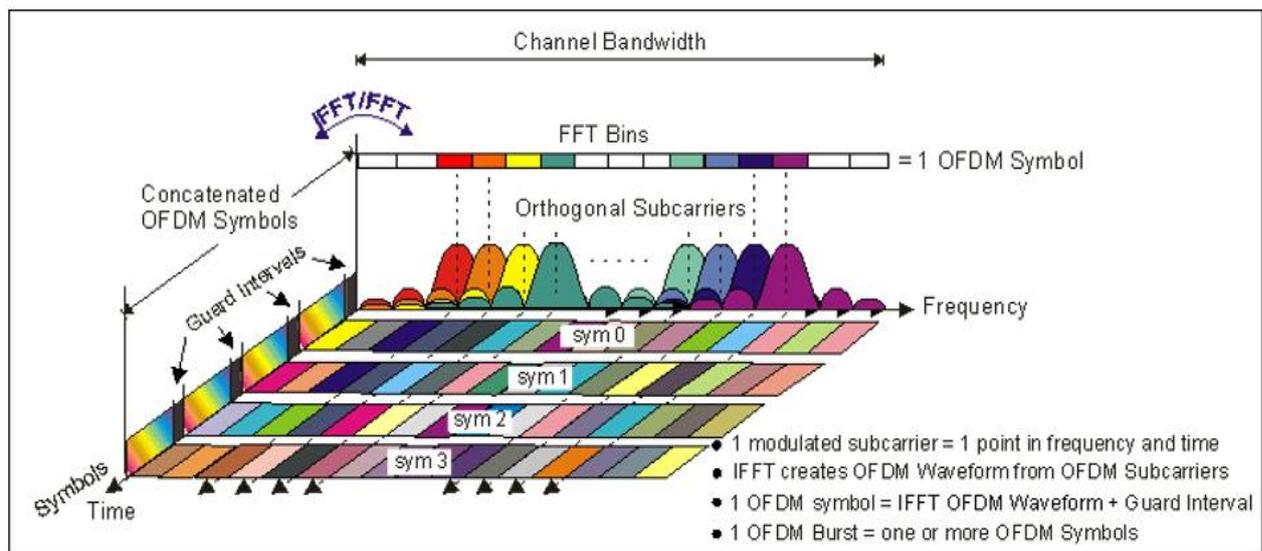


Figure I.8 : Représentation du signal OFDM en temps et fréquence.

I.3.3.2. L'OFDMA

A la différence de l'OFDM où chaque sous porteuse est exclusivement assignée à un seul utilisateur, en OFDMA les utilisateurs se voient attribuer un nombre précis de sous-porteuses pour un time-slot prédéterminé, appelées PRB (Physical Resource Block). La technique OFDMA permet d'allouer des canaux secondaires différents selon les utilisateurs dans une fenêtre temporelle à configuration variable pour la transmission d'un certains nombres de symboles OFDM.

En OFDMA, les sous porteuses sont regroupées en groupes appelés sous canaux mais de façon à ce que celles formant un même sous canal ne soient pas adjacentes. En sens descendant, un sous canal peut être alloué à différents utilisateurs. Les symboles OFDMA sont similaires à ceux de l'OFDM. Chaque symbole consiste en :

- Des sous porteuses de données (OFDM) pour transporter des données.
- Des sous porteuses pilotes servant comme référence de fréquences.
- Des sous porteuses DC désignant la fréquence centrale.
- Des sous porteuses de Garde pour éviter les interférences [8].

Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global, d'avoir sur chaque canal un débit plus faible et donc un temps d'émission de chaque symbole plus long (66.7 μ s pour le LTE); cela limite les problèmes d'interférences inter-symboles et de fading liés aux « chemins multiples de propagation » qui existent dans les liaisons radios de moyenne et longue portée. OFDMA fournit

une facilité et extensibilité de la bande passante par la configuration du nombre de sous-porteuses. Ceci permet à la station de base d'ajuster dynamiquement l'utilisation de la bande passante en fonction des exigences du système.

La figure ci-après met en évidence l'allocation des sous porteuses à différents utilisateurs en mode OFDMA.

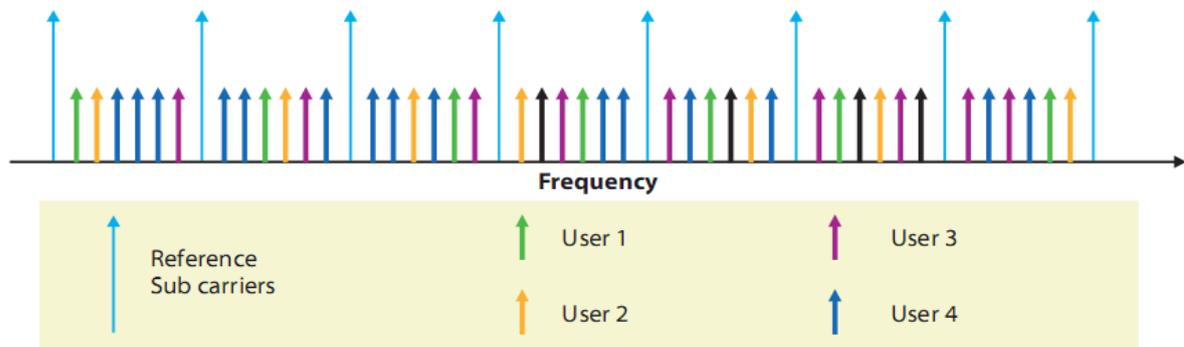


Figure I.9 : Allocation des sous-porteuses en mode OFDMA [9].

L'utilisation des signaux orthogonaux les uns aux autres pour les sous-porteuses contiguës (orthogonalité de l'OFDMA), évite les interférences mutuelles. Ce résultat est obtenu en ayant un écart de fréquence entre les sous-porteuses qui est égal à la fréquence des symboles sur chaque sous-porteuse. Cela signifie que lorsque les signaux sont démodulés, ils ont un nombre entier de cycles dans la durée du symbole et leur contribution aux interférences est égale à zéro; en d'autres termes, le produit scalaire entre chacune des sous-porteuses est nul pendant la durée de transmission d'un symbole (66.7 μ s en LTE, soit une fréquence de 15 KHz, ce qui correspond à l'écart de fréquence entre 2 sous-porteuses), et l'utilisation de nombreuses sous-porteuses permet aussi de s'adapter facilement à la puissance d'émission de chaque canal et pour chaque utilisateur.

La figure qui suit explicite la différence entre l'OFDM et l'OFDMA.

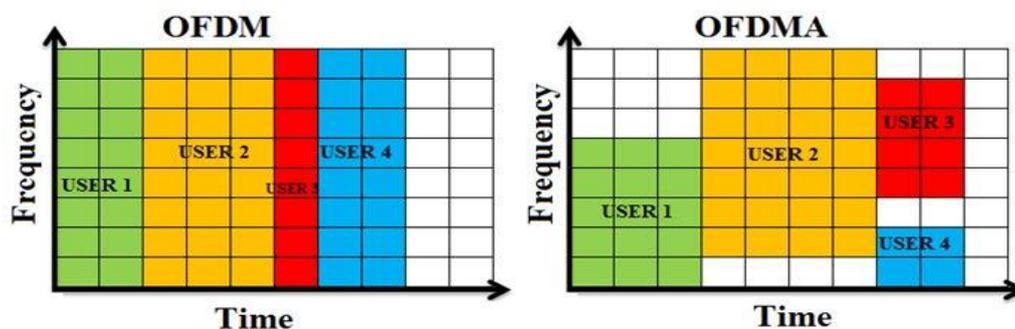


Figure I.10: Allocation de sous-porteuses en OFDM et OFDMA.

I.3.3.3. Le SC-FDMA

En LTE uplink, un concept différent est utilisé en technique d'accès. L'implémentation est appelée Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).

L'inconvénient majeur de la technique OFDMA, est son rapport PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) assez élevé. Ceci est dû à la nature de l'OFDM, qui est basée sur la transmission multi-porteuse, la puissance en un instant donné, est égale à la somme de toutes les puissances sur chaque sous-porteuse. Un PAPR élevé dégrade énormément l'efficacité de consommation d'énergie d'un amplificateur RF, ce qui rend impossible l'adoption d'un tel schéma de transmission pour le sens montant, tout en respectant la contrainte de la durée de vie des batteries des UE. En SC-FDMA chaque symbole est étalé sur l'ensemble des sous-porteuses allouées alors qu'en OFDMA, les symboles sont transmis chacun à travers une sous-porteuse. Les deux techniques présentent une multitude de points communs entre elles comme l'indique la figure ci-dessous :

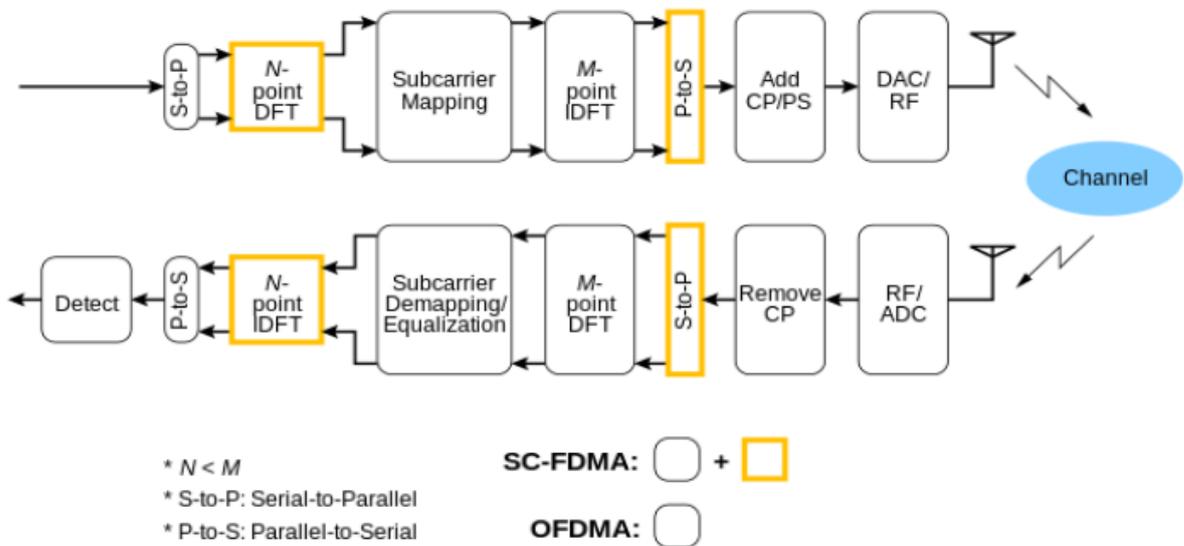


Figure I.11 : Codage radio OFDMA et SC-FDMA.

La différence majeure entre ces deux techniques, réside dans le fait que l'OFDMA est une technique de transmission multi-porteuse tandis que la SC-FDMA est une technique mono-porteuse. La figure suivante illustre cette différence.

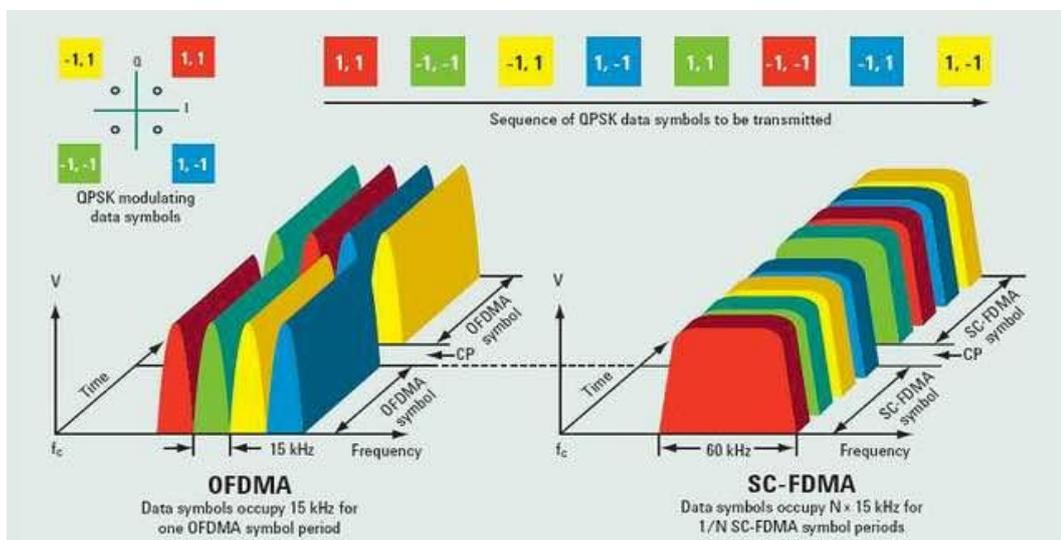


Figure I.12 : Différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.

I.3.3.4. Structure de la trame LTE

Les structures de trames pour la LTE diffèrent entre les modes duplex TDD et FDD, car il y'a des exigences différentes sur la séparation des données transmises.

Il existe deux de structures de trames LTE :

- Type1** : Utilisé pour le mode de duplexage FDD, cette trame est d'une longueur totale de 10ms comportant 20 slots individuels, et la sous trame se compose de deux slots comme l'indique la figure ci-dessous.

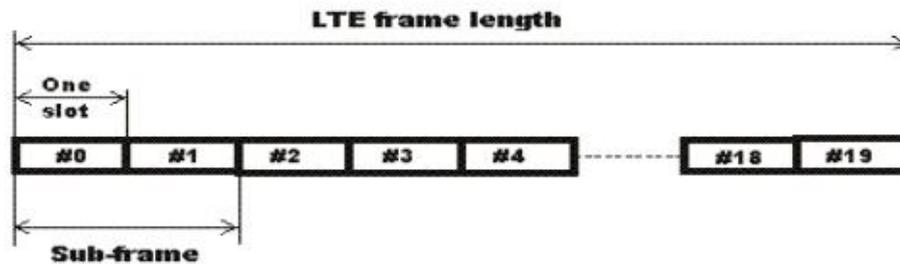


Figure I.13 : Structure trame LTE Type1 [10].

- Type2** : Utilisé pour le mode de duplexage TDD, la trame est aussi de longueur $T=10$ ms divisée en deux demi-trames, chacune de 5ms. Celles-ci sont divisées en 5 sous-trames, chacune est divisée en sous-trames spéciales composées de trois champs :
 - ↪ DwPTS (Downlink Pilot Time Slot), utilisée pour la synchronisation en DL.
 - ↪ GP (Guard Period), assure la transmission de UE sans avoir des interférences UL et DL.
 - ↪ UpPTS (Uplink Pilot Time Slot), utilisé par eNodeB pour déterminer le niveau de puissance reçue de l'UE ainsi que la durée de la puissance.

La figure suivante montre la structure de la trame LTE Type2 :

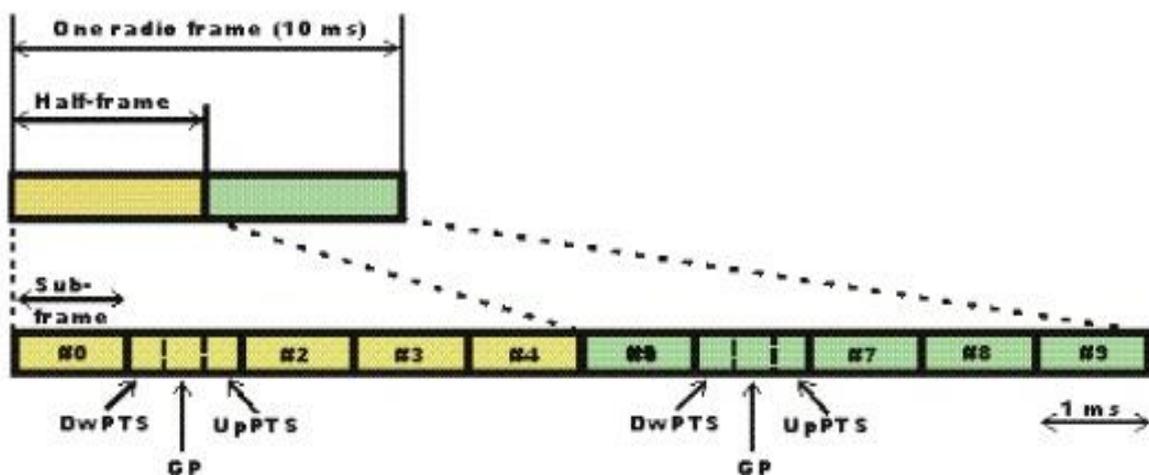


Figure I.14 : Structure trame LTE Type2.

I.3.3.5. MIMO (Multiple Input Multiple Output):

La technique MIMO consiste en l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Le but est d'améliorer le débit, d'augmenter l'efficacité spectrale, d'augmenter le rapport SNR, de diminuer la probabilité de coupure du lien radio etc.

L'opération MIMO nécessite une connaissance à priori du canal. Les réponses impulsionnelles des canaux LTE sont déterminées par la transmission séquentielle de signaux de référence connus de chaque antenne de transmission.

La figure suivante illustre un modèle MIMO :

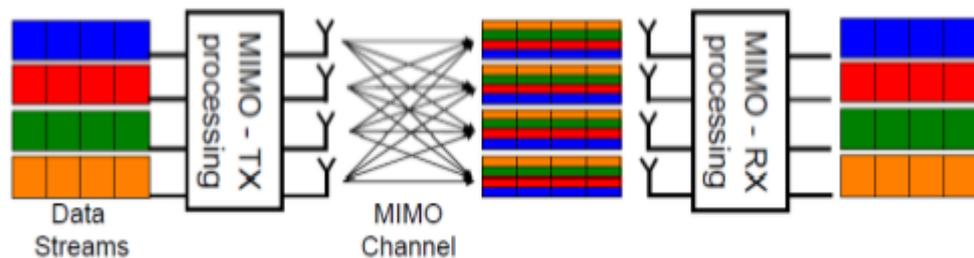


Figure I.15 : Modèle d'un système MIMO.

D'autres variantes de la technologie d'antennes sont possibles à savoir : la SISO (Single Input Single Output), la MISO (Multiple Input Single Output) et la SIMO (Single Input Multiple Output).

I.3.4. Les canaux radios

LTE, de manière similaire à l'UMTS, utilise le concept de canal afin d'identifier les types des données transportées sur l'interface radio, les caractéristiques de qualité de service associées, ainsi que les paramètres physiques liés à la transmission. On distingue trois classes de canaux, selon les couches du modèle OSI auxquelles ils sont attachés : les canaux logiques, les canaux de transport et les canaux physiques.

I.3.4.1. Les canaux Logiques :

Un canal logique est associé à un ou plusieurs flux de données (ou de signalisation) qui possèdent des caractéristiques communes : typologie des données transportées (plan usager ou plan de contrôle), priorité du flux, débit nominal (garanti ou non). Un canal logique est donc caractérisé par ce qu'il transporte, et non par la façon dont les données sont véhiculées.

Les canaux logiques se séparent en canaux de contrôle et canaux de trafic. Les canaux de contrôle transportent uniquement des informations du plan de contrôle, tandis que les canaux de trafic véhiculent exclusivement les données du plan usager.

Les différents canaux logiques définis pour l'interface radio du LTE sont :

- ❑ BCCH : canal DownLink, utilisé pour la diffusion d'informations de contrôle sur la cellule

- PCCH : canal DownLink utilisé pour la notification d'appel.
- CCCH : canal utilisé pour la communication entre le terminal et l'E-UTRAN.
- DCCH : porte la signalisation dédiée à un utilisateur (RRC et NAS).
- DTCH : porte les informations de trafic dédiées à un utilisateur.

I.3.4.2. Les canaux de transport :

Un canal de transport est caractérisé par la façon dont les données sont transportées sur les ressources physiques. Plusieurs canaux de transport sont définis dans l'interface radio du LTE pour les sens montant et descendant.

Les canaux utilisés en Downlink sont :

- BCH : pour la diffusion d'informations sur la cellule, (porte exclusivement le BCCH).
- DL-SCH : Utilisé pour la transmission de données dédiées de contrôle et du plan usager utilisé également pour transmettre les informations de cellule non portées par BCH.
- PCH : Pour diffuser les informations de paging sur l'ensemble de la cellule.

Les canaux de transport utilisés en uplink sont :

- UL-SCH : qui est l'équivalent du DL-SCH en UpLink.
- RACH : Il est utilisé Pour l'établissement d'une connexion RRC avec la station de base, son rétablissement, lors d'un handover ou pour transmettre des données.

I.3.4.3. Les canaux physiques

Ce sont les canaux physiques qui transportent les données des utilisateurs ainsi que les messages de contrôles qui lui sont parvenus des canaux logiques. Certains canaux physiques sont utilisés pour la liaison descendante, d'autres sont réservés pour la liaison montante.

Les canaux physiques en Downlink :

- PDSCH : Pour transmission du DL-SCH et du PCH
- PDCCH : pour donner des allocations d'ordonnancement à l'UE sur PDSCH ou PUSCH.
- PBCH : Pour la transmission du BCH.
- PCFICH : qui informe l'UE sur le nombre de symboles OFDM utilisé pour le PDCCH.
- PHICH : porte les acquittements d'HARQ.

Les canaux physiques en UpLink sont :

- PUSCH : Pour la transmission du UL-SCH ; il porte également les informations de contrôle en cas de collision de ces deux canaux sur le même intervalle de temps.
- PUCCH : qui transporte les informations de contrôle, comprenant les réponses ACK et NACK du terminal aux transmissions DownLink.

- PRACH : il transporte le préambule de l'accès aléatoire envoyé par les terminaux, le PRACH porte le RACH.

La figure suivante illustre l'association entre les différents canaux en uplink et Downlink :

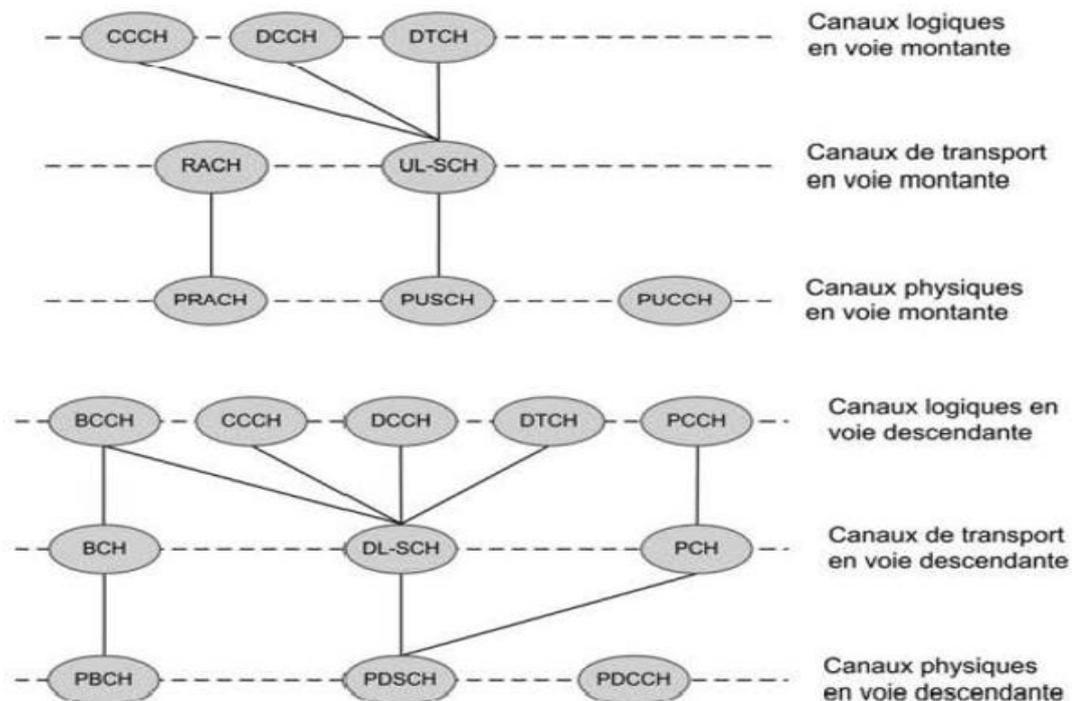


Figure I.16 : Association entre les différents canaux en UL et DL [1].

I.4. Le mécanisme CS Fallback

Le système LTE/EPC est purement basé sur la commutation de paquets et ne comporte pas de domaine à commutation de circuits, contrairement au GSM/GPRS et à l'UMTS. Cependant le système LTE doit être associé à l'architecture de service IMS, définie par le 3GPP, pour l'accès aux services multimédias. Ce dernier propose en effet une architecture fonctionnelle de services élémentaires (carnet d'adresses, appel voix/vidéo, échange de données client-à-client...)

Les services voix étant les principales sources de revenus des opérateurs de téléphonie mobile, ces derniers souhaitent pouvoir fournir un service voix via les terminaux mobiles LTE dès l'ouverture de leur réseau LTE, sans avoir à déployer dans le même temps une architecture IMS, complexe et coûteuse. C'est pourquoi un mécanisme a été défini pour permettre aux UE de basculer vers une technologie d'accès traitant la voix en commutation de circuits dès qu'un appel est lancé (voix CS). Ce mécanisme est appelé CS Fallback, et permet de renvoyer un appel voix lancé par l'UE ou à destination de celui-ci vers le domaine CS du GSM ou de l'UMTS.

I.4.1.Principe

Le mécanisme CS Fallback a été envisagé pour garantir une continuité de service d'un appel VoIP vers un appel voix CS, lorsque l'utilisateur sort de la zone de couverture du réseau LTE. Il ne

peut se limiter à un simple handover inter système puisque la gestion entière de l'appel est différente entre ces deux modes. Le basculement vers un mode de voix circuit doit réaliser le transfert complet du chemin de données de l'UE au point de sortie du réseau, et pas uniquement entre l'UE et le réseau d'accès. La signalisation d'appel est également modifiée, passant de SIP au protocole NAS Call Control. Le CS Fallback à travers le SR VCC (*Single Radio Voice Call Continuity*) modifie le plan usager de l'UE. Le SR-VCC est une procédure définie par le 3GPP pour permettre à l'UE d'échanger des données et de la signalisation avec un seul réseau d'accès à un instant donné et le réseau se charge du transfert des informations nécessaires au système cible.

I.4.2. Procédure de transfert d'appel voix LTE-IMS vers le domaine CS

L'UE remonte une mesure sur une cellule voisine UMTS ou GSM, qui déclenche la décision de handover. L'eNodeB demande alors au MME d'effectuer le handover des bearers EPS de l'UE (*via le message S 1-AP Handover Required*). Le MME détermine qu'au moins un des bearers EPS est un bearer de voix, par exemple à l'aide du QCI (typiquement égal à 1 dans ce cas). Il le traite alors séparément des autres bearers EPS actifs pour cet UE et contacte le MSC Serveur afin d'effectuer le transfert de l'appel voix vers le domaine CS. Pour les autres bearers, il déclenche une préparation de handover dans le domaine PS. Le message envoyé au MSC Serveur indique le MSISDN de l'abonné (numéro de téléphone), son IMSI, la cellule GSM cible ou l'identifiant du RNC pour un transfert vers l'UMTS, un conteneur transparent destiné au BSS ou au RNC et le contexte NAS de l'UE. La figure ci-dessous donne l'illustration de cette procédure :

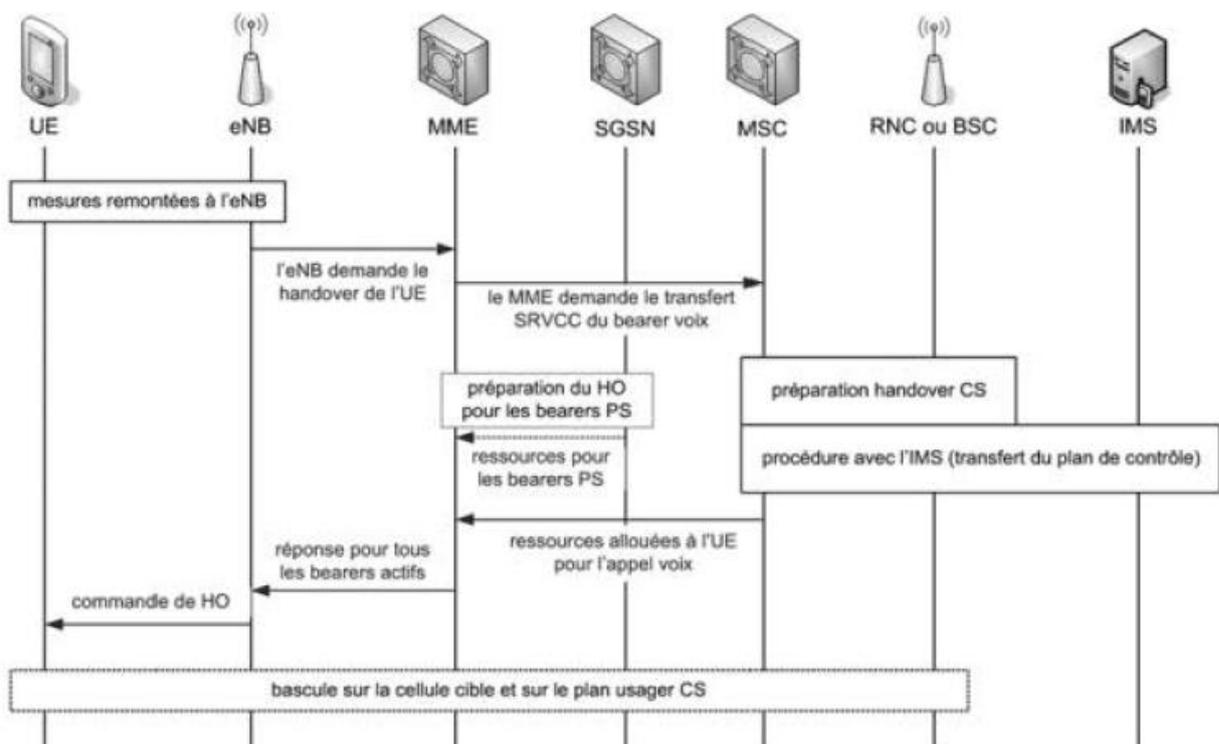


Figure I.14: Transfert d'appel voix LTE-IMS vers le domaine CS.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue des différentes générations de systèmes de téléphonie radio-mobile. Une description plus détaillée a été réservée au réseau 4G/LTE (caractéristiques, fonctionnement...) pour nous permettre de mieux appréhender les notions développées dans le chapitre suivant qui portera sur la qualité de service QoS.



Chapitre II. Gestion de la QoS en 4G/LTE



II.1.Introduction

Pour tout réseau déployé que ce soit en télécommunication, en informatique ou autre, le plus grand objectif est d'avoir les meilleures performances, de sorte que la qualité de service (QoS) assurée soit au minimum des exigences des utilisateurs.

Le contrôle de la qualité de service est d'une importance cruciale en LTE. En effet cette technologie offre des mécanismes dits de qualité de service différenciée pour faciliter la prise en compte des contraintes de services différents. Des services temps-réel (*par exemple, un appel voix ou un appel de streaming vidéo*) requièrent des délais de transmission courts mais peuvent tolérer des erreurs de transmission. En revanche, les services non temps-réel (*par exemple, un téléchargement de courrier électronique*) revêtent des contraintes de délais relâchées mais ne tolèrent pas d'erreurs de transmission. Le LTE a ainsi été conçu pour distinguer les services nécessitant un débit garanti ou GBR (*Guaranteed Bit Rate*), des services ne requérant pas de débit garanti (*non-GBR*).

Dans ce chapitre il est question de la QoS sous plusieurs aspects, mais aussi de la mise en évidence les différents mécanismes de sa gestion dans le réseau LTE.

II.2. Notions de QoS

La QoS (Qualité of service) ou QoS (Qualité de service) exprime la capacité d'un réseau à pouvoir garantir un niveau de service acceptable. Sa gestion peut être simplifiée et classifiée selon quatre points de vue :

- ❑ Besoins de QoS du client : Ils déterminent le niveau de qualité nécessaire pour un service donné, niveau qui peut être exprimé en langage non technique. Le client ne se soucie pas de la manière dont un service donné est fourni ou des aspects de la conception interne du réseau mais de la QoS de bout en bout qui en résulte.
- ❑ QoS offerte par le fournisseur : Les critères ou paramètres qui définissent la qualité offerte par le prestataire, peuvent varier selon différentes circonstances.
- ❑ Perception du client : Elle s'exprime généralement en termes de degré de satisfaction et est évaluée aux moyens d'enquêtes et commentaires reçus sur le niveau de service. Cet élément indique ce que le consommateur pense de la qualité reçue ou perçue et peut intervenir dans des comparaisons de qualité fournie (mise en évidence des causes d'ambiguïté).
- ❑ QoS obtenue ou fournie: Cet élément peut intervenir:
 - Comme base de comparaison entre la qualité assurée et la qualité proposée.
 - base de mesure corrective pour les fournisseurs de services.

La figure suivante met en évidence la QoS sous différents point de vue :

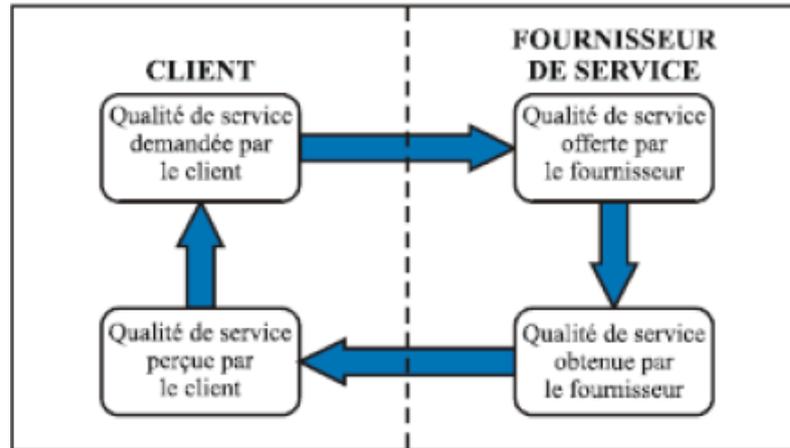


Figure II.1 : Perception de la QoS.

II.2.1. Contraintes de la QoS

La QoS est évaluée en fonction des différents équipements qui composent le réseau, ainsi que du trafic qui y circule. LTE étant un réseau tout IP à commutation de paquet, il est sujet à des contraintes à prendre en compte particulièrement dans le cas de services temps réels :

- **Le débit** : Il définit la quantité d'information (nombre de bits par seconde) pouvant être acheminée sur le réseau entre deux points donnés.
- **La latence** : C'est le délai de traversée du réseau, d'un bout à l'autre, par un paquet. Les différentes applications présentes dans un réseau n'auront pas le même degré d'exigence en fonction de leur nature : faible, s'il s'agit d'une messagerie électronique ou de fichiers échangés, fort s'il s'agit de données "voix". La latence dépend du temps de propagation (fonction du type de média de transmission), du temps de traitement (fonction du nombre d'équipements traversés) et de la taille des paquets (temps de sérialisation).
- **La gigue** : Elle exprime la variation de la latence.
- **Les pertes de paquets** : Pertes d'informations au cours de la transmission ou réception d'informations erronées dues à de la congestion sur le réseau ou des bruits.
- **La bande passante** : Il existe deux modes de disponibilité de la bande passante, selon le type de besoin exprimé par l'application à savoir :
 - Le mode burst: est un mode immédiat, qui monopolise toute la bande passante disponible.
 - Le mode Stream : est un mode constant, plus adapté aux fonctions audio/vidéo ou aux applications interactives.
 - La priorité des paquets : Il s'agit d'un mécanisme permettant d'administrer les paquets et la bande passante (mode burst ou Stream).

II.2.2. Les informations utilisées pour assurer la QoS

Pour mettre en place la qualité de service, il est nécessaire de se positionner 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.

II. 2.2. Modèles de gestion de la QoS

L'arrivée des applications multimédias, des services online (visioconférence, VoIP, audio, vidéo, jeux en réseaux..) a nécessité la mise en place de réseaux plus performants et fiables pour la satisfaction des abonnés et un fonctionnement plus optimal de ces services. Or le protocole IP assure le même traitement pour tous les paquets qu'il voit transiter, sans tenir compte des spécificités des applications émettrices, ni de leur contraintes (en bande passante, délai, ...). C'est pourquoi des travaux de l'IETF (Internet Engineering Task Force) ont recommandé la mise en place de deux modèles de gestion de la QoS: le modèle DIFFSERV et le modèle INTSERV.

II. 2.2.1. Modèle Intserv

Défini dans le RFC 1633, IntServ propose de réserver des ressources dans les nœuds du réseau avant de commencer à les utiliser. Ce modèle définit une architecture capable de prendre en charge la QoS sans toucher au protocole IP et pour cela il utilise un protocole spécifique de signalisation appelé RSVP (Resource Reservation Protocol).

Le RSVP est avant tout un protocole de signalisation qui permet de réserver dynamiquement de la bande passante, et de garantir un délai, ce qui le rend particulièrement efficace pour des applications comme la VoIP. Il rend également obligatoire la demande de QoS par le récepteur plutôt que par l'émetteur, ce qui permet d'éviter que certaines applications émettrices ne monopolisent des ressources inutilement, au détriment de la performance globale du réseau.

Intserv définit deux types de services :

- Guaranteed Service (GS) qui garantit la bande passante et un délai d'acheminement limité de bout en bout.
- Controlled Load (CL) qui est équivalent à un service Best Effort dans un environnement non surchargé et offre un contrôle sur les débits disponibles.

II. 2.2.2. Modèle Diffserv

Ce modèle, défini par l'IETF dans le RFC 2475, se base sur le principe de création de diverses classes de services, chacune avec une qualité de service différente. Ces classes se distinguent les unes des autres par la présence d'un code dans le paquet IP : le DSCP (Diffserv Code Point). Le marquage des paquets selon la qualité de service qu'il nécessite, se fait en périphérie du réseau, soit à la source directement ou soit au niveau du routeur de bordure. Ensuite, les routeurs internes déterminent la priorité du paquet et le traitent en fonction de celle-ci [11]. Le fait d'introduire la différenciation entre les flots de trafic dans le paquet IP à l'aide du champ DiffServ rend ce modèle évolutif.

Ces deux modèles sont complémentaires. En effet, IntServ est très performant et bien adapté aux réseaux de petites envergures comme les LAN, alors que DiffServ s'adapte mieux à des réseaux de grandes échelles comme ceux des ISP, ce qui fait de l'association de ces deux techniques un très bon compromis pour mettre en place une QoS de bout-en bout (IntServ aux extrémités, et DiffServ en cœur de réseau).

II.2.3. Procédés d'évaluation de la QoS

Les opérateurs radio- mobiles s'en remettent aux tests effectués pour assurer les performances du réseau et offrir aux abonnés l'utilisation attendue. Le principe est de définir un ensemble commun de techniques et d'outils de mesure pour fournir des résultats comparables, non seulement pour faire face à la concurrence, mais aussi pour fidéliser la clientèle.

II.2.3.1. Le drive test

Drive Test, est la procédure pour effectuer un test en conduisant. Le véhicule n'a pas vraiment d'importance, on peut faire un test de conduite en utilisant une moto ou un vélo. Ce qui compte, c'est le matériel et les logiciels utilisés dans le test : un ordinateur portable, un logiciel de collecte, un téléphone portable spécifique, un GPS et un scanner

L'objectif principal est de collecter des données de test, pouvant être visualisées, analysées en temps réel, ce qui permet de visualiser les performances du réseau sur le terrain. Les données de toutes les unités sont regroupées par logiciel de collecte et stockées [12]. Le drive test se base sur un certains nombres de paramètres pour évaluer les performances du réseau dont les principaux sont :

- ↳ **Symbol RSSI (Reference Signal Intensity)** : Indicateur de puissance du signal reçu, le RSSI est la puissance à large bande, y compris la puissance intracellulaire, les interférences et le bruit. Il fournit l'indication de la qualité du signal.

$$\begin{aligned} \text{RSSI} &= \text{puissance à large bande} \\ &= \text{bruit} + \text{puissance de la cellule de service} + \text{puissance d'interférence.} \end{aligned}$$

- ↪ **RSRP (Reference Signal Received Power)** : Puissance de signal de référence, Il s'agit d'un paramètre de test spécifique au LTE, utilisé par les périphériques pour déterminer les points de transfert. Sa connaissance fournit à l'UE des informations essentielles sur les cellules à partir desquelles les pertes de trajet peuvent être calculées et utilisées pour déterminer les réglages de puissance optimaux pour faire fonctionner le réseau.

$$\text{RSRP (dBm)} = \text{RSSI (dBm)} - 10 * \log (12 * N)$$

N étant le nombre de RB (Ressource Block) dans le RSSI.

- ↪ **RSRQ (Reference Signal Received Quality)** : C'est la qualité de réception du signal de référence. RSRQ est utilisée uniquement pendant les états connectés.

$$\text{RSRQ} = \text{RSRP} / (\text{RSSI} / N).$$

- ↪ **SINR (Signal to Interference Noise Ratio)** : Le SINR indique le rapport signal sur bruit. Ce paramètre est un moyen de mesurer la qualité des connexions sans fil LTE . Lorsque l'énergie du signal s'estompe avec la distance, c-à-d la perte de trajet due à des paramètres environnementaux (par exemple, le bruit de fond, la force d'interférence d'une autre transmission simultanée).

$$\text{SINR} = S / I + N$$

S étant la puissance moyenne du signal reçu et I la puissance d'interférence moyenne.

- ↪ **CQI (Channel Quality Index)** : C'est une mesure de la qualité de communication des canaux sans fil, c'est-à-dire qu'elle indique la qualité du canal radio mobile en liaison descendante telle que perçue par l'UE. Typiquement, un CQI de valeur élevée est indicatif d'un canal de haute qualité et vice versa.

- ↪ **PCI (Physical Cell Identity)** : Il est utilisé pour identifier la cellule et pour transmettre les données. PCI varie dans une plage de 0 - 503.

- ↪ **BLER (Block Error Ratio)** : Le taux d'erreur de bloc ou BLER est défini comme le rapport entre le nombre de blocs erronés reçus et le nombre total de blocs transmis.

II.2.3.2. Les plaintes clientèles

La réclamation est une demande d'un client ciblé sur ses insatisfactions qu'il faut prendre en charge et traiter le plus rapidement possible. Ces plaintes ont pour objectif de permettre à l'opérateur de prendre état des problèmes qui sévissent au sein de son réseau enfin d'y apporter des solutions appropriées.

II.2.3.3. Enquête de consommateurs

C'est une recherche méthodique de collecte d'informations portant ou non sur l'ensemble de population étudiée. Elle a pour objectif de faire l'état des lieux de la perception de l'utilisateur et sa satisfaction du service.

II.2.3.4. Benchmarking

Les outils de benchmark permettent de brancher plusieurs mobiles pour pouvoir faire des appels voix et/ou data en simultané et sur tous les réseaux disponibles afin de pouvoir comparer leur performance et leur qualité de service. Les statistiques générées peuvent être affichées sur des cartes, dans des tableaux ou sur des graphes.

II.2.3.5. Mesures KPI

Les indicateurs clés de performances (KPI) sont des indicateurs mesurables servant à surveiller et optimiser les performances du réseau afin de fournir une meilleure QoS et d'obtenir une meilleure utilisation des ressources de réseau. Les indicateurs les plus utilisés dans les réseaux mobiles sont: l'accessibilité, la continuité, l'intégrité, la mobilité, la disponibilité, l'utilisation et le trafic. Le chapitre 3 traitera des différents KPI.

II.3. Mécanismes de QoS dans LTE

Le contrôle de la qualité de service est essentiel pour l'opérateur afin de garantir une expérience satisfaisante à l'utilisateur. La technologie LTE offre des mécanismes dits de qualité de service différenciée afin de faciliter la prise en compte des contraintes de services différents.

II.3.1. Les bearers

Le concept de bearer a été introduit dès la conception du système GSM, pour affecter efficacement les ressources aux besoins des abonnés. Un bearer peut être vu comme un tuyau entre deux entités du réseau qui communiquent entre elles sur une interface, tuyau dont certaines caractéristiques sont négociées lors de son établissement et qui permet le transfert de données.

Le concept de bearer est ainsi décliné sur les interfaces du réseau dont les ressources doivent être économisées, et en particulier sur :

- l'interface radio, entre l'UE et l'eNodeB ;
- l'interface S1 entre l'E-UTRAN et le réseau cœur ;
- les interfaces du réseau cœur.

Les bearers sur ces interfaces forment un bearer agrégé, entre l'UE et le réseau cœur : le bearer EPS (ou EPS bearer). La figure suivante en donne une parfaite illustration :

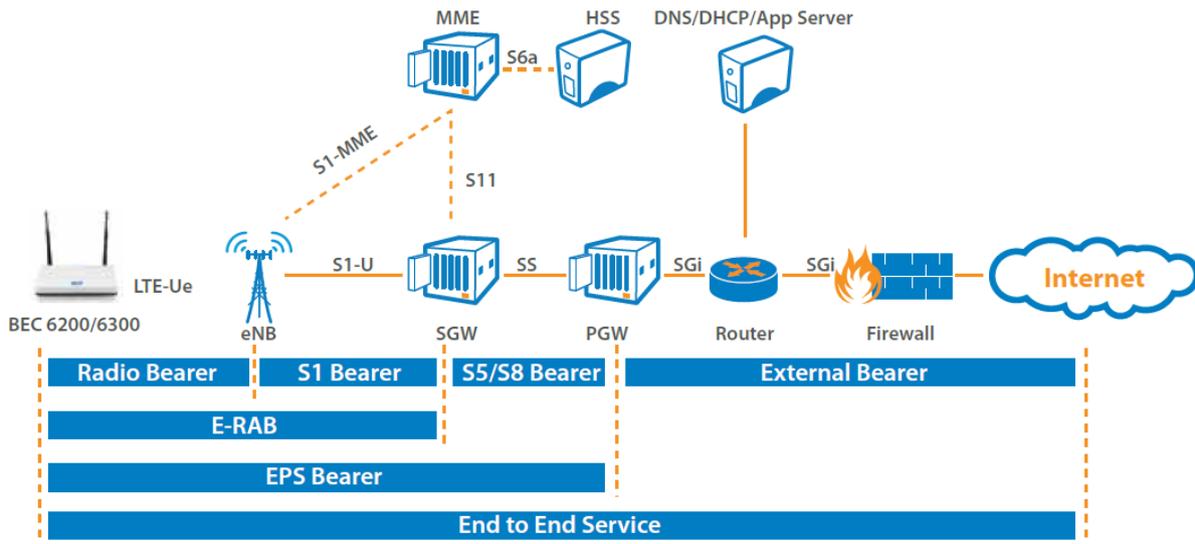


Figure II.2 : Les bearers au sein des interfaces

Le bearer EPS est défini comme étant une connexion logique entre deux points de terminaison (PGW et UE) au sein de l'architecture LTE/EPS.

Le LTE supporte différents types de services tels que la voix, le streaming vidéo, le téléchargement de données, etc. La prise en charge de ces services implique des contraintes différentes au niveau du réseau. Par exemple, une latence et une gigue réduites sont nécessaires au bon fonctionnement du service voix. En revanche, les contraintes de latence sont relâchées pour le téléchargement de données, mais ce dernier requiert un taux d'erreur plus faible. Le concept de qualité de service défini dans le cadre du LTE a pour objectif de répondre aux contraintes de chaque service via la définition de règles de priorité entre les flux.

Il existe deux types de bearers EPS : le bearer par défaut (default bearer) et le bearer dédié (dedicated bearer).

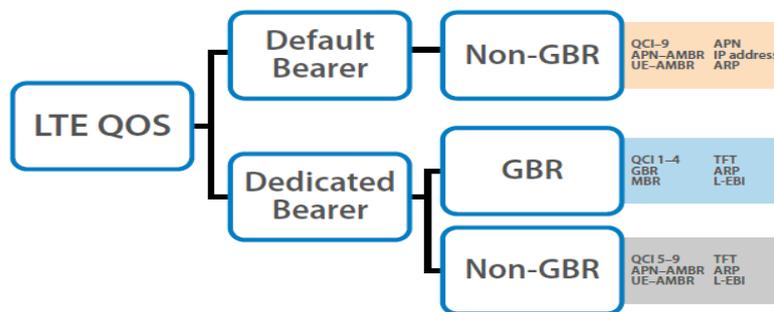


Figure II.3 : Différents types de bearers

II.3.1.1. Le bearer par défaut

Un bearer par défaut ou default bearer est établi pour chaque UE, lors de la procédure d'enregistrement au réseau. Une adresse IP est allouée à l'UE par la P-GW. Ce bearer reste établi

pendant la durée de la connectivité PDN et fournit à l'UE une connectivité IP permanente. Les valeurs de ses paramètres sont définies par le MME, en fonction des données de souscription de l'utilisateur fournies par le HSS.

Le bearer par défaut est systématiquement sans débit garanti (N-GBR) car il est établi de manière permanente et une garantie de service impliquerait la réservation permanente de ressources.

II.3.1.2. Le bearer dédié

Les bearers dédiés sont établis à n'importe quel moment après la procédure d'enregistrement pour que l'utilisateur puisse profiter de services nécessitant une QoS spécifique. Les supports dédiés sont les supports secondaires créés au-dessus du support par défaut existant. Ils partagent l'adresse IP précédemment établie par le porteur par défaut, donc le support dédié ne nécessite pas d'occuper adresse IP supplémentaire.

Par ailleurs, un même utilisateur peut gérer des bearers dédiés établis avec un ou plusieurs PDN et donc potentiellement avec un ou plusieurs P-GW. De manière optionnelle, les valeurs de paramètres de QoS sont reçues par la P-GW en provenance du PCRF et transférées vers la S-GW. Ces valeurs peuvent également être déterminées par des règles locales définies au sein du PCEF. Le MME transfère de manière transparente à l'eNodeB les valeurs reçues en provenance de la S-GW par l'intermédiaire de l'interface S 11 [1].

Les supports dédiés sont principalement utilisés en tant que services GBR (débit garanti) bien qu'ils puissent également être un service non-GBR. Un bearer avec débit garanti (GBR) est alloué principalement aux services dits temps réel tels que la voix ou le streaming vidéo. Toutefois, on peut aussi imaginer l'allocation d'un bearer GBR à un service de téléchargement pour des utilisateurs ayant souscrit à des abonnements dits premium. Au sein du réseau, une ressource est dédiée pendant toute la durée de vie du bearer EPS avec débit garanti. Quant aux bearers sans débit garanti (non-GBR), ils sont principalement alloués aux services non temps-réel tels que le téléchargement de données. Ces bearers n'ont pas de ressource dédiée au sein du réseau.

II.3.1.3. Paramètres QoS des bearers

La QoS du bearer EPS est caractérisée par des paramètres qui seront énumérés comme suit :

- **Le QCI (QoS Class Identifier) :** Le QCI est un paramètre défini au sein du système LTE/EPC pour différencier les Qualités de service entre les flux de services différents. L'UE et les nœuds du réseau tels que l'eNodeB, la SGW, la P-GW déterminent le traitement à appliquer aux paquets de données d'un bearer EPS en fonction de la valeur de QCI définie pour ce bearer.

9 QCI sont identifiés, chacun avec ses caractéristiques: type de ressource (GBR/non-GBR), priorité, délai de transmission et taux d'erreur. Le tableau suivant en donne un aperçu :

QCI	Bearer Type	Priority	Packet Delay	Packet Loss	Example
1	GBR	2	100 ms	10	VOIP Call
2		4	150 ms	10	Video Call
3		3	50 ms		Online Gaming (Real Time)
4		5	300 ms		Video Streaming
5	Non-GBR	1	100 ms	10	IMS Signaling
6		6	300 ms		Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc.
7		7	100 ms	10	Voice, Video, Interactive gaming
8		8	300 ms	10	Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc.
9		9			

Tableau II.1 : Caractéristiques QCI [13].

L'objectif de ces QCI normalisés est d'assurer que les services reçoivent le même niveau de QoS de bout-en-bout dans un environnement impliquant plusieurs constructeurs d'infrastructure. Ces caractéristiques ne sont pas transmises explicitement dans la signalisation entre les équipements seules les valeurs de QCI le sont.

- **L'ARP (Allocation and Retention Priority)** : Ce paramètre sert à déterminer lors d'une congestion si l'établissement du bearer EPS peut être accepté, aux dépens d'un autre bearer déjà établi, ou doit être rejeté. L'ARP est constitué des éléments suivants :
 - le niveau de priorité (valeur numérique de 1 à 15, 1 étant la priorité la plus élevée) ;
 - la capacité de préemption (valeur binaire : oui/non) ;
 - la vulnérabilité à la préemption (valeur binaire : oui/non).

Le niveau de priorité permet, dans une situation de limitation des ressources, d'assurer que le bearer de plus haute priorité sera établi. Par ailleurs, l'ARP peut être utilisé en cas de restriction de ressources pour décider de relâcher un ou plusieurs bearers EPS au profit d'un nouveau bearer de plus haute priorité: il s'agit du mécanisme de préemption.

La capacité de préemption indique si l'établissement du bearer peut conduire à la relâche d'un bearer de plus faible priorité, pour libérer les ressources nécessaires, si toutefois ce bearer moins prioritaire est vulnérable à la préemption.

- **Le MBR (Maximal Bit Rate)** : utilisé pour un porteur de type GBR et indique le débit maximal autorisé. Tous les paquets arrivant au support après le dépassement du MBR spécifié seront rejetés.
- **UE-AMBR (UE-Aggregated Maximum Bi Rate)** : désigne le débit maximal accordé à un UE pour l'ensemble de ses bearers non-GBR. Il est limité par un paramètre de souscription transmis par le HSS au MME lors de l'enregistrement de l'UE. Le MME produit l'UE-AMBR à partir de la somme des APN-AMBR des APN utilisés par les bearers EPS de l'UE, ou de la valeur

souscrite si celle-ci est inférieure à la somme des APN-AMBR. Il existe une valeur UE-AMBR pour le sens montant, une autre pour le sens descendant [12].

- **APN-AMBR (APN-Aggregated Maximum Bit Rate) :** L'APN-AMBR est le débit maximal autorisé à un UE par l'opérateur pour l'ensemble de ses bearers non-GBR utilisant l' APN considéré. C'est un paramètre lié à la souscription de l'abonné; il est donc enregistré au sein du HSS dans le contexte de l'abonné et transmis par le HSS au MME lors de l'enregistrement de l'UE au réseau. Le contrôle de ce débit agrégé est réalisé par la P-GW dans le sens descendant, par l'UE et la P-GW dans le sens montant [1][12].
- **GBR et N-GBR :** Pour un support EPS, avoir un type de ressource GBR signifie que la bande passante du support est garantie. Evidemment, un support EPS de type GBR a un "débit binaire garanti" associé comme l'un de ses paramètres de QoS. Seul un support EPS dédié peut être un support de type GBR et aucun support EPS par défaut ne peut être de type GBR. Le QCI d'un support EPS de type GBR peut aller de 1 à 4.

Pour un support EPS, avoir un type de ressource non-GBR signifie que le support est un support de type best-effort et que sa bande passante n'est pas garantie. Un support EPS par défaut est toujours un support non-GBR, alors qu'un support EPS dédié peut être GBR ou non-GBR. Le QCI d'un support EPS non-GBR peut aller de 5 à 9.

II.3.2. Le scheduling

L'allocation de ressources ou ordonnancement ou scheduling vise à partager des ressources radio communes entre les UE. Elle forme donc une fonctionnalité clé de l'interface radio pour les performances du système et le maintien de la qualité de service envers l'utilisateur.

La transmission de données en LTE, comme avec ses prédécesseurs, repose sur des canaux partagés dont l'accès est géré dynamiquement en fonction de paramètres de QoS et typiquement en fonction de la qualité de canal perçue par l'UE. L'accès au canal est déterminé par le scheduler, aussi parfois appelé ordonnanceur en français, dont la tâche est de décider des paramètres suivants :

- Quels UE servir en un temps donné
- Quelles ressources en fréquence allouer à chaque UE
- Quelle puissance appliquer, principalement en voie montante

Le scheduler tient compte des trois dimensions afin de mieux servir les UE :

- **La dimension temporelle :** Les données sont transmises sur des canaux partagés entre les UE. La raison est double, d'une part, les besoins en ressources des UE peuvent considérablement varier au cours du temps en fonction du type de service requis. Par exemple avec les appels voix, les périodes de silence sont nombreuses et cours de ces dernières aucune données n'est

transmise. Réserver des ressources pour ces périodes reviendrait à les gaspiller ; l'idée est d'allouer ces périodes de silence à d'autres UE. Il est donc plus efficace pour le système de mutualiser les ressources radio en canaux partagés et de les allouer aux UE en fonction de leurs besoins instantanés.

L'autre avantage d'un accès partagé est le gain de diversité multi-utilisateur. Cette diversité exploite les variations rapides du canal de transmission afin de servir les UE lorsque celui-ci est dans un état favorable, typiquement un état d'évanouissement constructif. Ce qui a pour avantage lorsque l'on a un grand nombre actif d'UE simultanée d'avoir une meilleure qualité que la moyenne, bénéficiant ainsi d'un débit plus important sur les ressources allouées

- **La dimension fréquentielle :** Tout comme l'adaptation aux évolutions du canal dans la dimension temporelle, le scheduler peut tirer parti des variations du canal dans la dimension fréquentielle, en allouant à chaque utilisateur des ressources en fréquences (PRB) bénéficiant de conditions radio favorables. On parle alors de scheduling adaptatif en fréquence, ou encore sélectif en fréquence.

Cela implique que l'UE retourne une information sur la qualité du canal dans la dimension fréquentielle. La dimension fréquentielle permet de coordonner l'interférence entre cellules voisines mais également d'influer sur la densité spectrale de la puissance (DSP) d'émission.

- **La dimension spatiale :** La gestion des transmissions MIMO impose au scheduler de prendre en compte une dimension supplémentaire : la dimension spatiale. Celle-ci entre en jeu en émission via l'opération de pré codage spatial, qui donne une propriété spatiale à la transmission (par exemple, en formant un faisceau pointant vers une direction privilégiée). En réception, les antennes multiples révèlent des propriétés spatiales des signaux, par exemple les directions d'arrivée. La dimension spatiale permet notamment de transmettre plusieurs flux d'informations, ou couches spatiales, sur les mêmes ressources temps-fréquence, mais aussi d'accroître la robustesse de la transmission lorsqu'une seule couche spatiale est transmise.

II.3.2.1. Les Algorithmes de scheduling

L'algorithme de scheduling proprement dit n'est pas normalisé car il ne requiert pas d'interfonctionnement avec d'autres équipements et fait donc l'objet d'une implémentation propriétaire. Il vise généralement à maximiser un critère de performance, sous un certain nombre de contraintes. Ce critère peut être, par exemple, la capacité de la cellule, éventuellement sous la contrainte d'une latence et/ou d'un débit garanti à un (ou plusieurs) UE en fonction du ou des service(s) requis.

Les algorithmes de scheduling sont nombreux mais dans ce qui suit on en citera que trois :

- **Le scheduler Round Robin** alloue des ressources aux UE à tour de rôle, indépendamment de leurs conditions radio. Ce scheduler est le plus équitable, mais est peu efficace en termes de débit total du système, puisqu'il ne tire pas parti des conditions radio.
- **Le scheduler Max-CQI** alloue des ressources aux UE qui bénéficient des meilleures conditions radio. Ce scheduler maximise le débit total du système mais n'est pas équitable, puisque les UE en mauvaise condition radio, en particulier ceux situés en bordure de cellule, ne sont jamais servis. Pour cette raison, le critère max-CQI ne présente pas d'intérêt pratique s'il est utilisé seul. En revanche, si un autre critère est utilisé pour choisir les UE à servir dans le domaine temporel, le critère max-CQI peut être utilisé dans le domaine fréquentiel pour attribuer chaque PRB à l'UE qui en tirera le meilleur parti (par exemple sous la contrainte d'un nombre donné de PRB par UE).
- **Le scheduler Proportional Fair** alloue des ressources aux UE qui maximisent une métrique du type débit instantané atteignable à l'instant courant par l'UE divisé par son débit moyen. Ce scheduler réalise un compromis entre les deux schedulers précédents, puisqu'il tient compte à la fois des conditions radio (à débits moyens similaires, l'UE avec la meilleure qualité de canal instantanée sera sélectionné en priorité), mais aussi de l'équité entre les UE (à qualités instantanées du canal similaires, l'UE ayant reçu le débit le plus faible jusque-là sera sélectionné en priorité).

II.3.2.2. Types de scheduling

On distingue en LTE: le scheduling dynamique, qui se subdivise en scheduling adaptatif en fréquence et scheduling non adaptatif, et le scheduling semi-persistant.

- **Scheduling dynamique** : Le scheduler dynamique prend ses décisions à chaque milliseconde en LTE, en fonction des informations d'entrée (puissance disponible, taille des buffers, indicateur de surcharge, qualité du canal, pré codage préféré...). Il peut ainsi tirer parti de la connaissance de la qualité de canal (quasi-) instantanée des UE, afin d'optimiser les débits utilisateur ainsi que le débit total de la cellule.

En plus de l'adaptation dans le domaine temporel, le scheduling dynamique peut être adaptatif en fréquence (généralement en voie descendante) pour une efficacité maximale. Pour être efficaces, les décisions prises par le scheduler sur la base des informations sur l'état du canal de l'UE doivent être toujours valides au moment où la transmission s'effectue.

- **Scheduling semi-persistant** : Contrairement au scheduling dynamique, le scheduling semi-persistant (SPS) préserve des ressources en fréquence pour une durée donnée, avec une période

prédéfinie entre chaque allocation. Ce mode d'allocation est adapté à des flux réguliers, dont les unités de données sont produites et émises périodiquement (voix et visiophonie..).

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini dans un premier temps la QoS sous différents aspects, ses buts et ses modèles de gestion pour nous permettre de mieux appréhender la notion de qualité de service dans toutes ses largesses.

Dans un second temps, nous avons défini les différentes méthodes d'évaluation de la qualité de service avec les paramètres qui en découlent mais aussi et également nous avons eu à mentionner les différents mécanismes mis en place par LTE pour une meilleure gestion de la qualité de service dans le but de satisfaire la clientèle.

Le chapitre 3 fera l'objet d'une étude approfondie des KPIs.



Chapitre III. Indicateurs de performance KPI pour 4G/LTE



III.1.Introduction

La QoS dans les réseaux mobiles est évaluée par les KPIs. Généralement regroupés au sein de tableaux de bord, les KPIs constituent des outils d'aide à la décision. En effet, leurs mises en place permettent de définir et d'observer l'évolution de la stratégie de l'entreprise. Le choix des KPIs dépend de l'objectif visé et de l'élément mesuré par l'entreprise. Les KPIs peuvent varier entre les ingénieurs de gestion, marketing, opérations et réseaux en fonction de leurs priorités, perspectives ou critères de performance.

Ce chapitre décrit les indicateurs clés de performance (KPI) d'Ericsson pour le LTE.

III.2. Notions d'indicateurs clés de performance

Les KPIs (Key Performance Indicators) ou encore indicateurs clés de performance sont un ensemble d'événements, de paramètres et de mesures quantifiables utilisés dans les réseaux LTE, UMTS, CDMA et GSM pour évaluer ou comparer les performances en termes de réalisation des objectifs stratégiques et opérationnels du réseau mobile.

Les Indicateurs clés de performance peuvent être utilisées pour les tâches suivantes:

- ✚ Contrôler et optimiser les performances du réseau radio afin de fournir une meilleure qualité d'abonné ou pour obtenir une meilleure utilisation des ressources réseau installées.
- ✚ Détecter des performances inacceptables (problèmes) liés au réseau cellulaire. Cela permettra à l'opérateur de prendre des mesures rapides afin de préserver la qualité des services réseau existants.
- ✚ Fournir les planificateurs de fréquence radio avec les informations détaillées. Cela les aidera à configurer les paramètres réseau pour une utilisation optimale.
- ✚ Dépannage sur les grappes de cellules d'intérêt.

III.3. Les différents types de KPI d'Ericsson

Le tableau I.1 résume les divers types de KPI de l'équipementier Ericsson.

III.3.1. Accessibility (Accessibilité)

Les KPIs d'accessibilité sont utilisés pour mesurer la probabilité que les services demandés par un utilisateur puissent être consultés dans les tolérances spécifiées, pour les conditions d'exploitation données. C'est la possibilité pour l'utilisateur d'accéder au réseau à tout moment. Pour fournir des services dans les réseaux sans fil aux utilisateurs, la première étape consiste à établir un accès aux services. Une fois l'accès au service établi l'utilisateur pourra bénéficier des avantages de ce dernier. Le service fournit par le RAN de LTE pour l'accessibilité est le E-RAB.

Le taux de succès d'établissement d'E-RAB est calculé séparément selon si l'E-RAB est établi avec l'installation initiale d'E-RAB ou avec la procédure initiale d'établissement de contexte. Ce dernier dépend de l'établissement de la connexion RRC et de la S1 signalisation entre le RBS (Radio Bearer Service) et le MME [14].

Les principaux KPIs d'accessibilité sont : RRC, S1, ERAB.

LTE KPI	Description des cas
Accessibilité	<ul style="list-style-type: none"> • RRC Connection Establishment Success Rate • Random Access Success Rate • Initial E-RAB Establishment Success Rate • RRC Connection Establishment Counters • Initial E-RAB Establishment Success Rate Counters • Added E-RAB Establishment Success Rate Counters • Added E-RAB Establishment Success Rate • S1 Signaling Connection Establishment
Retainabilité	<ul style="list-style-type: none"> • MME Initiated E-RAB & UE Context Release with counters Description • UE Session Time • RBS Initiated E-RAB & UE Context Release with counters Description • MME & RBS Initiated UE Context Release Flow Chart • MME & RBS Initiated E-RAB Release Flow Chart
Intégrité	<ul style="list-style-type: none"> • EUTRAN Throughput KPIs • EUTRAN Latency KPIs • EUTRAN Packet Loss KPIs
Mobilité	<ul style="list-style-type: none"> • X2 Based Handover Preparation & Execution • Intra RBS Handover Preparation & Execution • Intra Frequency Handover Preparation & Execution Counters • S1 Based Handover Preparation & Execution • Intra-frequency intra-LTE S1 & X2 Handover Flowchart • Inter Frequency Handover Preparation & Execution Counters • Inter-frequency intra-LTE S1 & X2 Handover Flowchart
Disponibilité (latence)	<ul style="list-style-type: none"> • Partial cell availability (node restarts excluded)

Tableau III.1 : Les 5 classes de mesure de KPI de la LTE.

III.3.1.1. Ressource Radio Control (RRC)

Le protocole RRC a pour but de transférer les informations de signalisation entre l'UE et la station de base.

III.3.1.1.1 RRC Connection Establishments Success Rate

La procédure d'établissement d'une connexion RRC est décrite en figure II.1. Elle semble assez proche de la procédure UMTS ; il y a néanmoins des différences notables. En UMTS, l'établissement de la connexion RRC rend disponible plusieurs SRB (Signalling Radio Bearer). Les SRB1, SRB2 et SRB3 sont systématiquement activés. En LTE, seul le SRB1 est activé lors de la procédure. Il permet de transporter la signalisation AS (Access Strate) et NAS (Non Access Strate). Un SRB supplémentaire, le SRB2, est établi à l'issue des procédures de sécurité. Le SRB2 sert exclusivement au transport des messages NAS mais dispose d'une priorité moindre que le SRB1.

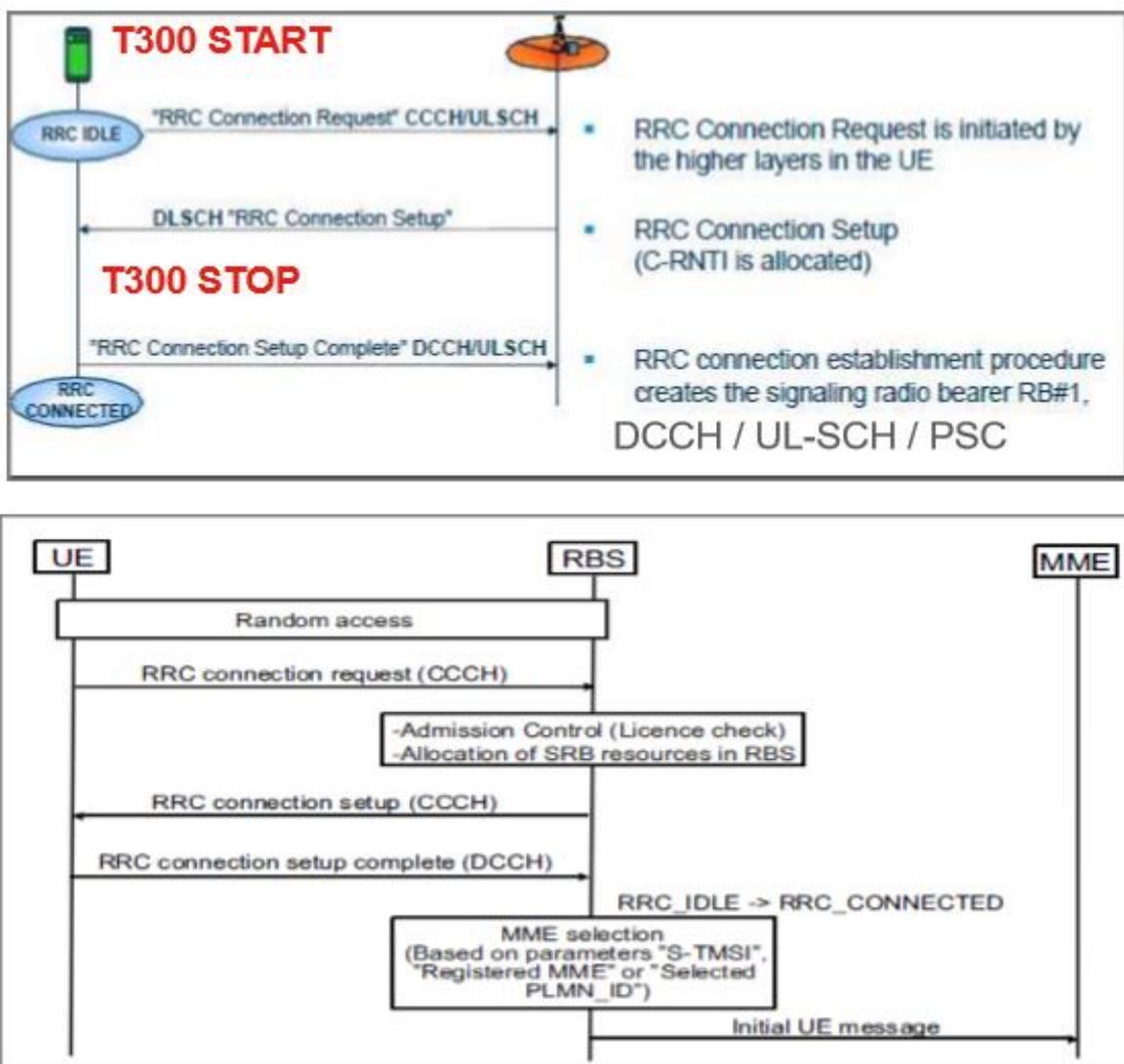


Figure III.1 : Configuration d'une connexion RRC [15].

Le RRC_Connection_Establishments_SR exprime le taux de réussite d'une connexion RRC. Ce KPI décrit le rapport de tous les établissements RRC réussis par rapport aux tentatives d'établissements RRC dans l'E-UTRAN. Il est donné par la relation suivante.

$$RRC_{SR} = \frac{RRCConnectionSuccess}{RRCConnectionAttempts} \times 100\%$$

- + **RRC_Connection_Success** = pmRrcConnEstabSucc : Nombre total de connexion RRC réussies
- + **RRC_Connection_Attempts** =pmRrcConnEstabAtt : Nombre total de tentatives de connexions RRC

La procédure d'établissement de connexion RRC est déclenchée par différentes causes identifiées par le champ « establishmentCause » dans le message RRCConnectionRequest, dans le message de demande de connexion on trouve :

- + **RRC_SSRservice** : Ce KPI évalue le taux de réussite de RRC avec les causes liées au service dans une cellule, il est donné par l'équation suivante.

$$RRC_SSRservice = \frac{\text{Taux de succès de connexion au service}}{\text{Taux de tentative de connexion}} \times 100 \%$$

- + **RRC_SSRsignal** : Ce KPI évalue le taux de réussite de RRC avec les causes liées au signal dans une cellule. Son équation est la suivante

$$RRC_SSRsignal = \frac{\text{Taux de succès de connexion lié au signal}}{\text{Taux de tentative de connexion}} \times 100\%$$

III.3.1.1.2 RRC Connection Reestablishment

La procédure de rétablissement d'une connexion RRC est sollicitée lorsque la connexion a été rompue entre le terminal et le réseau. Le terminal demande à rétablir la connexion RRC une fois la couverture radio retrouvée. La perte de connectivité peut survenir lors d'une procédure de handover ou suite à une défaillance du système. La procédure ne peut être activée que si la cellule d'accueil l'accepte.

Les différentes phases de la procédure sont décrites en figure III.2. Le terminal demande le rétablissement de la connexion RRC en envoyant un message RRC connection reestablishment request. Ce message est transmis sur le canal d'accès. Il contient la dernière identité C-RNTI () en possession du terminal au moment de l'évènement ayant déclenché la procédure. La cause ayant déclenché la procédure est également signalée (échec d'une procédure de handover, rupture de la liaison radio, erreur dans la procédure de control d'intégrité...).

Le réseau répond au terminal en émettant un message RRC connection reestablishment qui contient les paramètres du SRB1 et demande au terminal de se placer en mode connecté. Le mobile termine la procédure en envoyant le message RRC connection reestablishment complete [16].

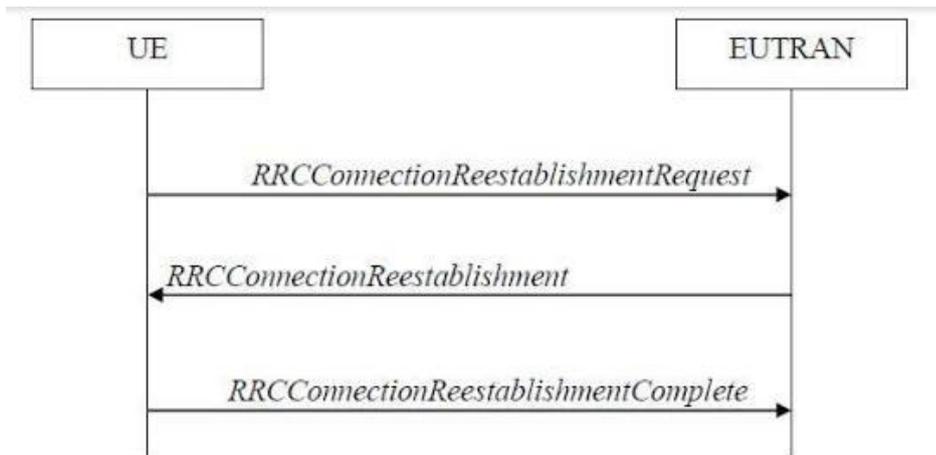


Figure III.2 : Procédure de rétablissement d'une connexion RRC

III.3.1.2. S1SIG Establishment Success Rate

S1 est une interface normalisée entre eNB et EPC, cette interface comprend deux parties le S1-CP (plan control) et S1-UP (plan usager). Le plan de control (S1-CP) est responsable de la livraison des protocoles de signalisation entre l'eNodeB et le MME. L'interface S1-MME consiste en un protocole SCTP (Stream Control Transmission Protocol) sur IP et prend en charge plusieurs UE via une seule association SCTP, il fournit également une livraison de données garanti. Le plan utilisateur (S1-UP) est défini entre l'eNodeB et le SGW. L'interface S1-U fournit une transmission de données non garanties et est responsable de la livraison des données utilisateurs. La procédure d'établissement S1 explicité III.3 ci-dessous.

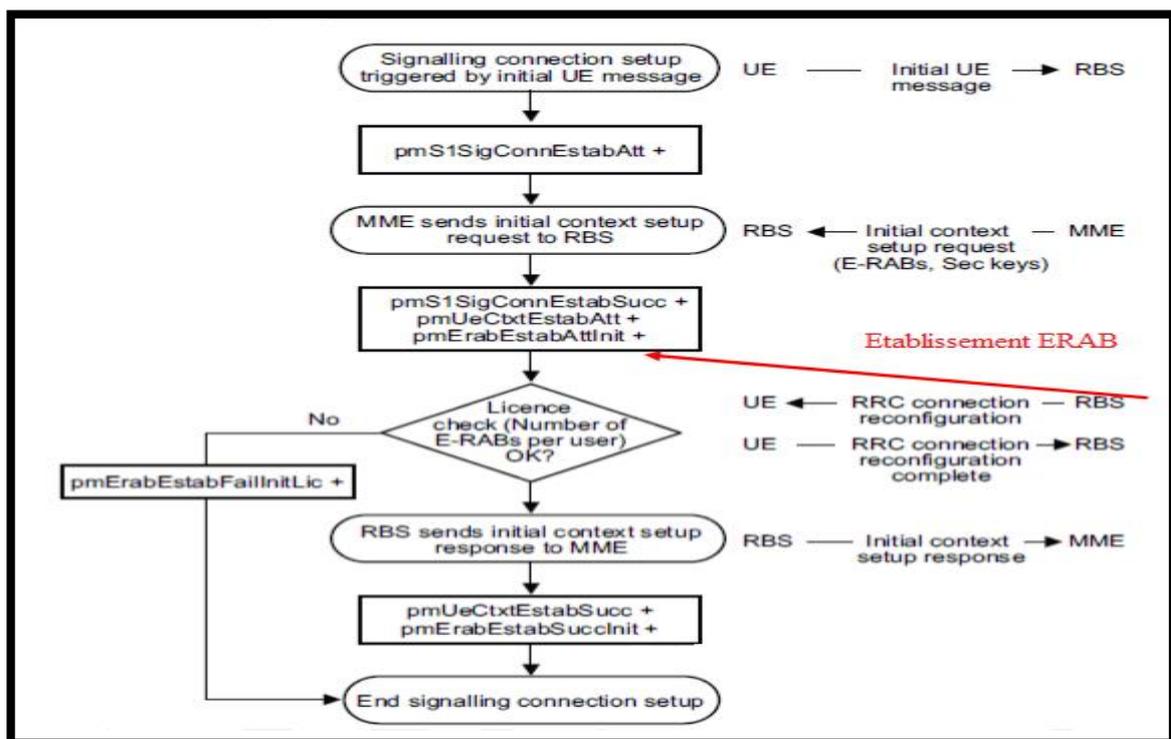


Figure III.3 : Phase d'établissement de l'interface S1

Le KPI S1SIG Connection Success Rate indique le taux de réussite de la connexion de signalisation sur l'interface S1, ce KPI comprend le nombre de tentative de configuration des connexions de signalisation S1. Sa formule est la suivante :

$$S1SIG_SR = \frac{S1SIGConnectionEstablishSuccess}{S1SIGConnectionEstablishAttemp} * 100\%$$

- ✚ **S1SIGConnectionEstablishSuccess** : Nombre total de tentatives de connexion de signalisation sur l'interface S1.
- ✚ **S1SIGConnectionEstablishAttemp** : Nombre total de tentatives de connexion de signalisation sur l'interface S1.

III.3.1.3. E-RAB Establishment Success Rate

Un E-RAB fait référence à la concaténation du support S1 et du support radio correspondant. Chaque E-RAB est défini par les paramètres suivants : E-RAB ID cet élément est utilisé pour identifier le E-RAB sur l'interface S1 et l'E-RAB QoS qui décrit le QCI définissant les paramètres de QoS (délai, taux d'erreur, ainsi que le GBR).

III.3.1.3.1. Initial E-RAB Establishment Success Rate

C'est le taux de réussite de l'établissement E-RAB initiale. Ce taux affiche la probabilité de succès ERAB pour accéder à tous les services, y compris la VoIP dans une cellule ou un réseau radio.

Ce KPI est calculé en fonction de la tentative de configuration de la connexion ERAB du compteur (point A) et de la configuration ERAB réussie (point B). L'explication est comme donnée dans l'illustration suivante:

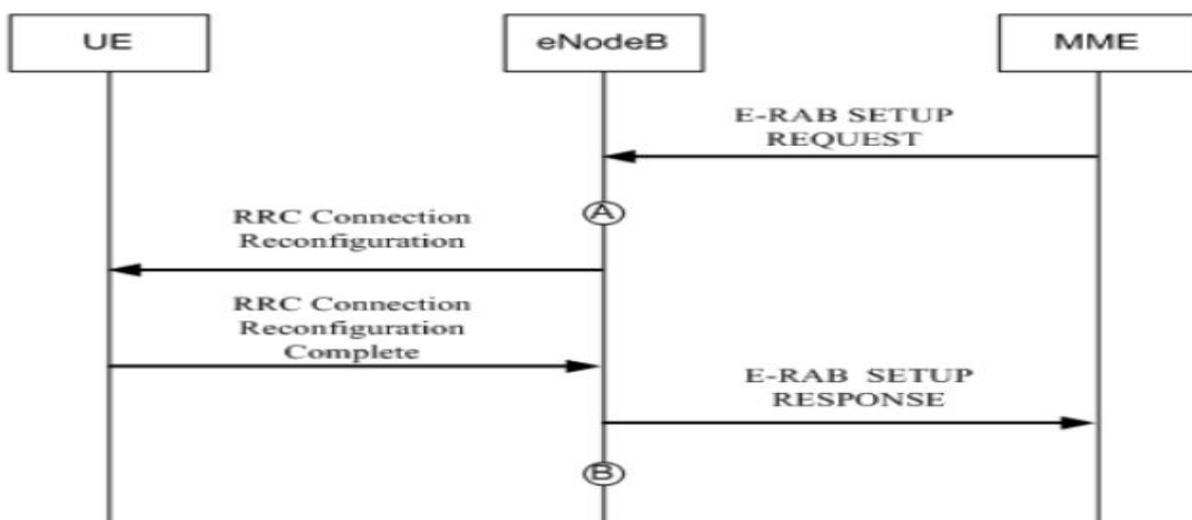


Figure III.4 : Procédure de configuration de l'ERAB

L'équation suivante indique le taux de réussite de l'accessibilité pour les services de l'utilisateur final qui sont fournis par les E-RABs inclus dans la procédure de configuration initiale du contexte utilisateur. Les compteurs sont au niveau de la cellule.

Initial E-RAB Establishment SR [%]=

$$= 100 \times \frac{pmRrcConnEstabSucc}{(pmRrcConnEstabAtt - pmRrcConnEstabAttReatt)} \times \frac{pmS1SigConnEstabSucc}{pmS1SigConnEstabAtt} \times \frac{pmErabEstabSuccInit}{pmErabEstabAttInit}$$

-  pmRrcConnEstabSucc : Nombre total de connexion RRC réussies
-  pmRrcConnEstabAtt : Nombre total de tentatives de connexion RRC
-  pmRrcConnEstabAttReatt : Nombre total de tentatives d'établissement de connexion RRC
-  pmS1SigConnEstabSucc : Nombre total de réussite de connexion de signalisation sur l'interface S1.
-  pmS1SigConnEstabAtt : Nombre total de tentatives de connexion de signalisation sur l'interface S1.
-  pmErabEstabSuccInit : Nombre total de réussite de l'établissement ERAB initial
-  pmErabEstabAttInit : Nombre total de tentatives de l'établissement ERAB initial

III.3.1.3.2. Initial E-RAB Establishment Success Rate per QCI

Ce KPI exprime le taux initial de succès de l'établissement d'ERAB par QCI (Quality Class-Identifiant), c'est-à-dire il décide de l'établissement de l'ERAB selon la valeur du QCI (1 à 9) selon si le débit est garanti ou pas.

L'équation suivante donne le taux de réussite de l'accessibilité des utilisateurs finaux aux services qui sont fournis par les ERABs inclus dans la procédure initiale d'établissement du contexte de l'utilisateur. Pour ce cas les compteurs sont au niveau de la cellule par QCI.

Initial E-RAB Establishment SR, QCI [%]=

$$= 100 \times \frac{pmRrcConnEstabSucc}{(pmRrcConnEstabAtt - pmRrcConnEstabAttReatt)} \times \frac{pmS1SigConnEstabSucc}{pmS1SigConnEstabAtt} \times \frac{pmErabEstabSuccInitQci}{pmErabEstabAttInitQci}$$

- ✚ pmErabEstabSuccInitQci : Réussite de l'établissement d'ERAB initial par QCI.
- ✚ pmErabEstabAttInitQci : Tentatives de l'établissement d'ERAB initial par QCI.

III.3.1.3.3. Added E-RAB Establishment Success Rate

Ce KPI exprime le taux de réussite de l'établissement d'ERAB ajouté. En effet le bearer ajouté est un bearer supplémentaire ajouté au bearer initial pour prendre en charge la qualité de service d'un autre flux de données différent de celui établi initialement. Il est donné comme suit :

$$\text{Added E-RAB Establishment SR [\%]} = 100 \times \frac{\text{pmErabEstabEstabSuccAdded}}{\text{pmErabEstabEstabAttAdded}}$$

- ✚ PmErabEstabEstabSuccAdded : Réussite de l'établissement d'ERAB ajouté
- ✚ PmErabEstabEstabAttAdded : Tentatives de l'établissement d'ERAB ajouté

III.3.1.3.4. Added E-RAB Establishment Success Rate per QCI

Ce KPI exprime le taux de réussite de l'établissement d'ERAB ajouté par QCI.

Son équation est la suivante :

$$\text{Added E-RAB Establishment SR, QCI [\%]} = 100 \times \frac{\text{pmErabEstabEstabSuccAdded}}{\text{pmErabEstabEstabAttAdded}}$$

III.3.2. Retainability (Continuité)

C'est la probabilité qu'un service une fois obtenu continue d'être fourni dans des conditions données pour une durée donnée.

Les KPIs de continuité sont utilisés pour évaluer la capacité du réseau à maintenir les services demandés par un utilisateur, pour une durée souhaité une fois que l'utilisateur est connecté au service. La notion de performance des KPIs de continuité peut être divisée en deux parties :

Le facteur de normalisation et la libération anormale.

III.3.2.1. CALL DROP

La baisse d'appel VoIP survient lorsque la libération de VoIP ERAB n'est pas normale. Chaque ERAB est associé à des informations de QoS. Voici une illustration de deux procédures en cours pour libérer ERAB à savoir: l'indication de libération ERAB et la demande de libération de contexte UE.

Le taux de coupure de service est donné par la formule suivante :

$$\text{Service}_{\text{CDR}} = \frac{\text{ERABAbnormalRelease}}{\text{ERABRelease}} * 100$$

- ✚ ERABAbnormalRelease : Nombre de relâchement anormal d'ERAB.
- ✚ ERABRelease : Nombre de relâchement d'ERAB.

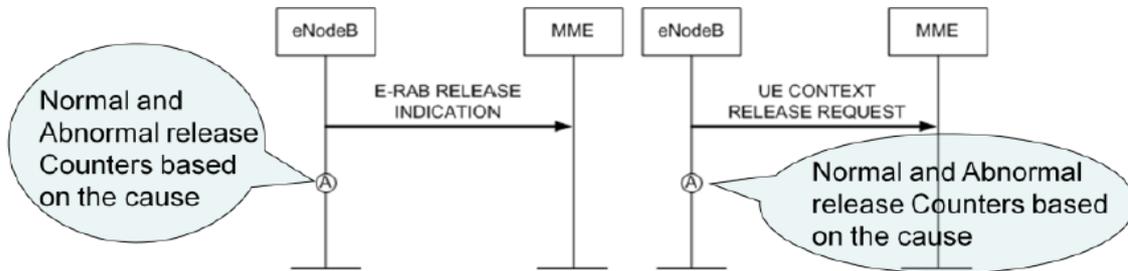


Figure III.5 : Les points de mesure du taux d'appel [17]

III. 3.2.2. E-RAB Retainability - Session Time normalized

Ce KPI exprime le temps de session de rétention normalisé, il mesure l'impact sur l'utilisateur final dans le but de refléter la probabilité de combien de temps un transfert en moyenne peut être conservé sans relâchement anormal. Le taux de rétention d'ERAB en session normalisé est donné par l'équation ci-dessous

$$ERAB\ Retainability = \frac{pmErabRelAbnormalEnbAct + pmErabRelMmebAct}{pmSessionTimeUe}$$

- ✚ **pmErabRelAbnormalEnbAct** : nombre de relâchement anormal d'ERAB initié par l'eNodeB.
- ✚ **pmErabRelMmebAct** : nombre de relâchement d'ERAB initié par le MME.

III.3.2.3. E-RAB Retainability-Percentage

C'est le pourcentage de rétention. Ce KPI mesure l'impact sur l'utilisateur final dans le but de refléter si la probabilité d'établissement d'un ERAB peut être conservée sans relâchement anormale. Il est donné par la formule suivante :

$$ERAB\ Retainability[\%] = 100 \times \frac{pmErabRelAbnormalEnbAct + pmErabRelMmebAct}{pmErabRelAbnormalEnb + pmErabRelNormalEnb + pmErabRelMmeb}$$

III.3.3. Integrity (Intégrité)

Les KPI d'intégrité permettent la mise en évidence de la manière dont le réseau d'accès EUTRAN impacte la qualité de service fournit à l'utilisateur final en d'autres termes, ils sont utilisés pour mesurer le caractère ou l'intégrité du réseau vis à vis de son utilisateur. Pour cela ils

font appellent à trois paramètres principales: la latence, le débit et la perte de paquet. Les KPIs d'intégrité utilisés par Ericsson sont au nombre de 6 à savoir:

III.3.3.1.Latency

C'est le temps nécessaire pour programmer le premier paquet sur l'interface radio, déterminé à partir du moment où il a été reçu au niveau du RBS. La latence de la liaison montante ne peut pas être mesurée en LTE RAN.

III.3.3.1.1.Downlink Latency (Latence de la liaison descendante)

Ce KPI permet de mesurer la latence en liaison descendante. Elle est donnée par la formule suivante.

$$DL\ Latency[ms] = \frac{pmPdcplLatTimeDI}{pmPdcplLatPcktDI}$$

 **pmPdcplLatTimeDI** : latence de la liaison descendante selon le PDCP (Packet Data convergence Protocol).

 **pmPdcplLatPcktDI** : latence des paquets en liaison descendante selon le PDCP

III.3.3.1.2.Downlink Latency per QCI (Latence de liaison descendante par QCI)

Ce KPI mesure la latence en liaison descendante selon la qualité de service QCI. Elle est donnée par la formule suivante.

$$DL\ Latency,\ QCI[ms] = \frac{pmPdcplLatTimeDIQci}{pmPdcplLatPcktDIQci}$$

 **pmPdcplLatTimeDIQci** : latence de la liaison descendante par QCI selon le PDCP (Packet Data convergence Protocol).

 **pmPdcplLatPcktDIQci** : latence des paquets en liaison descendante par QCI selon le PDCP (Packet Data convergence Protocol).

III.3.3.2.Throughput

Throughput est la vitesse à laquelle les paquets peuvent être transférés une fois que le premier paquet a été programmé sur l'interface radio.

III.3.3.2.1.Downlink Throughput (Débit de liaison descendante)

Ce KPI évalue le débit descendant de la cellule lorsqu'il y'a transfert de données en liaison descendante, il reflète la capacité de la cellule. Le débit descendant est donné par l'équation suivante.

$$\begin{aligned}
 \text{DL Throughput[kp]} &= \\
 &= \frac{\text{pmPdcPVolDIDrb} - \text{pmPdcPVolDIDrbLastTTI} - \text{pmPdcPVolDIDrbTransUm}}{\text{pmUeThpTimeDI}/1000}
 \end{aligned}$$

- ✚ **pmPdcPVolDIDrb** : Le débit total des données en liaison descendante au niveau de la couche PDCP.
- ✚ **pmPdcPVolDIDrbLastTTI** : Le débit total des données en liaison descendante dans le dernier intervalle de temps de transmission(TTI) au niveau de la couche PDCP.
- ✚ **pmPdcPVolDIDrbTransUm** : Le volume total de données en liaison descendante dans les DRB transmis par l'UE au niveau de la couche PDCP.
- ✚ **pmUeThpTimeDI** : le temps de transmission du débit de l'UE en liaison descendante.

III.3.3.2.Uplink Throughput (Débit en liaison montante)

Ce KPI évalue le débit montant de la cellule lorsqu'il y'a transfert de données en liaison montante, Il reflète aussi la capacité de la cellule.

$$\text{UL Throughput[kpbs]} = \frac{\text{pmUeThpVolUI}}{\text{pmUeThpTimeUI}/1000}$$

- ✚ **pmUeThpVolUI** : le débit montant de l'UE.
- ✚ **pmUeThpTimeUI** : le temps de transmission de l'UE en liaison montante.

III.3.3.3.Packet Error Loss Rate

Le taux de perte de paquets peut être décomposé en :

- ↳ Taux de perte de paquets liées à la congestion (par exemple : les paquets qui sont supprimés en raison de la fonctionnalité de gestion de la file d'attente active).
- ↳ Taux de perte de paquets non liées à la congestion (ce sont des paquets qui sont perdus lors de la transmission, par exemple rejetés par un récepteur de couche de liaison en raison d'une défaillance du CRC).

III.3.3.3.1. Downlink Packet Error Loss Rate (*Taux de perte de paquets erronés en DL*)

Les compteurs sont tous au niveau de la cellule, sauf pmPdcPpktDiscDIeth qui est au niveau du RBS.

Le taux de perte d'erreur de paquet DL pour l'UE est donné par l'équation suivante.

$$\begin{aligned}
 \text{DL Packet Error Loss Rate, cell}[\%] &= \\
 &= \frac{\text{pmPdcPpktDiscDIPelr} + \text{pmPdcPpktDiscDIPelrUu} + \text{pmPdcPpktDiscDIHo} + A}{\text{pmPdcPpktReceivedDI} + \text{pmPdcPpktFwdDI} + A}
 \end{aligned}$$

$$A = \text{pmPdcPpktDiscDIeth} * \frac{\text{pmPdcPpktReceivedDI}}{\sum \text{pmPdcPpktReceivedDI}}$$

- ✚ **pmPdcPpktDiscDIelr** : le nombre de paquet découvert en liaison descendante selon le PDCP.
- ✚ **pmPdcPpktDiscDIelrUu** : le nombre de paquet découvert en liaison descendante sur l'interface Uu selon le PDCP.
- ✚ **pmPdcPpktDiscDIHo** : le nombre de paquet découvert en liaison descendante lors du handover selon le PDCP.
- ✚ **pmPdcPpktReceivedDI** : Le nombre de paquet reçu en liaison descendante selon le PDCP.
- ✚ **pmPdcPpktFwdDI** : Le nombre de paquet délivré en liaison descendante selon le PDCP.

III.3.3.3.2.Uplink Packet Loss Rate (Taux de perte de paquets en liaison montante)

$$\text{UL Packet Loss Rate [\%]} = 100 * \frac{\text{pmPdcPpktLostUI}}{\text{pmPdcPpktLostUI} + \text{pmPdcPpktReceivedUI}}$$

- ✚ **pmPdcPpktLostUI** : le nombre total de paquet perdu en liaison montante au niveau de la couche PDCP.
- ✚ **pmPdcPpktReceivedUI** : le nombre total de paquet reçu en liaison montante au niveau de la couche PDCP.

III.3.4.Mobility (mobilité)

Les KPIs de mobilité sont utilisés pour mesurer la performance du réseau à pouvoir gérer le mouvement des utilisateurs tout en conservant le service pour l'utilisateur, comme le transfert (handover).

Ces KPIs sont définis sur la base des différents types de handover (intra-fréquence, inter- fréquence, inter- Radio Access Technology : RAT).

III.3.4.1.Mobility Success Rate

Le taux de réussite de la mobilité comprend à la fois la préparation des ressources de la cellule cible et le passage de la cellule source à la cellule cible, comme indiqué par l'équation suivante. Les compteurs sont au niveau du EUTRANCellRelation ou UTRANCellRelationlevel.

Mobility Success Rate [%] =

= 100

$$\times \left(\frac{pmHoPrepSuccLteIntraF + pmHoPrepSuccLteInterF + pmHoPrepSuccWcdma}{pmHoPrepAttLteIntraF + pmHoPrepAttLteInterF + pmHoPrepAttWcdma} \right)$$

$$\times \left(\frac{pmHoExeSuccLteIntraF + pmHoExeSuccLteInterF + pmHoExeSuccWcdma}{pmHoExeSuccAttIntraF + pmHoExeSuccAttInterF + pmHoExeAttWcdma} \right)$$

-  **pmHoPrepSuccLteIntraF:** Le nombre total de handover intra fréquences réussis selon la préparation des ressources dans le LTE.
-  **pmHoPrepSuccLteInterF:** Le nombre total de handover inter fréquences réussis selon la préparation des ressources dans le LTE.
-  **pmHoPrepSuccWcdma:** Le nombre total de handover réussi vers le Wcdma selon la préparation des ressources.
-  **pmHoPrepAttLteIntraF:** Le nombre total de tentative de handover intra fréquence selon la préparation des ressources
-  **pmHoPrepAttLteInterF:** Le nombre total de tentative de handover inter fréquence selon la préparation des ressources
-  **pmHoPrepAttWcdma :** Le nombre total de tentative de handover vers le Wcdma selon la préparation des ressources.
-  **pmHoExeSuccLteIntraF:** Le nombre total de handover intra fréquence exécuté avec succès dans un réseau LTE.
-  **pmHoExeSuccWcdma:** Le nombre total de handover intra fréquence exécuté avec succès vers le Wcdma
-  **pmHoExeAttLteIntraF:** Le nombre total de tentatives d'exécution de handover intra fréquence dans un réseau LTE.
-  **pmHoExeAttLteInterF:** Le nombre total de tentatives d'exécution de handover inter fréquence dans un réseau LTE.
-  **pmHoExeAttWcdma:** Le nombre total de tentatives d'exécution de handover vers un réseau Wcdma.

III.3.5. Availability (Disponibilité)

La disponibilité est le pourcentage de temps pendant lequel une cellule est disponible. Une cellule est disponible lorsque l'eNodeB peut fournir des services support. La disponibilité peut être mesurée au niveau de la cellule pour une variété de défauts matériels/logiciels.

Ce KPI fournit le pourcentage de temps de disponibilité d'une cellule afin d'évaluer la dégradation de la performance du réseau causée par les cellules indisponibles dans les heures de pointes sur le réseau [18].

III.3.5.1 Partial Cell Availability (node restarts excluded)

Ce KPI exprime la disponibilité partielle des cellules (redémarrage du nœud exclu). La durée en seconde pendant laquelle une cellule est disponible pour le service est définie comme la disponibilité des cellules. La disponibilité des cellules pour un groupe de L nombre de cellules pendant N période de rapport peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\begin{aligned} \text{Cell Availability} &= \\ &= 100 \\ &\times \frac{N \times L \times 900 - \sum(\text{pmCellDowntimeAuto} + \text{pmCellDowntimeMan})}{N \times L \times 900} \end{aligned}$$

- ✚ **pmCellDowntimeAuto** : le temps d'indisponibilité de la cellule vu que le système la considéré désactivé.
- ✚ **pmCellDowntimeMan** : le temps d'indisponibilité de la cellule car elle a été verrouillée manuellement.

III. 4. Conclusion

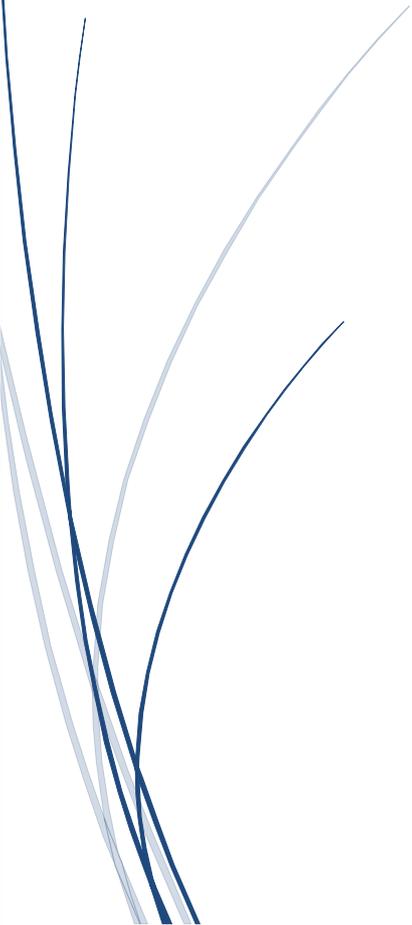
Dans ce chapitre nous avons évoqué la notion de KPI (définition, but), en particulier on a abordé les KPIs utilisés par l'équipementier Sony Ericsson.

En effet l'étude de ces indicateurs de performance nous a permis d'acquérir des connaissances sur la gestion de la QoS, mais aussi et surtout comment les KPIs influent sur le fonctionnement du réseau.

Le chapitre 4 fera l'objet de l'étude des données issues de ces KPIs.



Chapitre IV. Analyse de KPI et Optimisation réseau



IV.1. Introduction

L'évaluation de la qualité de service dans les réseaux mobile passe à travers l'analyse et l'interprétation des données issues des indicateurs de performance KPI. En effet, l'objectif des opérateurs est de repérer toutes les anomalies qui apparaissent sur le réseau et faire en sorte de répondre de manière satisfaisante aux besoins de la clientèle.

Ce chapitre portera sur l'analyse et l'interprétation des statistiques KPI recueillies auprès des services de télécommunication AT Mobilis de Bejaïa.

IV.2. Analyse de statistiques KPI et Optimisation réseau

L'étude de ces statistiques issues des KPIs (accessibilité, mobilité, intégrité, rétention) portera sur 11 sites de Bejaïa sélectionnés sur le réseau 4G/LTE d'AT Mobilis (06202L, 06210L, 06665L, 06664L, 06204L, 06667L, 06601L, 06211L, 06205L, 06206L, 06209L). Ces statistiques portent sur une durée deux mois de l'année en cours (1/4/18-23/5/18).

IV.2.1. Accessibilité

L'accessibilité au réseau est la possibilité pour un utilisateur de disposer des ressources (accès) du réseau à tout moment. Cette aptitude est régie par trois indicateurs KPI différents : le RRC, l'ERAB et le S1SIG. Les figures suivantes illustrent l'accessibilité au réseau pour les sites (06202L, 06210L, 06665L).

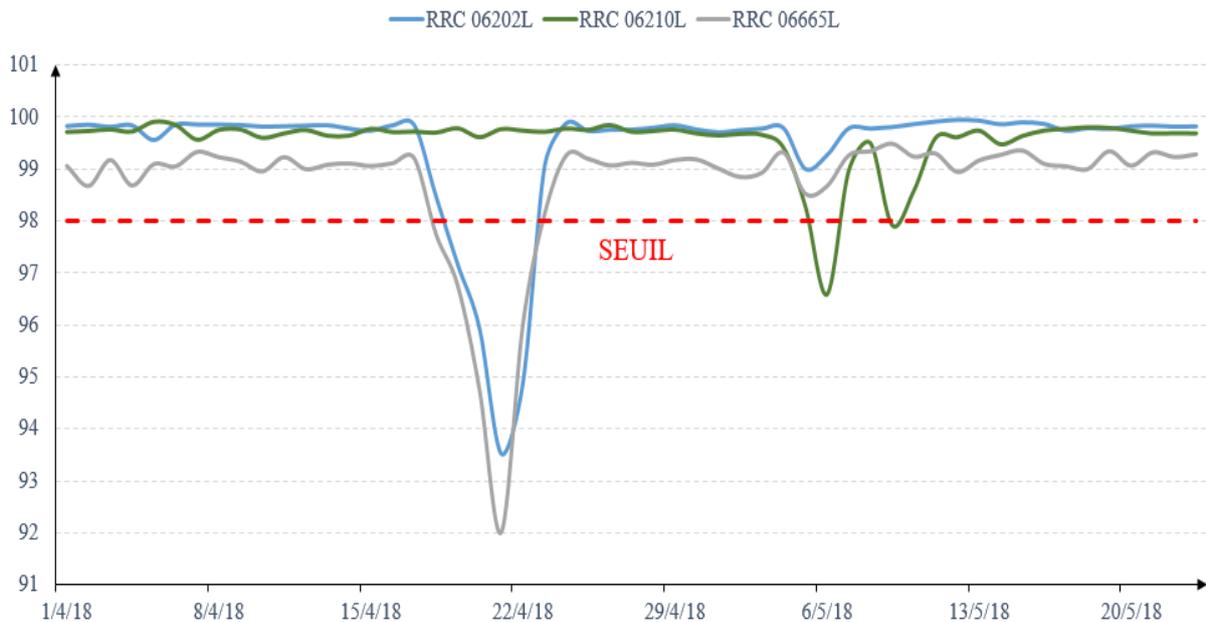


Figure IV.1 : Taux de succès d'établissement RRC.

La figure ci-dessus représente le taux de succès d'établissement d'une connexion RRC pour les 3 sites mentionnés. Le seuil pour ce KPI étant fixé à 98%, on remarque des dégradations importantes au niveau des sites (06202L, 06665L) et des dégradations mineures sur le site 06210L.

Les principaux problèmes liés à l'échec d'établissement d'une connexion RRC sont: le rejet de la connexion RRC et l'échec de l'installation RRC en raison de l'absence de réponse. Ces derniers peuvent avoir pour causes:

Cause 1 : Une mauvaise couverture

En effet lorsque les conditions radio sont médiocres ceci peut entrainer un blocage lors des phases d'établissement de la connexion RRC.

Cause 2 : la congestion

La signalisation RRC demande un certain temps de traitement par l'UE et est consommatrice de ressources radio or dans une situation de congestion ce temps de traitement peut s'avérer être plus long et conduire à une indisponibilité des ressources.

Cause 3 : Problème de configuration (des utilisateurs qui ne sont pas compatibles avec la configuration du réseau).

Nous proposons les solutions suivantes:

- ✓ Solution 1 : On peut soit augmenter la puissance de l'eNodeB ou ajuster les paramètres de l'antenne (Tilt et Azimut).
- ✓ Solution 2 : Augmenter le délai d'attente du temporisateur (T300).
- ✓ Solution 3 : Ce genre de problème est résolu généralement en changeant de terminal.

Sur la figure IV.2 ci-après, nous constatons des échecs de signalisation assez critiques dépassant le seuil par endroit pour les 3 sites. Le seuil pour ce KPI étant fixé à 98%.

Ce KPI supporte entre autre la signalisation du plan de contrôle entre l'eNodeB et le MME, la mise à jour des informations de configuration de l'eNodeB et du MME.

Des dégradations au niveau de ce KPI peuvent entrainer : une relâche des différentes connexions, des échecs handover, des pertes de qualité de service.

Les solutions que nous proposons sont les mêmes que celles citées précédemment.

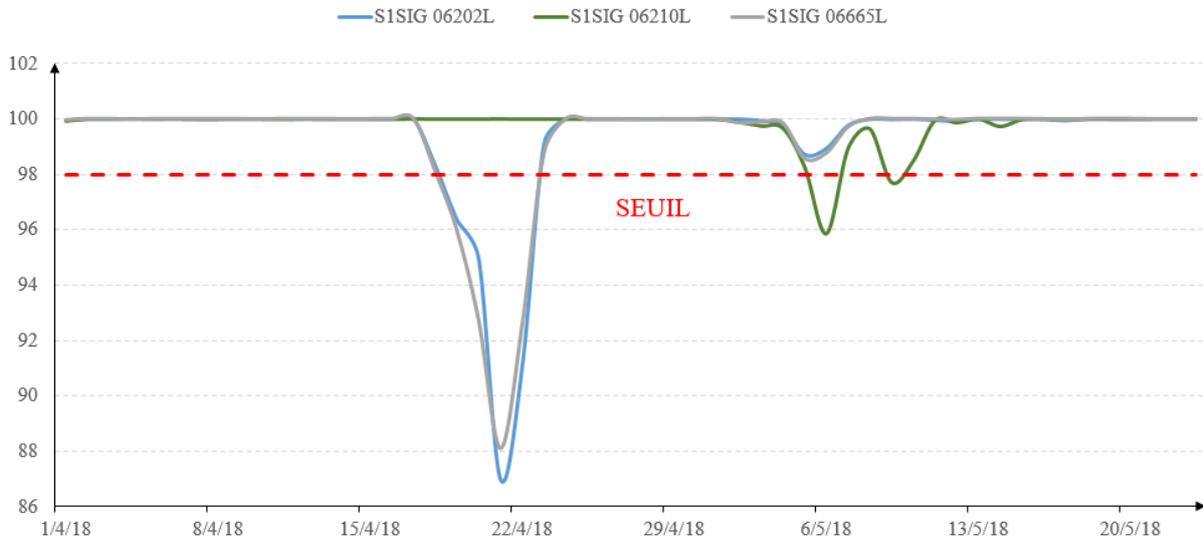


Figure IV.2 : Taux de succès de signalisation S1.

La figure IV.3 ci-dessous présente un taux de succès d'établissement ERAB élevé pour les 3 sites (au-dessus du seuil 97%) malgré quelques légères irrégularités. Cependant les anomalies que l'on peut rencontrer sont les suivantes :

- échecs de la liaison radio lors de la phase de l'établissement (événement de désynchronisation et expiration du temporisateur),
- expiration du délai de transmission RLC.

Pour remédier à ces problèmes cités ci-dessus nous proposons : d'augmenter la durée du temporisateur.

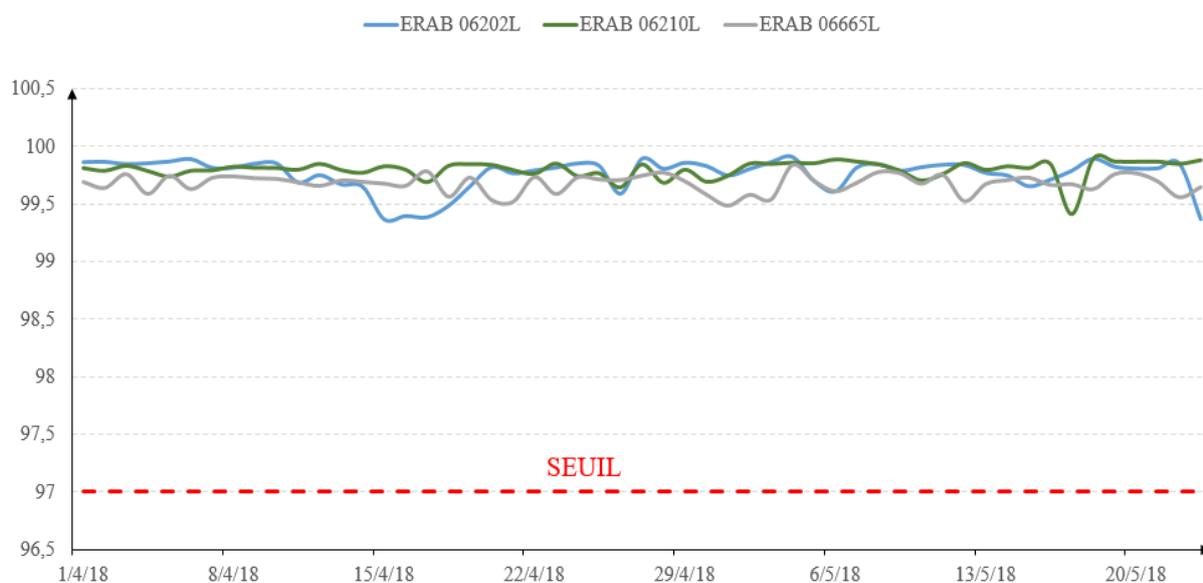


Figure IV.3 : Taux de succès d'établissement ERAB.

IV.2.2. Continuité

La figure IV.4 illustre l'évolution du taux de coupures de support ERAB sur les sites (06204L, 06664L, 06667L). Pour rappel, un E-RAB est le support de la couche d'accès pour transporter les données de service des utilisateurs.

Le taux de réussite de la configuration E-RAB dans une cellule représente directement la capacité de la cellule à fournir des configurations de connexion E-RAB pour les utilisateurs.

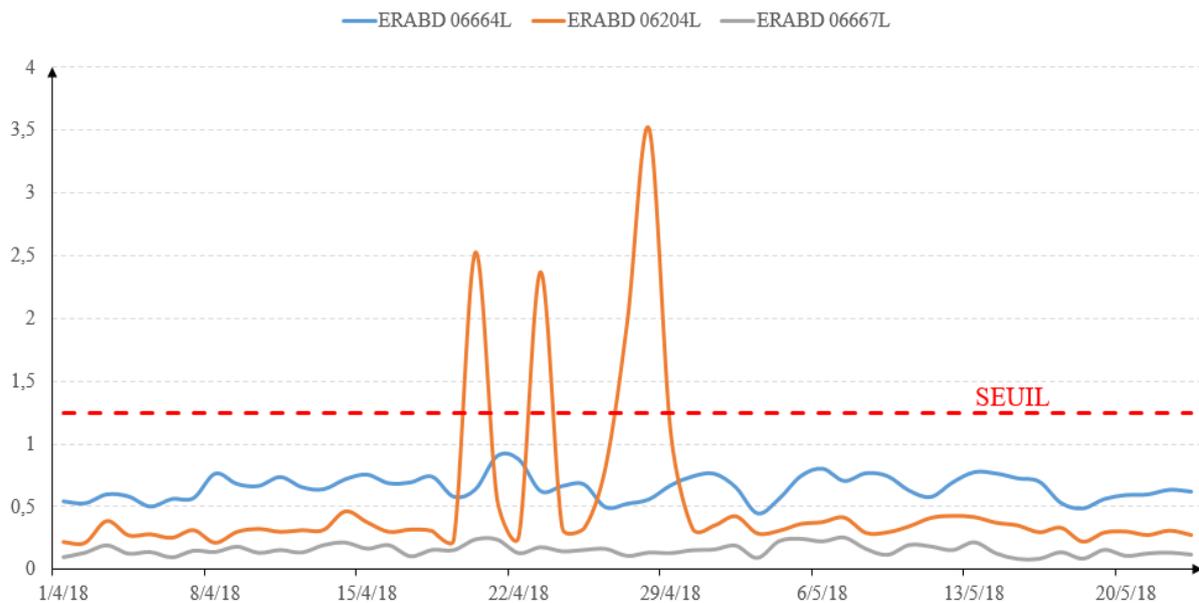


Figure IV.4 : Taux de coupure de support E-RAB.

On remarque sur les sites (06664L, 06667L) que le taux de coupure est acceptable ; en effet le taux est en dessous du seuil (1.25%) cependant il est assez élevé sur le site 06204L du 19 au 29/04/2018.

Ces irrégularités peuvent être dues à plusieurs causes notamment :

- Cause 1 : l'indisponibilité de débits plus importants demandés par les services.
- Cause 2 : la congestion sur le réseau

Ce problème survient en général quand il n'y a pas de ressources disponibles pour l'utilisateur.

- Cause 3 : la mauvaise couverture

Dans ce cas, la coupure se produit dans les régions où le niveau du signal atteint des valeurs critiques, ou ne parviens pas à une bonne connexion.

☑ Cause 4 : les interférences

Ce problème est généralement détecté dans les zones où l'on a un bon niveau de signal mais une mauvaise qualité. Cette dégradation de qualité peut être due aux interférences causées par la présence d'autres signaux reçus avec un bon niveau de signal provenant de plusieurs cellules, ce qui provoque un relâchement d'ERAB.

Les solutions que suggérons pour ces problèmes sont :

- ✓ Solutions 1 et 2 : on peut soit faire un down tilt (angle d'inclinaison de l'antenne vers le bas) pour diminuer la zone de couverture ; soit diversifier la fréquence.
- ✓ Solution 3 : l'ajustement des paramètres de la cellule servante au niveau Azimut, Tilt (pour plus de détails voir annexe B) ; l'ajout d'un nouveau site ou l'augmentation de la puissance au niveau de l'eNodeB.
- ✓ Solution 4 : Augmenter la bande passante ou procéder à un réajustement au niveau des sites voisins, d'opérer une mise à jour des tilts des antennes qui causent des interférences.

IV.2.3. Intégrité

Les figures ci-dessous illustrent la dégradation des KPIs d'intégrité (débit utilisateur) dans le sens montant et le sens descendant sur les sites (06206L, 06209L, 06211L). Les problèmes de débit se traduisent en général par des coupures, des lenteurs dans les transmissions de données.

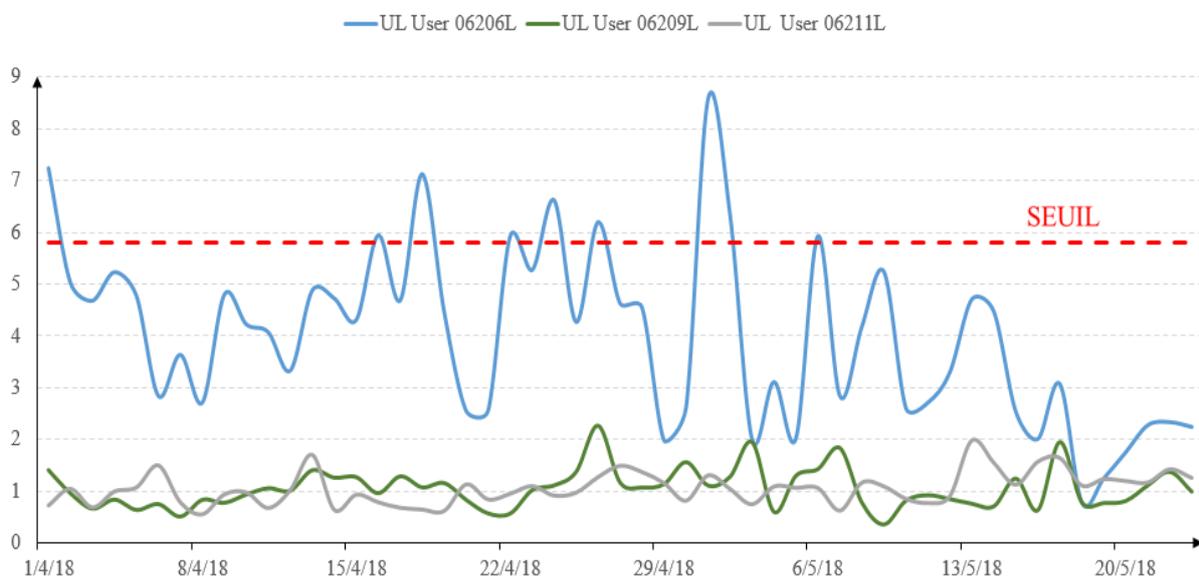


Figure IV.5 : Débit utilisateur en Uplink.

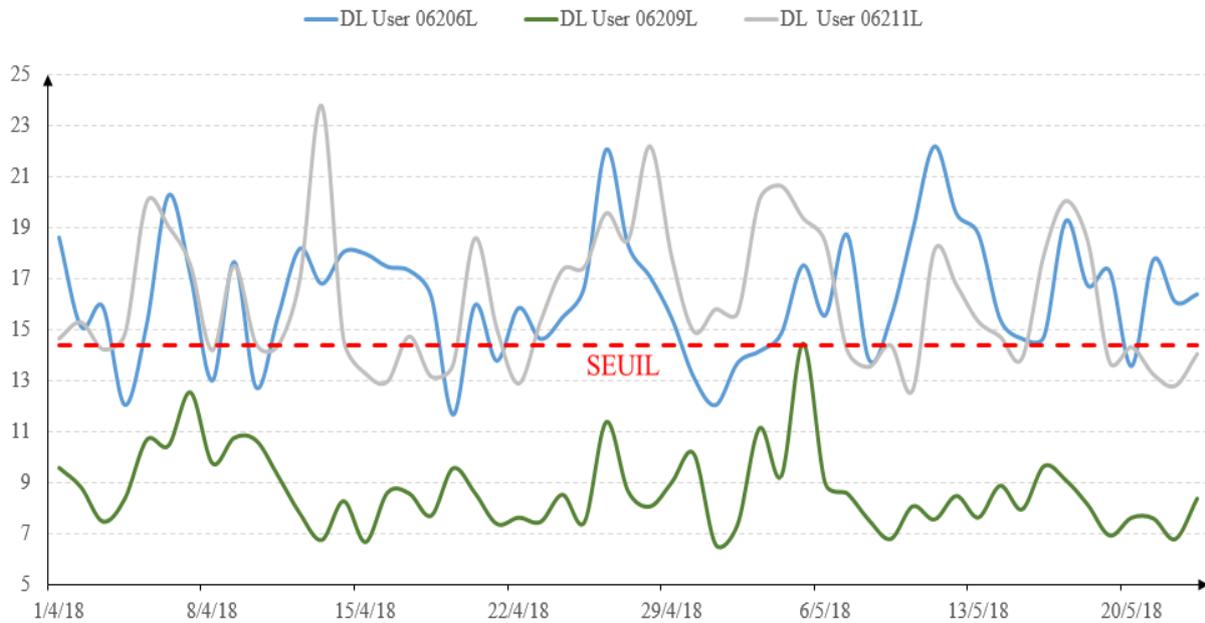


Figure IV.6: Débit utilisateur en Downlink.

On constate de faibles débits (en dessous du seuil 5,4Mps en uplink et 14Mbps en downlink) dans les deux cas de figure.

Cette baisse de débit s'explique par :

- Cause 1 : des soucis de couverture,
- Cause 2 : des interférences inter sites.
- Cause 3 : surcharge au niveau de la cellule concernée (congestion).

Pour remédier à ces problèmes, nous proposons :

- ✓ Solution 1 : augmenter la puissance dans l'eNodeB, étendre ou réduire la zone de couverture.
- ✓ Solution 2 : modifier les paramètres des canaux physiques (PDCCH, PDSCH).
- ✓ Solution 3 : forcer les utilisateurs à se connecter à une cellule libre, en diminuant la puissance d'émission RS de la cellule congestionnée.

IV.2.4. Mobilité

Les KPIs de mobilité permettent d'assurer la continuité des services lorsque l'utilisateur est en cours de déplacement. Ces KPIs sont définis sur la base des différents types de handover dans le LTE qui sont : intra-fréquence, inter- fréquence, inter-Radio Access Technology (IRAT).

Notre étude portera uniquement sur le cas handover intra fréquence. La figure suivante présente le taux de réussite du handover intra-fréquence sur les sites (06601L, 06205L, 06211L).

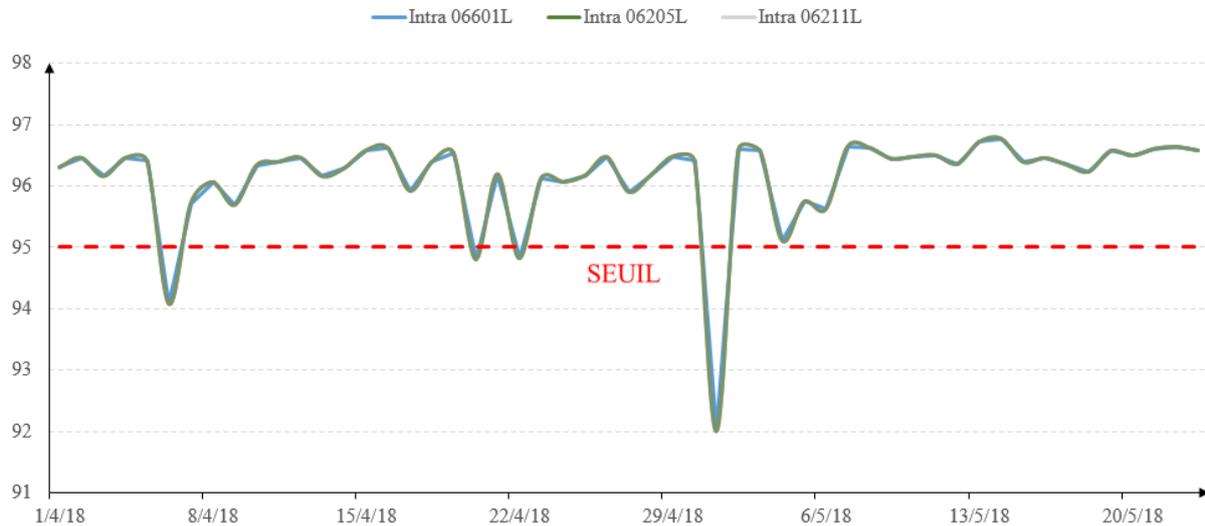


Figure IV.7: Taux réussite handover intra fréquence.

Nous remarquons que l'évolution du taux de réussite est la même sur les trois sites. Les trois courbes sont confondues; elles présentent également les mêmes anomalies. Nous remarquons une dégradation de trois jours (entre le 04 et 07-04-2018), une légère dégradation entre le (19 et 21-04-2018 et entre le 22 et le 23) puis une autre dégradation importante (le taux est descendu jusqu'à 92%, le seuil étant estimé à 95%) du 29-04-2018 au 01-05-2018. Le taux est irrégulier le long de toute la période des deux mois.

Ces irrégularités s'expliquent par une multitude de causes telles que :

- Cause 1 : Problème matériel.
- Cause 2 : Problème de Congestion.
- Cause 3 : Problème d'interférences dans le réseau.
- Cause 4 : Un RLF (Radio Link Failure).

Les solutions que nous préconisons sont les suivantes :

- ✓ Solution 1 : Vérifier ou faire constamment des ajustements au niveau du matériel.
- ✓ Solution 2 : Dégager la cellule congestionnée ou dévier le handover vers un autre système (UMTS ou GSM).
- ✓ Solution 3 : Elaborer un nouveau plan de fréquence.
- ✓ Solution 4 : Rajouter de nouveaux sites, ou augmenter la puissance de l'eNodeB.

IV.3. Conclusion

Dans ce chapitre il a été question d'une part d'analyse de statistiques KPI qui ont été mises à notre disposition par les services d'AT Mobilis dans la ville de Béjaia et d'autre part de proposer des solutions (dans le cadre de l'optimisation) aux problèmes rencontrés au cours de notre analyse.

La prise en charge des requêtes des utilisateurs et la correction des anomalies sur le réseau (dans des délais raisonnables) sont des processus incontournables et vitaux pour les réseaux de mobiles pour la satisfaction de leurs abonnés et leur maintien sur le marché de la concurrence.

Conclusion générale



Afin de faire face à la concurrence et de satisfaire aux exigences de leurs clients ainsi que des autorités de régulations nationales, les opérateurs de téléphonie mobile se doivent de contrôler en permanence, la qualité de leurs services. Cette tâche importante dans le processus global de conduite d'un réseau de télécommunications nécessite une connaissance approfondie du fonctionnement et de la constitution du réseau. C'est dans cette optique que nous avons choisi d'aborder la thématique de qualité de service (QoS) dans un réseau 4G/LTE.

Après un bref rappel des caractéristiques des générations antérieures des technologies radio-mobiles, nous avons décrit les composantes d'un réseau 4G/LTE, expliqué ses spécificités techniques et introduit ensuite les mécanismes de gestion de la QoS sous un tel réseau. Pour quantifier cette QoS, nous avons défini divers indicateurs de performance utilisés par l'équipementier Ericsson. Des statistiques recueillis chez l'opérateur AT Mobilis nous ont permis d'estimer la qualité des services fournis, à travers l'évolution de certains paramètres. L'analyse des résultats obtenus permet de détecter d'éventuelles anomalies ou dysfonctionnement sur le réseau qu'il faut bien évidemment corriger pour une utilisation plus optimale du réseau.

Ce projet nous a permis entre autres d'approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux mobiles en général et de la 4G/LTE en particulier. A travers l'évaluation et l'analyse de la QoS, nous cernons beaucoup mieux maintenant les diverses tâches quotidiennes et les défis techniques auxquels sont confrontés les équipes de conduite et d'optimisation des réseaux des opérateurs de télécommunications.



Bibliographie

- [1] Y.Bouguen, E.Hardouin, F-X. Wolf, <<LTE et les réseaux 4G>>, Paris : Groupe Eyrolles 2012.
- [2]. A.AMAZIT. <<Impact des interférences de la couche physique sur la couche mac dans la technologie LTE>>, Ingéniorat, Université du Québec, Juin 2011
- [3] <http://www.efort.com>. 2009, site d'études et formations en Télécommunications Service et Réseaux de Télécommunication.
- [4] G.SEIDE, <<Planification d'un réseau de quatrième génération à partir d'un réseau de troisième génération>>, Université de Montréal, 2011.
- [5] T.AMAM, L.Lydia, <<Optimisation radio du réseau 4G-LTE>>, mémoire, Master2 Telecom, Université A. Bejaïa, Juin 2017.
- [6] Z.BOUADJAMA, A.LAIB, <<Contrôle et suivi de la QoS des réseaux 4G LTE>>, Master2 Telecom, Université A. Bejaïa, Juin 2017.
- [7] H.BOUCHEMTOUF, R.BOUDGHENE STAMBOULI, << Etudes Des Performances Des Réseaux 4G (LTE)>>, Master en Télécommunication Option : Réseaux Mobiles et Services (RMS), Université A.B.Belkaid, juin 2013.
- [8] M.BOUKENNA, << Allocation dynamique des sous porteuses multi-utilisateurs dans un système 4G>>, Mémoire Pour obtention du Diplôme de MAGISTER, Option : communication, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SETIF1 UFAS (ALGERIE)
- [9] D.KOHKOH, << Système 4G : Étude et simulation de l'interface radio LTE-Advanced dans un environnement monocellulaire et multicellulaires>>, Ben Abdellah Faculté Des Sciences et Techniques Fès, Systèmes Microélectroniques Université Sidi Mohammed de Télécommunications et de l'Informatique Industrielle, 21 Juin 2013.
- [10] <https://fr.slideshare.net/miyamiya/lte-presentation-french>.
- [11] D.ASHTARI, G.LUIS, Projet, <<Mise en œuvre des deux approches standard : DiffServ et IntServ/RSVP et validation par la transmission de trafic Triple-Play entre les deux entreprises>>, Master Informatique, UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, UE PRES, FOURMAUX OLIVIER ,2006-2007.
- [12] <https://www.telecomhall.com/what-is-rf-drive-test-testing-.aspx>

- [13] Bectechnologies, <<Quality of Service(QoS) in LTE>>.
- [14] Ericsson, <<Key Performance Indicators>>, 37/1553-HSC 105 50/1 Uen G ,2011-09-12
- [15] Ericsson <<LTE Accessibility>>, Ericsson Internal, 2011-07-10 ,32 pages
- [16] Phillipe Martins, Marceau Coupechoux ;<<Vers Les Systèmes Radio mobiles 4^e Génération : de L'UMTS Au Lte>> ; 3 Mars 2011.
- [17] D. Schehrazed, T.Chafia, Mémoire de Master, << Contribution à l'optimisation d'un réseau LTE : Adaptation du HANDOVER >>, Master en Génie Electrique Option : signal et communication, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Juin 2017.
- [18] Abd.Yehia, SlideShare, <<huawei-lte-kpi-ref>>,2012-03-30

ANNEXES



A.1.Le TILT

Le tilt est l'angle d'inclinaison de l'antenne vers le haut et vers le bas. Il est donc utilisé pour diriger le faisceau de l'antenne ; lorsqu'il est dirigé vers le bas on l'appelle (Down Tilt ou Tilt Négatif) et lorsqu'il est dirigé vers le haut on le nomme (Up Tilt ou Tilt Positif).

L'inclinaison peut se faire de deux façons souvent complémentaires : tilt mécanique réalisé par une inclinaison de l'antenne (vers le haut ou vers le bas), et tilt électrique, réalisé par légère modification des caractéristiques électriques de l'antenne.

La valeur du tilt est comprise entre 0 et 10°.

A.2.L'AZIMUT

L'azimut est la direction principale d'émission d'une antenne ; exprimé en degrés l'azimut est compté positivement dans le sens horaire, en partant du nord (l'azimut 0°). L'azimut est donc l'orientation de l'antenne par rapport au nord et sa valeur est comprise entre (0 et 36°) nécessaire pour vérifier qu'une communication se déroule normalement. La figure ci-dessous illustre l'ajustement du tilt et de l'azimut.

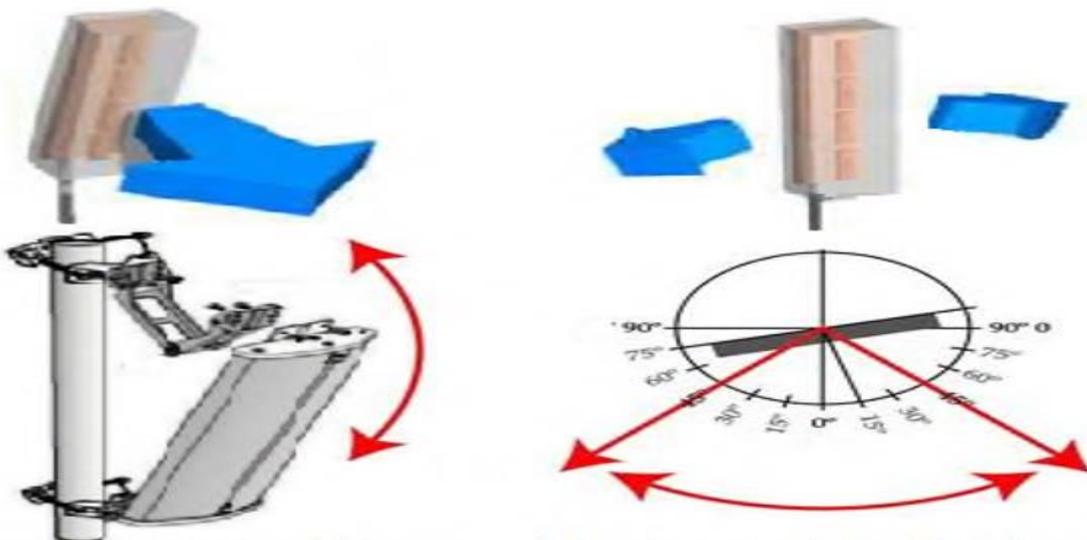


Figure A.1 : Comparaison entre l'ajustement du tilt et de l'azimut.