

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة سعيدة د. مولاي الطاهر
كلية التكنولوجيا
قسم: الإعلام الآلي

Mémoire de Master

Spécialité : Réseaux Informatiques et Systèmes

Thème

Etude et analyse de la qualité de service dans
les réseaux cellulaires 4G LTE

Présenté par :

Derkaoui tayeb yacer

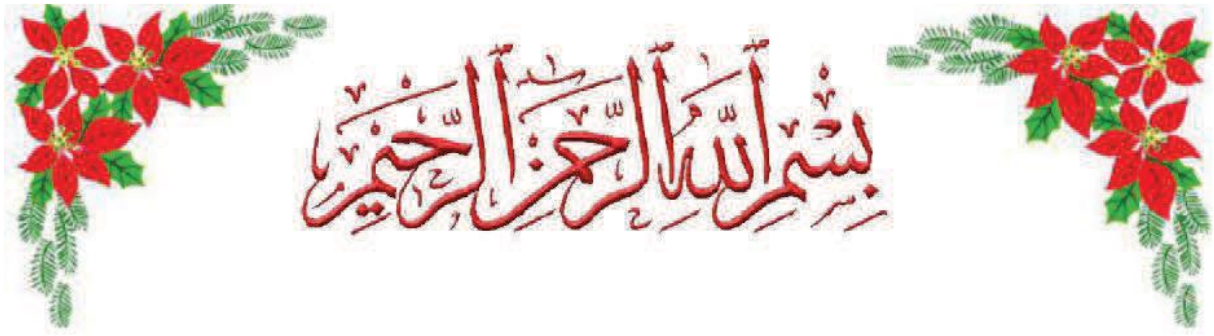
Khatir mohamed moubine

Dirigé par :

Dr A.Houacine



Année universitaire 2022-2023



REMERCIEMENT

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

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

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

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

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



DÉDICACE

Ce mémoire est dédié à

*Nos parents,
Nos familles,
Nos ami(e)s,
Tous ceux qui nous aiment et qu'on aime.*

Derkaoui tayeb yacer & Khatir mohamed moubine

ملخص

ملخص باللغة العربية

في السنوات الأخيرة شهدت شبكات الهاتف المحمول واللاسلكية نموًا غير مسبوق. من ناحية أخرى، تم نشر عدة أجيال متتالية من شبكات الاتصالات، مكرسة بشكل رئيسي للمهاتفة (G2)، ثم أكثر توجهاً نحو الوسائط المتعددة (G3). من ناحية أخرى، تحقق شبكات (G4) اللاسلكية زيادة حقيقية في الإنتاجية وتتيح إمكانية التشغيل البيئي مع الشبكات الأخرى.

في هذا العمل درسنا جودة الخدمة في شبكة خلوية 4G LTE في ظل سيناريوهات مختلفة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة تحت محاكي شبكة NS3 تأثير مسافة المستخدمين (UEs) من الهوائيات (EnbNode) والأشياء المحيطة على QoS مع مؤشراتها وهي: SINR (نسبة الإشارة إلى التداخل بالإضافة إلى الضوضاء)، CQI (مؤشر جودة القناة) و (TB كتلة النقل)، بالإضافة إلى التعرف على أهمية handover في جودة الخدمة.

Abstract

Your summary in English

In recent years, mobile and wireless networks have experienced unprecedented growth. On the one hand, successive generations of telecommunication networks were introduced, mainly for telephony (2G), but then more multimedia-oriented (3G). 4G radio networks, on the other hand, brought real increases in data throughput and enabled interoperability with other networks.

In this work, we study QoS in 4G LTE cellular networks under different scenarios. The simulation results under the NS3 network simulator show the impact of the distance between the user (UE) and the antenna (EnbNode) and surrounding objects on QoS, and the indicators are: SINR (signal-to-interference-plus). Noise ratio), CQI (Channel Quality Indicator) and TB (Transport Block), In addition to recognizing the importance of handover in quality of service.

Résumé

Votre résumé en français

Ces dernières années, les réseaux mobiles et sans fil ont connu une croissance sans précédent. D'autre part, des générations successives de réseaux de communication ont été introduites, principalement la téléphonie (2G), mais ensuite plus orientée multimédia (3G). D'autre part, les réseaux radio 4G ont apporté de réelles augmentations du débit de données et permis l'interopérabilité avec d'autres réseaux.

Dans ce travail, nous étudions la QoS dans les réseaux cellulaires 4G LTE sous différents scénarios. Les résultats de la simulation dans le cadre du simulateur de réseau NS3 montrent l'effet de la distance entre l'utilisateur (UE), l'antenne (EnbNode) et les objets environnants sur la QoS, et les indicateurs sont : SINR (Signal Overlapping). rapport de bruit), CQI (Channel Quality Index) et TB (Transport Mass). En plus d'apprendre l'importance de Hanovre dans la qualité du service.

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Introduction aux réseaux cellulaires

I.1 Introduction.....	3
I.2 Réseaux Cellulaires	3
I.2.1 Définition de réseau cellulaire.....	3
I.2.2 La cellule	3
I.2.3 Déploiement des réseaux cellulaires	3
I.2.3.1 Macro cellule omnidirectionnelle.....	4
I.2.3.2 Macro cellule bi-sectorisée.....	4
I.2.3.3 Macro cellule tri-sectorisée.....	4
I.2.4 Classification des cellules.....	4
I.2.5 Réutilisation des fréquences	6
I.3 Evolution des réseaux cellulaires	7
I.3.1 La première génération des téléphonie mobile (1G).....	7
I.3.2 La deuxième génération des téléphonie mobile (2G)	8
I.3.2.1 GSM(2G)	8
I.3.2.1.1 Architecture du réseau GSM.....	8
I.3.2.1.1.1 Le BSS (Base Station SubSystem).....	9
Deux entités physiques composent cette station :.....	9
I.3.2.1.1.2 Le NSS (Network SubSystem).....	12
I.3.2.1.1.3 L'OSS (Opération Support Subsystem)	13
I.3.2.2 GPRS (2.5G).....	14
I.3.2.2.1 Le SGSN (Serving GPRS Support Node).....	14
I.3.2.2.2 Le GGSN (Gateway GPRS Support Node).....	15
I.3.2.2.3 Le BG (Border Gateway).....	15
I.3.2.2.4 Les équipements GSM utilisés :	15
I.3.2.2.5 Le type de transmission dans le réseau GPRS.....	16
I.3.2.2.6 La gestion d'itinérance	16
I.3.2.3 EDGE.....	16
I.3.3 La troisième génération des téléphonies mobile (3G).....	17
I.3.3.1 UMTS (3G).....	17

I.3.1.1 Architecture du réseau UMTS	17
I.3.1.2 Le mode de transmission dans le réseau UMTS	18
I.3.2 HSDPA (3.5G)	19
II.3.3 HSUPA (3.75G).....	19
I.3.4 La Quatrième Génération (4G LTE)	19
I.3.4.1 Historique sur la 4G	20
I.3.5 La cinquième génération des téléphonies mobile (5G)	21
I.4 Conclusion	21

Chapitre II : Etude détaillées réseau 4G

II.1 Introduction	23
II.2 LTE (4G).....	24
II.3 Buts de la 4G.....	25
II.4 Architecture du réseau 4G LTE	25
II.4.1 Equipement Utilisateur (UE).....	25
II.4.2 Réseau d'accès E-UTRAN	26
II.4.3 Réseau coeur EPC (<i>Evolved Packet Core</i>)	28
II.5 Architecture en couches.....	30
II.5.1 Les protocoles de l'interface Radio.....	30
II.6 Les caractéristiques fondamentales de la 4G	32
II.6.1 Débits et fréquences du réseau 4G	32
II.6.2 Latence.....	33
II.6.3 L'agilité en fréquence.....	34
II.6.4 Codage et sécurité.....	34
II.6.5 Multiplexage.....	34
II.6.6 La Mobilité	37
II.6.6.1 Le Handover	37
II.6.7 Modulation adaptative et codage	38
II.6.8 Les types de transmission utilisée dans la 4G	38
II.6.8.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).....	38
II.6.8.2 L'OFDMA (Technique d'accès multiple en voie descendante)	39
II.6.8.3 SC-FDMA (Single Carrer - Frequency Division Multiple Access)	40
II.7 Inconvénients et avantages de LTE	41
II.8 La 4G dans le Monde	42
II.9 Conclusion.....	44

Chapitre III : Généralités sur la Qualité de Service

III.1 Introduction	46
III.2 Définitions de la Qualité de service (QoS)	46
III.3 Le But de la QoS	47
III.4 Les Paramètres de la QoS	47
III.4.1 Le débit	48
III.4.2 Le taux de perte.....	48
III.4.3 Le délai de transit (Latence)	48
III.4.4 La Gigue (Jitter ou Delay variation)	48
III.4.5 La bande passante.....	48
III.4.6 Priorité des paquets	49
III.5 Les critères utilisés pour assurer la QoS	49
III.6 La gestion de la qualité de service.....	49
III.6.1 Le modèle IntServ	50
III.6.2 Le modèle DiffServ	50
III.7 La notion de Bearer	51
III.8 Efficacité QoS.....	53
III.9 Qualité de service en LTE/EPC.....	54
III.10 Les Performance des réseaux 4G	55
III.10.1 Une mobilité à toute épreuve	55
III.10.2 Des temps de réponse rapides	55
III.10.3 La voix sur IP	55
III.10.4 Débit sur l'interface radio	55
III.10.5 Connexion permanente.....	56
III.10.6 Délai pour la transmission de données.....	56
III.10.7 Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G	56
III.10.8 Flexibilité dans l'usage de la bande.....	57
III.11 Exemples de Qualité de Service.....	57
III.11.1 Contraintes communes aux applications multimédia.....	57
III.11.2 La téléphonie sur IP.....	57
III.11.3 La visioconférence.....	58
III.12 Conclusion	58

Chapitre IV : Environnement de simulation des scenarios

IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Le simulateur NS3	60
IV.3 Description de NS3.....	60
IV.4 Modules du simulateur NS3.....	61
IV.5 Les ressources pour installer NS3	65
IV.5.1 Le Web	65
IV.5.2 Mercurial	65
IV.5.3 Bake	66
IV.5.3.1 Caractiristique de bake	66
IV.5.3.2 Limitations	66
IV.5.4 Waf	66
IV.6 Environnement de développement.....	66
IV.6.1 Installation de NS3	67
IV.7 Conclusion :	67

Chapitre V : Réalisation et simulation

V.1 Introduction	69
V.2 Matériels et logiciels de base pour réaliser notre travail :.....	69
V.3 Installation de l'environnement de simulation :.....	69
V.3.1 Installation de NS3 :	71
V.4 Architecture de test	72
V.5 Les critères utilisés dans notre simulation	73
V.6 Résultats de simulation :	74
V.7 Conclusion.....	83
ConclusionGénérale	84
Bibliographie.....	85

Liste des Figures

Figure 1: Réseau cellulaire.....	5
Figure 2: Exemple de réutilisation des fréquences	6
Figure 3 Evolution des réseaux cellulaires.....	7
Figure 4 : Architecture du réseau GSM.....	9
Figure 5: Le MS.....	9
Figure 6 : La carte SIM.....	11
Figure 7 : Architecture globale d'un réseau GPRS	14
Figure 8 : Architecture du réseau UMTS.....	18
Figure 9 : Présentation générale sur le système LTE	24
Figure 10 : Architecture générale du réseau LTE [15].	26
Figure 11 : Les interfaces du réseau d'accès.	28
Figure 12 : Architecture de l'EPC (Evolved Packet Core).	29
Figure 13 : Pile protocolaire[17].....	32
Figure 14 : Structure générique de la trame LTE[19].	35
Figure 15 : Structure de la trame radio FDD	35
Figure 16 : présente le duplexage FDD.....	36
Figure 17 : présente la trame TDD	37
Figure 18 : Modulation LTE	38
Figure 19 : Technique OFDM[17]	39
Figure 20 : Les porteuses de l'OFDMA.....	40
Figure 21 : Les porteuses de l'OFDMA[17]	40
Figure 22 : La différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.	41
Figure 23 : Les marchés 4G et 4G+ dans le monde.....	43
Figure 24 : Déploiement de la 4G dans le monde.....	43
Figure 25 : Division de la propagation des réseaux (millions).....	44
Figure 26 : Besoin de mécanismes de QoS lors d'un accès à des ressources partagées[18]. ..	52
Figure 27 : EPS Bearers.....	53
Figure 28 : QoS dans LTE/EPC.....	54
Figure 29 : modules de NS3	62
Figure 30 : La réalisation d'une simulation dans NS3	73
Figure 31 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB.....	75
Figure 32 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB	76
Figure 33 : TB en fonction de la distance entre UE-eNodeB.....	77
Figure 34 : Downlink communication.....	78
Figure 35 : Uplink communication.....	79
Figure 36 : Handover scénario.....	80
Figure 37 : L'animation du scénario de handover	81

Introduction Générale

L'accès à l'information a subi des transformations majeures. Après l'invention de la première génération de téléphonie analogique, la deuxième génération (2G) correspond à l'arrivée de nouveaux standards de communication mobile :

La technologie GSM a amélioré les conversations vocales internationales et a permis de transmettre des messages SMS via la transmission de données numériques. La troisième génération (3G) représentée par la technologie UMTS fournit des débits de données rapides jusqu'à 2 Mb/s, réduisant le besoin d'accès Internet mobile, de visualisation vidéo et de communication vocale. Les capacités de transfert de données de ces systèmes de deuxième et troisième génération sont encore limitées. Le système de quatrième génération (4GLTE) est aujourd'hui une véritable révolution car il permet de démultiplier les données grâce à deux phénomènes. La première consiste à acheminer les appels vocaux directement sur Internet, plutôt que via le réseau téléphonique (Voice over IP). La seconde utilise le multiplexage (plusieurs types d'informations réparties sur un même canal), qui permet d'augmenter la quantité d'informations transmises. Par conséquent, 4GLTE est défini comme le débit de données mobile le plus élevé. Il est à noter que la technologie 4G a évolué avec la norme LTE-Advanced (communément appelée 4G+), qui permet des débits plus élevés sur les réseaux mobiles LTE. Cet article se concentre sur les performances des réseaux 4G LTE et la modélisation de la chaîne de transmission. Dans mes simulations, nous ne nous intéressons qu'à la partie e-UTRAN du système, avec un accent particulier sur les canaux de transport et de signalisation. Nous nous intéressons particulièrement aux métriques de qualité qui peuvent être utilisées pour évaluer la qualité des transmissions en liaison descendante et en liaison montante. Parmi ces indicateurs figurent le CQI (canal quality indicator), ainsi que le SINR (signal-to-noise ratio) et le TB (block transport). L'organisation générale de notre mémoire est articulée sur cinq chapitres :

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

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

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

Le chapitre 4 : Environnement de simulation des scénarios.

Le chapitre 5 : Réalisation et simulation.

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

Chapitre I

Introduction aux réseaux cellulaires

I.1 Introduction :

Un système de communication, ou réseau, désigne tous ensemble d'éléments capables de véhiculer de l'information d'une source vers une destination bien définie. Les progrès de la technologie et les évolutions rapides des systèmes de télécommunications ont facilité la forte croissance des systèmes radio-mobiles dans le domaine public. La croissance exponentielle de la demande en services mobiles, ainsi que la nécessité d'assurer un support haut débit pour l'implémentation des applications multimédias nécessitent une utilisation efficace de l'étroite bande passante affectée au lien de transmission radio. [1]

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

I.2 Réseaux cellulaires

I.2.1 Définition de réseau cellulaire

Un réseau cellulaire est un réseau de communication dédié aux appareils mobiles. Il permet la communication entre ces unités mobiles et avec tous les utilisateurs de téléphones mobiles. Ondes radio dans les réseaux cellulaires Est le lien entre l'utilisateur et l'infrastructure de l'opérateur, chaque antenne couvre une zone définie, au fur et à mesure que l'utilisateur se déplace, le téléphone change de cellules

I.2.2 La cellule

Il découpe une unité géographique couverte par une antenne radio en petites zones et établit une station de base définie. Un ensemble de plusieurs cellules est appelé une zone de localisation. La taille de la cellule dépend de la nature et de la densité du nombre d'ouvrages de circulation simultanés à écouler et la distance entre eux doit être de 2 à 3 fois le diamètre de la cellule pour éviter de trouver deux cellules Adjacent à la même fréquence. Elle assure : [2]

- L'interface entre le mobile et le central (Switch).
- L'émission permanente de la signalisation.

I.2.3 Déploiement des réseaux cellulaires

Diverses tailles et types de cellules sont à déployer en fonction de l'environnement considéré et de la technologie. Un opérateur devra donc tenir compte des contraintes du relief topographique et des contraintes

urbanistiques pour dimensionner les cellules de son réseau pour cela, on distingue : [2]

I.2.3.1 Macro cellule omnidirectionnelle

Elle est composée d'un frame et donc d'un seul secteur. Elle possède au minimum un TRX. Ce type classique de cellule est plus utilisé dans les zones rurales (à faible densité d'abonnés).

I.2.3.2 Macro cellule bi-sectorisée

Elle est composée de deux frames (une par secteur) et de deux secteurs. Elle possède au minimum un TRX chacun. Ce type de cellule conviendrait mieux à un environnement médian (ruro-urbain). Malheureusement ce type de cellule est de plus en plus délaissé au profit des cellules tri-sectorisées.

I.2.3.3 Macro cellule tri-sectorisée

Elle est composée de trois frames (une par secteur) et de trois secteurs possédants chacun au minimum un TRX. C'est le type de cellule la plus utilisée, notamment en zones urbaines à forte densité de trafic. Les microcellules sont des cellules de petite dimension destinées aux zones à fortes densité de trafic (par exemple une rue passante), tandis que les pico cellules sont pourtant des cellules de taille encore inférieures, prévues pour des endroits tels que les gares, les galeries marchandes...etc.

I.2.4 Classification des cellules

Il convient de noter que la taille des cellules n'est pas la même dans toute la région. dépend en fait de :

- (a) - le nombre d'utilisateurs potentiels dans la zone,
- (b) - configuration du terrain (relief géographique, présence de bâtis, ...),
- (c) - Nature du bâtiment (maison, immeuble, bâtiment en béton...)
- (d) - Emplacement (rural, suburbain ou urbain) et densité des bâtiments.

Par conséquent, dans les zones rurales avec un petit nombre d'utilisateurs et un terrain relativement plat, les cellules seront plus grandes que dans les villes, où le nombre d'utilisateurs est très élevé et l'atténuation causée par les bâtiments est importante. Un opérateur devra donc tenir compte des contraintes du relief topographique et des contraintes urbanistiques pour dimensionner les cellules de son réseau. On distingue pour cela quatre services principaux :

(1) - Le service Outdoor : Indique les conditions nécessaires au bon fonctionnement de la communication extérieure.

(2) – Le service Incar : considère l'utilisateur à l'intérieur de la voiture. Une marge supplémentaire de 6 décibels watts, exprimée en 6 [dBw], est généralement ajoutée au budget de puissance pour en tenir compte.

(3) - Le service Indoor : permet le bon fonctionnement des communications à l'intérieur des bâtiments. Ces services sont en outre subdivisés en deux catégories :

(3.1) – (le Soft indoor) : lorsque l'utilisateur se trouve juste derrière la façade du bâtiment

(3.2) –(le Deep indoor) : intérieur profond.

- La pico-cellule : rayon inférieur à 100m, en zone urbain.
- La micro-cellule : rayon inférieur à 1Km, en zone suburbain.
- La macro-cellule : rayon de 1 à 35Km, en zone rural.

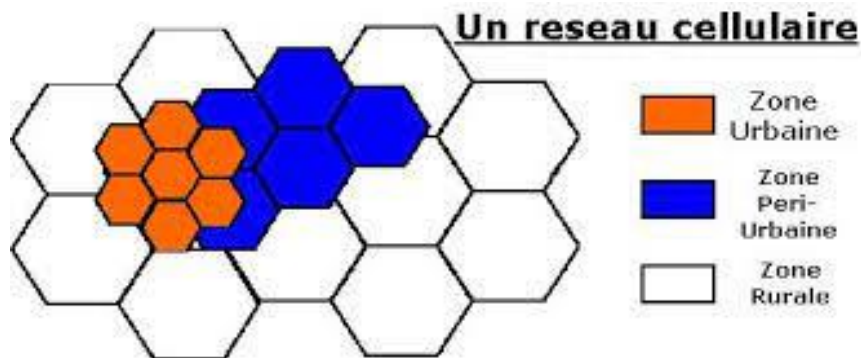


Figure I.1: Réseau cellulaire

Figure 1: Réseau cellulaire

On pense généralement qu'une atténuation supplémentaire de 10 [dB] pour le Soft Indoor doit être prise en compte lors de l'établissement d'un bilan de puissance, c'est-à-dire lors de l'analyse du rapport de la puissance transmise à la puissance reçue sur le côté droit du récepteur, et il est de 20 [dB] pour Deep Indoor à 900 [MHz]. Quand on sait que 10 [dB] représente 10 fois la puissance, on comprend qu'il est primordial pour les opérateurs de dimensionner leurs réseaux le plus raisonnablement possible, quitte à faire des mesures sur le terrain.

I.2.5 Réutilisation des fréquences

Les cellules d'une même zone de couverture ont des fréquences différentes, de sorte qu'une cellule n'interfère pas avec l'autre. Cependant, il est possible de réutiliser la fréquence d'une cellule dans une autre cellule relativement éloignée c'est-à-dire des cellules non adjacentes, tant que cette deuxième cellule n'interfère pas avec la première, la détermination de l'allocation et de la réutilisation de ces fréquences est essentielle pour une évaluation du système car il y a une augmentation du trafic, une augmentation du nombre d'abonnés, une concentration dans certaines zones. [3]

La figure I.2 illustre le concept de réutilisation des fréquences par groupes, où les cellules avec le même chiffre utilisent la même fréquence. La forme hexagonale des cellules est la plus pratique, car elle permet une plus grande couverture. [3]

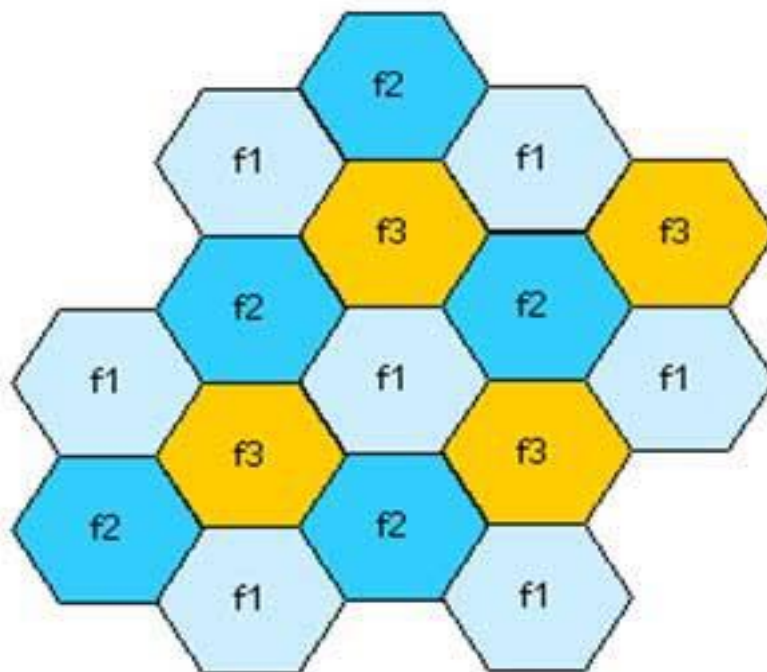


Figure I.2: Exemple de réutilisation des fréquences

Figure 2: Exemple de réutilisation des fréquences

Les réseaux mobiles ont beaucoup évolué depuis leur apparition dans les années 1970 à nos jours. Cette évolution, de la première à la quatrième génération des réseaux cellulaires est illustrée à la Figure 3.

I.3 Evolution des réseaux cellulaires

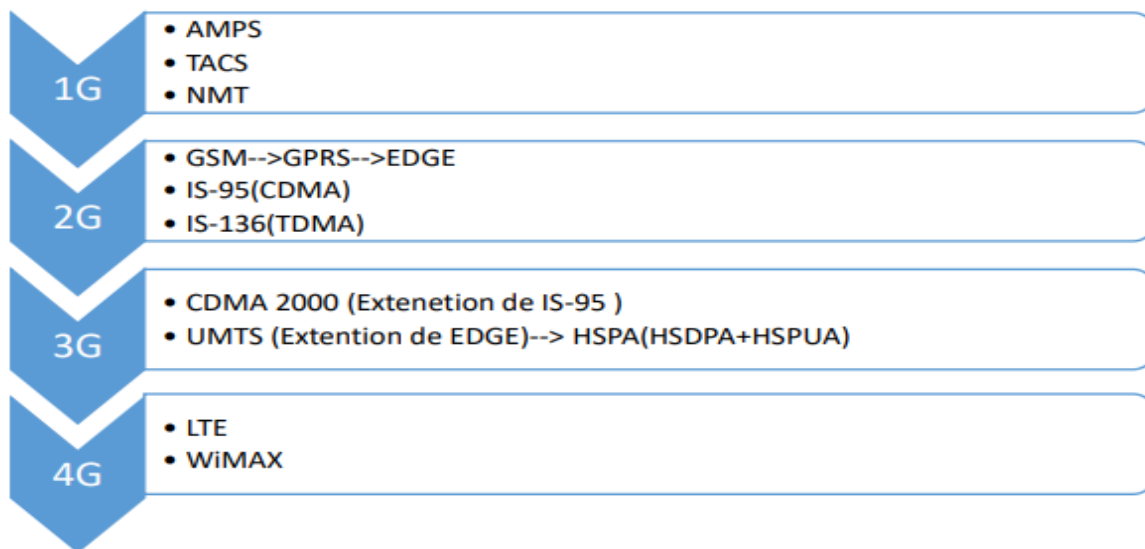


Figure I.3: Evolution des réseaux cellulaires

Figure 3Evolution des réseaux cellulaires

I.3.1 La première génération des téléphonie mobile (1G)

La première génération de systèmes cellulaires (1G) reposait sur un système de communications mobiles analogiques. Cette génération a bénéficié de deux inventions techniques majeures des années 1970 : le microprocesseur et le transport numérique des données entre les téléphones mobiles et la station de base. Les appareils utilisés étaient particulièrement volumineux. La première génération utilisait essentiellement les standards suivants :

AMPS (Advanced Mobile Phone System) : lancé aux Etats-Unis, est un réseau analogique reposant sur la technologie FDMA (Frequency Division Multiple Access).

NMT (Nordic Mobile Téléphone) : a été essentiellement conçu dans les pays nordiques et utilisés dans d'autres parties de la planète.

TACS (Total Access Communications System) : qui repose sur la technologie AMPS, a été fortement utilisé en Grande Bretagne.

La première génération avait beaucoup de défauts, comme l'incompatibilité des normes d'une région à l'autre, des transmissions analogiques non sécurisées (appels téléphoniques), pas de roaming international (le roaming est la possibilité de conserver son numéro sur le réseau d'un autre opérateur). Pour cette raison, la 1G a été remplacée une fois

qu'une deuxième génération plus puissante utilisant la technologie numérique est apparue.

I.3.2 La deuxième génération des téléphonie mobile (2G)

Ce système cellulaire utilise une technologie numérique pour le signal vocal, il apporte une meilleure qualité ainsi qu'une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur cette génération a été développée en 1980, elle utilise les standards suivants :

I.3.2.1 GSM(2G)

GSM ou 2G, est un system cellulaire numérique de télécommunication radio-mobile, qui a été développée en Europe et adoptée dans une bonne partie du monde. Cette technologie s'appuyant sur les transmissions numériques permettant une sécurisation des données, et assurer le roaming entre pays exploitant ce type de réseau.

Le GSM permettait aussi l'émission de SMS, et présente l'avantage de pouvoir assurer des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté. [4]

La 2G peuvent atteindre un débit de 9.6 Kbit/s, elle utilise la commutation par circuit, aussi une modulation de phase appelée GMSK et une combinaison de techniques de multiplexage FDMA et TDMA. [5]

Grâce à la technique TDMA, la porteuse qui a une bande passante de 200 kHz, est subdivisée en huit intervalles de temps. Ainsi, jusqu'à 8 conversations simultanées partagent une seule porteuse, donc les utilisateurs peuvent partager le même canal.

I.3.2.1.1 Architecture du réseau GSM

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

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

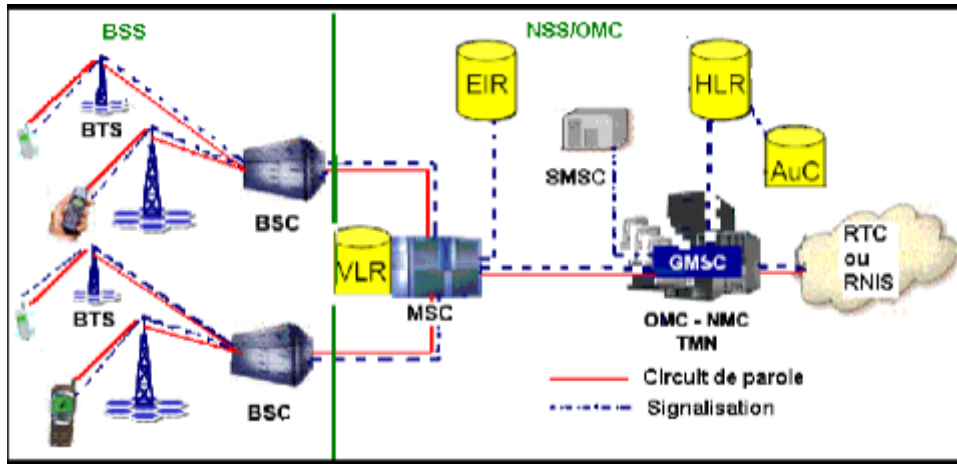


Figure I.4 : Architecture du réseau GSM

Figure 4 : Architecture du réseau GSM

I.3.2.1.1.1 Le BSS (Base Station SubSystem)

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

a .Station mobile SM :

Il se compose d'un terminal et d'une carte SIM, Les terminaux mobiles se composent d'un émetteur/récepteur, chaque terminal est Différenciez-vous des autres par IMEI (International Mobile Equipment Identity) est un nombre à 15 chiffres. Une carte SIM est une mini base de données avec Mémoire et microprocesseurs contenant des données spécifiques telles que le code PIN et IMSI (International Mobile Subscriber Identity) pour identifier l'abonné Dans n'importe quel réseau cellulaire

Deux entités physiques composent cette station :

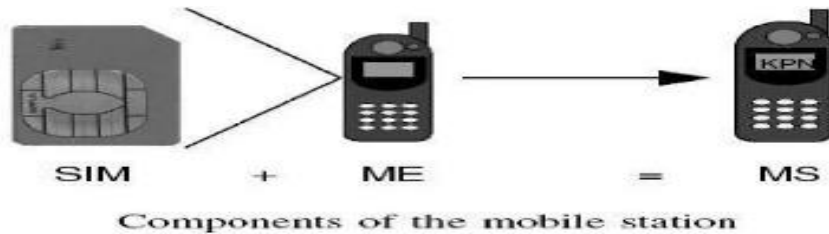


Figure I.5 : Le Station mobile

Figure 5: Le MS

L'équipement mobile ME (mobile équipement) :

La partie banalisée de station mobile constitue l'équipement mobile, la partie visible est l'ensemble formé par l'équipement radioélectrique, le clavier, l'afficheur, le micro et le hautparleur. L'équipement mobile est le terminal sans le module d'identité d'abonné. C'est la partie matérielle qui fournit l'entrée dans ce réseau et de communiquer.

➤ **Le module d'identité d'abonné SIM :**

La carte SIM est la partie de personnalisation station mobile, c'est une carte mémoire qui permet la séparation entre le moyen de communication et le titre d'abonnement propre à l'abonné.

La fonction principale de la carte SIM est de contenir et de gérer une série de fonction, où chaque type d'information a une clé spécifique qui la relie à Protégez l'accès aux informations stockées sur la carte.

Parmi les informations contenues dans cette carte :

- L'identité IMSI (international mobile subscriber identity) avec laquelle on peut identifier l'abonné dans n'importe quel réseau GSM.
- Le MSISDN (mobile station ISDN number) : est le numéro de l'abonné mobile qui est le seul identifiant connu à l'extérieur du réseau GSM.
- Le MSRN (mobile station roaming number) : il permet le routage des appels entrant directement du commutateur passerelle(GMSC) vers le commutateur MSC de la station mobile.
- L'identité TMSI (temporel mobile subscriber identity) numéro temporaire de l'abonné mobile.
- LAI (location area identification) : une zone de localisation est identifiée par cette adresse LAI.
- Numéro d'identification personnel PIN (personnel identity number) : qui est un numéro composé de quatre chiffres utilisé comme un mot de passe par l'abonnée pour accéder à son abonnement et pour le protéger des connexions frauduleuses.



Figure I.6 : La carte SIM

Figure 6 : La carte SIM

b. Les BTS (Base Transceiver Station)

La station de base est le point d'entrée dans Un réseau de stations mobiles, qui est un groupe d'émetteurs/récepteurs appelés TRX. Responsable de la transmission radio : modulation, égalisation, codage, correction d'erreurs.

Plus généralement, il gère toute la couche physique : multiplexage TDMA, sauts de fréquence lents, cryptage, et il effectue également toutes les mesures radio nécessaires pour vérifier que les communications en cours se déroulent correctement.

La BTS gère la couche liaison de données pour l'échange de signalisation entre la station mobile et l'infrastructure, et enfin, elle gère la liaison de données avec le BSC pour assurer la fiabilité de la conversation. Les BTS ont généralement une capacité maximale de 16 porteuses et peuvent prendre en charge jusqu'à une centaine de communications simultanées.

c. Le BSC (Base Station Controler)

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

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

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

I.3.2.1.1.2 Le NSS (Network SubSystem)

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

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

a. Le MSC (Mobile service Switching Center)

Il assure la commutation entre les abonnés du réseau, il participe à la fourniture des différents services tel que la téléphonie, la transmission des messages courts et l'exécution de Handover, il permet encore de mettre à jour les différentes bases de données (HLR, VLR et AUC) qui donnent toutes les informations concernant les abonnés et leur localisation dans le réseau.

Les commutateurs MSC d'un opérateur d'un opérateur sont reliés entre eux pour la commutation interne des informations. Des MSC servant de passerelle (Gateway mobile switching center, GMSC) sont placées en périphérie du réseau d'un opérateur de manière à assurer une interopérabilité entre réseaux ; on distingue deux types d'appels au niveau du MSC :

- Mobile-mobile : dans ce cas le MSC établit une liaison avec un autre MSC
- Mobile-réseau fixe(RTC) : le MSC possède une fonction passerelle GMSC (Gateway MSC) activée au début de chaque appel d'un abonné vers un réseau fixe.

b. Le VLR (Visitor Location Register)

L'enregistreur de localisation des visiteurs mémorise les données relatives à un abonné mobile quand ce dernier entre dans la zone de couverture du sous-système réseau. Le VLR est une base de données dynamique ; il dialogue avec le HLR de l'abonné mobile pour prendre connaissance des informations nécessaires. Les informations relatives à l'abonnés accompagnent l'abonné conjointement à ses déplacements dans le réseau.

c. HLR (Home Location Register)

Le HLR est la base de données qui gère les abonnés d'un PLMN donné. Il mémorise d'une part les caractéristiques de chaque abonné :

- L'identité internationale de l'abonnée utilisée par le réseau IMSI.
- Le numéro d'annuaire de l'abonnée MSISDN.
- Le profil de l'abonnement (services supplémentaires autorisés, autorisation d'appel international, etc.).

Ces données sont rentrées par l'opérateur à partir de son système d'administration. Elles varient peu dans le temps.

Le HLR est une base de données de localisation. Il mémorise pour chaque abonné le numéro de VLR où il est enregistré, même dans le cas où l'abonné se connecte sur un PLMN étranger. Cette localisation est effectuée à partir des informations émises par le terminal à travers le réseau.

L'implantation de HLR peut être centralisée ou décentralisée. Dans le premier cas, un HLR peut gérer plusieurs centaines de milliers d'abonnés et il constitue une machine spécifique. Dans le deuxième cas, il peut être intégré dans le MSC et les données d'une abonnée sont alors physiquement stockées sur le MSC où il communique préférentiellement. Les échanges de signalisation sont ainsi minimisés.[6]

d. L'AuC (Authentication Center)

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

e. L'EIR (Equipment Identity Register)

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

I.3.2.1.13 L'OSS (Opération Support Subsystem)

Le sous-système d'exploitation et de maintenance de l'OSS permet à un opérateur de gérer son réseau. La diversité des appareils dans un réseau GSM encourage une approche structurée et en couches.

La mise en place du réseau GSM (mode circuit) permettra aux opérateurs d'offrir un accès à la mobilité tout en conservant une interface avec le réseau fixe RTC existant, offrant ainsi des services de type « **Voix** » à leurs clients.

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

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

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

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

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

I.3.2.2 GPRS (2.5G)

Le General Packet Radio Service ou GPRS est une norme pour la téléphonie mobile dérivée du GSM, elle est basée sur la commutation des paquets avec un débit de 114Kbit/s qui est plus élevé que le GSM et est mieux adapté à la transmission de données il offre plusieurs services tel que la consultation du web, le transfert de fichiers et la transmission de vidéos compressées, la messagerie, la géolocalisation ...etc. [5]

L'architecture du réseau GPRS est illustrée sur la figure I.5

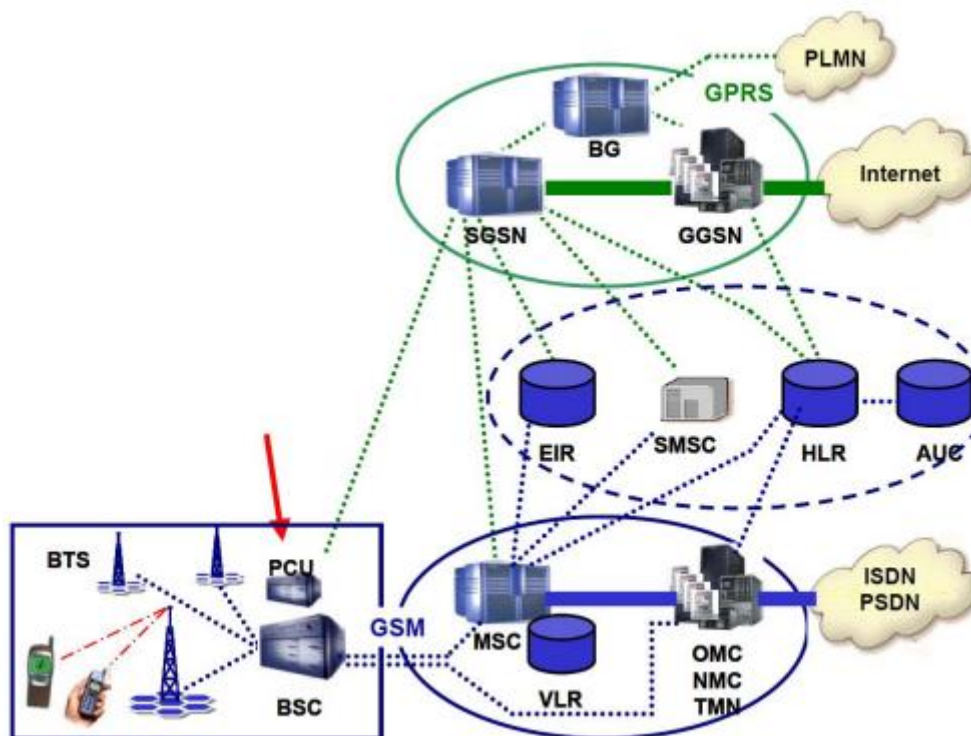


Figure I.7 : Architecture globale d'un réseau GPRS

Figure 7 : Architecture globale d'un réseau GPRS

[7]

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

I.3.2.2.1 Le SGSN (Serving GPRS Support Node)

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

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

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

I.3.2.2.2 Le GGSN (Gateway GPRS Support Node)

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

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

I.3.2.2.3 Le BG (Border Gateway)

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

I.3.2.2.4 Les équipements GSM utilisés :

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

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

Le réseau **GPRS** est totalement dépendant du bon fonctionnement des infrastructures du réseau **GSM**, ce dernier constitue donc en effet une base pour la mise en place du réseau **GPRS**. L'ensemble des éléments **GSM** et **GPRS** sont associés pour fournir un service **GPRS**. Deux protocoles sont alors utilisés :

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

I.3.2.2.5 Le type de transmission dans le réseau GPRS

Cette norme utilise la transmission par paquets. Lorsqu'une station mobile transmet des données à un terminal fixe, les données sont transmises au SGSN via le BSS (BTS + BSC), puis le SGSN envoie les données au GGSN, et le GGSN achemine les données vers le récepteur. Le routage vers terminal (terminal mobile vers terminal mobile ou terminal fixe vers terminal mobile) utilise les principes des protocoles d'encapsulation et de tunnellation. Les données examinées par le GGSN sont transmises au SGSN sur lequel repose la station mobile cible

I.3.2.2.6 La gestion d'itinérance

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

- ✓ En « **REPOS** », le mobile est éteint.
- ✓ En « **SURVEILLANCE** », le mobile est localisé au niveau de la zone de routage.

Le mobile peut être appelé par le **SGSN**.

- ✓ Etat « **PRET** », le mobile est localisé au niveau de la cellule. Le mobile peut recevoir des informations ; dans cet état le terminal est localisable à la cellule près.

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

I.3.2.3 EDGE

Enhanced Data Rates for GSM Evolution, qualifié souvent de 2,75 G, est une évolution de la norme GPRS.

L'EDGE utilise différents schémas de modulation et de correction d'erreurs, permettant un taux de transmission de données plus élevé et une connexion plus fiable et robuste. L'EDGE permet la commutation de paquets, c'est-à-dire qu'il peut fournir une connexion Internet.[\[8\]](#)

L'architecture d'un réseau EDGE est identique à celle de GPRS, seules quelques modifications sont à réaliser concernant le sous-système radio.

I.3.3 La troisième génération des téléphonies mobile (3G)

Elle est apparue pour établir des normes internationales afin de garantir une compatibilité mondiale, une mobilité globale. La compatibilité avec les réseaux 2G et des débits de 2Mbps pour une mobilité faible est allons jusqu'à 144kbps pour une mobilité forte. Les principales normes 3G sont le CDMA 2000 et UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

I.3.1 UMTS (3G)

L'UMTS est l'acronyme d'Universal Mobile Telecommunication System, est une technologie qui exploite une bande de fréquence plus large. C'est un system de transfert des données par paquets. Les systèmes sans fil de troisième génération qui sont juste introduites dans les marchés mondiaux offrent des débits de données beaucoup plus élevés, et permet des améliorations significatives par rapport aux systèmes 2G. Les systèmes sans fil 3G ont été proposées pour fournir des services vocaux, de radiomessagerie et fournir des interactifs multimédias, y compris l'accès à l'internet, la téléconférence et d'autres services. [8][9].

I.3.1.1 Architecture du réseau UMTS

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

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

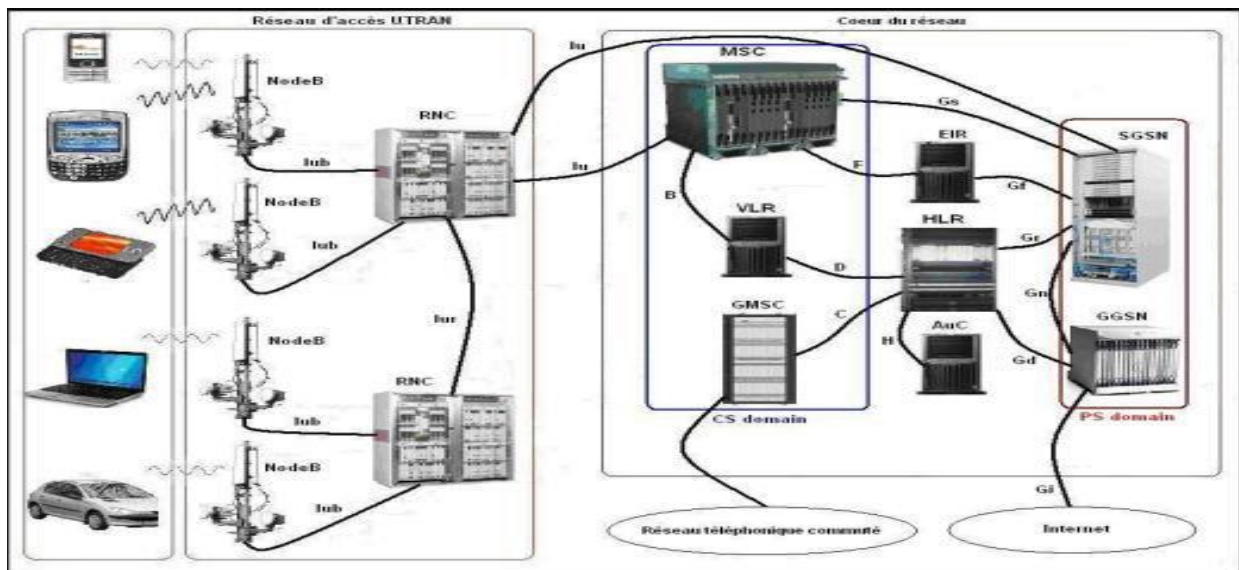


Figure I.8 : Architecture du réseau UMTS

Figure 8 : Architecture du réseau UMTS

I.3.1.2 Le mode de transmission dans le réseau UMTS

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

a. Le mode circuit

Ce mode permet de gérer les services temps réel dédiés aux conversations téléphoniques (visiophonie, jeux vidéo, applications multimédia). Ces applications nécessitent des temps de transfert rapides. Lorsque l'UMTS est introduit, le débit binaire en mode de domaine de circuit est de 384 Kbits/s.

L'infrastructure repose alors sur les principaux éléments du réseau GSM : MSC/VLR (base de données existante) et GMSC pour une connexion directe aux réseaux externes.

b. Le mode paquet

Ce mode est utilisé pour gérer les services non temps réel. Cela concerne principalement la navigation sur Internet, la gestion des jeux en ligne, l'accès et l'utilisation du courrier électronique. Ces applications sont moins sensibles au temps de transfert, c'est pourquoi les données seront transférées en mode paquet. Le débit du domaine paquet sera sept fois plus rapide que le mode circuit, soit environ 2 Mbps.

L'infrastructure s'appuie alors sur les principaux éléments du réseau GPRS : SGSN (bases de données existantes) en mode paquet GPRS, équivalent des MSC/VLR en réseau GSM) et le GGSN (équivalent du GMSC en réseau GSM)

qui jouera le rôle de commutateur vers le réseau Internet et les autres réseaux publics ou privés de transmission de données.

I.3.2 HSDPA (3.5G)

La technologie HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) représente la première étape d'évolution de la méthode d'accès du réseau mobile de troisième génération UMTS (Universal Mobile Telecommunications Service). Cette technologie permet d'obtenir des débits théoriques supérieurs à 10 Mbps sur le lien descendant et de supporter des services à valeur ajoutée, tels que l'accès internet à haute vitesse, le téléchargement de fichiers audio et vidéo, la réception de programmes télévisés et la visiophonie. [7]

Les débits 3G actuels en flux descendant (environ 384 Kbps, et jusqu'à 2 Mbps selon les normes) seront portés à 14 Mbps (débit maximal selon les normes) sur les systèmes HSDPA.[10]

II.3.3 HSUPA (3.75G)

Le HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) est un protocole de téléphonie mobile de troisième génération (3G), de la famille UMTS, dont les spécifications ont été publiées par le 3GPP dans la « release 6 » du standard UMTS. Le HSUPA est un complément de HSDPA pour la voie montante. Le HSUPA, présenté comme le successeur du HSDPA, porte le débit montant (Uplink) à 5,8 Mbit/s théorique, le flux descendant (Downlink) étant de 14 Mbit/s comme en HSDPA.[10]

I.3.4 La Quatrième Génération (4G LTE)

La technologie **LTE** (Long Term Evolution) permet une "mobilité à très haut débit", c'est-à-dire des débits théoriques de transmission de données supérieurs à 100 Mbit/s, voire supérieurs à 1 Gbit/s (débit minimum défini par l'**UIT** pour la Spécification **IMT-Advanced** de la technologie **LTE Advanced**). En pratique, le débit est de l'ordre de la dizaine de Mbit/s, selon le nombre d'utilisateurs, puisque la bande passante est partagée entre les terminaux actifs des utilisateurs présents dans la même radio cellule.

L'une des caractéristiques de la **4G** est qu'elle possède un cœur de «réseau» basé sur **IP** qui n'offre plus le mode commuté (établissant les circuits qui acheminent les appels «voix»), ce qui signifie que les communications téléphoniques utilisent la voix sur **IP** (en mode paquet **VoIP** «Voix sur **IP**»).

Avec la **4G**, on se dirige vers la transmission de toutes les informations « voix et données » par **IP**, le même protocole qu'on utilise sur Internet. Pour les fournisseurs, c'est plus facile et moins cher à gérer. Ça facilite aussi le

développement d'applications multimédias. Cette technologie permet des vitesses de téléchargement plus rapides et des temps de latence plus courts.

I.3.4.1 Historique sur la 4G

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

En Novembre 2005, **KT** (Korea Telecommunication) démontre le service mobile **WiMAX** à Busan, Corée du Sud[11]. La société japonaise **NTTDoCoMo** (Nippon Telegraph & Telephone) a testé, en Février 2007, un prototype de communication **4G** système **MIMO** 4x4 appelé **VSF-OFCDM** à 100 Mbit/s tout en se déplaçant, et 1 Gbit/s à l'arrêt. Un an plus tard, le commissaire européen Viviane Reding a proposé de réaffecter des 500-800 MHz pour les communications sans fil.

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

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

Le 25 Février 2010, l'Estonie a ouvert **EMTLTE "4G"** travail en réseau dans le régime d'essai.

Le 5 Juin 2010, Sprint Nextel a publié le premier Smartphone **4G**, l'Evo **HTC4G**.

En Juillet 2010, **MTS** Ouzbékistan à Tachkent déployé **LTE**. Le 25 août 2010, la Lettonie a ouvert **LMTLTE "4G"** travail en réseau dans le régime d'essai de 50% du territoire[11].

Le **LTE** permet d'exploiter des largeurs de bande de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz. La norme **LTE-Advanced** impose des critères de base sur le débit et sur la latence, comme le résume le **Tableau I.1** suivant[11]:

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

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

I.3.5 La cinquième génération des téléphonies mobile (5G)

Cette technologie a fait ses débuts dans la version 15 et vise à augmenter les débits de données et à introduire de nouveaux services à haute vitesse.

Actuellement, il existe environ 32 réseaux 5G dans le monde. Cette génération utilise le MIMO-amélioré et les ondes millimétriques cela permettra une connectivité transparente pour assurer la connexion interne des objets : voiture autonome, maisons intelligente ... [12]

Il est prévu que la 5G fournisse un débit uniforme d'au moins 10 Gbit/s avec quelques millisecondes de latence et un service extrêmement fiable.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous donnons un aperçu des principales caractéristiques des différentes générations de téléphones mobiles et de réseaux cellulaires. La mise en œuvre des services GPRS implique l'évolution du matériel et des logiciels en plus du réseau GSM existant.

L'évolution du GSM vers le GPRS prépare l'introduction des réseaux UMTS de troisième génération. Afin d'intégrer le GPRS à l'UMTS, des modifications d'infrastructure ont dû être apportées, ce qui a nécessité l'ajout d'équipements supplémentaires et le chargement de logiciels supplémentaires.

Le GPRS constitue une évolution majeure de la troisième génération d'UMTS. Il est conçu pour le transfert de données par paquets afin d'assurer un accès facile au réseau Internet.

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

Finalement, nous avons présenté la 5G et il est encore en développement

Chapitre II

Etude détaillées réseau 4G

II/Introduction :

Planifier un réseau mobile implique d'identifier tous les composants matériels et logiciels de ces systèmes, de les localiser, de les interconnecter et de les utiliser de manière optimale, tout en respectant un certain nombre de contraintes de qualité de service. . Il s'agit d'un processus long et complexe qui se déroule avant que le réseau ne soit opérationnel. Compatible avec les réseaux de première (1G), deuxième (2G) et troisième (3G) génération.

Les réseaux de nouvelle génération stimulent la planification des réseaux cellulaires, de nouvelles voies d'investigation En fait, la tendance est de plus en plus à l'intégration transparente des technologies sans fil existantes telles que GSM, LAN et Bluetooth

Ad hoc dans un environnement complètement hétérogène. Cette nouvelle vague de pensée se distingue. La 4ème génération des générations précédentes. Les systèmes **4G** sont complètement orientés vers l'utilisateur final, en fournissant des services variés à haut débit et sans coupure à travers les réseaux.

II.2 LTE (4G)

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

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « downlink », alors que la "vraie 4G" offre un débit descendant atteignant 1 Gbit/s.

La technologie LTE repose sur une combinaison de technologies sophistiquées à même d'élever nettement le niveau de performances (très haut débit et latence) par rapport aux réseaux 3G existants. Le multiplexage OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences.

Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi ou le WiMax) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée.

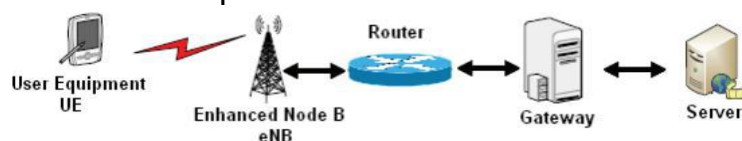


Figure II.1 : Présentation générale sur le système LTE

Figure 9 : Présentation générale sur le système LTE

[13].

II.3 Buts de la 4G

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

Plusieurs technologies sont disponibles. Elle veut rendre les connexions réseau plus visibles. Pour éviter les interruptions de service pendant la transmission intercellulaire, l'utilisateur doit baisser le volume, usage en direction du Tout-IP [14]

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

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

II.4 Architecture du réseau 4G LTE

L'architecture générale du système LTE est montrée sur la figure II-1, le réseau LTE est composé de deux entités principales : le réseau d'accès radio terrestre universel évolué (EUTRAN) qui est le réseau d'accès radio pour l'EU, et le coeur de paquets évolué (EPC) qui est le coeur du réseau. L'architecture du réseau coeur est aussi désignée par, évolution d'architecture de service (SAE), et la combinaison de l'EUTRAN et de l'EPC est aussi appelée système paquet évolué (EPS) [14].

II.4.1 Equipement Utilisateur (UE)

En LTE, l'UE communique avec l'E-UTRAN et l'EPC en utilisant les protocoles appropriés la communication du plan utilisateur se termine au niveau de l'eNodeB et supporte tous les protocoles afférents au plan utilisateur. Dans le côté plan de contrôle, l'UE communique avec l'eNodeB et le MME à travers les protocoles RRC et NAS respectivement.

Pour pouvoir supporter différentes capacités matérielles, différents équipements utilisateurs (UE) sont définis (Tableau II.1). Les catégories sont

différenciées selon le débit maximal, supporté, des données dans les deux liaisons montante et descendante. En plus le nombre maximale de couches de données (ou flux de données) diffère selon la catégorie de l'UE.

Par exemple, le débit maximal pour la catégorie 1 pour les deux liaisons descendante et montante est approximativement de 10 et 5 Mbps respectivement.

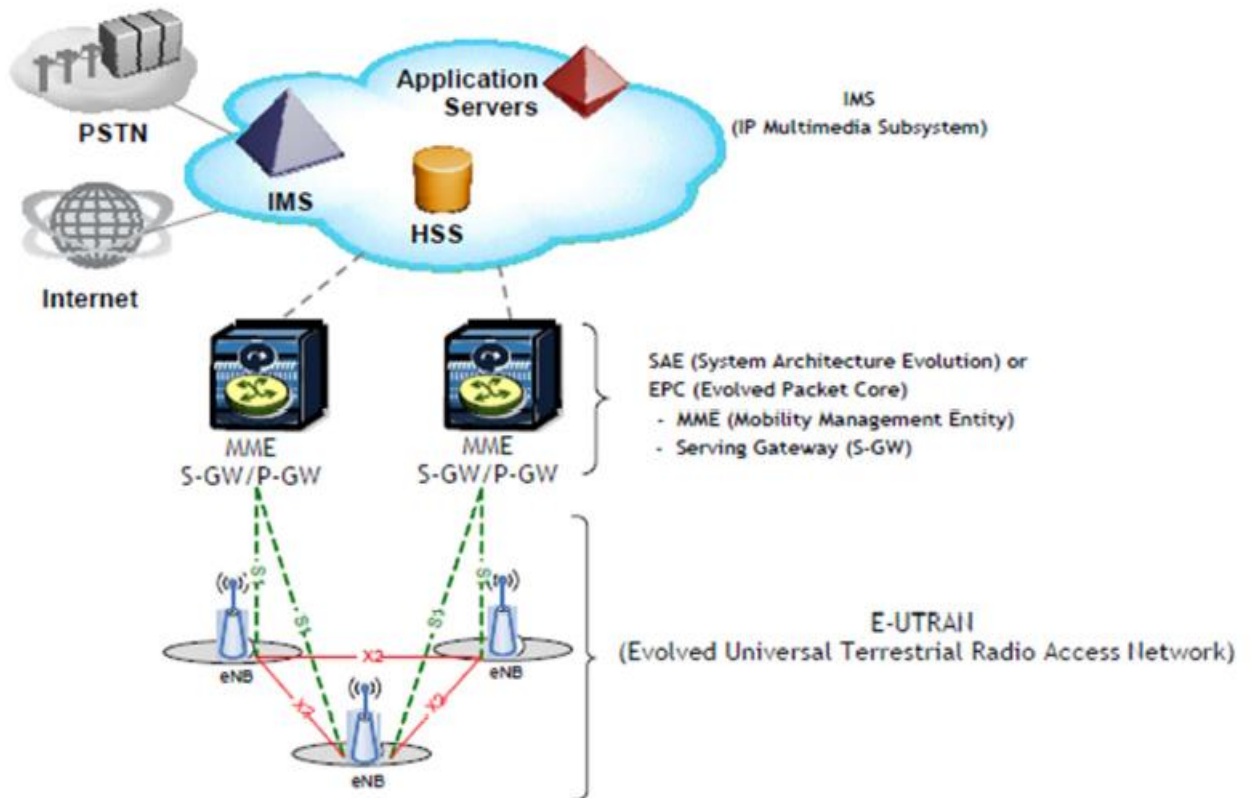


Figure II.2 : Architecture générale du réseau LTE [15].

Figure 10 : Architecture générale du réseau LTE [15].

II.4.2 Réseau d'accès E-UTRAN

L'E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) désigne le réseau d'accès à la LTE, il a une architecture horizontale vu que les contrôleurs des stations de base ont été supprimés ; il est composé de stations de base nommées eNodeB, d'antennes radio et des liaisons de transmission (en fibre optique, en cuivre ou en faisceaux hertziens).

L'eNodeB joue le rôle du NodeB et du RNC (*Radio Network Control*) dans les réseaux UMTS. Cela permet de réduire le délai d'accès et de simplifier la fonction d'opération et de maintenance du réseau.

L'eNodeB est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'UE. Il a pour responsabilité de gérer les tâches suivantes :

- Gestion des ressources radio (RRM).
- Contrôle du porteur radio.
- Contrôle de l'admission radio.
- Contrôle de la connexion en mobilité.
- Ordonnancement de l'UE (UL et DL).
- Sécurité en accès strate (AS).
- Effectuer les mesures comme une base pour l'ordonnancement et la gestion de la mobilité.
- Compression de l'en-tête IP.
- Le cryptage des données utilisateur.
- Routage des données utilisateur entre eNodeB et S-GW.
- Traitement de la pagination originaire du MME.
- Traitement des messages de diffusion originaires du MME et du système d'opérations et de maintenance (OMS).
- Sélection de l'élément MME dans le cas où l'UE ne fournit pas cette information.
- Traitement des messages PWS, incluant ETWS et CMAS.

Les eNodeBs sont reliés entre eux par une interface X2 (Figure II.2).

• **L'interface X2** : c'est une interface logique. Elle est introduite dans le but de permettre aux eNodeBs d'échanger des informations de signalisation durant le Handover ou la signalisation, sans faire intervenir le réseau coeur.

Les eNodeBs sont reliés au coeur du réseau à travers l'interface S1.

• **L'interface S1** : c'est l'interface intermédiaire entre le réseau d'accès et le réseau coeur. Elle peut être divisée en deux interfaces élémentaires : Cette dernière consiste en S1-U(S1- Usager) entre l'eNodeB et le SGW et S1-C(S1- Contrôle) entre l'eNodeB et le MME.

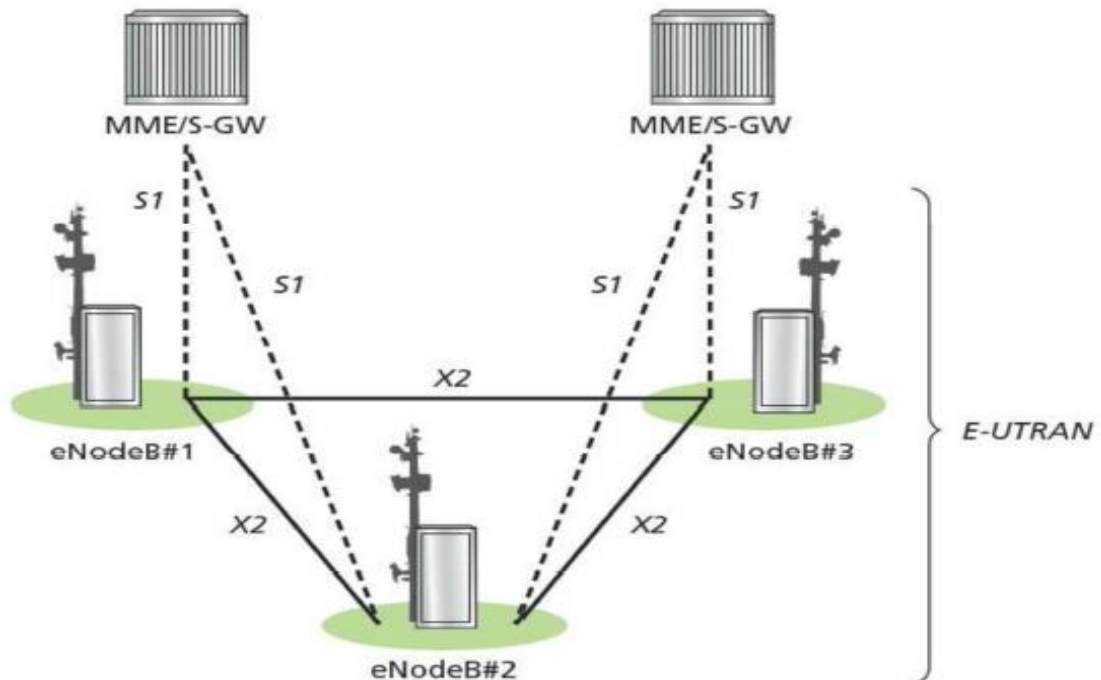


Figure II.3 : Les interfaces du réseau d'accès.

Figure 11 : Les interfaces du réseau d'accès.

II.4.3 Réseau coeur EPC (*Evolved Packet Core*)

L'UE communique avec l'EPC par le biais de l'E-UTRAN. Lorsqu'un UE est allumé, l'EPC est responsable de l'authentification et l'établissement de la connexion initiale nécessaire pour toute la communication qui s'en suit. A la différence de l'UMTS, le LTE a une architecture dite toute IP, qui supporte uniquement les données à commutation par paquets (PS).

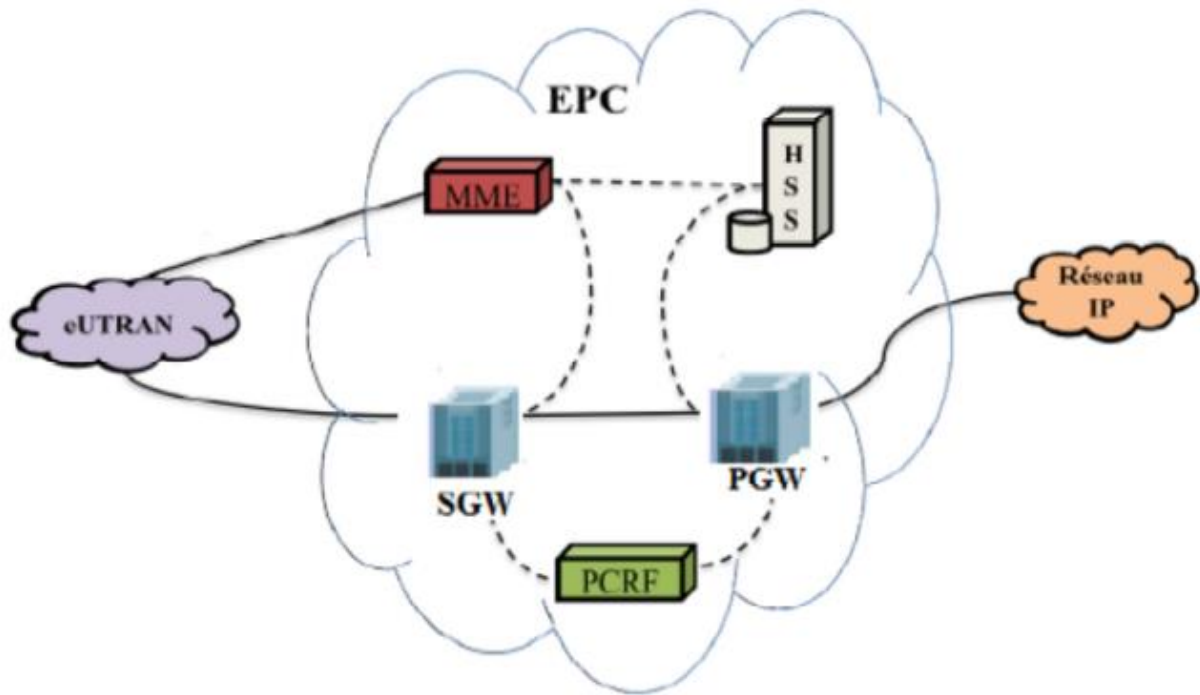


Figure II.4 : Architecture de l'EPC (Evolved Packet Core).

Figure 12 : Architecture de l'EPC (Evolved Packet Core).

Les principales entités de l'EPC ainsi que nous avons pu l'observer dans les figures précédentes sont : MME, S-GW, PDN-GW, PCRF et HSS. Les fonctions de ces entités sont décrites de la façon suivante :

- **Mobility Management Entity(MME)** : Cette partie est responsable de la localisation et du suivi du terminal mobile (UE) entre les appels et de la sélection d'un bon S-GW (Serving-GetWay) dans la connexion. Puisqu'il atteint le dernier point de protection par codage, c'est le point où l'interception de la signalisation est rendue efficace. De cette manière, le signal entre le UE (Utilisateur Equipment) et le réseau central est contrôlé pour assurer l'établissement, la maintenance et l'expansion des supports de service sans fil.
- **Serving Gateway(SGW)** : La passerelle de service SGW, est un élément plan de données au sein de LTE/SAE. Son objectif principal est de gérer la mobilité du plan utilisateur, elle agit également comme une frontière principale entre le RadioAccess Network, RAN et le réseau coeur. La SGW maintient également les chemins de données entre les eNodeBs et les passerelles PDN. De cette façon le SGW forme une interface pour le réseau de données par paquets à l'E-UTRAN. Aussi quand les UEs se déplacent dans les régions

desservies par des eNodeBs différentes, la SGW sert de point d'ancrage de mobilité veillant à ce que le chemin de données soit maintenu.

- **PDN Gateway (PGW)** : la passerelle LTE/SAE PDN assure la connectivité pour l'UE à des réseaux de paquets de données externes, remplissant la fonction d'entrée et de sortie pour les données UE. L'UE peut disposer d'une connectivité avec plus d'un PGW pour l'accès à des PDNs multiples.

- **Home Subscriber Server (HSS)** : Avec la technologie LTE, le HLR est réutilisé et renommé HSS. Le HSS est donc un HLR évolué qui contient l'information de souscription pour les réseaux GSM, GPRS, 3G, LTE, et IMS. A la différence de la 2G et de la 3G où l'interface vers le HLR est supportée par le protocole du monde SS7, MAP, l'interface S6 s'appuie sur le protocole du monde IP, DIAMETER. Le HSS est une base de données qui est utilisée simultanément par les réseaux 2G, 3G, LTE/SAE et IMS qui appartiennent au même opérateur. Il supporte donc les protocoles MAP (2G, 3G) et DIAMETER (LTE/SAE, IMS).

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

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

- ✓ La première est de gérer la qualité de service **QoS** que requiert le réseau et alloue en conséquence les porteuses Bearer appropriées.

- ✓ La deuxième tâche se rapporte principalement à la tarification. En effet, le **PCRF** gère les politiques de facturation qui doivent être prises en compte par le **PDN-GW** et applicables en fonction des actions de l'utilisateur.

II.5 Architecture en couches

II.5.1 Les protocoles de l'interface Radio

L'interface radio se distingue de la transmission directe par le coût et la rareté du spectre, ainsi que par le taux d'erreur extrêmement élevé de la transmission. En raison de ces caractéristiques, la pile de protocoles de l'interface radio est assez spécifique. Elle est composée de plusieurs couches. Le **LTE** fonctionne en couches entre les utilisateurs, les **eNodeBs** et les **MMEs** (Mobile Management Entity)[16].

➤ **La couche Physique (PHY)**

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

➤ **La couche liaison de données**

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

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

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

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

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

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

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

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

Gérant tout type d'applications non traitées au niveau de l'eNodeB (exemple Tarification)[17].

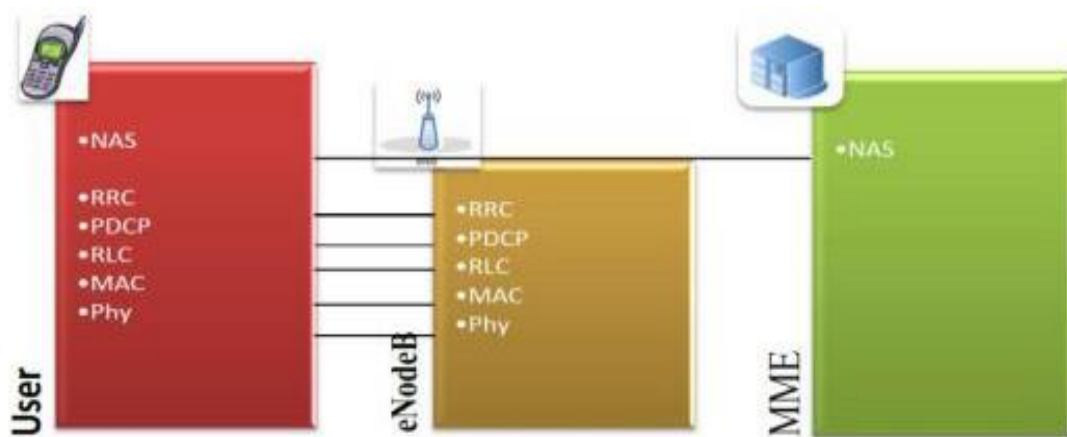


Figure II.5: Pile protocolaire

Figure 13 : Pile protocolaire[17]

II.6 Les caractéristiques fondamentales de la 4G

La **4G** permet effectivement d'avoir des performances de **Qos** très fiables, en citant par la suite quelques paramètres[18]:

II.6.1 Débits et fréquences du réseau 4G

L'évolution des débits suit un schéma similaire à celui de la puissance de calcul. Chaque nouvelle technologie de réseau mobile augmente les débits et crée un besoin de débits encore plus élevées. Il était également clair en 2004 que LTE offrirait des débits de données extrêmement élevés. Outre les contraintes de capacité, les données envoyées à l'utilisateur final dépendent également de sa situation radio, c'est-à-dire de sa localisation dans la cellule, du mécanisme de transmission utilisé et des ressources spectrales disponibles.

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

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

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

II.6.2 Latence

➤ Latence du plan de contrôle

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

➤ Latence du plan usager

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

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

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

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

II.6.3 L'agilité en fréquence

Pour s'adapter aux différentes attributions de spectre, le LTE doit pouvoir fonctionner sur des porteuses de différentes longueurs. Les exigences de bande passante d'origine ont ensuite été réduites à 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz dans les directions amont et aval. Ainsi que dans les directions de liaison descendante.

II.6.4 Codage et sécurité

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

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

II.6.5 Multiplexage

Les normes **LTE** prévoient un fonctionnement bi mode, notamment le multiplexage par répartition en fréquence (**FDD**) et le multiplexage par répartition temporelle (**TDD**). La transmission et la réception se font à des fréquences distinctes en mode **FDD** (Frequency Division Duplexing). Le mode **TDD** implique la transmission et la réception sur la même fréquence mais à des moments différents. Le premier mode (**FDD**) est au centre de l'appel à candidatures français. C'est aussi celui utilisé dans les équipements de télécommunications aujourd'hui, et dans la plupart des premiers réseaux **4G LTE** autorisés. Le second mode (**TDD**) utilise des bandes de fréquences distinctes qui seront attribuées ultérieurement.

II.6.5.1 Structure d'une trame LTE

La durée des trames génériques **LTE** est de 10 millisecondes. Elles sont séparées en dix sous-trames, dont chacune a une durée de 1,0 ms. Chaque sous-trame est divisée en deux créneaux, soit un total de 20 créneaux allant de 0 à 19. Selon que le préfixe cyclique conventionnel ou étendu est utilisé, un slot est composé de 6 ou 7 symboles **OFDM** [19].

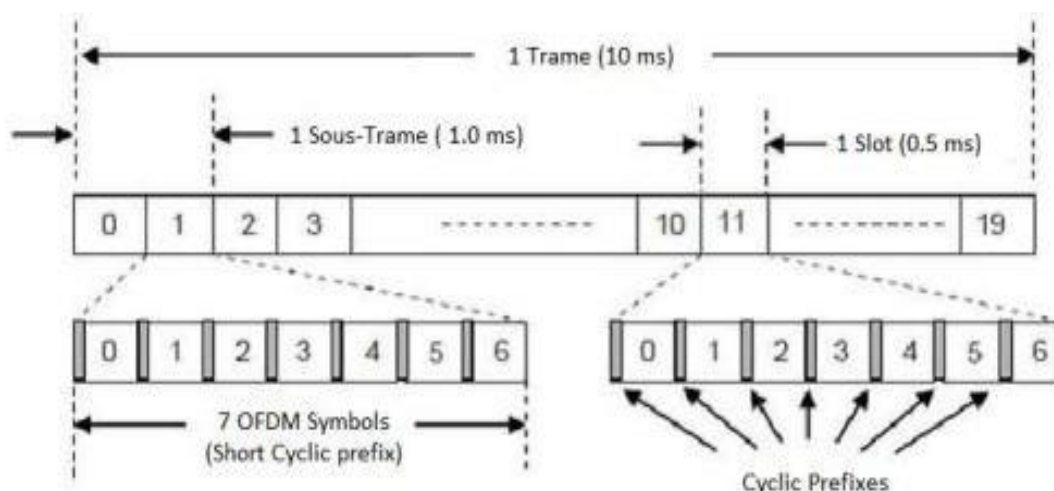


Figure II.6 : Structure générique de la trame LTE

Figure 14 : Structure générique de la trame LTE[19].

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

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

a. Structure de type 1 : FDD

FDD (Frequency Division Duplex) est une technique de duplexage utilisée dans les communications sans fil. Les données sont envoyées et reçues à des fréquences différentes ; en d'autres termes, la fréquence de la porteuse du signal change en fonction de la direction de la liaison (montante ou descendante). La technologie permet la transmission et la réception simultanées, ce qui est son principal avantage par rapport à l'autre technologie principale de duplexage, **TDD** (Time Division Duplexing).

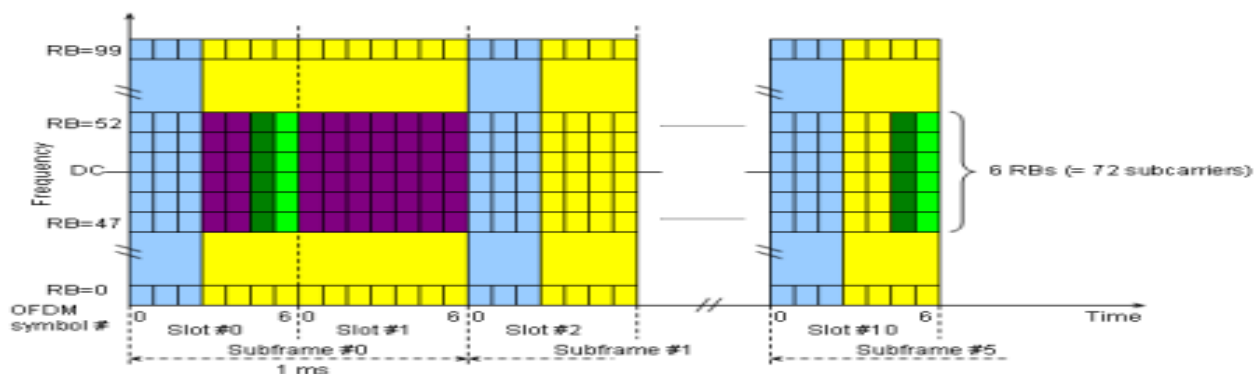


Figure II.7 : Structure de la trame radio FDD

Figure 15 : Structure de la trame radio FDD

Avec le **FDD**, la trame entière est alternativement dédiée à la réception et l'émission. La trame radio **FDD** offre un logement composé de 7 symboles **OFDM**.
La Figure II.9 présente le duplexage **FDD**.

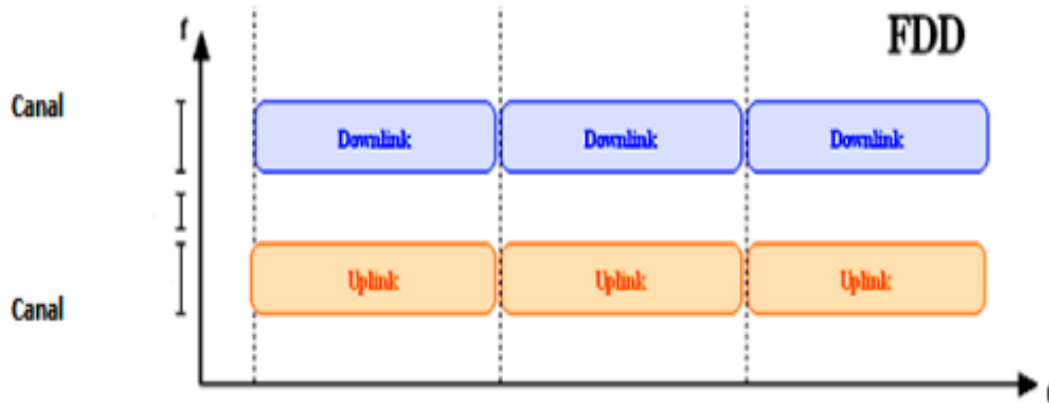


Figure II.8 : présente le duplexage FDD

Figure 16 : présente le duplexage FDD

b. Structure de type 2 : TDD

TDD est une technique qui permet à un canal de communication (tel qu'un canal radio) utilisant les mêmes ressources de transmission de diviser la transmission et la réception dans le temps. Cette approche présente des avantages évidents lorsque les débits de transmission et de réception sont différents et non égaux. Plus ou moins de bande passante peut être fournie selon l'augmentation ou la diminution du taux de transfert.

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

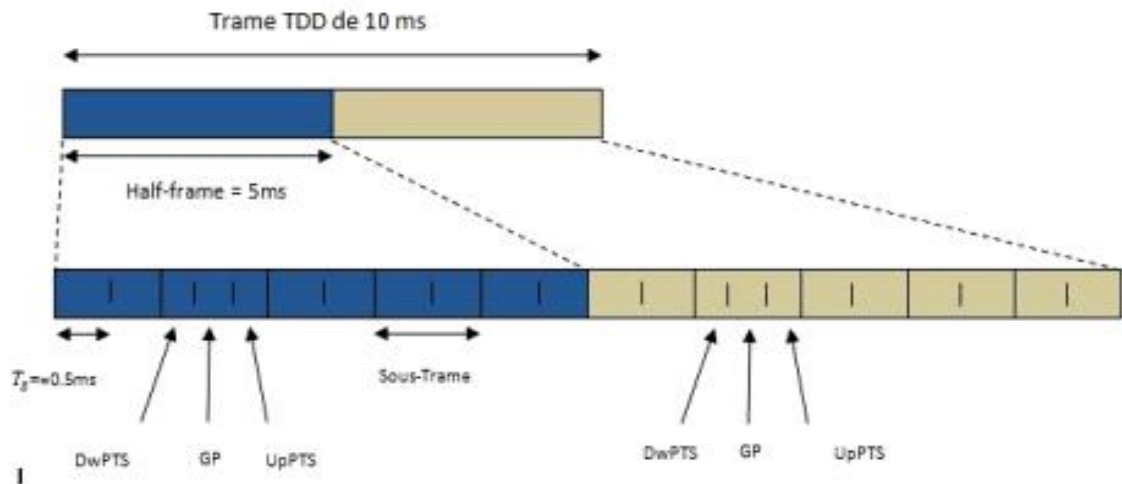


Figure II.9 : présente la trame TDD

Figure 17 : présente la trame TDD

Elle a la même durée qu'une trame **LTE** en mode **FDD**, c'est-à-dire 10 ms avec 10 sous-trames de 1 ms, à l'exception des sous-trames (1) et (2), qui contiennent des données de signalisation et Sont [17]:

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

II.6.6 La Mobilité

La mobilité d'un réseau mobile est une fonction essentielle. Le **LTE** entend maintenir la fonctionnalité pour les **UE** se déplaçant à grande vitesse (jusqu'à 350 km/h, voire 500 km/h selon la bande de fréquences), tout en étant optimisé pour les faibles vitesses des **UE** (entre 0 et 15 km/h). Les services en temps réel tels que la voix doivent être fournis avec le même degré de qualité que dans la version 6 de l'**UMTS**[11].

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

II.6.6.1 Le Handover

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

- a. **Hard Handover** : le terminal est servi par une seule station de base.

b. **Soft Handover** : le terminal est servi par toutes les stations de base.

II.6.7 Modulation adaptative et codage

La modulation et le codage adaptatifs (AMC) sont une stratégie opportuniste qui tend à changer la technique de modulation et de codage en fonction de l'état du canal. Le type de modulation pris en charge par LTE est: QPSK, 16QAM, 64QAM. Voir le **Figure II.11**[17] :

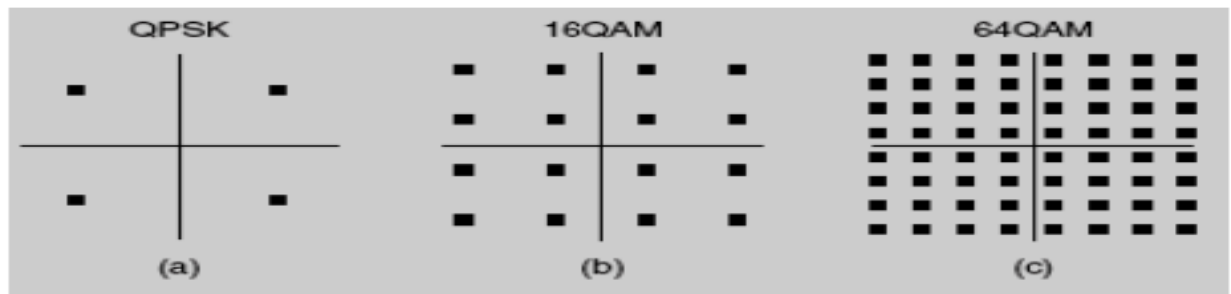


Figure II.10 : Modulation LTE

Figure 18 : Modulation LTE

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

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

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

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

II.6.8.1 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

L'objectif de l'**OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est de distribuer le signal numérique sur un grand nombre de sous-porteuses

orthogonales, avec un préfixe cyclique ajouté entre les signaux **OFDM** pour éviter les interférences[20].

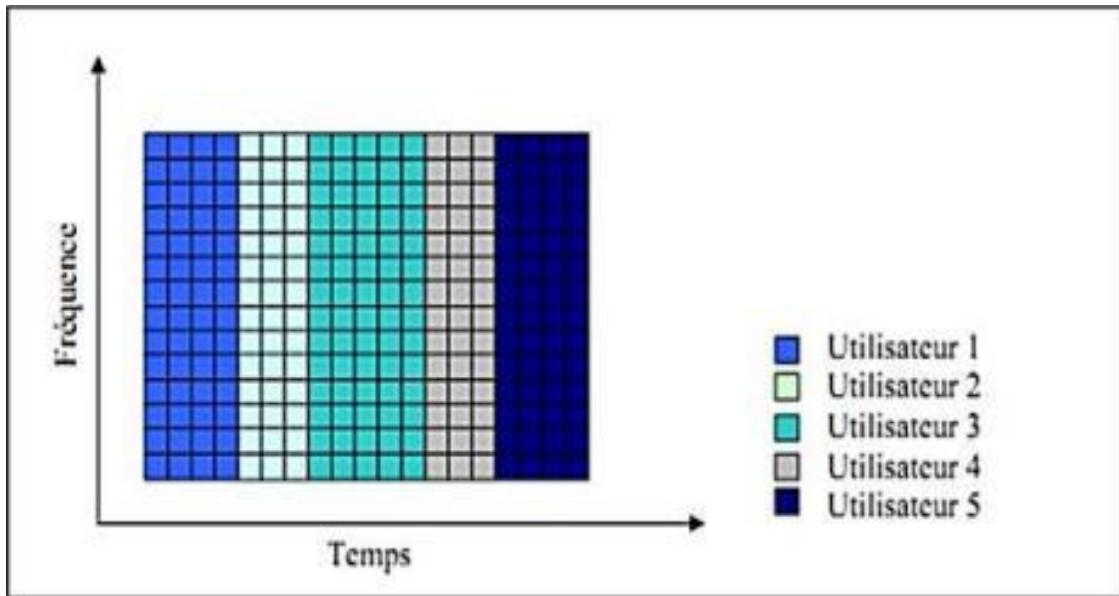


Figure II.11 : Technique OFDM

Figure 19 : Technique OFDM[17]

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

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

Le principe de l'**OFDMA** est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ce qui permet, pour un même débit global[17]

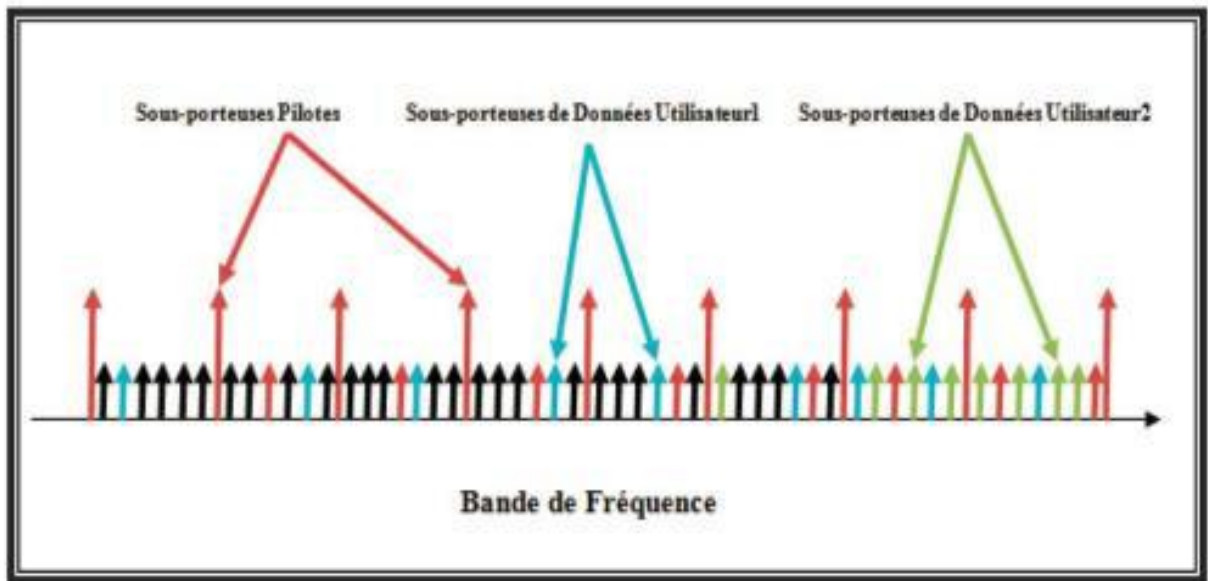


Figure II.12 : Les porteuses de l'OFDMA

Figure 20 : Les porteuses de l'OFDMA

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

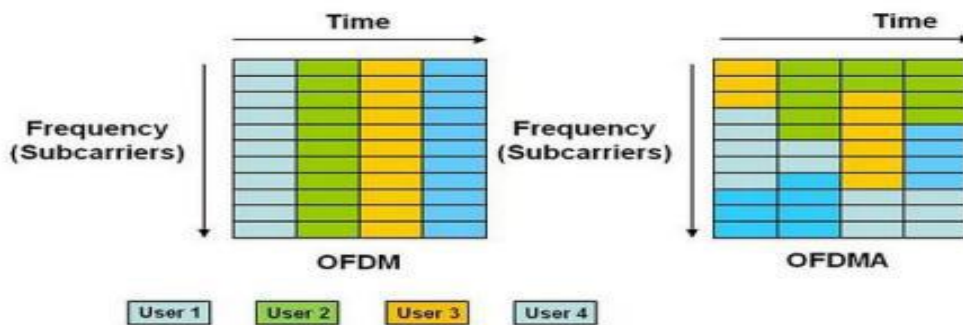


Figure II.13 : La différence entre OFDM et OFDMA

Figure 21 : Les porteuses de l'OFDMA[17]

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

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

Comme avec d'autres technologies de schéma d'accès multiple, l'objectif est d'allouer et de partager des ressources radio communes (bandes de fréquences) entre plusieurs utilisateurs. Le codage **SC-FDMA** est une variation linéaire du codage **OFDM** et **OFDMA**.

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

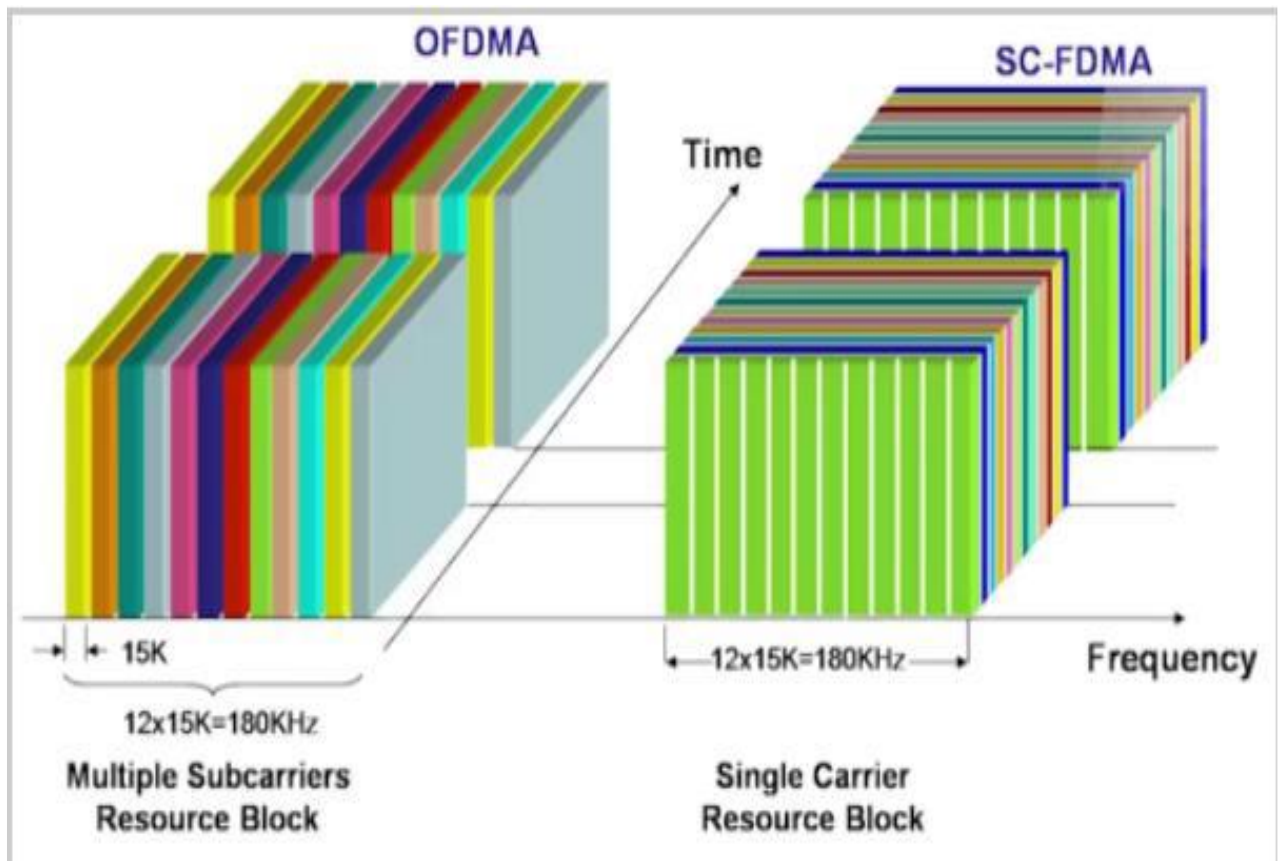


Figure II.14 : La différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.

Figure 22 : La différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA.

II.7 Inconvénients et avantages de LTE

Les premiers essais ont montré la capacité de la technologie à générer des vitesses de déplacement extrêmement rapides dans des environnements fixes et mobiles. La technologie devrait permettre aux opérateurs d'optimiser la consommation de spectre, de minimiser les coûts d'exploitation et de fournir aux consommateurs une latence faible, ultra élevée et un débit ultra élevé.

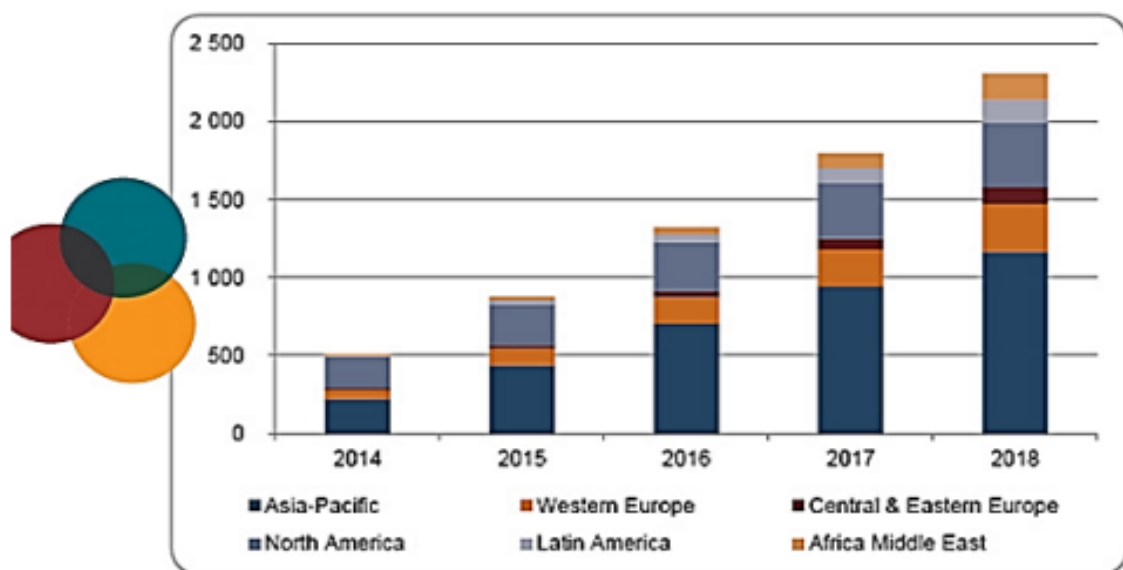
Selon les normes **3GPP**, **LTE** doit être en mesure de fournir des vitesses de téléchargement de 100 Mbps et des vitesses de téléchargement de 50 Mbps. Cependant, tous les obstacles techniques n'ont pas été surmontés, y compris l'attribution des ressources spectrales. Pour répondre à la demande, **l'UIT-R** estime qu'il faut actuellement 1 GHz de spectre alloué aux communications mobiles.

II.8 La 4G dans le Monde

Plusieurs études menées par des organisations telles que **GFK**, Médiamétrie et **IDC** montrent que les données haut débit mobiles mondiales continuent de croître rapidement, reflétant la tendance à la hausse des ventes de smartphones. **L'IDATE** (Institut De L'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe) a publié son Bilan 2014, qui comprend un bilan des principales évolutions du marché mobile mondial, des réseaux, des terminaux et des services, ainsi que des estimations pour **4GLTE** 2018.

L'IDATE estime qu'il y avait 500 millions d'abonnements 4G dans le monde fin 2014, soit 7% de toutes les SIM actives. L'IDATE et l'IDATE estiment que le nombre d'abonnements LTE atteindre 2,3 milliards, toujours un abonnement mondial (29% de toutes les SIM).

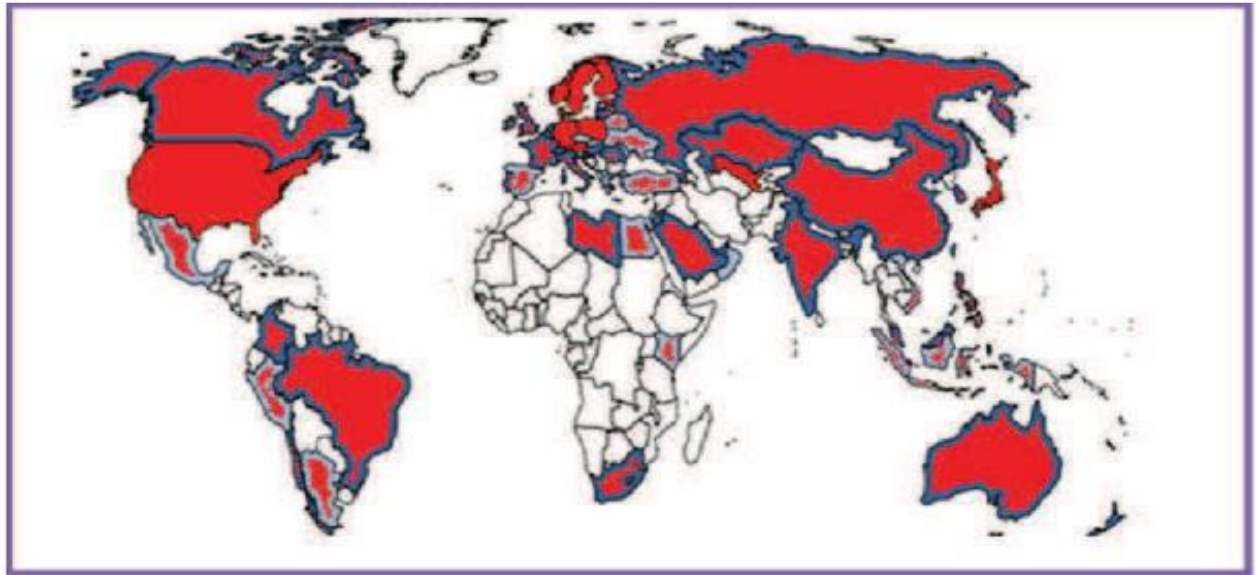
Avec les USA et l'Asie qui ont un déploiement de la 4G plus mature, ce sont bien sûr les pays européens et les pays africains qui auront la plus forte progression dans les années à venir.



Source: IDATE, in *World LTE market*, December 2014

Figure II.15 : Les marchés 4G et 4G+ dans le monde

Figure 23 : Les marchés 4G et 4G+ dans le monde



 Pays avec réseaux commerciaux de 4G

Figure II.16 : Déploiement de la 4G dans le monde

Figure 24 : Déploiement de la 4G dans le monde

Bien que la 5G ait élargi son champ d'action, la 4G reste très populaire, même dans les années à venir.

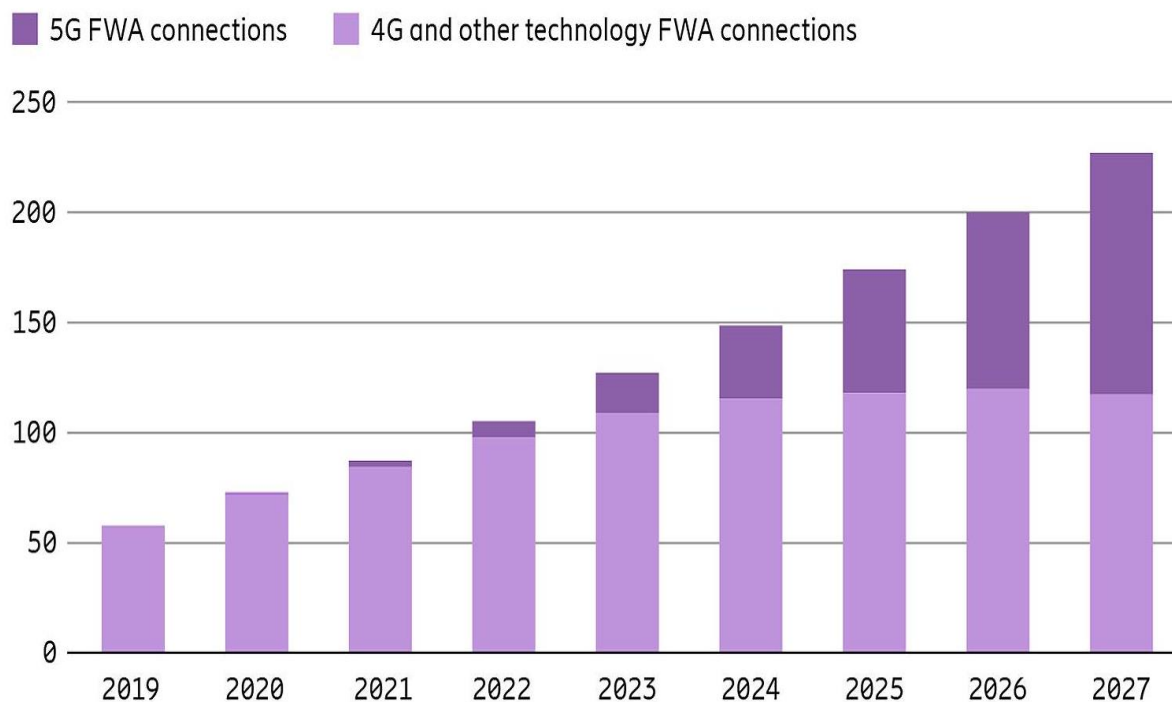


Figure II.17 : Division de la propagation des réseaux (millions)

Figure 25 : Division de la propagation des réseaux (millions)

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivons les nombreux composants et fonctionnalités de la technologie **LTE** (quatrième génération) pour présenter le langage utilisé dans la technologie.

Le chapitre suivant décrit les performances de qualité de service (**QoS**) de la technologie **LTE**. Par conséquent, nous discuterons de leurs nombreuses interactions.

Chapitre III

Généralités sur la Qualité de Service

III.1 Introduction

L'un des enjeux majeurs pour les opérateurs de téléphonie mobile est d'élever leur niveau de sensibilisation. Pour L'objectif est de rassembler autant d'abonnés (capacité) que possible pour augmenter la capacité. Augmentez vos revenus tout en offrant une meilleure qualité de service (QoS) et des performances supérieures En facilitant l'utilisation de nouveaux types tels que la voix sur IP, la visiophonie et la vidéo streaming... Ces nouveaux usages incitent à une utilisation plus intensive du réseau. Ce chapitre donne un aperçu de la capacité et de l'état de l'art en matière de capacité. Différentes technologies sont estimées et prises en compte pour la qualité de service dans les réseaux LTE. Augmentez la capacité et impactez la qualité de service des réseaux 4G/LTE.

L'objectif principal d'un opérateur est d'obtenir le maximum d'abonnés pour augmenter son chiffre d'affaires ; par conséquent, chaque opérateur mobile doit se concentrer sur les besoins de ces clients afin d'augmenter sa pénétration ; ainsi, il doit se soucier d'améliorer son réseau (couverture) et des paramètres de qualité de service (débit, latence).

L'objectif principal de tout réseau, que ce soit dans les télécommunications, l'informatique ou autre, est de fournir des performances optimales. Pour cela, le taux de qualité de service doit être au moins aussi élevé que le standard de l'utilisateur pour le garder pleinement satisfait.

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

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

Dans une connexion entre un émetteur et un récepteur, la capacité à transmettre un certain nombre de paquets dans de bonnes conditions s'appelle la Qualité de Service (QoS), qui peut s'exprimer de différentes manières, notamment par la disponibilité, le débit, les délais de transmission, la gigue, le taux de perte de paquets, etc.

La qualité de service (QoS) désigne l'utilisation de mécanismes ou de technologies sur un réseau afin de contrôler le trafic et garantir la performance des applications essentielles malgré une capacité réseau limitée. Cela permet aux organisations de gérer leur trafic réseau de manière sélective en privilégiant certaines applications à haute performance.

La qualité de service est généralement appliquée aux réseaux qui transportent du trafic pour des systèmes gourmands en ressources. Les services courants qui en ont besoin incluent la télévision sur protocole Internet (IPTV), les jeux en ligne, le streaming, la vidéoconférence, la vidéo à la demande (VOD) et la voix sur IP (VoIP).

Avec la QoS, les entreprises peuvent optimiser les performances de plusieurs applications sur leur réseau et surveiller les aspects tels que le débit, le délai, la gigue et le débit des paquets de leur réseau. Cela leur permet de gérer le trafic sur leur réseau et de modifier la façon dont les paquets sont acheminés vers Internet ou d'autres réseaux pour éviter les retards de transmission. Ainsi, elles peuvent garantir la qualité de service attendue pour les applications et offrir les expériences utilisateur souhaitées.

III.3 Le But de la QoS

La qualité de service (QoS) a pour objectif d'optimiser les ressources du réseau et de garantir des performances optimales des applications. Elle joue un rôle essentiel dans la satisfaction des utilisateurs en leur offrant des débits et des temps de réponse adaptés aux protocoles utilisés au niveau de la couche réseau.

La QoS permet aux fournisseurs de services de définir explicitement avec leurs clients les caractéristiques de transit des données applicatives sur leurs infrastructures IP.

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

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

En résumé, la QoS vise à répondre aux besoins spécifiques des différentes applications et utilisateurs en offrant des performances optimales adaptées aux exigences de chaque service. Elle constitue un pilier fondamental pour assurer une expérience utilisateur de haute qualité dans les réseaux.

III.4 Les Paramètres de la QoS

La qualité de service au sein d'un réseau spécifique est évaluée en considérant les divers éléments qui le composent ainsi que le flux de trafic qu'il supporte. Dans ces réseaux, on observe une utilisation croissante d'applications multimédia telles que la voix sur IP ou la vidéo à la demande, en plus des applications traditionnelles. Ces applications multimédia requièrent un niveau minimal de qualité de service en ce qui concerne des aspects tels que la bande passante, le délai, la variation de délai (gigue) et le taux de perte de paquets. Afin de garantir ces exigences, une évaluation précise est nécessaire.

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

III.4.1 Le débit

Il définit la quantité maximale de transfert d'informations (bits) qui peut être réalisée par unité de temps (s) dans la communication entre un émetteur et un récepteur.

III.4.2 Le taux de perte

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

III.4.3 Le délai de transit (Latence)

C'est le temps qu'il faut à un paquet de données pour voyager d'un bout à l'autre du réseau. De par leur nature, de nombreuses applications disponibles sur ce réseau n'auront pas le même niveau d'exigence : faible dans le cas de messages électroniques ou de fichiers transférés, élevé dans le cas de données "voix". La latence est déterminée par le délai de propagation (selon le type de support de transport), le temps de traitement (selon le nombre d'appareils traversés) et la taille des paquets (temps de sérialisation).

III.4.4 La Gigue (Jitter ou Delay variation)

Elle exprime la variance du délai de transmission en millisecondes (ms) (latence des paquets). L'existence de la gigue dans les flux peut être causée par les fluctuations de l'intensité du trafic sur les connexions de sortie des commutateurs ; plus largement, elle est déterminée par le volume du trafic et le nombre de dispositifs sur le réseau.[21]

III.4.5 La bande passante

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

➤ Le mode "burst" est un mode immédiat, qui monopolise toute la bande passante disponible (par exemple lors d'un transfert de fichier).

➤ Le mode "stream" est un mode constant, plus adapté aux fonctions audio/vidéo ou aux applications interactives.

III.4.6 Priorité des paquets

Afin de résoudre le dilemme entre les modes "burst" et "streaming" mentionnés précédemment, il est possible d'implémenter une gestion du trafic soit au sein du réseau lui-même, soit à ses extrémités. Dans le cas où la gestion se fait à l'intérieur du réseau, les nœuds de ce réseau jouent un rôle de classification et de priorisation des paquets qui y transitent. En revanche, si la gestion est effectuée à l'extérieur, les équipements du réseau sont libérés de toute responsabilité quant à la Qualité de Service (QoS). Dans ce cas, deux mécanismes sont utilisés :

D'une part, le contrôle de débit TCP qui ajuste le débit des applications TCP en fonction de la charge du réseau et de la priorité des applications; d'autre part, la mise en place de files d'attente personnalisées qui acheminent les flux entrants vers les files d'attente correspondantes.

III.5 Les critères utilisés 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

III.6 La gestion de la qualité de service

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

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

Or actuellement le protocole IP assure le même traitement pour tous les paquets qu'il voit transiter (notamment dans l'Internet), sans tenir compte des spécificités des applications émettrices, ni de leur contraintes (en bande passante, délai..) : il s'agit du fameux BEST EFFORT.

Voilà pourquoi depuis la fin des années 1980, l'IETF a lancé des travaux en vue de combler ce talon d'Achille d'IP. Cela s'est traduit par la constitution de deux groupes de travail, qui ont mis au point deux modèles de gestion de la qualité de service (ou QoS, Quality Of Service) que nous allons vous présenter : le modèle INTSERV, et le modèle DIFFSERV.[\[22\]](#)

III.6.1 Le modèle IntServ

Le modèle IntServ est basé sur la réservation préalable des ressources nécessaires à travers tous les nœuds du réseau avant de permettre le transit des flux. Cette approche repose sur l'utilisation du protocole RSVP (Resource Reservation Protocol), qui introduit une couche de contrôle d'admission supplémentaire pour vérifier la disponibilité de la bande passante requise à un instant donné. Dans le modèle IntServ, les routeurs doivent maintenir des tables pour enregistrer l'état de chaque flux et les allocations de ressources correspondantes. Cette approche vise à offrir une garantie de qualité de service (QoS) en réservant et en gérant précisément les ressources pour chaque flux.

III.6.2 Le modèle DiffServ

Le modèle DiffServ (Differentiated Services) est un protocole qui assigne des priorités à un champ de l'en-tête IP appelé DSCP (DiffServ Control Protocol). Il permet une gestion différenciée des classes de services en mettant en place des files d'attente prioritaires dans les routeurs pour chaque classe de trafic. Contrairement au modèle IntServ, le modèle DiffServ ne vise pas à garantir une QoS absolue, mais plutôt à améliorer le service Best-Effort en offrant une garantie de QoS relative. L'approche DiffServ simplifie le déploiement et l'exploitation du réseau en fournissant une gestion différenciée du trafic sans nécessiter une réservation préalable des ressources pour chaque flux individuel.

L'utilisation des modèles IntServ et DiffServ offre différentes approches pour la gestion de la qualité de service dans les réseaux IP. Alors que le modèle IntServ vise à fournir des garanties de QoS strictes en réservant spécifiquement les ressources pour chaque flux, le modèle DiffServ se concentre sur une gestion différenciée du trafic en utilisant des priorités pour améliorer le service Best-Effort. Le choix entre ces deux modèles dépend des besoins spécifiques du réseau et des exigences en matière de QoS.

III.7 La notion de Bearer

Les ressources de traitement au sein de n'importe quel nœud de réseau sont limitées et partagées entre les utilisateurs. Entre utilisateurs Selon la nature et la technologie du réseau, il peut être difficile et coûteux pour les opérateurs d'augmenter ces ressources. Par exemple, les ressources radio (spectre) sont très coûteuse dans les réseaux mobiles.

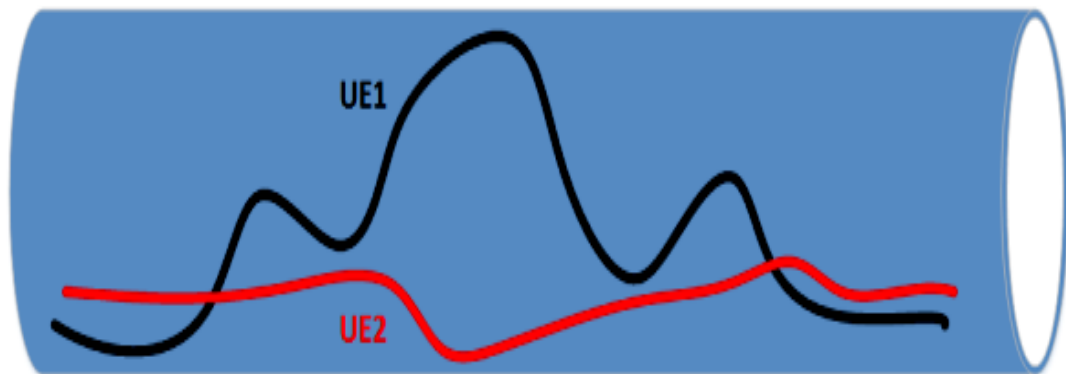
Cette préoccupation a conduit à rechercher des stratégies visant à optimiser l'utilisation de ces ressources sur l'interface radio, ainsi que sur d'autres interfaces réseau incluses dans l'**UE-Network User Plan**. Ces algorithmes de **QoS** s'efforcent de fournir aux utilisateurs un service satisfaisant tout en limitant les ressources nécessaires pour y parvenir.

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

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

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

1. Sans mécanismes de QoS, l'UE2 subit les variations de trafic de l'UE1



2. Avec des mécanismes de QoS: l'UE2 peut avoir un débit garanti, l'UE1 ne peut monopoliser toute la bande passante

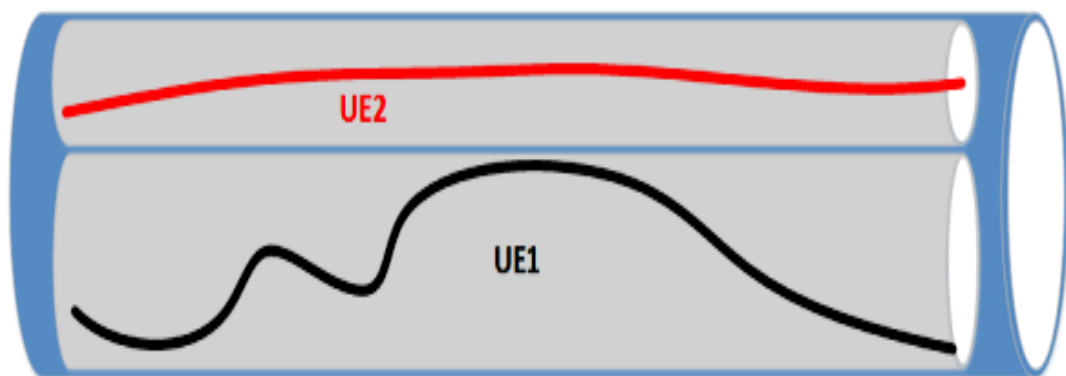


Figure III.1: Besoin de mécanismes de QoS lors d'un accès à des ressources partagées

Figure 26 : Besoin de mécanismes de QoS lors d'un accès à des ressources partagées[18].

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

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

- L'interface radio, entre l'UE et l'eNodeB ;
- L'interface **S1** entre **E-UTRAN** et le réseau coeur **CN** ;
- Les interfaces du réseau coeur[18].

III.8 Efficacité QoS

Ces applications avec des exigences de qualité de service peuvent être utilisées sur les réseaux LTE. Puisqu'il s'agit d'un réseau tout paquet, il faut trouver un moyen de différencier les flux de paquets en fonction des exigences de QoS.

Un flux QoS appelé « support EPS » est formé entre UE et P-GW : il s'agit d'un support radio qui transmet des paquets de support EPS entre UE et eNB, comme le montre la Figure III.2.

Chaque flux IP est affecté à un support EPS distinct et le réseau détermine la priorité du trafic. Lorsque P-GW reçoit un paquet IP d'Internet, il le classe selon des paramètres prédéterminés et le transmet au support EPS approprié.

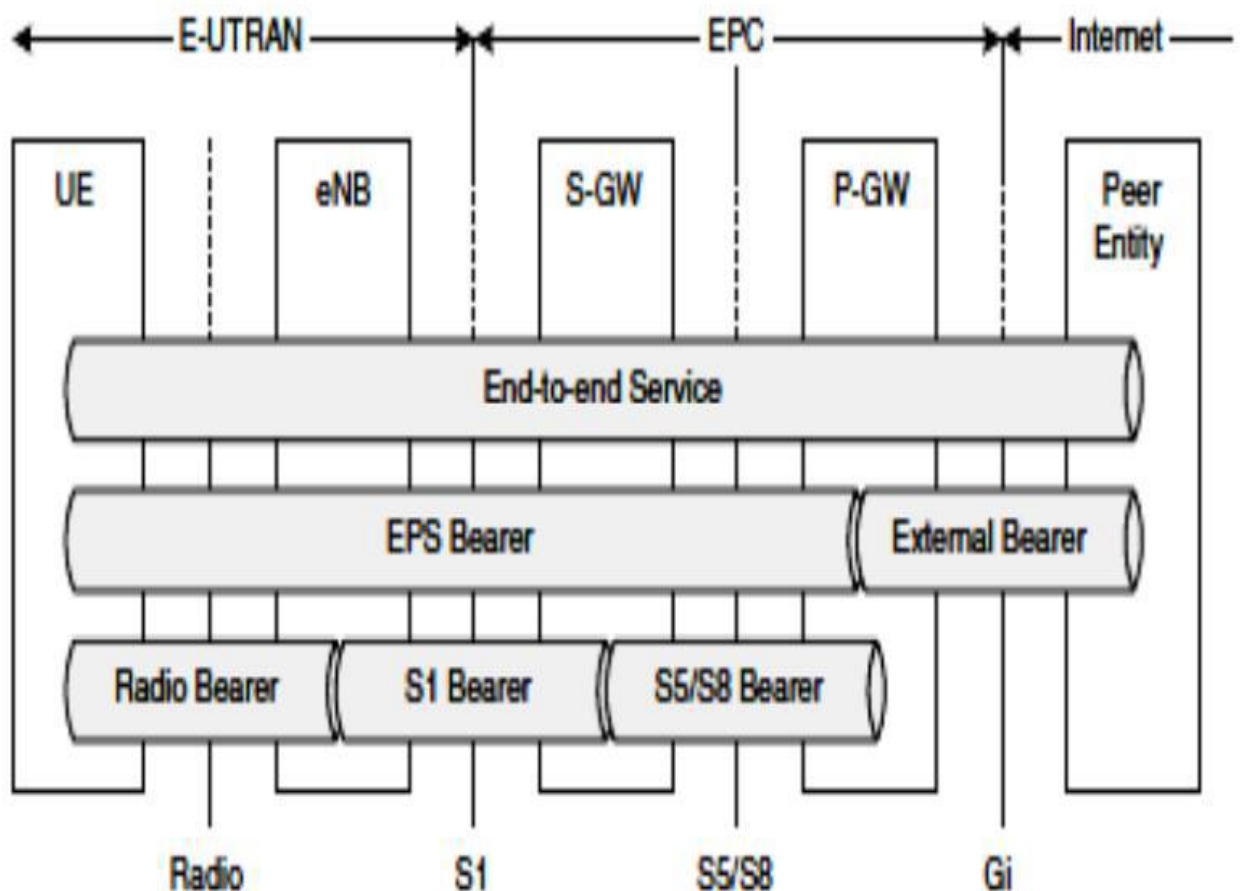


Figure III.2: EPS Bearers

Figure 27 : EPS Bearers

III.9 Qualité de service en LTE/EPC

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

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

Le terme "**Bearer**" fait référence à une notion virtuelle qui est une collection de configurations de réseau qui offrent un traitement unique à un certain groupe de trafic. Les paquets de voix sur IP, par exemple, sont traités en priorité par le réseau par rapport à l'activité du navigateur Web[23].

Dans les réseaux **LTE**, la **QoS** est appliqué sur les Radio **Bearer**, **S1Bearer** et **S5/S8 Bearer**, encore appelé **EPSBearer** (Evolved Packet System Bearer) comme le montre la **Figure III.3**.

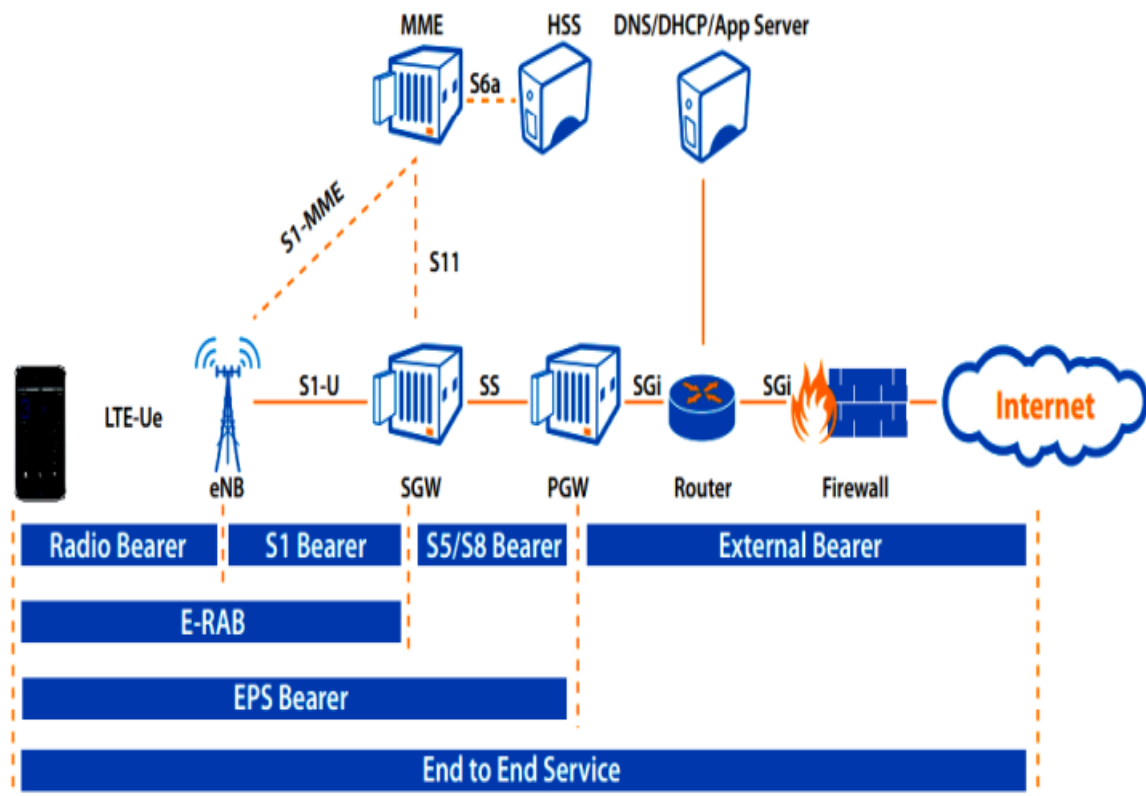


Figure III.3: QoS dans LTE/EPC

Figure 28 : QoS dans LTE/EPC

Il existe deux types de bearers EPS :

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

III.10 Les Performance des réseaux 4G

III.10.1 Une mobilité à toute épreuve

L'un des défis des réseaux mobiles est la disponibilité à tout moment et en tout lieu. A cet effet, les réseaux 4G sont conçus pour fonctionner aussi bien en zone dense qu'en zone rurale. Une cellule 4G peut couvrir un diamètre de 5 kilomètres dans les zones densément peuplées et s'étendre jusqu'à 100 kilomètres dans les zones les plus reculées.

III.10.2 Des temps de réponse rapides

L'utilisation d'une communication à un débit binaire plus élevé n'est pas optimale si les transferts de données se produisent sur une trop longue période de temps. La 4G offre une latence moyenne de 20 ms pour cela, et elle peut descendre en dessous de 5 ms.

III.10.3 La voix sur IP

La 4G fournit des services de voix sur IP. En fait, la norme est basée sur les réseaux de transport de paquets IP. La voix n'a pas de modes de routage à l'exception de VoIP.

III.10.4 Débit sur l'interface radio

Le point de départ de la 4G est une liaison descendante de 100 Mbit/s et une liaison montante de 50 Mbit/s. Compte tenu de l'attribution de la bande 20 MHz, l'interface radio E-UTRAN doit pouvoir supporter un débit descendant instantané maximum (du réseau au terminal) de 100 Mbit/s Direction de la liaison descendante et vitesse instantanée maximale de la liaison montante (du terminal au réseau) de 50 Mbit/s, en tenant également compte de l'attribution de la bande de 20 MHz. Les technologies utilisées sont OFDMA

(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour la liaison descendante et SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour la liaison montante. Cela correspond à une efficacité spectrale de 5 bit/s/Hz dans le sens aval et de 2,5 bit/s/Hz dans le sens amont.

Si l'on considère la bande de 5 MHz allouée au HSDPA de 14,4 Mbit/s, l'efficacité spectrale dans le sens de la liaison descendante est de 2,9 bit/s/Hz.

Avec la 3G il est nécessaire d'allouer une bande de fréquence de 5 MHz. Avec la LTE, il est possible d'opérer avec une bande de taille différente avec les possibilités suivantes : 1.4, 3, 5, 10, 15 et 20MHz, pour les sens descendant et montant. L'intention est de permettre un déploiement flexible en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer.

III.10.5 Connexion permanente

Le principe de l'accès haut débit, où la connexion est permanente, pour l'accès à Internet. Même si la connexion est permanente au niveau du réseau, les terminaux doivent passer de l'état IDLE à l'état ACTIVE lors de l'envoi ou de la réception de trafic. Ce changement d'état se produit en moins de 100 ms. Le réseau pourra recevoir du trafic de n'importe quel terminal connecté, puisque ce dernier dispose d'une adresse IP, stocker ce trafic en mémoire, effectuer une opération de paging pour localiser le terminal et lui demander de réserver des ressources pour pouvoir relayer son trafic.

III.10.6 Délai pour la transmission de données

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

III.10.7 Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G

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

III.10.8 Flexibilité dans l'usage de la bande

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

III.11 Exemples de Qualité de Service

À partir de ces quelques exemples, il est clair que les exigences de QoS peuvent varier. Par exemple, si vous distribuez de la vidéo à la demande, vous avez besoin d'une diffusion en temps quasi réel avec une très faible latence et une faible gigue ; mais de temps en temps, une image perdue ou une légère baisse de la qualité de l'image n'est pas dramatique.

En fonction de l'application, nous devons faire le meilleur compromis pour fournir la meilleure QoS car nous savons qu'aucune solution ne résoudra tous les problèmes en même temps.

Comme de plus en plus de bande passante est disponible pour les utilisateurs, les applications réseau évoluent constamment, ou plus précisément, de nouvelles applications sont apparues: les applications multimédia. On peut compter parmi ces applications : la téléphonie sur IP, la diffusion de musique, la vidéoconférence, la vidéo à la demande. Ces nouvelles applications étant gourmandes en ressources, les réseaux traditionnels doivent mettre en œuvre des mécanismes de QoS pour ces flux dits continus. Nous allons voir ici les contraintes de ces applications.

III.11.1 Contraintes communes aux applications multimédia

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

III.11.2 La téléphonie sur IP

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

III.11.3 La visioconférence

Pour la visioconférence, le débit est essentiel pour que la qualité de la vidéo soit suffisante et les contraintes en termes de délais sont identiques à celles de la voix sur **IP**. Il est en effet très gênant que l'image soit décalée du son ou que le média soit saccadé [24].

III.12 Conclusion

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

Le chapitre suivant sera consacré Pour découvrir l'environnement de simulation des scenarios

Chapitre IV

*Environnement de simulation des
scenarios*

IV.1 Introduction

NS3 est un simulateur réseau à événements discrets qui a acquis une grande renommée et est largement utilisé dans la communauté scientifique pour la recherche dans le domaine des réseaux. Grâce à ses fonctionnalités avancées et à sa flexibilité, NS3 offre un environnement puissant et fiable pour mener des expériences et des études approfondies sur les réseaux.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser au simulateur NS3.

IV.2 Le simulateur NS.3

Le simulateur NS-3 (Network Simulator 3) est un environnement de simulation open-source utilisé pour modéliser et simuler des réseaux de communication. Il est largement utilisé dans le domaine de la recherche et du développement de protocoles de communication, des réseaux sans fil, des réseaux ad hoc, des réseaux de capteurs, de l'Internet des objets (IoT) et d'autres domaines connexes.

NS-3 permet aux chercheurs et aux développeurs de créer des scénarios de réseau personnalisés, de tester et d'évaluer différentes configurations réseau, ainsi que de développer et de valider de nouvelles idées et protocoles. Il offre une grande flexibilité et une puissante capacité de modélisation pour simuler des réseaux complexes avec des détails précis.

NS3 est un simulateur réseau à événements discrets qui a acquis une grande renommée et est largement utilisé dans la communauté scientifique pour la recherche dans le domaine des réseaux. Grâce à ses fonctionnalités avancées et à sa flexibilité, NS3 offre un environnement puissant et fiable pour mener des expériences et des études approfondies sur les réseaux.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser au simulateur NS3.

IV.3 Description de NS3

Le simulateur de réseaux NS3 a été développé en 2006 par Thomas R. Henderson et Sumit Roy, tous deux étudiants à l'université de Washington. NS3 est un outil de recherche puissant qui permet d'étudier la conception, les interactions des protocoles et les problèmes de performance à grande échelle. Sa conception favorise les pratiques de développement de logiciels communautaires et open source, encourageant ainsi la participation de la communauté de recherche. Il a été conçu pour être évolutif, modulaire, bien codé et bien documenté. Son noyau et ses modèles sont écrits en C++, avec une interface de script en Python. Il est construit comme une bibliothèque qui peut être liée de manière statique ou dynamique à un programme principal en C++, définissant ainsi la topologie de la simulation et lançant le simulateur.

Le projet NS3 est distribué sous les termes de la licence GNU GPL v2 et s'efforce de maintenir un environnement ouvert permettant aux chercheurs de contribuer et de partager leurs logiciels. Pour son développement, le système NS3 utilise plusieurs composants de la "toolchain" GNU, tels que gcc, binutils GNU et gdb. Il fonctionne uniquement dans un environnement de type Linux. Pour les utilisateurs de Windows, il existe des environnements qui simulent l'environnement Linux à différents degrés (cygwin).

NS3 propose un support limité du script Python ainsi que certaines fonctionnalités de haut niveau, comme la visualisation. Il est possible de générer un ensemble de compilations pour permettre à un script Python d'interagir avec l'API de NS3, qui est normalement accessible à partir d'un script en C++.

IV.4 Modules du simulateur NS3

NS3 est une librairie C++ constitué d'un ensemble de modèles pour simuler des réseaux. Ces modèles sont implémentés en objets C++ enveloppés par python. Avant de commencer à écrire du code NS-3, nous devons expliquer quelques concepts de base qui sont couramment utilisés dans les réseaux et la signification qu'ils ont dans NS-3.

communément utilisés dans les réseaux et la signification qu'ils ont dans NS-3. Un dispositif qui se connecte à un réseau est appelé hôte ou point de système de bout en bout. Dans la NS-3 nous les appelons nœuds, car NS-3 n'est pas spécifiquement un simulateur d'Internet, et ils sont représentés en C++ par la classe Node. En C++ à partir de la classe Node et des méthodes fournies. Habituellement, ces dispositifs sont généralement séparés en logiciel système et en logiciel d'application. La figure suivante montre comment un nœud est divisé.

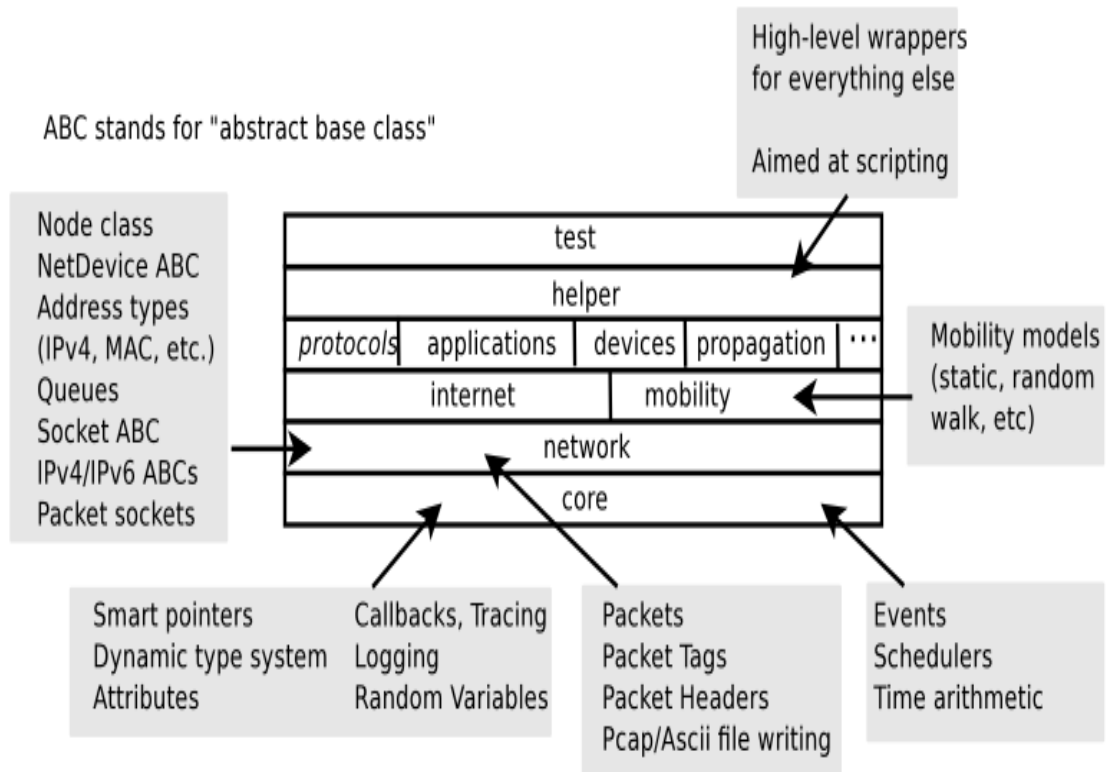


Figure IV.1: modules de NS3

Figure 29 : modules de NS3

Dans le NS-3, il n'y a pas de véritable concept de système d'exploitation et il n'utilise donc que le logiciel d'application(software).

Cette abstraction est représentée par la classe Application. La classe Application fournit des méthodes pour gérer notre version des applications au niveau de l'utilisateur ou pour utiliser les applications prédéfinies du NS-3 appelées Udp Echo Client Application et prédéfinies de NS-3 appelées Udp Echo Client Application et Udp Echo Server Application qui composent une paire d'applications client/serveur, utilisées pour générer et répercuter des paquets réseau simulés.

Dans le monde réel, un ordinateur peut être connecté à un réseau. Les supports sur lesquels circulent les informations circulent sont appelés canaux. Le sous-réseau de communication de base dans NS-3 est représenté par la classe Channel. La classe Channel contient également des méthodes pour gérer des objets de sous-réseau et y connecter des nœuds.

Si nous voulions connecter un ordinateur à un réseau, nous devrions acheter du matériel tel qu'un câble réseau ou une carte périphérique à installer dans notre ordinateur, appelée carte d'interface réseau (NIC). Les cartes d'interface réseau ne fonctionneront pas sans un pilote logiciel pour contrôler le matériel. NS-3 couvre les deux fonctionnalités en utilisant une classe nommée NetDevice. La classe NetDevice fournit des méthodes pour gérer la connexion aux nœuds et aux objets de canal. Il existe des versions spécialisées de NetDevice telles que CsmNetDevice, PointToPointNetDevice, et

WifiNetDevice, etc. La dernière classe qui nous aidera à mettre en place la topologie de notre réseau est celle des Topology Helpers. Les aides à la topologie nous aident à gérer les connexions entre les appareils, par exemple, l'attribution d'adresses IP à plusieurs appareils ou des opérations plus complexes, par exemple, la connexion de plusieurs appareils à des canaux multipoints, puis la connexion à des réseaux individuels réseaux individuels pour former des réseaux internet.

Core Module :

Il permet de créer une structure de classes hiérarchiques qui dérive de la classe Object de base. Ce module de base est indépendant.

Le module de base de NS3 joue un rôle central dans la simulation des réseaux et offre une interface de programmation riche permettant aux développeurs d'interagir avec les composants de NS3. Il offre des fonctionnalités avancées pour la création de topologies de réseau, la définition des comportements des nœuds et des canaux, la manipulation des paquets de données, la gestion des protocoles de communication, etc.

Common Module :

Il permet de gérer les actions liées à l'émission et à la réception des paquets. Centré sur la classe Paquets utilisé pour la simulation de réseau au niveau des paquets, son utilisation permet d'optimiser la gestion de la mémoire en utilisant la méthode copier/coller.

Ce module fournit des fonctionnalités et des utilitaires essentiels utilisés à travers différents modules de NS3, facilitant ainsi le développement et la réutilisation du code dans le simulateur de réseaux.

Simulator Module :

Il permet de gérer la simulation des événements, il prévoit explicitement la possibilité de planifier ces derniers à des moments différents et ensuite de les exécuter.

La classe Time représente le temps simulé à haute résolution en utilisant un entier de 128 bits, et cette classe est la classe la plus importante du simulateur.

Mobility Module :

Le module de mobilité dans NS3 permet de spécifier les positions des nœuds et d'associer des modèles de mouvement aux agents de la simulation. Il offre la flexibilité de définir des trajectoires et des comportements de mouvement réalistes pour les nœuds dans le réseau simulé. Les modèles de mobilité disponibles dans NS3 permettent de simuler différents scénarios, tels que la

mobilité aléatoire, les déplacements en ligne droite, les modèles de mobilité basés sur des traces réelles, etc. En utilisant le module de mobilité, les chercheurs peuvent étudier l'impact de la mobilité des nœuds sur les performances du réseau et évaluer l'efficacité des protocoles de routage et de communication.

Node Module :

La classe Node dans NS3 est un composant fondamental qui représente un nœud dans le réseau simulé. Chaque nœud peut contenir plusieurs NetDevices, qui sont attachés à des canaux virtuels pour l'envoi et la réception des paquets. De plus, un nœud peut abriter plusieurs gestionnaires de protocole qui traitent les paquets reçus par les NetDevices. Pour faciliter la simulation des communications, chaque nœud peut également contenir une liste d'applications qui génèrent et reçoivent des paquets. La classe Node joue donc un rôle central dans la construction des topologies de réseau et la définition des comportements des nœuds.

Helper Module :

Le module Helper de NS3 agit comme un wrapper de haut niveau, simplifiant la création de scénarios de simulation complexes et l'installation de différents modules dans les agents appropriés. Il fournit des classes d'assistance et des méthodes pour configurer rapidement des scénarios de simulation, notamment en créant des nœuds, en définissant les protocoles de communication, en paramétrant les modèles de mobilité et en ajoutant des applications. En utilisant le module Helper, les chercheurs peuvent gagner du temps et de l'effort dans la mise en place de simulations complexes et se concentrer davantage sur l'analyse des résultats.

Application Module :

NS3 propose également plusieurs applications intégrées qui peuvent être installées sur les nœuds de simulation. Ces applications, fournies par NS3, permettent de modéliser différents types de trafic et de comportements d'application. Elles peuvent être activées et désactivées à des moments spécifiques de la simulation, offrant ainsi un contrôle précis sur les interactions et les échanges de données entre les nœuds. Les applications intégrées dans NS3 facilitent la modélisation et l'évaluation des performances des protocoles de communication dans des scénarios variés.

Internet Stack Module :

Le module Internet Stack de NS3 englobe les classes qui définissent les protocoles TCP/IP des couches réseau trois et quatre. Ces protocoles incluent le protocole Internet (IP), le protocole de contrôle de transmission (TCP) et le

protocole de datagramme utilisateur (UDP), entre autres. En fournissant des classes et des méthodes pour la configuration et la gestion des protocoles TCP/IP, ce module permet aux chercheurs d'étudier en détail les performances et les comportements des protocoles de communication sur les réseaux simulés.

Devices Module :

Le module Devices de NS3 représente les périphériques réseau utilisés dans la simulation. Ces périphériques transmettent les paquets de données à travers des canaux virtuels vers d'autres instances de la classe NetDevice. Ils jouent un rôle essentiel dans la modélisation et la simulation du transfert de données entre les nœuds du réseau simulé. Les composants du module Devices incluent des NetDevices tels que les cartes réseau Ethernet, sans fil, etc., qui permettent la communication entre les nœuds du réseau.

Routing Module :

NS3 propose deux algorithmes de routage pour les simulations de réseaux. Le premier, appelé GlobalRouter, utilise des routes statiques préconfigurées. Le deuxième algorithme met en œuvre le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) pour les réseaux ad hoc dynamiques. Ces algorithmes de routage permettent aux chercheurs d'évaluer les performances des protocoles de routage dans différentes conditions de réseau et de comparer leur efficacité dans des scénarios spécifiques. En utilisant le module de routage de NS3, il est possible de modéliser et d'analyser les performances des protocoles de routage dans divers environnements de réseau.

IV.5 Les ressources pour installer NS3

IV.5.1 Le Web

Il est important de se familiariser avec plusieurs ressources clés lors de l'utilisation de NS3. Le site principal, accessible via <http://www.nsnam.org>, offre des informations fondamentales sur le système NS3.

Une connexion Internet est indispensable pour installer NS3.

IV.5.2 Mercurial

Pour gérer l'organisation et l'évolution de la ligne de code et de la documentation des systèmes complexes, il existe des systèmes de gestion de code source tels que le bien connu "concurrent version system CVS". Dans le projet NS3, Mercurial est utilisé comme système de gestion de code source. Pour obtenir de plus amples informations, veuillez consulter le site <http://www.selenic.com/mercurial>.

IV.5.3 Bake

Bake n'est pas équivalent à make, autoconfig ou automake. Il ne remplace pas les outils de gestion de paquets présents dans notre système, mais il s'agit d'un outil intégré développé par les concepteurs de logiciels pour automatiser la construction de projets interdépendants. Bake a été créé dans le but de simplifier la construction reproductible de NS3, en prenant en compte la dépendance entre plusieurs projets. Il permet d'assembler de manière cohérente toutes les pièces logicielles pour créer quelque chose d'utile. Pour notre travail, nous utiliserons bake pour construire NS3.

IV.5.3.1 Caractéristique de bake

- Manipulation automatique des dépendances entre les bibliothèques.
- Téléchargement automatique des composants nécessaires.
- Construction automatique des composants requis.
- Possibilité d'ajout de modules à l'arbre des composants.
- Éviter tous les détails de la construction à l'utilisateur.

IV.5.3.2 Limitations

Cependant, il est important de noter certaines limitations de Bake :

- Bake est uniquement compatible avec les systèmes Linux.
- Si des outils supplémentaires sont nécessaires, l'utilisateur doit les installer manuellement pour les rendre disponibles lors de l'utilisation de Bake.

IV.5.4 Waf

Une fois que le code source a été téléchargé sur notre système local, nous devons le compiler pour générer des programmes utilisables. Comme pour la gestion du code source, il existe de nombreux outils disponibles pour cette tâche, le plus connu étant "make".

Cependant, ces derniers temps, de nouveaux systèmes de construction basés sur le langage Python ont été développés. Le projet NS3 utilise le système Waf, qui est l'un de ces systèmes de nouvelle génération basés sur Python, pour la construction du code.

IV.6 Environnement de développement

Les scripts dans NS3 sont écrits en C++ ou en Python. La plupart des API de NS3 sont disponibles en Python, mais les modèles sont écrits en C++ dans les

deux cas. Pour le développement, le système NS3 utilise plusieurs composants de la GNU "toolchain", qui est l'ensemble des outils de programmation disponibles dans l'environnement mentionné précédemment. NS3 utilise des outils tels que gcc, binutils GNU et gdb.

Cependant, nous n'utilisons pas les outils GNU tels que make ou autotools pour la construction des outils système. Nous utilisons plutôt Waf pour ces fonctionnalités. Un utilisateur de NS3 travaille généralement sous Linux ou dans un environnement Linux simulé sur Windows. Pour ceux qui travaillent sous Windows, il existe des environnements qui permettent de simuler l'environnement Linux à différents degrés. NS3 peut être installé dans un environnement de machine virtuelle tel que VMware en installant une machine virtuelle Linux.

IV.6.1 Installation de NS3

L'installation de simulateur NS3 se fait en trois étapes :
Téléchargez le code source, puis compilez-le en deux étapes. Avant cela, les utilisateurs doivent également télécharger les packages nécessaires pour effectuer ces étapes correctement. (Se référer au chapitre "Implémentation et simulation" pour plus de détails).

IV.7 Conclusion

En conclusion, la simulation joue un rôle crucial dans l'étude des réseaux, offrant une solution économique qui évite les déplacements. Toutefois, il est important de prendre en compte l'erreur de simulation en plus de l'erreur inhérente à une solution réelle.

Nous avons examiné le simulateur de réseau NS3 dans ce chapitre. Dans le prochain chapitre, nous aborderons l'installation et l'utilisation de NS3 puis étudier et analyser des scénarios spécifiques.

Chapitre V

Réalisation et simulation

V.1 Introduction :

La simulation de réseau est une technique où un simulateur (logiciel) modélise le comportement d'un réseau, soit en calculant les interactions entre les entités du réseau à l'aide des formules mathématiques, soit en collectant et reproduisant les observations d'un réseau réel. Permettent d'économiser du temps et de l'argent sur l'exécution des tâches de simulation et sont également utilisés par les concepteurs de réseaux pour tester de nouveaux protocoles réseau ou modifier des protocoles réseau de manière contrôlée et efficace.

La problématique étudiée est la simulation des performances des réseaux cellulaires : il s'agit de bénéficier de l'accès Internet sur le réseau cellulaire en satisfaisant un maximum d'abonnés à tout moment, n'importe où (tout type de zone) avec la meilleure QoS possible.

Nous présentons dans ce qui suit le déroulement des étapes de simulation que nous avons menée dans ce travail de fin d'études qui consiste à simuler des scénarios dans LTE. Notre intérêt est d'étudier et analyser QoS dans 4G.

V.2 Matériels et logiciels de base pour réaliser notre travail :

Pour notre travail, nous avons installé une machine virtuelle Linux à l'aide du logiciel VMware Workstation, qui permet d'installer des machines virtuelles dans le système d'exploitation.

Nous avons installé Linux (Ubuntu 14.04) sur la machine virtuelle.

Ensuite, nous avons installé le simulateur NS3.

Le NS-3 peut être monté de deux manières. Vous aurez besoin de télécharger:

- Soit une archive contenant les sources et tous les fichiers nécessaires.
- Ou des sources directement depuis le référentiel Mercurial.

Le moyen le plus simple pour l'installation est d'utiliser l'environnement ns-3-allinone. Il s'agit d'un ensemble de scripts qui gère le téléchargement et la construction des différents sous-systèmes de NS-3. C'est recommandable de débiter avec NS-3 dans cet environnement

V.3 Installation de l'environnement de simulation :

On doit télécharger tous les composants nécessaires, puis compiler et assembler le tout pour avoir l'arbre des composants pour utiliser NS3.

On doit télécharger les composants manquants : NS3 Core nécessite gcc/g++ version 3.4 ou ultérieure et Python 2.4 ou version ultérieure.

• configuration minimale requise pour C++ : il s'agit du package minimum requis pour que exécute NS3

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

- configuration minimale requise pour Python : il s'agit du package minimum requis pour fonctionner. dynamique avec Python Bindings
sudo apt -get install gcc g++ python python-dev
- Mercurial requis pour travailler avec NS3 : les systèmes complexes ont besoin d'un moyen de gérer l'organisation et le développement du flux de code et de leur document . Le système de gestion de code le plus connu est le ' concurrent version CVS system'

Le projet NS3 utilise Mercurial comme système de gestion de code source.

Pour plus d'informations sur le , consultez le site Web

'<http://www.selenic.com/mercurial>'.ici en italique est la commande pour le télécharger et l'installer :

sudo apt-get install mercurial

- Exécuter les liens python dans l'arborescence de développement NS3 (ns-3-dev) nécessite bazaar

sudo apt -get install bazaar

- debug :

sudo apt-get install gdb valgrind

- Bibliothèque scientifique GNU (GSL) pour les modèles d'erreur WiFi

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

- Besoin d'un analyseur lexical analyseur et analyseur lexical 'bison et flex' :

sudo apt-get install bison flex libfl-dev

- Pour installer gcc-3.4 pour l'émulation Network Cradle (NSC) :

sudo apt-get install g++ - 3.4 gcc-3.4

- Pour lire les traces de paquet pcap

sudo apt-get install tcpdump

- prise en charge de la base de données pour les statistiques :

sudo apt-get install sqlite3 sqlite libsqlite3-dev

- Version basée sur XML (version libxml2 requise >= 2.7)

sudo apt-get install libxml2 libxml2-dev

Dans les paquets suivants, toutes les dépendances requises sont prises en charge et vous pouvez installer tous ces paquets pour une utilisation complète de ns3 :

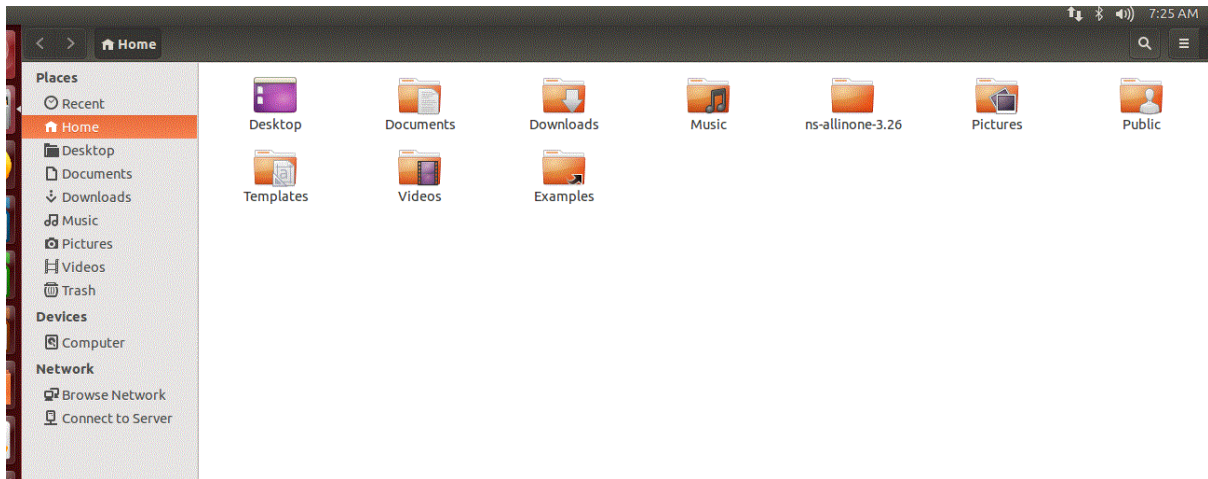
```
sudo apt-get install gcc g++ python python-dev mercurial bazaar gdb valgrind gsl-
bin libgsl0-dev libgsl0ldbl flex bison tcpdump sqlite sqlite3 libsqlite3-dev
libxml2 libxml2-dev libgtk2.0-0 libgtk2.0-dev uncrustify doxygen graphviz
imagemagick texlive texlive-latex-extra texlive-generic-extra texlive-generic-
recommended texinfo dia texlive texlive-latex-extra texlive-extra-utils texlive-
generic-recommended texi2html python-pygraphviz python-kiwi python-
pygoocanvas libgoocanvas-dev python-pygccxml
```

V.3.1 Installation de NS3 :

Il faut télécharger NS-3 à l'aide d'une archive. Dans le cas où l'archive complète a été téléchargée, il faut d'abord la décompresser :

```
tar xjf ns-allinone-3.26.tar.bz2
```

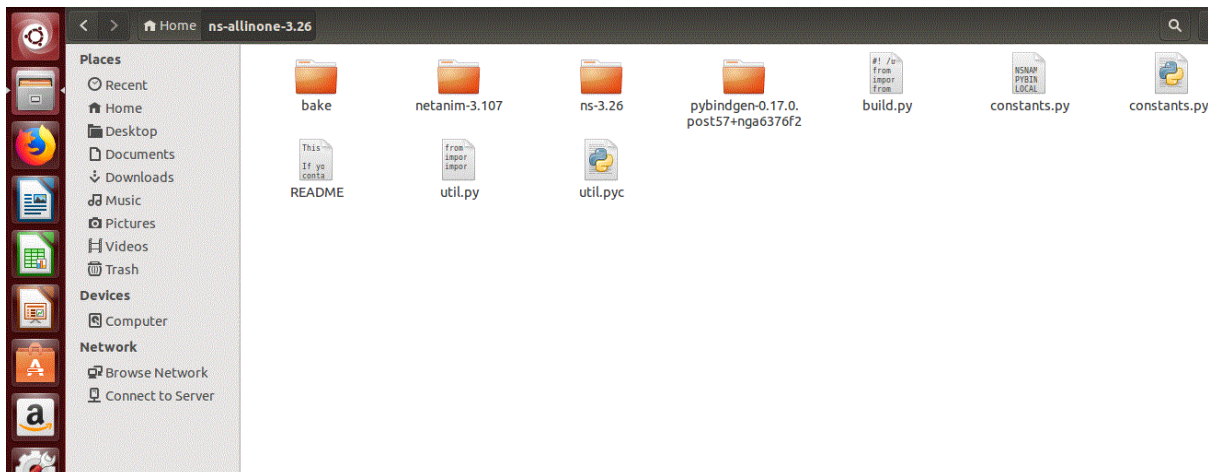
Un dossier ns-allinone-3.26 est maintenant créé.



Il reste à compiler. Pour ce faire, un script Python build.py est fourni dans ce dossier. Il suffit de l'exécuter pour obtenir un environnement de simulation NS-3 standard :

```
Cd ns-allinone-3.26
```

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



Plusieurs options de compilation peuvent être configurées à l'aide de l'outil Waf. C'est l'équivalent d'un générateur basé sur Python. Il permet de configurer, compiler et installer des applications de manière plus simple que make.

```
./waf configure
```



```

sara@ubuntu: ~/ns-allinone-3.26/ns-3.26
sara@ubuntu:~/ns-allinone-3.26$ cd ns-3.26
sara@ubuntu:~/ns-allinone-3.26/ns-3.26$ ./waf configure
Setting top to : /home/sara/ns-allinone-3.26/ns-3.26
Setting out to : /home/sara/ns-allinone-3.26/ns-3.26/build
Checking for 'gcc' (C compiler) : /usr/bin/gcc
Checking for cc version : 4.8.4
Checking for 'g++' (C++ compiler) : /usr/bin/g++
Checking for compilation flag -Wl,--soname=foo support : ok
Checking for program 'python' : /usr/bin/python
Checking for python version : (2, 7, 6, 'final', 0)
python-config : /usr/bin/python-config
Asking python-config for pyembed '--cflags --libs --ldflags' flags : yes
Testing pyembed configuration : yes
Asking python-config for pyext '--cflags --libs --ldflags' flags : yes
Testing pyext configuration : yes
Checking for compilation flag -fvisibility-hidden support : ok
Checking for compilation flag -Wno-array-bounds support : ok
Checking for pybindgen location : ../pybindgen-0.17.0.post57+nga6376f2 (guessed)
Checking for python module 'pybindgen' : 0.17.0.post57+nga6376f2
Checking for pybindgen version : 0.17.0.post57+nga6376f2
Checking for code snippet : yes
Checking for types uint64_t and unsigned long equivalence : no
Checking for code snippet : no
Checking for types uint64_t and unsigned long long equivalence : yes
Checking for the apidefs that can be used for Python bindings : gcc-LP64
Checking for internal GCC cxxabi : complete
Checking for python module 'pygccxml' : not found
Checking boost includes : headers not found, please provide a --boost-includes argument (see help)
Checking boost includes : headers not found, please provide a --boost-includes argument (see help)
Checking for click location : not found
Checking for program 'pkg-config' : /usr/bin/pkg-config
Checking for 'gtk+2.0' >= 2.12 : yes
Checking for 'libxml-2.0' >= 2.7 : yes
Checking for 'libxslt-1.0' >= 1.1.26 : not found

```

./waf

```

sara@ubuntu:~/ns-allinone-3.26/ns-3.26$ ./waf
Waf: Entering directory '/home/sara/ns-allinone-3.26/ns-3.26/build'
Waf: Leaving directory '/home/sara/ns-allinone-3.26/ns-3.26/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (1.816s)

Modules built:
antenna          aodv             applications
bridge           buildings        config-store
core             csma             csma-layout
dsdv            dsr             energy
fd-net-device   flow-monitor    internet
internet-apps  lr-wpan         lte
mesh           mobility         mpi
netanim (no Python) network         nix-vector-routing
olsr           point-to-point  point-to-point-layout
propagation     sixlowpan       spectrum
stats          tap-bridge      test (no Python)
topology-read  traffic-control uan
virtual-net-device visualizer      wave
wifi           winax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite          click            openflow

```

Nous utilisons la commande suivante pour exécuter nos programmes :

./waf --run filename

V.4 Architecture de test

La simulation peut y être alors exécutée afin d'en extraire les résultats comme le montre la **Figure V.1**

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

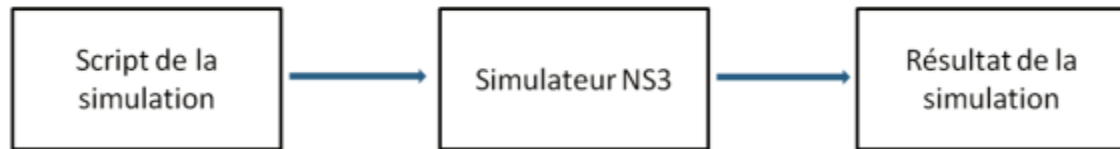


Figure V.1: La réalisation d'une simulation dans NS3

Figure 30 : La réalisation d'une simulation dans NS3

V.5 Les critères utilisés dans notre simulation

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

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

Parmi ces critères figurent le **CQI** (Channel Quality Indicator), qui est un indicateur de la qualité du canal, ainsi que le **SINR** (Signal Interference Noise Ratio), qui est un rapport signal/bruit, et le **TB** (Transport Block)[25].

Le **SINR** :

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

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

Le **CQI** :

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

Le **TB** :

En **LTE**, un **TB** (Transport Block) est défini comme des données acceptées par la couche physique qui doivent être combinées. Le cadencement de chaque bloc de transmission est alors précisément lié à cette couche 1, par

exemple, chaque bloc de transmission est généré exactement toutes les 10 ms, soit un multiple de 10 ms.

V.6 Résultats de simulation :

Scénario 1

Le scénario analysé se compose de deux nœuds : **eNB** et un seul **UE** (enregistré auprès de eNB). L'UE se déplace radialement à travers la cellule à l'aide du **ns3 :: constantVelocityMobilityModel**.

L'exemple présenté décrit comment la qualité du canal se dégrade à mesure que la distance entre **UE** et **eNB** augmente. Par conséquent, comme prévu, le débit binaire total (en bits/TTI) disponible pour l'**UE** diminue à mesure que la distance entre les nœuds augmente.

Nous avons pu tester certains paramètres de **QoS** (**CQI**, **SINR** et **TB**) à l'aide du simulateur NS-3. Nous fournissons tous les résultats sur des graphiques que nous avons pu tester afin de voir comment certains facteurs affectent ces paramètres.

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

script_ en C++ :

```
#include <ns3/assert.h>
#include <ns3/math.h>
#include <vector>
#include <ns3/spectrum-value.h>
#include <ns3/double.h>
#include "ns3/enum.h"
#include <ns3/lte-mi-error-model.h>

namespace ns3 {
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("LteAmc");
NS_OBJECT_ENSURE_REGISTERED (LteAmc);
/**
 * Table of CQI index and its spectral efficiency. Taken from 3GPP TSG-RAN WG1
 * [R1-081483 Conveying MCS and TB size via PDCCH]
 * (http://www.3gpp.org/ftp/tsg\_ran/WG1\_RL1/TSGR1\_52b/Docs/R1-081483.zip)
 * file `TBS_support.xls` tab "MCS Table" (rounded to 2 decimal digits).
 * The index of the vector (range 0-15) identifies the CQI value.
 */
static const double SpectralEfficiencyForCqi[16] = {
    0.0, // out of range
    0.15, 0.23, 0.38, 0.6, 0.88, 1.18,
    1.48, 1.91, 2.41,
    2.73, 3.32, 3.9, 4.52, 5.12, 5.55
};
};
#ifdef __cplusplus
#endif
```

Cette script représente les indicateurs qui utilisé dans la simulation.

```

{
    for (it = sinr.ConstValuesBegin (); it != sinr.ConstValuesEnd (); it++)
    {
        double sinr_ = (*it);
        if (sinr_ == 0.0)
        {
            cqi.push_back (-1); // SINR == 0 (linear units) means no signal in
this RB
        }
        else
        {
            /*
            * Compute the spectral efficiency from the SINR
            *
            * spectralEfficiency = log2 ( 1 +  $\frac{\text{SINR}}$  )
            *
            *  $-\ln(5 \cdot \text{BER}) / 1.5$ 
            * NB: SINR must be expressed in linear units
            */
            double s = log2 ( 1 + ( sinr_ / ( (-std::log ( 5.0 * m_ber )) / 1.5 ) ) );
        });

        int cqi_ = GetCqiFromSpectralEfficiency (s);
        NS_LOG_LOGIC (" PRB =" << cqi.size ()
            << ", sinr =" << sinr_
            << " (= " << 10 * std::log10 (sinr_) << " dB)"
            << ", spectral efficiency =" << s

```

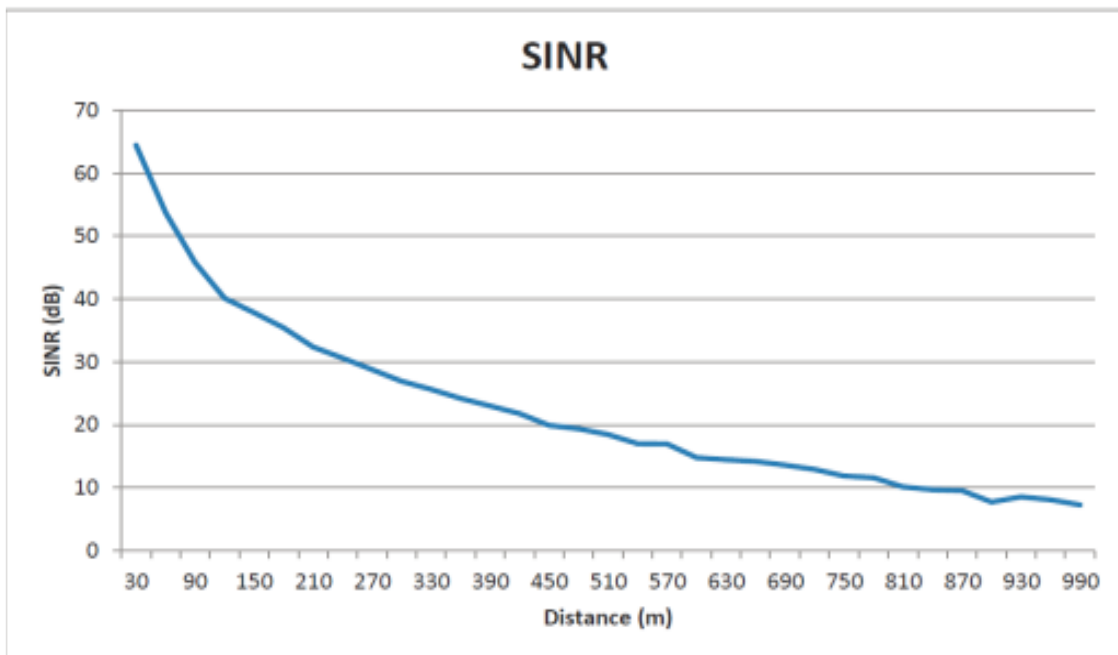


Figure V.2 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB

Figure 31 : SINR en fonction de la distance UE-eNodeB

Dans le graphique de la **figure V.2**, nous observons une nette baisse du rapport **SINR**, s'approchant de zéro à une distance de près de 1 km entre l'**UE** utilisateur et l'antenne **eNodeB**, compte tenu de la valeur de bruit fixe de **-148,947 dB**. Cela est principalement dû à l'atténuation du signal, à l'évanouissement, à la dispersion et aux multiples allers-retours.

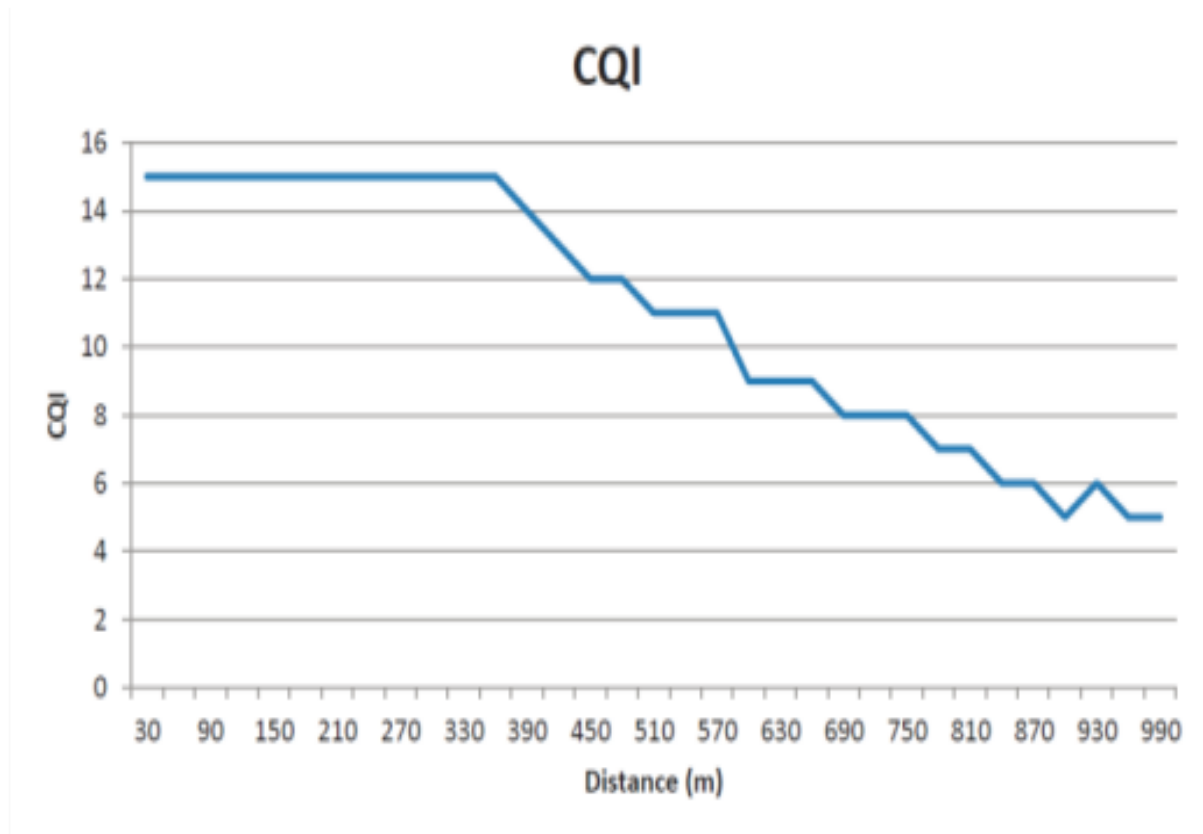
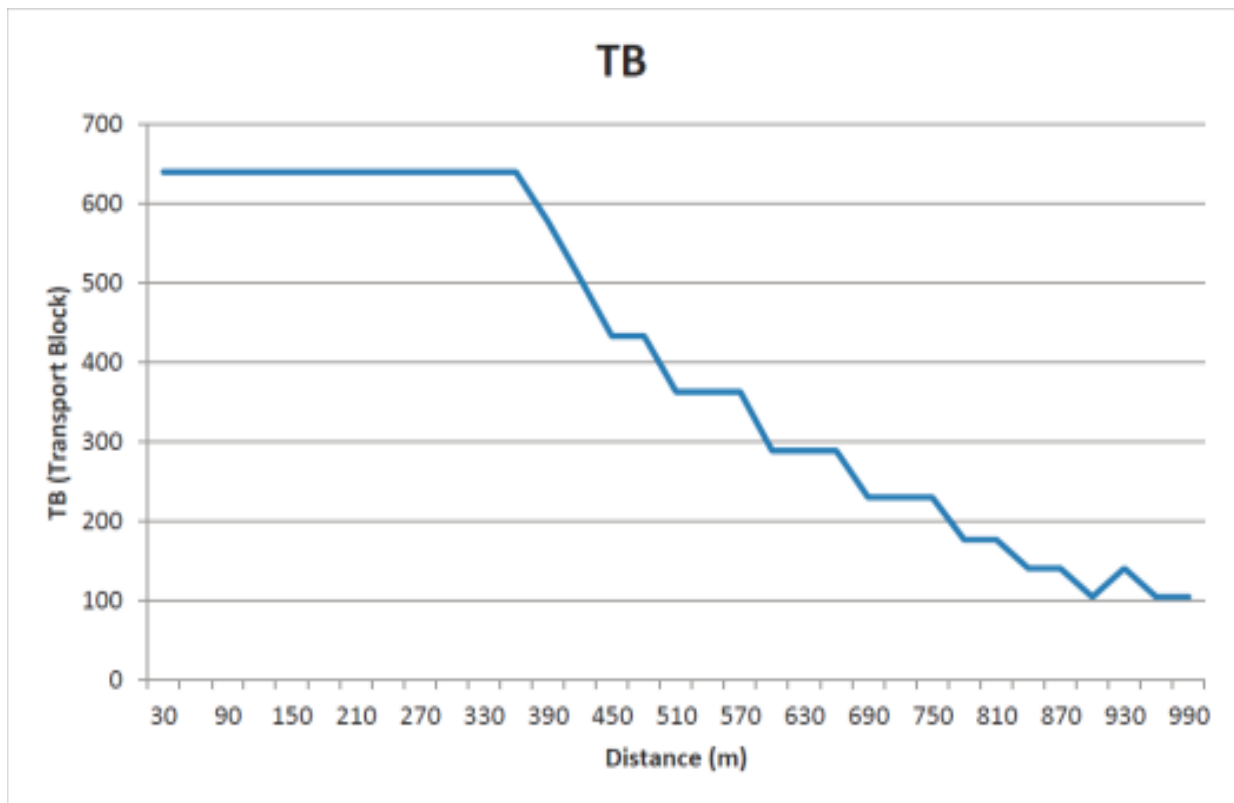


Figure V.3 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB

Figure 32 : CQI en fonction de la distance UE-eNodeB

Le graphique de la **Figure V.3** montre la qualité du canal en fonction de la distance entre l'**UE** et l'**eNodeB**, la qualité augmentant de 0 à 360 m. Après cette valeur, une escalade de la dégradation est observée, principalement en raison d'une diminution de la force du signal, d'une augmentation du taux d'erreur sur les bits et des interférences.



V.4 : TB en fonction de la distance entre UE-eNodeB

Figure 33 : TB en fonction de la distance entre UE-eNodeB

Le graphique de la **Figure V.4** montre le nombre de blocs transmis lorsque la distance entre l'**UE** et l'**eNodeB** augmente. Cette dégradation est principalement due à une diminution de l'intensité du signal, une augmentation du taux d'erreur binaire et des signaux parasites.

Scénario 2

Un réseau **LTE** de base est composé d'un certain nombre de cellules, chaque cellule ayant une base nœud de station (**eNodeB**) et de nombreux nœuds d'équipement utilisateur (**UE**). La simulation alors procède pour nous montrer comment deux nœuds **UE** communiquent entre eux, ainsi avec un nœud de station de base ou un **eNodeB**. Une simulation de la communication montante nous montre comment les nœuds **UE** envoient des messages/informations à la station de base, tandis que la simulation de la communication descendante illustre comment les stations de base transmettent des informations aux nœuds **UE** correspondants qui relèvent de leur juridiction.

I. DOWNLINK COMMUNICATION:

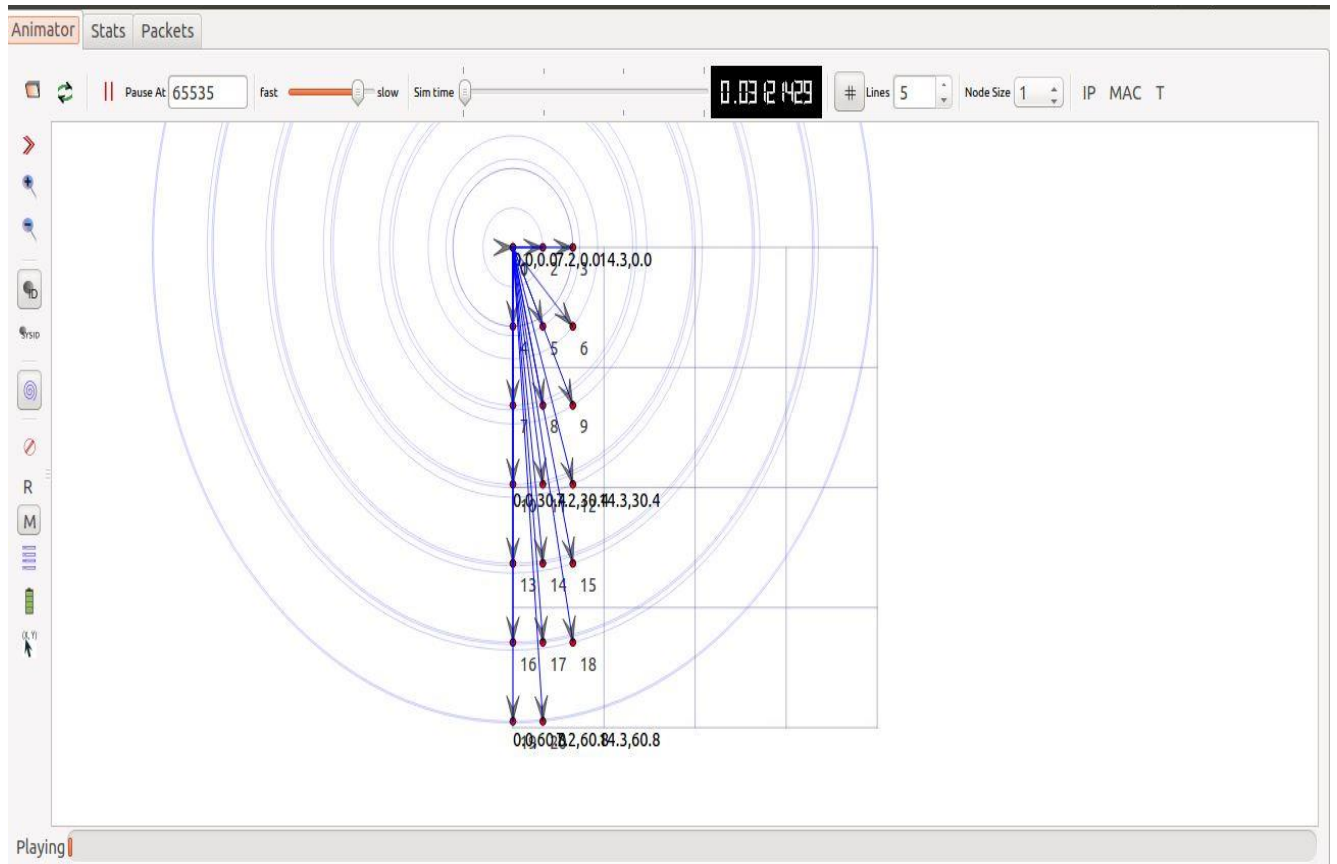


Figure V.5 : Downlink communication

Figure 34 : Downlink communication

La figure V.5 illustre la communication descendante du réseau **LTE** dans lequel la station de base envoie des messages/informations à tous ses nœuds **UE** correspondants. Les flèches pointant vers le bas indiquent sens de transmission des messages qui confirme qu'il s'agit d'un cas de (downlink communication).

II. UPLINK COMMUNICATION

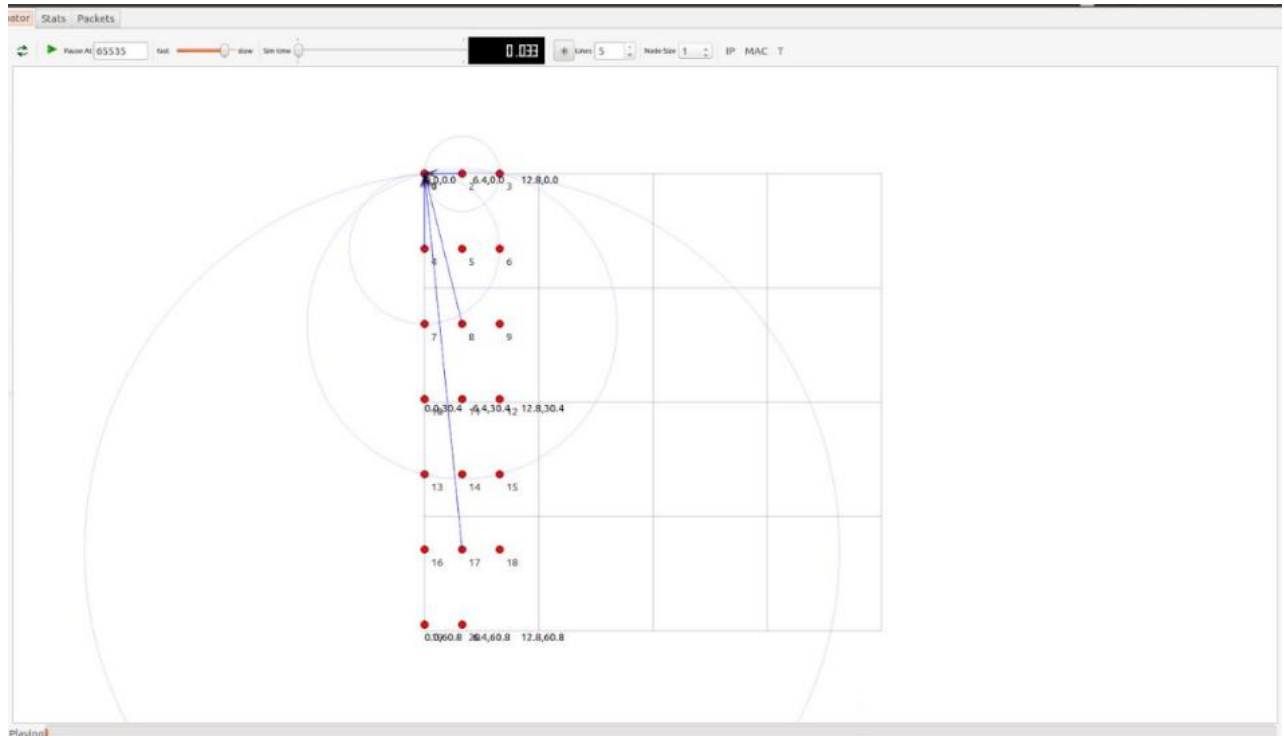


Figure V.6 : Uplink communication

Figure 35 : Uplink communication

La figure V.6 illustre la communication montante du réseau LTE dans lequel les nœuds UE envoient des messages/informations à leurs correspondants station de base. La flèche pointe vers le haut en direction de la base station indiquent le sens de transmission des messages qui confirme qu'il s'agit d'un cas de (uplink communication).

Scénario 3 (suit à scénario 2)

III. HANDOVER SCENARIO:

```
AnimationInterface WARNING:Node:0 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
AnimationInterface WARNING:Node:1 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
AnimationInterface WARNING:Node:0 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
AnimationInterface WARNING:Node:1 Does not have a mobility model. Use SetConstantPosition if it is stationary
0.029 /NodeList/5/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 3: connected to CellId 1 with RNTI 2
0.029 /NodeList/7/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 5: connected to CellId 1 with RNTI 3
0.029 /NodeList/18/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 16: connected to CellId 1 with RNTI 1
0.029 /NodeList/21/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 19: connected to CellId 1 with RNTI 4
0.034 /NodeList/3/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 1: connected to CellId 1 with RNTI 20
0.034 /NodeList/10/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 8: connected to CellId 1 with RNTI 18
0.034 /NodeList/13/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 11: connected to CellId 1 with RNTI 17
0.034 /NodeList/19/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 17: connected to CellId 1 with RNTI 19
0.04 /NodeList/14/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 12: connected to CellId 1 with RNTI 30
0.04 /NodeList/15/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 13: connected to CellId 1 with RNTI 32
0.04 /NodeList/20/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 18: connected to CellId 1 with RNTI 29
0.04 /NodeList/22/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 20: connected to CellId 1 with RNTI 31
0.0409286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 3 RNTI 2
0.0409286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 5 RNTI 3
0.0409286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 16 RNTI 1
0.0409286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 19 RNTI 4
0.0459286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 1 RNTI 20
0.0459286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 8 RNTI 18
0.0459286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 11 RNTI 17
0.0459286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 17 RNTI 19
0.046 /NodeList/4/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 2: connected to CellId 1 with RNTI 37
0.046 /NodeList/6/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 4: connected to CellId 1 with RNTI 40
0.046 /NodeList/16/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 14: connected to CellId 1 with RNTI 38
0.046 /NodeList/17/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 15: connected to CellId 1 with RNTI 39
0.0519286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 12 RNTI 30
0.0519286 /NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 13 RNTI 32
```

Figure V.7 : Handover scénario

Figure 36 : Handover scénario

La simulation du scénario de handover commence par la mise en place de la connexion d'un UE (qui est identifié par son International Mobile Subscriber Identity, IMSI) avec son eNodeB correspondant (identifié par son Radio Network Temporary Identifier, RNTI). Nous imprimons sur le terminal les instants exacts auxquels la connexion est établie. Ensuite, dès qu'un UE mobile commence à recevoir un signal d'une meilleure force de signal d'une base station autre que celle à laquelle il était connecté jusqu'à présent, on voit que le nœud UE est remis comme suit :

```
rahul@rahul-HP-Notebook:~/ns3/ns-allinone-3.27/ns-3.27$ ./waf --run scratch/hand
Waf: Entering directory '/home/rahul/ns3/ns-allinone-3.27/ns-3.27/build'
Waf: Leaving directory '/home/rahul/ns3/ns-allinone-3.27/ns-3.27/build'
Build commands will be stored in build/compile_commands.json
'build' finished successfully (12.863s)
/NodeList/4/DeviceList/0/LteUeRrc/ConnectionEstablished UE IMSI 1: connected to CellId 1 with RNTI 1
/NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/ConnectionEstablished eNB CellId 1: successful connection of UE with IMSI 1 RNTI 1
/NodeList/2/DeviceList/0/LteEnbRrc/HandoverStart eNB CellId 1: start handover of UE with IMSI 1 RNTI 1 to CellId 2
/NodeList/4/DeviceList/0/LteUeRrc/HandoverStart UE IMSI 1: previously connected to CellId 1 with RNTI 1, doing handover to CellId 2
/NodeList/4/DeviceList/0/LteUeRrc/HandoverEndOk UE IMSI 1: successful handover to CellId 2 with RNTI 1
/NodeList/3/DeviceList/0/LteEnbRrc/HandoverEndOk eNB CellId 2: completed handover of UE with IMSI 1 RNTI 1
```

Comme nous pouvons le voir dans le résultat ci-dessus, au début des temps, le nœud **UE** avec IMSI 1 était connecté à une station de base avec un **CellId de 1** et un RNTI de 1. Dans la troisième ligne des résultats, nous pouvons clairement observer qu'en raison de la mobilité des le nœud **UE**, le nœud **UE** est remis à la station de base avec un **CellId de 2**. Nous sommes d'abord informés du début du scénario de transfert à la fois de les perspectives **UE** et **eNodeB**. Dès que la durée infime de la passation se termine, nous sommes avertis de la fin de la passation et nous voyons que le nœud **UE** a été transféré avec succès d'un station de base à l'autre.

L'animation du scénario de handover est la suivante :

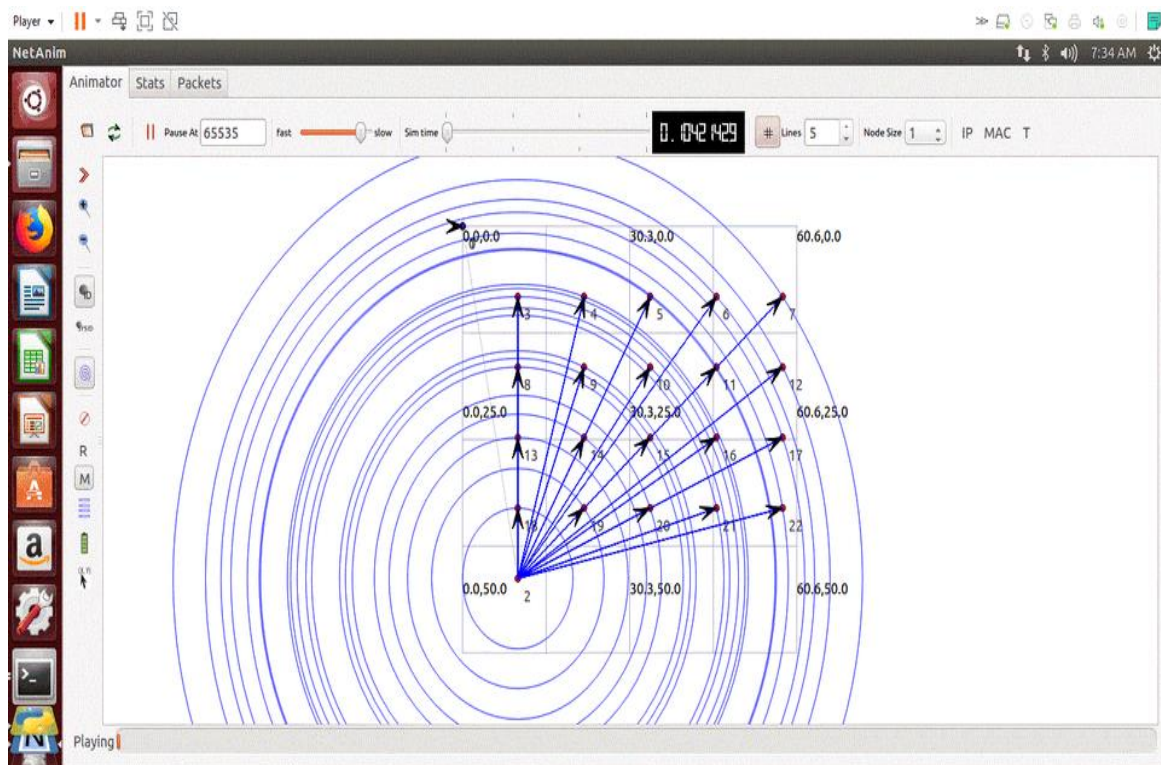


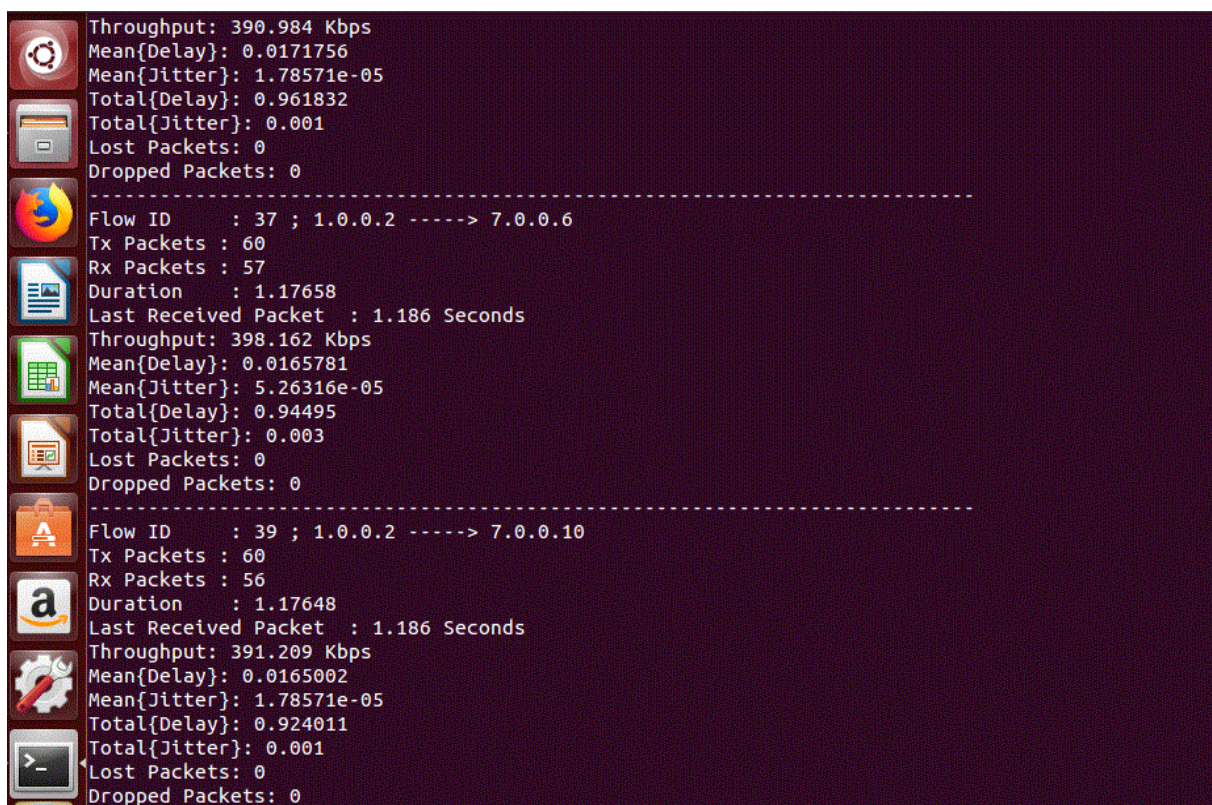
Figure V.8 : L'animation du scénario de handover

Figure 37 : L'animation du scénario de handover

Dans la **figure V.8**, nous pouvons observer que les nœuds **UE** qui effectuaient auparavant le processus de ulipnk communication avec la station de base avec **CellId 1** est transmis avec succès à la station de base avec **CellId 2**. Après les nœuds **UE** remis, ils continuent à assurer leurs fonctions de uplink et downlink communication comme d'habitude.

IV. COMPUTATION OF EVALUATION CRITERIA

Les critères d'évaluation de la simulation ont été évalués à l'aide du flow-monitor paquet de NS3. Les critères d'évaluation correspondant à chaque flux ont été imprimés dans le terminal. Un flux n'est rien d'autre qu'une transmission unidirectionnelle unique de voix ou de données paquets d'un nœud à l'autre (eNodeB ou UE). dans notre cas, chaque flux a été attribué avec un ID de flux afin que nous puissions distinguer tous les différents flux qui ont lieu au cours de la simulation et afin qu'ils puissent être en conséquence évalués selon leurs critères d'évaluation correspondants.



```
Throughput: 390.984 Kbps
Mean{Delay}: 0.0171756
Mean{Jitter}: 1.78571e-05
Total{Delay}: 0.961832
Total{Jitter}: 0.001
Lost Packets: 0
Dropped Packets: 0
-----
Flow ID      : 37 ; 1.0.0.2 -----> 7.0.0.6
Tx Packets  : 60
Rx Packets  : 57
Duration    : 1.17658
Last Received Packet : 1.186 Seconds
Throughput: 398.162 Kbps
Mean{Delay}: 0.0165781
Mean{Jitter}: 5.26316e-05
Total{Delay}: 0.94495
Total{Jitter}: 0.003
Lost Packets: 0
Dropped Packets: 0
-----
Flow ID      : 39 ; 1.0.0.2 -----> 7.0.0.10
Tx Packets  : 60
Rx Packets  : 56
Duration    : 1.17648
Last Received Packet : 1.186 Seconds
Throughput: 391.209 Kbps
Mean{Delay}: 0.0165002
Mean{Jitter}: 1.78571e-05
Total{Delay}: 0.924011
Total{Jitter}: 0.001
Lost Packets: 0
Dropped Packets: 0
```

est un échantillon de 3 flux parmi les nombreux flux qui ont eu lieu pendant le déroulement de la simulation.

Unique flux en détail

```
-----  
Flow ID      : 39 ; 1.0.0.2 -----> 7.0.0.10  
Tx Packets  : 60  
Rx Packets  : 56  
Duration    : 1.17648  
Last Received Packet : 1.186 Seconds  
Throughput  : 391.209 Kbps  
Mean{Delay}: 0.0165002  
Mean{Jitter}: 1.78571e-05  
Total{Delay}: 0.924011  
Total{Jitter}: 0.001  
Lost Packets: 0  
Dropped Packets: 0
```

Ici, la transmission de 60 paquets a lieu depuis le nœud eNodeB avec IP adresse 1.0.0.2 au nœud UE avec une adresse IP de 7.0.0.10. Cette transmission a un ID de flux de 39. En ce qui concerne les critères d'évaluation, nous pouvons voir qu'il prend seulement 1,17648 secondes pour que l'eNodeB transmette un total de 60 paquets, tandis que atteignant un débit de 391,209 Kbps. Nous pouvons également constater que nous avons considérablement faibles valeurs du délai moyen et de la gigue moyenne. Aucun paquet n'est perdu ou abandonné pendant l'intégralité du flux, témoignant de la robustesse de notre réseau.

V.7 Conclusion

Dans cette étude, des simulations sont effectuées sur la partie e-UTRAN du système, en se concentrant sur les caractéristiques des canaux de transmission et de signalisation. Nous concluons que la fiabilité du réseau est indiquée par les paramètres de performance de transmission inclus. À cette fin, nous avons testé plusieurs paramètres de qualité de service inclus dans les réseaux 4G LTE, notamment **CQI** (Channel Quality Indicator), **SINR** (Signal to Interference Noise Ratio) et **TB** (Transport Block).

En plus de notre connaissance de l'importance de handover lorsque la puissance du signal devient faible, le handover peut transférer l'utilisateur vers une cellule avec un signal plus fort pour maintenir une connexion stable et de qualité.

Conclusion Générale

Notre travail comprend des simulations sur le réseau 4G LTE, l'étude et l'analyse de sa qualité de service, et pour atteindre notre objectif, il faut que Nous passons d'une technologie à l'autre, d'une génération à l'autre. Il faut voir une description générale des technologies **GSM**, **GPRS**, **UMTS** et **LTE**, puis nous expliquer les caractéristiques de cette technologie et ses différentes composantes.

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

Dans la dernière section, nous introduisons l'outil de simulation **NS3** pour simuler certains critères de qualité de service en tant que mesure de la qualité de transmission en liaison descendante (downlink) et en liaison montante (uplink). Parmi ces indicateurs on retrouve notamment le **CQI** (Channel Quality Indicator), mais aussi le **SINR** (Signal-to-Noise Ratio) et le **TB** (Transport Block), En plus de l'importance de handover dans la stabilité de **QoS**.

Ce projet nous permet de démontrer les principaux paramètres du réseau **4G**, qui font de ce réseau le meilleur et le plus cher, sont les très hauts débits qu'il utilise, une latence bien inférieure aux réseaux **3G**, une large bande passante, des bandes de fréquences flexibles, et l'interopérabilité avec d'autres réseaux, donc ce paramètre donne aux utilisateurs la possibilité d'utiliser en **4G**.

Bibliographie

- [1] MEZHOUD Naima & BOUZERA Naima. Optimisation de la migration du réseau + GSM vers le réseau UMTS. Mémoire de master. 2015
- [2] HADDOUCHE, Khayra. Développement d'un outil d'optimisation pour l'analyse des fichiers de traçage de l'opération Drive Test des réseaux 2G/3G. Mémoire de master.2019.
- [3] MEGNAFI, Hicham. Frequency Plan Optimization Based on Genetic Algorithms for Cellular Networks. Journal of Communications Software and Systems, 2020, vol. 16, no 3
- [4] MEGNAFI, Hicham; BOUKLI, Nouredine; BERRICHI, Houssein,
“ Optimisation Radio dans le réseau GSM : L'évaluation des paramètres radio utilisés dans la liaison radio de réseau GSM par le Software GSM-RNO (GSM - Radio Network Optimisation)”, Editions universitaires européennes, ISBN-6131587795, 2011. GSM
- [5] MISHRA, Ajay R. Cellular technologies for emerging markets: 2G, 3G and beyond. John Wiley & Sons, 2010.2G 3G
- [6] Réseaux GSM, 5ème édition revue et augmentée. Xavier Lagrange, Philippe Godlewski, Samir Tabbane, année: 2000.
- [7]: Cédric DEMOULIN, Marc VAN DROOGENBROECK « PRINCIPES DE BASE DU FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU GSM », Département d'Électricité, Électronique et Informatique (Institut ttefiore) Sart Tilman, B-4000 Liège, Belgique
- [8] MISHRA, Ajay R. (ed.). “Advanced cellular network planning and optimisation: 2G/2.5 G/3G... Evolution to 4G”, 2007, John Wiley & Sons. 2G 3G 4G
- [9] HOCINE, Merah. Conception d'un MODEM de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à base de la technologie MC-CDMA. Mémoire de Magister En électronique, 2012.
- [10] Hamamdji sami & Seba Nasreddine-reda. Optimisation radio de la 3G de la téléphonie. Mémoire de master .2016
- [11] BOUGUEN Younes, HARDOUIN , F.X. Wolff, « LTE et les réseaux 4G », Eyrolles, 2012.
- [12] ABDELLAOUI, Ghouthi, MEGNAFI, Hicham, et BENDIMERAD, Fethi Tarik. A novel model using Reo for IoT self-configuration systems. In : 020 1st International

Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP).
IEEE, 2020. p. 1-5

[13] : GHASSEN.A.Abed, MAHAMOD Ismail et KASMIRAN Jumaris, “Modeling and Performance

Evaluation of LTE Networks with Different TCP Variants”, Académie mondiale des sciences,2011.

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

[15]. Mohamed Moussaoui, « Réseau UMTS et ses évolutions : UMTS/HSxPA/3LTE », Engineering school. La première Ecole de Printemps sur ”Réseaux sans Fils et Technologies Emergentes”. pp.76, 16 Mars 2010. Marrakech, 2011.

[16] Yahiaoui Hamza,Lounnas Redouane «Étude des Performances des Réseaux 4G LTE», Mémoire de Projet de Fin d’Etudes en Réseaux et Communications, 13/Juliette/2017.

[17] Hiba Mouachi, «Etude et simulation de la norme LTE par 3GPP», Projet de semestre, ENSA Marrakech, Université Cady Ayyad, 19/06/2012.

[18] BOUGUEN, Younes, HARDOUIN, F.X. Wolff, « LTE et les réseaux 4G », Eyrolles, 2012.

[19] LTE : Rapport Nokia Siemens/ INPT.

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

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

[22] : « [http://wapiti.telecom-lille1.eu/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2002ttnfa03/NatchiaKoua o-Benlahcen/index.htm](http://wapiti.telecom-lille1.eu/commun/ens/peda/options/ST/RIO/pub/exposes/exposesrio2002ttnfa03/NatchiaKoua%20Benlahcen/index.htm) ».

[23] Andriamifidy Nalijaona Irina, «Les Réseaux LTE», Université d’Antananarivo, 2013.

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

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

