وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Mnistère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبدالحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

N° d'ordre : M...../GE/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Télécommunication

Thème

Planification et Dimensionnement d'un réseau LTE

Présenté par :

M^elle^ Diarra Maïmouna

Soutenu le 16 /08 /2020 devant le jury composé de :

Président :	M. Azzedine Mohamed	MAA	Université de Mostaganem
Examinateur :	M. Abed Mansour	MCA	Université de Mostaganem
Encadrante :	Mme Benchellal Amel	MCB	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents qui me sont chers, quoi que je fasse ou dise-je ne saurai vous remercier, je remercie Dieu de m'avoir donné des parents comme vous. Que Dieu vous protège et vous bénisse.

À mes frères pour leur encouragement.

À mes sœurs pour leur soutien moral et leur encouragement

A mes amies (Sanaba koné, Fata Traoré, Mariétou Scissé, Mansaran Théra) pour leur soutien.

À toutes les personnes qui m'ont encouragé, merci d'être toujours là pour moi.

Que Dieu vous bénisse tous.

Diarra Maïmouna

Remerciement

Au terme de ce travail ; je remercie tout d'abord le créateur de l'univers qui m'a doté d'intelligence et m'a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

J'offre mes sincères et chaleureux remerciements à Mme Amel Benchellal pour son encadrement, son orientation, ses conseils et la disponibilité qu'elle m'a témoignée pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier M. Azzedine Mohamed qui a accepté de présider le jury de soutenance.

M. Abed Mansour Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier le chef de département du Génie Electrique et des Systèmes des Télécommunications de la Faculté Ibn Badis de Mostaganem.

Je désire aussi remercier toute l'équipe pédagogique de l'université Ibn Badis de Mostaganem qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Un grand merci à M. Ibrahima Diallo pour ses conseils sur le sujet et sa disponibilité pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions.

Je souhaite remercier également tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon cursus scolaire.

Et pour finir je tiens à remercier mes parents, mes frères et sœurs pour leur soutien constant et leurs encouragements.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale……..…1

I.Chapitre I : Le réseau mobile LTE..... 4

I.1.Introduction : 5

I.2.Evolution des réseaux mobiles : 5

I.3.Principe du concept cellulaire : 9

I.4.Le réseau LTE ou 4G : 10

I.5.Les caractéristiques de la 4G : 12

I.5.1.Les débits : Les objectifs du débit maximale définit pour la LTE : 12

I.6.Architecture du réseau LTE : 13

I.6.1.Le réseau cœur EPC (Evolved Packet Core) : 14

I.6.2.Le réseau d'accès radio E-UTRAN : 16

I.7.Architecture protocolaire de l'interface radio : 17

I.7.1.Les couches de l'interface radio : 18

I.7.1.1.La couche physique : 18

I.7.1.2.La couche 2 qui ressemble à la couche liaison du modèle OSI : 19

I.7.1.3.La sous-couche PDCP : 19

I.7.1.4.La sous couche RLC : 19

I.7.1.5.La sous-couche MAC : 19

I.7.1.6.La couche RRC : 20

I.8.Technique d'accès : 20

I.8.1.L'OFDM : 20

I.8.2.L'OFDMA ET L'SC-FDMA : 21

I.9.Structure d'une trame : 22

TABLE DES MATIERES

I.10.La technologie MIMO : 24
I.11.Le réseau LTE-Advanced : 25
I.12.Le réseau LTE-Advanced Pro : 26
I.13.La qualité de service : 27
I.13.1.Le porteur EPS : 28
I.14.Modulation et codage adaptatifs : 29
I.15.Les avantages du LTE : 30
I.16.Les limites du LTE : 30
I.17.La 4G dans le monde : 31
I.18.Conclusion : 32
II.Chapitre II : Dimensionnement d'un réseau LTE 33
II.1.Introduction : 34
II.2.Processus de dimensionnement d'un réseau : 34
II.2.1.Pré-dimensionnement : 35
II.2.2.Dimensionnement de la couverture : 35
II.2.3.Dimensionnement de la capacité : 35
II.2.4.Optimisation : 36
II.3.Dimensionnement d'un réseau LTE : 36
II.3.1.Dimensionnement orienté ouverture : 37
II.3.2.Bilan de la Liaison Radio (RLB) : 37
II.4.Modèle de propagation : 38
II.4.1.Modèle de propagation en espace libre : 39
II.4.2.Modèle de propagation Standard : 39
II.4.3.Le modèle empirique : 39

TABLE DES MATIERES

II.4.3.1.Le modèle Okumura-Hata : 39
II.4.3.2.Le modèle cost 231 de Hata : 41
II.5.Dimensionnement orienté ouverture en liaison descendante (Downlink) : 41
II.5.1.Débit requis : 42
II.5.2.Puissance de la sous-porteuse : 43
II.5.3.Le SINR (Signal to Interference and Noise Radio) requis au récepteur : 43
II.5.4.Sensibilité du récepteur : 43
II.5.5.Les marges de bruit : 44
II.6.Dimensionnement orienté couverture pour la liaison montante (Uplink) : 49
II.6.1.Le SINR requis : 49
II.6.2.La puissance de la sous-porteuse : 49
II.6.3.Sensibilité de récepteur l'eNodeB : 49
II.6.4.Gain d'Antenne : 49
II.6.5.Bilan de la liaison montante (Uplink) : 49
II.7.Rayon de la cellule : 49
II.8.Le nombre de site : 50
II.9.Planification orienté capacité : 52
II.9.1.Calcul de la capacité en liaison montante et descendante : 52
II.9.1.1.Calcul de l'efficacité de la bande spectrale : 53
II.9.1.2.Nombre des eNodeBs requis : 54
II.9.1.3.Nombre final d'eNodeB requis : 54
II.10.Dimensionnement de l'interface S1 et X2 : 54
II.10.1.L'interface X2 : 55
II.10.2.L'interface S1 : 55

TABLE DES MATIERES

II.11.Conclusion : 55

III.Chapitre III : Simulation sur ATOLL 56

III.1.Introduction : 57

III.2.Présentation du logiciel ATOLL : 57

III.3.Démarrage d'un projet Atoll : 58

III.3.1.Ouverture d'un nouveau projet : 58

III.3.2.Réglage des paramètres de la zone : 59

III.4.Etude du cas de la ville Mostaganem 64

III.4.1.Couverture..... 64

III.4.2.Prédiction de couverture 67

III.5.Conclusion 76

Conclusion Générale ……..……76

Référence bibliographiques……..……..…79

Annexes…….81

Résumé…….87

LISTES DES TABLEAUX

Chapitre I : Le Réseau Mobile LTE

Figure I.1: Evolution des réseaux mobiles 8

Figure I.2: Architecture de le LTE 14

Figure I.3: Architecture EPC 15

Figure I.4: Architecture protocolaire de le LTE 17

Figure I.5: Les différents couches de l'interface radio 18

Figure I.6: Principe de l'OFDM 21

Figure I.7: La différence entre l'OFDMA et SC-FDMA 22

Figure I.8: Structure d'une trame LTE 22

Figure I.9: Structure de Trame en FDD 23

Figure I.10: Structure de Trame en TDD 24

Figure I.11: Différents types d'antennes 25

Figure I.12: Evolution de la technologie LTE 27

Figure I.13: EPS bearers 29

Figure I.14: Les différents types de modulation 30

Chapitre II : Dimensionnement d'un Réseau LTE

Figure II.1: Processus de dimensionnement d'un réseau LTE 35

Figure II.2: Connexions du système d'alimentation de l'antenne 46

Figure II.3: Configuration des secteurs cellulaires 50

Figure II.4: Modèle hexagonale de la cellule 51

LISTES DES TABLEAUX

Chapitre III : Simulation sur Atoll

Figure III.1: Nouveau document Atoll avec le modèle LTE 59

Figure III.2: Réglage des paramètres de projection et de formats 60

Figure III.3: L'ajout d'un map au niveau document 61

Figure III.4: Importation des données numériques 61

Figure III.5: Création d'un émetteur et ses caractéristiques 62

Figure III.6: Configuration de la cellule ou antenne 63

Figure III.7: La carte de la ville de Mostaganem via (Google Earth) 65

Figure III.8: Vue aérienne de la ville de Mostaganem 65

Figure III.9: La zone précise à couvrir (ville de Mostaganem) via Google 66

Figure III.10: Dispositions des sites et des émetteurs 67

Figure III.11: Création d'une couverture par niveau de signal 68

Figure III.12: Résultat de la prédiction de couverture par niveau de signal 68

Figure III.13: Zones à recouvrir 69

Figure III.14: Histogramme de la couverture par niveau de signal 70

Figure III.15: Disposition de nouveau site dans la ville de Mostaganem 71

Figure III.16: Résultat de la nouvelle prédiction de la couverture par niveau de signal 71

Figure III.17: Légende de la nouvelle prédiction de la couverture par niveau de signal 72

Figure III.18: Histogramme de la nouvelle couverture par niveau de signal 73

Figure III.19: Résultat de la prédiction de la couverture par émetteur 74

Figure III.20: Carte de recouvrement 75

Figure III.21: Histogramme de couverture par les zones de chevauchement 75

Figure III.22: Légende de la carte de recouvrement 76

LISTES DES TABLEAUX

Chapitre I : Le Réseau Mobile LTE

Tableau I.1: Caractéristiques des réseaux mobiles de la 1G à la 3G 6

Tableau I.2: Différentes technologies de téléphonie mobile 9

Tableau I.3: Différence entre LTE et LTE-Advanced 26

Chapitre II : Dimensionnement d'un Réseau LTE

Tableau II.1: Quelques caractéristiques requises pour le débit 42

Tableau II.2: Les pertes de pénétration 44

Tableau II.3: Les pertes selon le type de signal 45

Tableau II.4: Marge de shadowing 45

Tableau II.5: Les pertes de la ligne d'alimentation 46

Tableau II.6: La marge d'interférence (dB) en fonction de la charge de la cellule 48

Tableau II.7: Empreinte du site en fonction du nombre de secteurs 51

Tableau II.8: Surface de la zone 52

LISTES DES ABREVIATIONS

Liste des Abréviations :

1G : première génération

2G : deuxième génération

3G : troisième génération

4G : quatrième génération

5G : cinquième génération

B

BTS : Base Transceiver Station

BSS : Base Station Sub-System

BSC : Base Station Controller

C

CoMP : Coordinated Multipoint

CN : Core Network

E

Eq : Equation

EDGE : Enhanced Data Rates For GSM Evolution

EPS : Evolved Packet System

EPC : Evolved Packet Core

E-UTRAN : Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network

EnodeB : Evolved NodeB

F

FDD : Frequency Division Duplexing

G

GSM : Global System for Mobile

LISTES DES ABREVIATIONS

GPRS : Generation Packet Radio Service

GGSN : Gateway GPRS Support Node

H

H^+ : Symbolise le HSPA+

HS : Hight Speed

HSDPA : Hight Speed Dowlink Packet Access

HSUPA : Hight Speed Uplink Packet Access

HSPA : Hight Speed Packet Access

I

IP : Internet Protocol

IMS : IP Multimedia Sub-system

IUT : International Telecommunications Union

L

LTE : Long Term Evolution

LOS : Line-Of-Sight

M

MIMO : Multiple Input Multiple Output

MAPL : Maximum Allowable PathLoss

MS : Mobile Station

MAC : Medium Access Control

MME : Mobility Management Entity

N

NAS : strate de non accès

NR : New Radio

LISTES DES ABREVIATIONS

nRB : nombre de blocs de ressources

NLOS : Non-Line-Of-Sight

O

OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA : Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access

OMC : Operations and Maintenance Center

OSS : Operation Sub-system

P

PMLN : Public Land Mobile Network

PDP : Packet Data Protocol

PDCP : Packet Data Compression Protocol

PDN-GW : Packet Data Network Gateway

PS : Packet Switching

PGW : Packet Switch-Gateway

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente

Q

QOS : Quality Of Service

QAM : Quadrature Amplitude Modulation

QPSK : Quadrature Phase Shift Key

R

RRC : Radio Ressource Control

RLC : Radio Link Control

RLB : Bilan de Liaison Radio

RN : Relay Node

LISTES DES ABREVIATIONS

RC : Radiocom

RNC : Radio Network Sub-system

S

S1-C : Interface entre EnodeB et MME (S1 control plan)

S1-U : Interface entre ENodeB et SGW (S1 User plan)

SC-FDMA : Single Carrier- Frequency Division Multi-Access

S-GW : Serving Gateway

SISO : Single Input Single Output

SIMO : Single Input Multiple Output

SINR : Signal to Interfernce & Noise Radio

SAE : System Architecture Evolution

SGSN : Serving GPRS Support Node

T

TDD : Time Division Duplexing

TTI : Transmission Time Interval

TDMA : Time Division Multi-Access

U

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

UP : Uplink

UE : User Equipment

V

VoIP : Voice over IP

W

W-CDMA : Wide Coding Division Multiple Access

LISTES DES ABREVIATIONS

X

X2 : interfaces entre les eNodeBs

Release : est un ensemble de nouvelles fonctionnalités dans la norme par les groupes du 3GPP.

Release 8 : introduction des évolutions HSPA+ et première Release du réseau d'accès LTE et du réseau cœur EPC.

3GPP : 3rd Generation Patrnership Project : c'est une coopération entre organismes de normalisation en télécommunications tels que : l'UIT (Union Internationales des Télécommunications), l'ETSI (European Telecommunications Standarts Institute) qui a pour objectif de définir des spécifications permettant l'interfonctionnement d'équipements de constructeurs différents, son rôle consiste à maintenir et développer les spécifications des systèmes : GSM/GPRS/EDGE, UMTS, LTE

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les besoins des utilisateurs dans la téléphonie mobile ont eu de nombreux rebondissement dans les années 70. L'objectif était d'avoir un moyen de communication sans fil capable de transmettre la voix d'un point A à un point B. Après des recherches approfondis, la première génération (1G) de la téléphonie mobile a vu le jour. Cette première génération était une téléphonie analogique utilisée uniquement pour passer des appels.

Après ce premier pas, les besoins ont changé et on a pensé à améliorer la qualité de service donc on a numérisé cette première technique pour aboutir à une nouvelle technologie qui est le GSM en 1990.

Le GSM a connu un succès énorme et presque tous les pays développés l'ont adopté mais après les progrès et le développement de l'internet on a cherché à l'incorporer dans les téléphones mobiles. Dès lors on a cherché une nouvelle technologie qui permet une connexion à internet avec une qualité de service élevée car le GSM était limité d'où l'arrivée de la troisième génération (3G) qui a permis aux utilisateurs d'avoir accès à un réseau internet mobile et a conduit à un débit plus élevé par rapport à la 2G. De nos jours nous avons la quatrième génération (4G) qui présente beaucoup d'amélioration avec une architecture tout en IP.

Pour être plus précis nous avons la 3.9G avec la norme LTE puis la 4G avec la norme LTE-Advanced appelée encore la vraie 4G.

De ce fait, ce projet de fin d'étude sera en trois grands chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons une étude approfondie du réseau LTE, son architecture, ses caractéristiques, l'interface air, l'objectif du réseau, ses avantages et ses limites.

Le second chapitre sera consacré au dimensionnement du réseau LTE que nous expliquerons en détail, nous allons étudier également le dimensionnement pour la planification orientée couverture et orientée capacité ainsi que le dimensionnement de l'interface X2 et S1.

Dans le chapitre trois, nous présenterons notre outil de dimensionnement ainsi que son principe de planification. Nous élaborons la réalisation par l'exposition des différentes interfaces de l'application que nous validerons par une simulation avec ATOLL.

En fin, on terminera par une conclusion qui récapitulera notre travail et présentera les connaissances acquises suite à ce projet de fin d'étude.

Cahier des charges

Titre du projet : Planification et dimensionnement d'un réseau LTE dans la ville de Mostaganem

Encadré par : Mme Amel Benchellal

Problématiques :

La planification et le dimensionnement d'un réseau consiste à prédire ou trouver de bonnes positions des sites pour une meilleure couverture.

Toutefois il se pose un problème a deux niveaux qui sont d'ordre économique (lié au coût d'installation des sites) et technique dans la mesure où il faut une bonne disposition des sites pour une meilleure couverture. Ce problème nous a poussé à nous poser la question suivante :

Qu'est-ce que la ville de Mostaganem est bien couverte par le réseau LTE ?

Comment trouver une meilleure couverture pour cette ville à travers un outil de planification ?

Objectifs :

Notre objectif à travers ce mémoire est d'avoir une meilleure couverture du réseau 4G/LTE du réseau Mobilis dans la ville de Mostaganem et avoir une capacité accrue pour les abonnées du réseau.

Méthodologie : Au cours de ce projet, nous adopterons une démarche qui a le plan suivant :

- Phase d'étude théorique
- Phase de vérification des données
- Phase de Simulation et d'analyse

Mots clés : modèle de propagation, 3G, 2G, 4G, eNodeB, planification, dimensionnement, bilan de liaison.

Outils : Atoll 3.0

I. Chapitre I : Le réseau mobile LTE

CHAPITRE 1 LE RESEAU MOBILE LTE

I.1. Introduction :

La téléphonie mobile est devenue un outil incontournable dans le quotidien de notre société aussi bien dans les pays industrialisés où elle satisfait des besoins en nouveaux services que dans les pays en voie de développement.

Les réseaux mobiles sans fil ont connu un essor sans précèdent. Il s'agit du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés à la téléphonie (2G, GSM) puis la (3G, UMTS) plus dirigés vers le multimédia, et ensuite la 4G qui nous a apporté un véritable tournant dans le monde de la télécommunication.

L'objectif de la 4G n'est pas seulement d'augmenter les débits et les applications prises en charge par le réseau mais de construire un cadre permettant la communication entre plusieurs appareils.

La quatrième génération (4G) appelé aussi LTE succédant la 2G et la 3G ; nous a permis d'introduire de très haut débit pouvant atteindre en théorie 150Mbit/s. La particularité de la 4G par rapport à ses prédécesseurs est le passage à une structure IP pour le transport des communications vocales et des SMS sous forme de paquets de données.

La 4G accompagne l'arrivée des smartphones et le développement de nouvelles applications fortement consommateurs de données et de bande passante comme : lecture de vidéo ou de musique en streaming, jeu vidéo en ligne…

L'une des évolutions importantes de la 4G est la VOLTE (voice over LTE) qui assure une qualité supérieure des appels vocaux sans trop consommer de bande passante et permet de garder active la connexion 4G pendant la communication téléphonique, cela nécessite des terminaux compatibles.

La norme LTE-Advanced aussi nommée 4G est une version améliorée de la norme 4G, celle-ci permet d'améliorer les performances d'une communication radio-mobile.

I.2. Evolution des réseaux mobiles :

Les réseaux de communication mobile n'ont cessé d'évoluer et plusieurs générations ont vues le jour en commençant dans les années 70 par la première génération qui a été le début d'une grande révolution dans le monde de la téléphonie, cette dernière offrait un service médiocre de communication avec transmission analogique non sécurisée et sans roaming vers

l'international, ensuite est apparu la deuxième génération (2G) qui a eu un changement de technologie en passant de la transmission analogique à la transmission numérique permettant ainsi une sécurisation des données. Le GSM a connu un grand succès et a permis de susciter le besoin de téléphoner en tout avec une possibilité d'émettre des minimessages (SMS).[21]

Les systèmes 2G présentent toutefois plusieurs limites dont la plus grande est d'ordre capacitaire, impliquait des rejets d'appels aux heures les plus chargées de la journée. La seconde est d'ordre fonctionnel avec un débit de 9.6kbit/s. Le GSM utilisait un réseau cœur à commutation de circuit par lequel l'accès aux services de données était très lent. Afin d'augmenter les débits fournis, le réseau d'accès GSM fut connecté à un réseau cœur appelé GPRS (General Packet Radio Service). Cette évolution améliora la prise en charge des services de données. En complément de ce développement, la technologie d'accès radio EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) rendit possible des débits de l'ordre de 240 Kbit/s par cellule grâce à l'amélioration des techniques d'accès au canal radio. Mais à la fin des années 1990, les débits fournis par les réseaux 2G étaient encore trop limités pour que l'accès aux services de données puisse s'écouler facilement. Cette limitation fut à l'origine de la définition des technologies 3G. Sur le tableau I.1 nous pouvons voir l'évolution des débits et les différentes techniques utilisées ainsi que la largeur des différents canaux et la latence. [1]

	GSM/GPRS/EDGE	UMTS Release 99	HSPA	HSPA+ Release8
Débit maximal UL	118 Kbit/s	384 Kbit/s	5.8Mbit/s	11.5 Mbit/s
Débit maximal Dl	236 Kbit/s	384 Kbit/s	14.4 Mbit/s	42 Mbit/s
Latence	300 ms	250 ms	70 ms	30 ms
Largeur de canal	200 KHZ	5 MHZ	5 MHZ	5 MHZ avec possibilité de deux canaux simultanés
Technique d'accès Multiple	FDMA/TDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA
Modulation DL Modulation UL	GSMK 8PSK	QPSK BPSK	QPSK, 16QAM BPSK, QPSK	QPSK,16QAM,64QAM BPSK, QPSK, 16QAM
Bandes de fréquences usuelles (MHZ)	900/1800	900/2100	900/2100	900/2100

Tableau I.1: Caractéristiques des réseaux mobiles de la 1G à la 3G [1]

La troisième génération de réseaux mobiles (3G) regroupe deux familles de technologies ayant connu un succès commercial : l'UMTS (Universal Mobile Télécommunications System), issu

du GSM est largement déployé autour du globe, le CDMA2000, issu de l'IS-95 est déployé principalement en Asie et en Amérique du Nord. Les interfaces radio de ces deux familles reposent sur des caractéristiques techniques proches. Les objectifs de l'UMTS étaient d'augmenter la capacité du système pour le service voix mais surtout d'améliorer le support des services de données. Elle utilise la technologie W-CDMA (Wideband CDMA ou CDMA large bande). Cette dernière est basée sur une technique d'accès multiples CDMA et supporte les deux schémas de duplexage FDD et TDD. Le W-CDMA autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules, renforçant la qualité des communications lors du changement de cellule en mobilité. Cette technique est limitée à un débit maximal de 384 Kbits/s dans le sens montant et descendant. La 3G a connu deux évolutions majeures qui sont le HSPA (High Speed Packet Access) et le HSPA+ (High Speed Packet Access+). Les évolutions HSPA furent introduites par :

- HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) a permis d'augmenter le débit descendant.[21]
- HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) a permis d'augmenter le débit montant.[21]

Le HSPA connu commercialement sous le nom de 3G+, a permis le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio, où des ressources radio sont réservées à chaque UE pendant la durée de l'appel, à une commutation par paquets, où la station de base décide dynamiquement du partage des ressources entre les UE actifs. Les techniques employées par le HSPA impliquent un partage de ressource entre les UE se trouvant dans la même cellule et le HSPA+ connue commercialement sous le nom 3G++ ou H+, a permis d'améliorer les débits fournis aux utilisateurs et la capacité du système grâce à de nouvelle technique comme la modulation 64QAM sur la voie descendante et 16QAM sur la voie montante.

L'introduction de nouvelles technologies sur le marché qui nécessitaient une forte consommation en débit et des services qui nécessitaient également une connexion quasi-continue, provoqua une augmentation de trafic.

Cette augmentation de trafic impliquait un partage des ressources entre les utilisateurs ce qui a conduit à une réduction des débits fournis aux utilisateurs, en plus de cela on avait une énorme charge sur le réseau, ceci mena à une dégradation de la qualité de service d'où l'introduction de la LTE sur le marché avec un très haut débit. [1]

La 4G a été définit par la Release 8 du 3GPP, elle est considérée comme la quatrième étape de l'évolution des réseaux mobiles ou 4G.

L'objectif de la 4G est d'augmenter la capacité et d'assurer également la convergence de la 3G à la 4G avec des réseaux de communication radio basés sur le protocole IP.

Figure I.1: Evolution des réseaux mobiles [13]

Génération	Acronyme	Description	Version des normes 3GPP	Débit Théorique (Download)
1G	RC2000	Analogique	96	9.6Kbps
2G	GSM	Echange de voix uniquement	97	171.2Kbps
2.5G	GPRS	Echange de données seulement	98	384Kbps
2.75G	EDGE	Evolution du GPRS	99	144Kbps rurale, 384Kbps urbaine, 2Mbps point fixe
3G	UMTS	Voix et données	5 et 6	14.4Mbps
3.5G	HSPA	Evolution de l'UMTS	7	21Mbps
3.75G	HSPA+	Evolution de l'UMTS	8	42Mbps
4G (3.9G)	LTE	Données et voix	8 et 9	100Mbps 150Mbps 300Mbps
4.5G	LTE-Advanced	Evolution de la LTE	10,11 et 12	1Gbps à l'arrêt, 100Mbps en mouvement
4.9G	LTE-Advanced Pro	Evolution de la LTE	13	Plus de 3Gbps
5G	NR	Nouvelle Technologie d'accès Radio	14,15et 16	Plus de 10Gbps

Tableau I.2: Différentes technologies de téléphonie mobile [13]

I.3. Principe du concept cellulaire :

Le principe de fonctionnement du réseau cellulaire est basé sur le concept cellulaire.

Une zone desservie par un opérateur est divisée en cellules alimentées par une station de base.

Le principe de ce système est de diviser le territoire en de petites zones appelées cellules. Les stations de base appelées BTS sont reparties uniformément sur un secteur géographique donné permettant ainsi à une cellule d'utiliser plusieurs fréquences qui seront différentes des cellules

voisines. Ces mêmes fréquences seront réutilisées par des cellules suffisamment éloignées pour éviter les interférences.

Le nombre de communication simultanée que peut écouler une station de base (BTS) est limité à cause du nombre de fréquences disponibles (porteuses).

L'opérateur utilise dans les zones urbaines des microcellules pour écouler un Trafic important (plusieurs utilisateurs). On peut citer comme modèle de cellule :

- **Les modèles macro-cellule :**

Les modèles macro-cellule sont des modèles basés sur l'analyse des obstacles (forêt, colline), ils sont essentiellement destinés aux installateurs des réseaux mobiles en environnement rural car ces zones sont faiblement peuplées.

- **Les modèles micro-cellule :**

Les modèles micro-cellule prédisent une zone de couverture très précise et moins étendue. Ces modèles sont destinés aux installateurs des réseaux mobiles en environnement urbain ou semi-urbain. [3]

I.4. Le réseau LTE ou 4G :

La LTE (long Term Evolution) est une norme de communication qui a été proposée par l'organisme 3GPP (3éme Génération Partnership Project, qui est une coopération entre organismes de communication en télécommunications tel que UIT) pour améliorer la norme UMTS des réseaux cellulaires 3G. Elle fut introduite en Algérie en 2016 et au MALI en 2017 par l'opérateur Orange et en 2018 par MALITEL.

Elle offre des débits élevés pour le Trafic temps réel avec une très grande portée. De façon théorique elle peut atteindre des débits de 50 Mbit/s sur le lien montant et 150 Mbit/s sur le lien descendant.

La norme LTE nous propose plusieurs bandes de fréquence d'une largeur allant de 1.25 à 20 MHz en liaison montante comme en liaison descendante ce qui permet à un opérateur de couvrir de très grande surface.

Au tout début la norme LTE était considérée comme une norme de la troisième génération « 3.9G » mais comme elle était plus proche de la 4G on l'a nommée 4G mais elle ne satisfaisait pas toutes les spécifications techniques imposées par la norme 4G par UIT ainsi la 3GPP l'a

fait évoluer en permanence pour aboutir à LTE-Advanced dont on abordera par la suite.[20] L'introduction de la norme LTE est liée essentiellement :

- **La capacité :** les techniques employées par le HSPA impliquaient le partage des ressources avec les UE connectés dans la même cellule et aussi avec la présence de plusieurs UE dans une même cellule cela entrainaient la réduction du débit fourni aux UE. L'accroissement des besoins de capacité est une constante dans l'évolution des réseaux mobiles. En effet chaque technologie doit évoluer constamment en capacité pour satisfaire les besoins des utilisateurs.
- **Les débits :** l'évolution des débits suit une progression semblable à la capacité, chaque nouvelle technologie augmente de débit et doit susciter une attente de débit supérieur. Il était clair que la norme LTE devrait fournir de très haut débit car les valeurs des débits fournis aux abonnés ont augmenté avec l'introduction des techniques HSPA et HSPA+ sur le marché. L'introduction des débits supérieurs à ceux fournis par les technologies HSPA était une demande forte des utilisateurs et aussi des opérateurs car cela permettait à l'utilisateur d'accéder à des services favoris chez lui ou hors domicile avec une certaine facilité, donc l'attente des opérateurs est de fournir des débits supérieurs à ceux fournis par les réseaux HSPA d'où l'un des motifs du déploiement de la norme LTE.
- **Latence :** la latence est le délai de transmission dans les communications, peut être définis aussi comme la capacité du système à traiter rapidement des demandes d'utilisateur ou de service. Ainsi nous avons deux types de latence :
  - ✓ La latence du plan de contrôle : représente le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service.
  - ✓ La latence du plan usager : correspond au délai de transmission d'un paquet au sein du réseau une fois la connexion établie.

L'UMTS et ses évolutions HSPA offraient une latence du plan usager supérieure à 70 ms, une valeur trop importante pour offrir des services tels que les jeux vidéo en ligne. L'amélioration de la latence est l'un des motifs ayant donné la voie à l'introduction d'un nouveau système.

- **L'adaptation du spectre :** La technologie UMTS obligeait les opérateurs à utiliser des canaux de 5 MHz. Cette limitation était très pénalisante dû au fait que les allocations

spectrales dont la largeur est inférieure à 5 MHz ne peuvent pas être utilisées, ce qui limite le spectre disponible en plus de cela en cas de disponibilité de plusieurs bandes spectrale de largeur 5MHz, l'opérateur était incapable d'allouer simultanément plusieurs porteuses à un même UE. Cette contrainte limite le débit maximal du système ainsi que la flexibilité de l'allocation des ressources spectrales aux utilisateurs. Cette contrainte a été résolu partiellement avec le HSPA+, avec la possibilité de servir un UE sur deux porteuses de 5 MHz simultanément mais un consensus s'est ainsi imposé sur le besoin d'un système dit « agile en fréquence », capable de s'adapter à des allocations spectrales variées. Cette agilité est un objectif de conception fort du LTE.

I.5. Les caractéristiques de la 4G :

L'objectif majeur de la 4G est d'améliorer le support des services à travers une capacité accrue du système, une augmentation des débits, une réduction de la latence et fournir une meilleure qualité de service ainsi la 4G est caractérisée par :

I.5.1. Les débits : Les objectifs du débit maximale définit pour la LTE :

- 150Mbit/s dans le sens descendant avec une largeur de bande allouée de 20 MHZ.
- 50Mbit/s dans le sens montant avec une largeur de bande de 20 MHZ.

Ces débits sont appliqués à un UE qui comporte deux antennes en réception et deux antennes en émission on les appelle des "antennes MIMO ".

- **La Latence :** la latence a été améliorée avec la technologie LTE. Avec un plan de contrôle ayant un temps de transition inférieur à 100 ms et un plan usager ayant un temps de latence inférieur à 5 ms.
- **Une agilité en fréquence :** le LTE opère sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Elle utilise des bandes de fréquences hertziennes comprise entre 1.4MHZ et 20MHZ dans les deux sens. [9]
- **Capacité :** la technologie LTE a permis d'atteindre les 400 utilisateurs par cellule pour des largeurs de bandes supérieures contrairement à la technologie UMTS qui atteignait seulement au moins 200 utilisateurs par cellule.

- **Mobilité :** le LTE permet d'assurer des vitesses allant jusqu'à 350 km/h, voir jusqu'à 500 km/h en fonction des bandes de fréquences utilisées. Le handover pourra donc s'effectuer dans des conditions où l'usager se déplace à grande vitesse. [15]
- **Connexion permanente :** le principe des accès haut débit où la connectivité est permanente pour l'accès à Internet. Il est nécessaire pour le terminal de passer de l'état IDLE à l'état ACTIF lorsqu'il s'agira d'envoyer ou de recevoir un trafic. Ce changement d'état s'opère en moins de 100 ms.

I.6. Architecture du réseau LTE :

L'architecture du réseau LTE est appelée architecture plate car elle est constituée uniquement de station de base (eNodeB) dans la partie l'E-UTRAN. La suppression du contrôleur de station de base en LTE s'explique par une volonté de réduire la latence du système et pour rendre l'architecture LTE plus simple, robuste et évolutive face à la montée en trafic, raison pour laquelle le LTE s'appuie sur un nouveau réseau d'accès, qui nous amène à utiliser de nouvelles bandes de fréquences à exploiter, des nouvelles antennes à déployer sur tout le territoire. [2]

Avec tout une architecture basée sur Internet Protocol (IP), l'architecture du réseau LTE se compose de deux parties : un réseau évolué d'accès radio LTE (l'E-UTRAN) et le réseau cœur évolué, comme on peut le voir sur la Figure I.2.

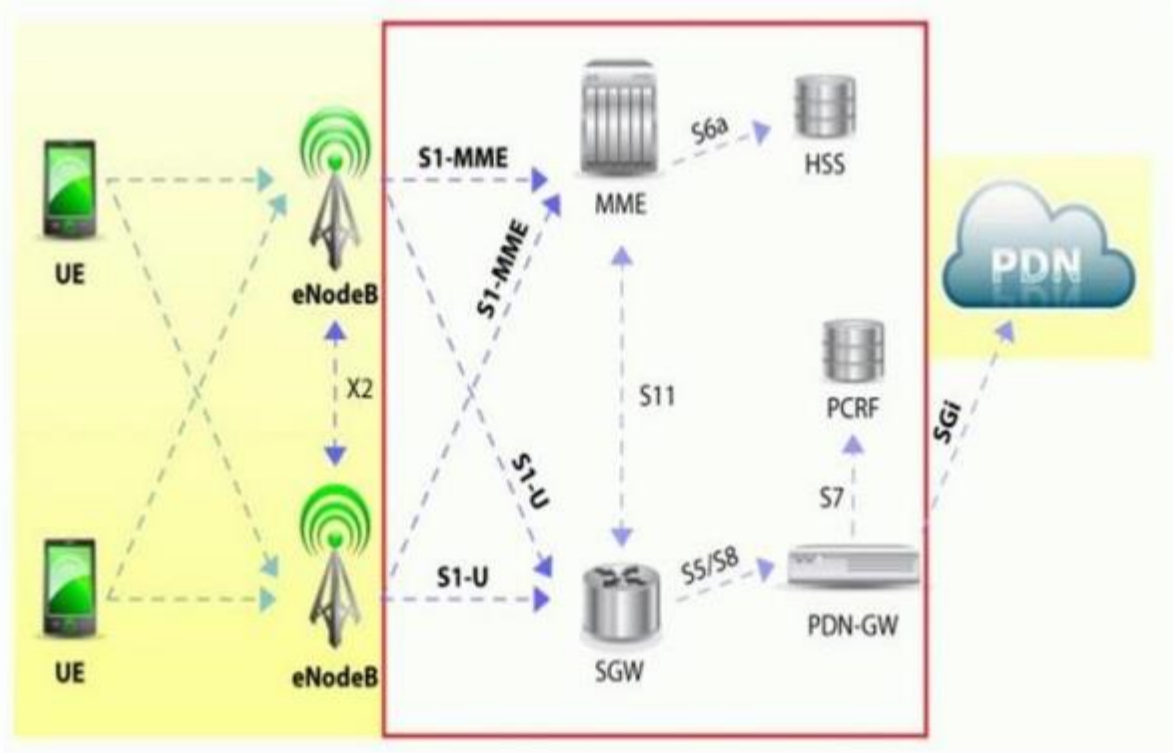


Figure I.2: Architecture de le LTE [11]

I.6.1. Le réseau cœur EPC (Evolved Packet Core) :

Le réseau cœur évolué appelé EPC utilise des technologies en IP c'est-à-dire qu'il est basé sur le Protocol internet. Il permet la signalisation, le transport des voix et des données, il assure la mobilité, la gestion des utilisateurs, la sécurité et la qualité de service et assure également l'interconnexion avec des routeurs, les réseaux de téléphonie fixe et le réseau internet.

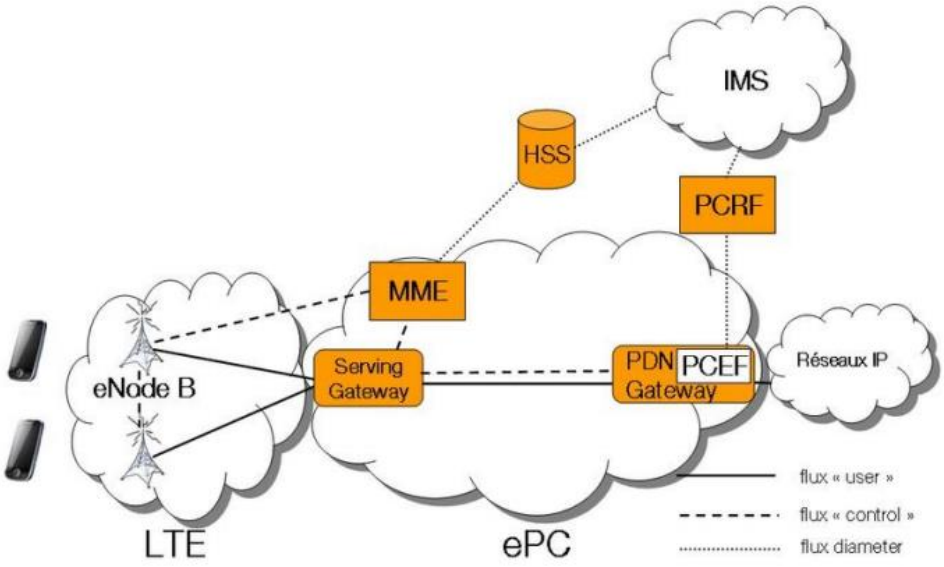


Figure I.3: Architecture EPC [8]

L'EPC d'un réseau LTE est constitué principalement :

Le MME (Mobility Manager Entity) : cette partie est responsable de la localisation de UE, de connaitre sa position, permet de gérer la signalisation et les procédures d'authentification et de mobilité des Equipements mobiles. Cette entité permet aussi le contrôle du signal entre le UE et le réseau cœur, et assure l'établissement et la maintenance. [2]

HSS (Home Suscriber Service) : c'est une base de données évoluée du HLR, cette entité contient le profil de l'abonné pour les réseaux : 2G, 3G et 4G.

Le SGW (Serving Gateway) : c'est un lien entre le réseau d'accès radio et le réseau cœur. Il est responsable du transport des communications d'un relai à un autre. Il gère tout aspect handover inter-eNodeB et peut effectuer un transfert vers un réseau 2G ou 3G. [11]

Le PGW (Packet Data Network Gateway ou PDN Gateway) : Il est responsable du routage de paquet en attribuant une adresse IP au mobile lors de son attachement au réseau. Il achemine les données internet vers l'UE et réciproquement les données de l'UE vers internet, il effectue pour chaque mobile l'allocation d'adresse IP, le filtrage et comptabilise les octets échangés. Il arrive à se connecter aux UE à travers un eNodeB et un SGW.

Le PDN-GW est la passerelle vers les réseaux externes, il est responsable du lien entre les réseaux et notamment avec le monde internet. [11]

Le PCRF (Policy Charging Rules Function) : le PCRF est la règle de tarification politique. Cette entité fournit au PGW les règles de taxation nécessaires pour différencier les flux de données et de les taxer d'une façon convenable. Le PCEF (Policy Control Enforcement Function) intégré dans la PGW, communique avec le PCRF pour appliquer les règles fixées par ce dernier.[22]

SGSN (Serving GRPS Support Nom) : c'est la partie qui interconnecte le LTE, UMTS et le réseau GSM pour augmenter la mobilité par exemple si l'usager se déplace d'une zone LTE à une zone 2G ou 3G. Le MME sélectionnera la SGSN et ce dernier sera impliqué dans la mise en place du default bear. [2]

IMS (IP Multimedia Sub-system) : il permet d'offrir des services multimédias sur les réseaux IP entre autres sur les réseaux mobiles. IMS permet des services interpersonnels multimédia riches tels que voix sur IP, conférence vidéo, messagerie instantanée, sonnerie sur plusieurs terminaux. [8]

I.6.2. Le réseau d'accès radio E-UTRAN :

La partie radio du réseau appelée E-UTRAN est simplifiée par rapport à celles des réseaux 2G (BSS) et 3G (UTRAN) par l'intégration des stations de base appelées « eNodeB ».

Il ne comporte que les eNodeB. A la différence de la 3G, les fonctions supportées par la RNC (Radio Network Controller) ont été répartis entre l'eNodeB et les entités du réseau cœur SGW. Cette partie est responsable de la gestion des ressources radio, la compression, la sécurité, et la connectivité vers le réseau cœur évolué. Cette partie est caractérisée par :

- Débit de l'interface radio
- La mobilité
- Coexistence et l'interconnexion avec la 3G
- Une connexion permanente
- Délai de transmission de données

L'eNodeB : est l'équivalent de la BTS dans le réseau GSM et de NodeB dans le réseau UMTS.

Les eNodeB permettent de faire la liaison entre l'équipement utilisateur et le réseau cœur. Ils ont pour fonction la sécurisation lorsqu'on a un problème de relais et le partage des ressources lorsque le lien principal est saturé. La fonctionnalité de handover est plus robuste dans LTE.[16]

I.7. Architecture protocolaire de l'interface radio :

Les plans (usager et contrôle) sont matérialisés par des piles protocolaires qui partagent un tronc commun (partie inférieure) et se distinguent par des interactions avec les couches supérieures. La signalisation NAS est véhiculée à travers le plan de contrôle de l'interface radio, le plan usager permet de véhiculer sur la signalisation des paquets à destination de la couche IP.

Remarque : le NAS (Strate de Non Accès) représente un ensemble de protocoles qui s'établit entre l'UE et le réseau cœur. Le NAS permet l'échange d'information de contrôle ou de données quelque soit l'accès radio.

Les deux plans sont présentés comme suit sur la figure I.4:

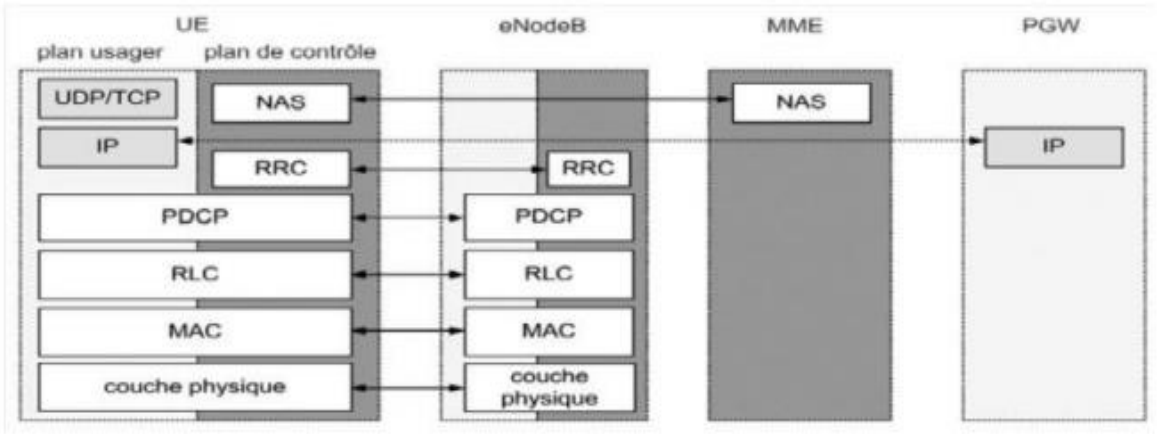


Figure I.4: Architecture protocolaire de le LTE [9]

Un paquet émis par un UE est encapsulé dans un protocole EPC pour traverser le tunnel existant entre le P-GW et eNodeB et arrivé à destination. Le protocole de perçage GTP (GPRS Tunnel Protocol) est employé au-dessus des interfaces cœur du réseau pour se charger de l'acheminement du paquet vers l'eNodeB correspondant.

Le flux de trafic regroupe l'ensemble des données de l'usager et les signalisations au niveau de l'application. Le flux de signalisation permet le transport des messages de signalisation par exemple (la signalisation pour la gestion des ressources radio, pour la gestion de mobilité, pour les services NAS et d'autres procédures entre le mobile et le cœur de réseau). [9]

L'interface radio est la couche réseau communicante entre UE et le MME, gérant l'établissement des appels et la gestion de la mobilité.

I.7.1. Les couches de l'interface radio :

Cette interface fournit des connexions entre UE et eNodeB. Comme le modèle de l'interface UMTS, le modèle LTE se compose d'un ensemble de couches dont le rôle de chacune sera brièvement décrite. [9]

L'interface radio est caractérisée par les couches suivantes :

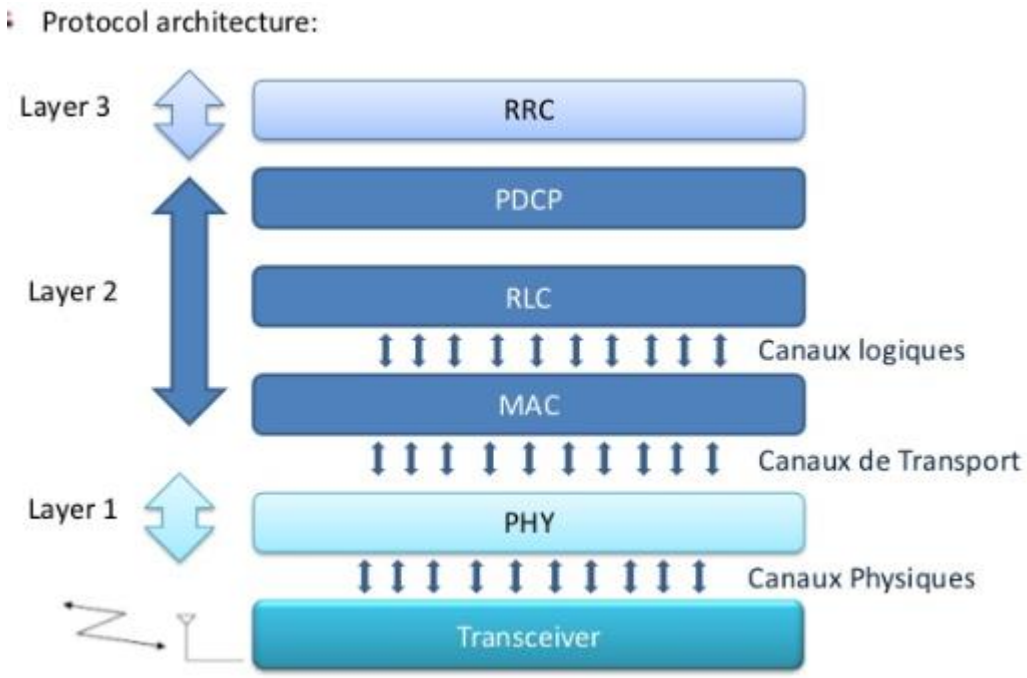


Figure I.5: Les différents couches de l'interface radio

I.7.1.1.La couche physique :

La couche physique ou encore appelée layer 1 (L1), son rôle est d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air en résistant aux différentes perturbations du canal radio mobile. Cette dernière offre un service de transport de données sur l'interface air de la couche MAC. Parmi ces fonctions nous pouvons citer :

- Le codage de canal, qui protège les bits d'informations contre les erreurs de transmission, en introduisant de la redondance dans la séquence de bit transmis.

- Le traitement spatiaux (MIMO), qui précodent les symboles de modulation pour les transmettre sur plusieurs antennes.
- La modulation qui associe les bits à transmettre à des symboles de modulation capables d'imprimer une onde électromagnétique.
- La modulation multi porteuse permettant d'associer le signal à transmettre sur chaque antenne à des porteuses multiples, selon le principe de l'OFDM pour la liaison montante et de SC-FDM pour la liaison descendante.

I.7.1.2.La couche 2 qui ressemble à la couche liaison du modèle OSI :

Cette couche est constituée de trois sous-couches :

- PDCP (Packet Data Compression Protocol)
- RLC (Radio Link Control)
- MAC (Meduim Access Control)

Ces sous-couches interviennent pour le transfert des données du plan usager comme du plan de contrôle

I.7.1.3. La sous-couche PDCP :

Cette couche permet d'assurer des fonctions de sécurité et de transfert des données :

- La compression d'en tête IP
- Le chiffrement des données et la signalisation RRC
- Détection et suppression des doublons (unité de données PDCP reçues deux fois). [4]

I.7.1.4. La sous couche RLC :

Elle est située au-dessous de la couche PDLP, elle a pour rôle le transport des données entre l'UE et eNodeB. [4]

I.7.1.5. La sous-couche MAC :

Elle permet l'accès et l'adaptation au support de transmission grâce aux fonctions suivantes :

- Le maintien de la synchronisation sur le lien montant
- La priorisation des flux sur le lien montant

- La correction d'erreur par retransmission lors de la réception d'un acquittement.

I.7.1.6. La couche RRC :

Cette couche sert de contrôle de l'interface radio. Elle est connectée au quatre couches à travers des points d'accès de contrôle. Elle est aussi responsable de la configuration et du contrôle des couches de niveau 1 (couche physique) et niveau 2 (MAC, PDCP et RLC).

Elle assure les fonctions suivantes :

- L'envoie des messages de paging pour localiser un UE.
- La gestion des connexions RRC telle que l'établissement, la reconfiguration et le relâchement.
- La mobilité en mode connecté.
- La transmission de signalisation de la couche supérieure.
- La diffusion des informations du système vers un autre eNodeB.

I.8. Technique d'accès :

Pour tout système radio il est important de définir une technique d'accès qui permet une gestion des ressources radio disponible. Pour les réseaux LTE, la technique OFDMA est utilisée sur la liaison descendante et SC-FDMA sur la liaison montante. Le SC-FDMA a été adopté pour la liaison montante du LTE car ce codage permet de diminuer la consommation électrique du terminal et donc contribue à l'augmentation de l'autonomie de la batterie.[18]

L'OFDMA est utilisée pour la liaison descendante car il permet pour une même largeur spectrale, un débit binaire plus élevé. [18]

Avant d'aborder ces deux techniques nous allons introduire l'OFDM.

I.8.1. L'OFDM :

L'OFDM est un principe de multiplexage qui consiste à répartir sur un grand nombre de sous porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Cette technique est utilisée pour que les fréquences des sous porteuses soient les plus proches que possibles pour transmettre un maximum d'information sur une portion de fréquence donnée. En OFDM les sous-porteuses sont orthogonales entres elles. Les signaux des sous porteuses se chevauchent entre elles mais grâce à l'orthogonalité ils ne s'interfèrent pas entre eux.

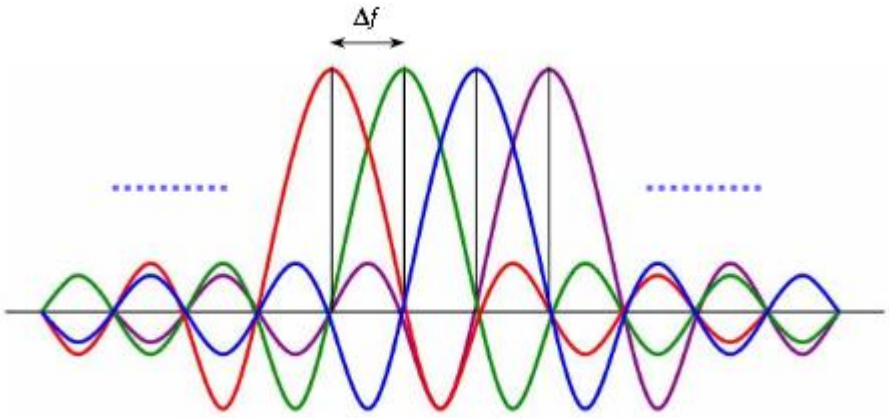


Figure I.6: Principe de l'OFDM [5]

I.8.2. L'OFDMA ET L'SC-FDMA :

- **L'OFMA :** est une extension de la technique OFDM, c'est une combinaison du TDMA et du FDMA. Etant une technique de multiplexage, ce codage radio assure le multiplexage en fréquence et en temps et assure également un partage aisé des ressources fréquentielle entre un nombre variable d'utilisateur bénéficiant de débits divers. Il est utilisé pour les liaisons radio descendante du réseau LTE. L'espacement entre les sous porteuses est de 15 KHZ.
- **Le SC-FDMA :** il est utilisé pour la liaison montante (dans le sens terminal vers station de base) en LTE. Il est connu sous le nom (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Il offre des performances similaires à l'OFDMA. En OFDMA, les symboles sont transmis à travers une sous porteuse alors qu'en SC-FDMA chaque symbole est étalé sur l'ensemble des sous-porteuses allouées. [7]

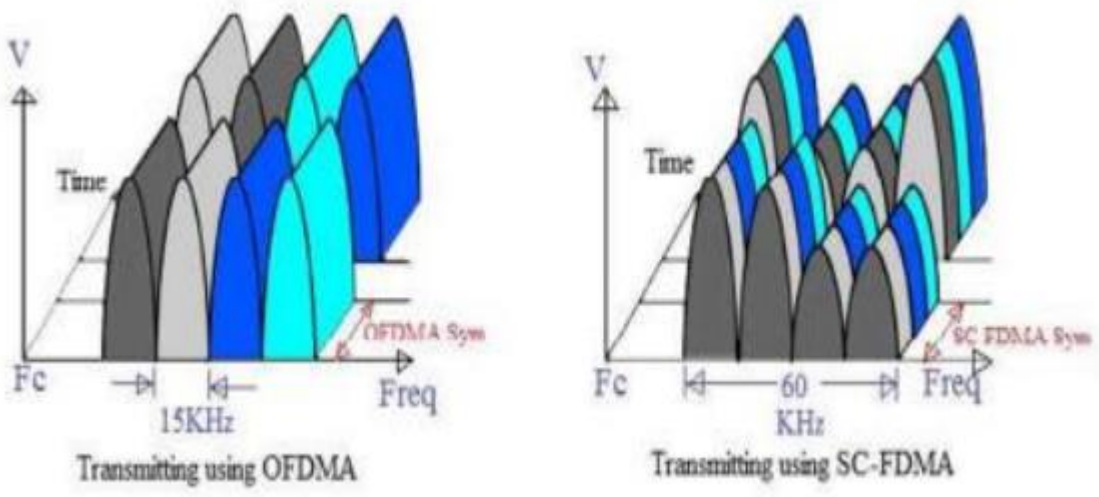


Figure I.7: La différence entre l'OFDMA et SC-FDMA [13]

I.9. Structure d'une trame :

La trame générique du réseau LTE à une durée de 10 ms, décomposée en 20 slots de 0.5 ms chacun numérotés de 0 à 19. [5]

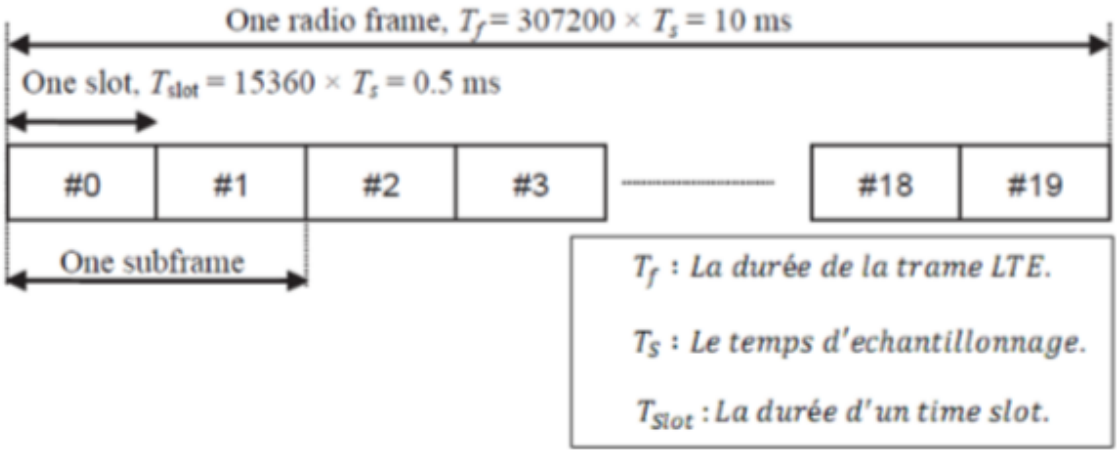


Figure I.8: Structure d'une trame LTE [6]

Le duplexage est une caractéristique spécifique au réseau, il permet la séparation de la liaison radio entre l'UE et la station de base en liaison montante et descendante. Le duplexage peut être effectué afin d'attribuer les slots d'émission et de réception.

Il existe deux types de structure de trame de deux modes de duplexage :

❖ **La structure de trame de type 1 :** mode FDD (Frequency Division Duplex)

Dans le mode FDD, l'émission et la réception se font à des fréquences différentes c'est à dire que la fréquence de la porteuse du signal est différente suivant le sens de la liaison (montante ou descendante). L'avantage principal de la FDD par rapport à la TDD est qu'elle permet d'émettre et de recevoir simultanément.

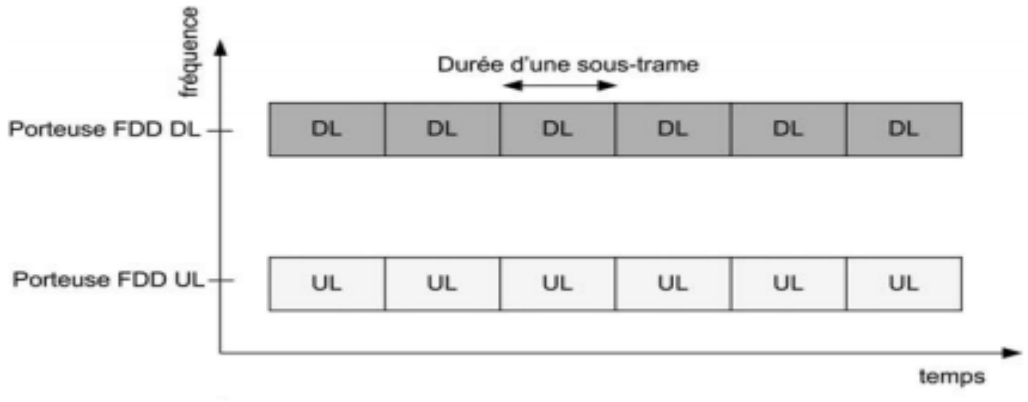


Figure I.9: Structure de Trame en FDD [9]

❖ **La structure de trame de type 2 :** mode TDD (Time Division Duplex)

Les deux sens utilisent les mêmes fréquences dans le mode TDD avec des intervalles de temps différents appelés times slots c'est-à-dire qu'il permet à un canal de communication utilisant une même ressource de transmission (par exemple le canal radio) de séparer le temps de l'émission et de réception.

Cette technique présente l'avantage dans le cas où les débits d'émission et de réception sont variables c'est-à-dire, le débit d'émission ou de réception augmente ou diminue. Un autre avantage de cette technique est qu'elle est très efficace pour la technique de « beamforming ».

Remarque :

Le beamforming, encore appelé filtrage spatial ou formation de faisceau, exploite les ondes électromagnétiques pour améliorer la précision des connexions. Sa technique consiste à focaliser un signal vers un dispositif de réception spécifique au lieu de le diffuser dans toutes les directions à partir d'une antenne radio, dans ce cas la connexion est plus rapide, plus directe qu'elle ne le serait sans formation de faisceau.

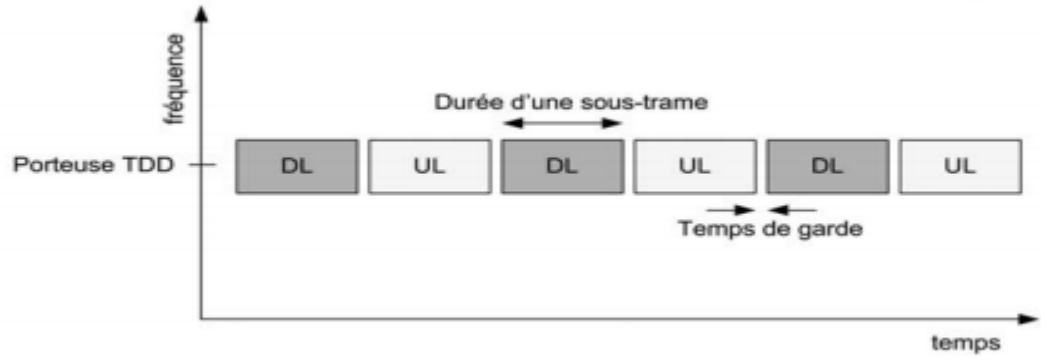


Figure I.10: Structure de Trame en TDD [9]

I.10. La technologie MIMO :

Les antennes MIMO jouent un rôle important dans le réseau LTE. Elles se basent sur l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception. Les antennes MIMO font partie intégrante de du LTE. Cette technologie permet la transmission simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur.

En utilisant plusieurs antennes à l'émission et à la réception on obtient la diversité spatiale dont l'objectif est de combattre l'évanouissement causé par de multi-trajet.

Cette technologie MIMO est utilisée dans le but d'augmenter le débit et la portée des réseaux sans fil.

Lorsqu'un système comprend une antenne en émission et plusieurs antennes à la réception, on parle de SIMO, s'il comporte plusieurs antennes à l'émission et une antenne à la réception, il est nommé MISO et si les deux cotés (émission-réception) comportent une antenne chacune on parle de SISO. [5]

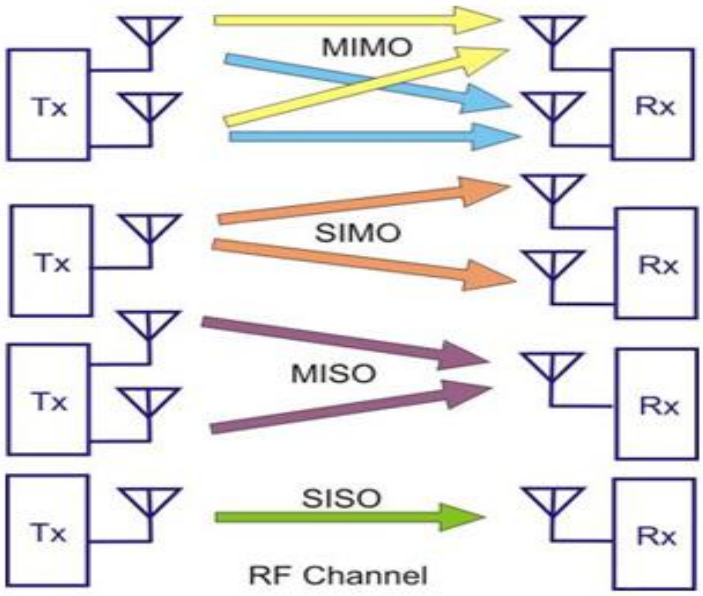


Figure I.11: Différents types d'antennes [5]

Avec une telle structure mise en place (antenne MIMO) dans le réseau LTE cela permet d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR) et donc le taux d'erreur binaire.

I.11. Le réseau LTE-Advanced :

Le LTE Advanced est une (version) évolution de la norme LTE lui permettant d'atteindre le statut de la véritable norme 4G tout en gardant une compatibilité avec le LTE.

Grâce aux fréquences identiques et aux techniques de codage telles que la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant, la technique SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) pour le sens montant et la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output) pour l'émission-réception qui sont déjà utilisées dans le réseau LTE.

Le LTE-Advanced permet de fournir des débits descendants (pour le téléchargement) supérieurs à 1Gbit/s et 500 Mbit/s pour la liaison montante. Le LTE-Advanced est caractérisé par :

- Un débit maximal descendant de 1Gbit/s
- Latence : moins 5 ms
- Une bande passante de 100 MHZ
- Mobilité : elle a la même mobilité que le LTE

- Comptabilité : elle est compatible avec le LTE et les Systèmes existants 3GPP (2G/3G).

	LTE	LTE ADVANCED
Max downlink speed (bps)	150 M	1G
Max uplink speed (bps)	50 M	500 M
Temps de latence	≈10 ms	Less than 5 ms
3GPP releases	Rel 8/9	Rel 10
Année de déploiement	2009/10	2011
Méthode d'accès	OFDMA/SC-FDMA	OFDMA/SC-FDMA
Spectre hertzien (MHZ)	20	100

Tableau I.3: Différence entre LTE et LTE-Advanced

I.12. Le réseau LTE-Advanced Pro :

La LTE-Advanced Pro est une norme de développement des réseaux mobiles après le LTE et LTE Advanced. Elle est parfois appelée 4.5G ou 4.9G, elle est considérée comme une technologie intermédiaire entre la 4G définis par les premières versions de LTE et la nouvelle technologie d'accès radio 5G. [23]

Elle permet d'agréger jusqu'à 32 porteuses par rapport à la LTE-Advanced qui agrège 5, en plus de cela elle intègre plusieurs nouvelles technologies associées à la 5G, telles que 256 QAM, massive MIMO, LTE-Unlicensed et LTE lot qui permettent l'évolution des réseaux vers la prise en charge de la norme 5G. [13]

Elle est caractérisée par :

- Des vitesses de données supérieurs à 3Gbps
- Une bande passante de 640 MHZ
- Latence : 2 ms

- Comptabilité : elle est compatible avec le LTE et les Systèmes existants 3GPP (2G/3G)

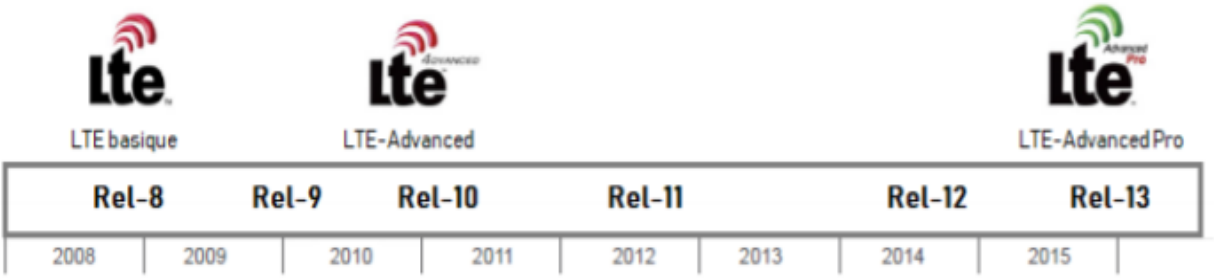


Figure I.12: Evolution de la technologie LTE [13]

I.13. La qualité de service :

La qualité de service appelée en anglais QOS (quality of service) est la capacité de transmission dans de bonnes conditions d'un certain nombre de paquet entre un émetteur et un récepteur. La qualité de service est nécessaire pour garantir à l'utilisateur des débits suffisants et constants.

Le LTE offre des mécanismes de qualité de service différents pour faciliter la prise en compte des différents services. Les services mobiles peuvent être distingués selon deux critères souvent intimement liés :

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

Ces deux caractéristiques impliquent une prise de charge différente sur le réseau. On constate dans ce cas que le traitement d'un appel voix n'impose pas les mêmes contraintes que le téléchargement d'un fichier. De façon générale les services temps réels comme par exemple (un appel en streaming ou un appel voix) demandent des délais de transmission court et peuvent tolérer des erreurs de transmissions alors que les services non-temps-réel comme par exemple (le téléchargement d'un fichier ou d'un courrier) peuvent tolérer des délais de transmissions mais ne tolèrent pas des erreurs de transmission.

Le LTE offre des applications qui ont besoins de la qualité de service puisque c'est un réseau tout en IP. [2]

Selon les types de service à offrir et qui dépendent de la qualité de service désirée par l'utilisateur, la qualité de service est définie par les critères suivants :

- **Les pertes de paquets :** elles correspondent aux octets perdus lors de la transmission de paquet c'est-à-dire les paquets de données qui n'ont pas été reçu par la destination lors d'une communication.
- **Le débit :** il définit le débit maximal en bit pour la transmission de l'information par unité de temps dans une communication entre l'émetteur et le récepteur.
- **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, il monopolise toute la bande passante disponible par exemple (lors du téléchargement d'un fichier).
  - ✓ Le mode stream : est un mode constant, plus adapté aux applications interactives ou aux fonctions audio/vidéo. [2]

I.13.1. Le porteur EPS :

Le porteur EPS appelé en anglais (The bearer EPS) est un tuyau (tunnel) construit entre l'Equipement User et le P-GW, il est caractérisé par des paramètres de qualité de service parce que les applications n'ont pas le même besoin c'est-à-dire que nous avons des applications qui nécessitent un débit garantit comme le streaming, la phonie et des applications qui ne nécessitent pas de débit garantit comme le téléchargement d'un fichier, ainsi il existe deux types de bearers EPS : [4]

- **Le default bearer :** le default bearer est le premier bearer établie lorsque l'UE s'enregistre auprès du réseau, il reste actif durant toute la durée de la connexion. [19]
- **Les Dedicated bearers :** appelés en français les porteurs dédiés, ils permettent d'obtenir une qualité de service spécifique à l'application demandée par l'utilisateur.[19]

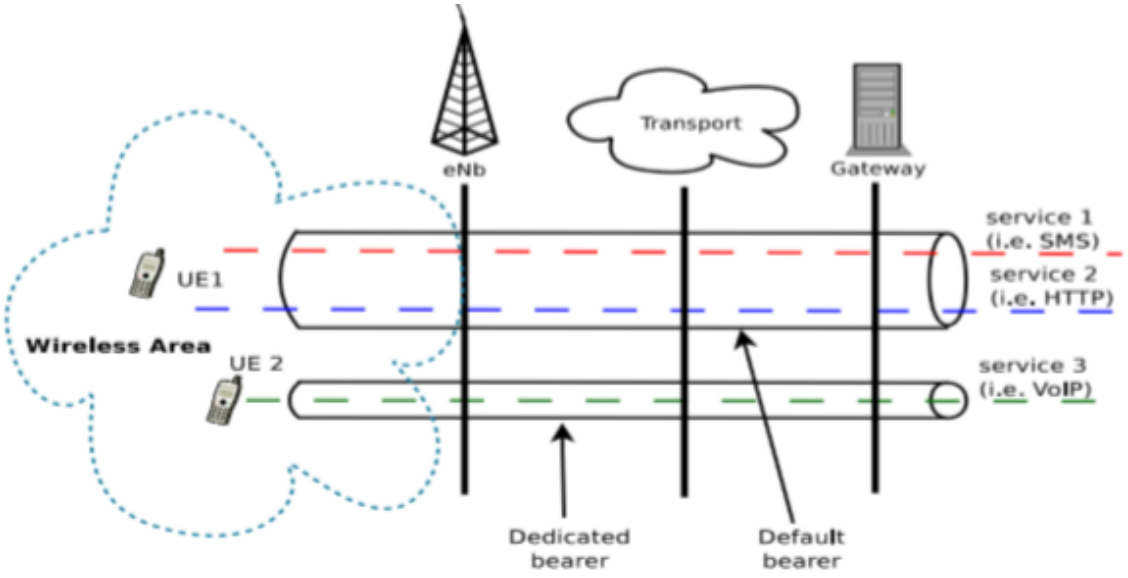


Figure I.13: EPS bearers [4]

I.14. Modulation et codage adaptatifs :

La modulation et le codage adaptatif sont une approche efficace qui tend à adapter la technique de modulation et de codage en fonction de l'état du canal. Ils permettent de maximiser l'efficacité spectrale (le débit permit par bits par second par Hz) tout en gardant le taux d'erreur par bit (BER) inferieur à un certain seuil. Chaque sous-porteuse est modulée à l'aide de différents niveaux de modulation ainsi nous avons le QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) qui correspond au 4QAM, le 16-QAM et le 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation à 16 états). [2]

Avec la mise en œuvre de la modulation 16 QAM, cette dernière a permis de doubler la capacité de transfert par rapport à la technologie UMTS. La modulation 16 QAM utilise deux niveaux d'amplitude avec deux porteuses en quadrature ce qui se traduit par 2^4=16 états d'informations. Chacune des différents niveaux de modulation est utilisé pour un lien précis comme suit :

- Modulations pour la liaison montante : QPSK et 16-QAM.
- Modulations pour la liaison descendante : QPSK, 16-QAM et 64-QAM.

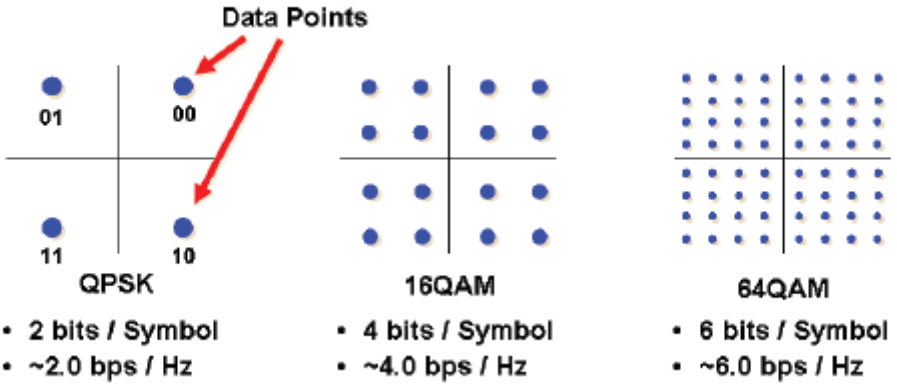


Figure I.14: Les différents types de modulation [13]

I.15. Les avantages du LTE :

Le principal avantage du réseau LTE est la vitesse, cette connexion nous permet de télécharger du contenu avec une très grande vitesse. En augmentant considérablement la vitesse de téléchargement des données, le réseau LTE a permis aux smartphones d'exprimer tout leur potentiel ainsi nous pouvons citer comme avantages :

- ❖ Augmentation du débit du réseau
- ❖ Augmentation de la vitesse de transfert de données
- ❖ La qualité de service élevée
- ❖ Grande capacité
- ❖ Permet de lire des vidéos HD en streaming sans aucune difficulté
- ❖ Effectuer des vidéoconférences

Bien sûr comme chaque technologie le LTE présente des avantages aussi bien que des inconvénients.

I.16. Les limites du LTE :

Comme inconvénients du LTE nous pouvons citer :

- ❖ Incompatible avec tous les smartphones.
- ❖ Difficile à mettre en œuvre.
- ❖ Les forfaits sont très chers.
- ❖ Consomme plus de donnée du tarif en moins de temps.

- L'accès à ce réseau est accessible que dans les villes ou les zones largement communiquées.

I.17. La 4G dans le monde :

Les réseaux LTE du monde entier exploitent une multitude de bande de fréquences différentes.

Dans l'attribution des fréquences pour la norme LTE par l'ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques et de Postes) nous pouvons citer :

- La bande de fréquence B3 (1800 MHZ)

Cette bande de fréquence permet à l'opérateur d'accélérer le déploiement de son réseau 4G car elle est déjà utilisée pour le réseau 2G que l'opérateur a eu le temps de déployer. Cette bande de fréquence présente des caractéristiques à mi-chemin entre le 800MHZ et le 2600 MHZ car elle pénètre mieux que le 2600MHZ mais porte moins loin que le 800 MHZ.[17].

- La bande de fréquence B1 qui correspond au 2100 MHZ

Comme la bande 1800 MHZ, cette bande permet à l'opérateur d'accélérer le déploiement de son réseau 4G car c'est une bande déjà utilisée pour le réseau UMTS (3G).

- La bande de fréquence B7 (2600 MHZ)

Cette bande de fréquence est idéale pour les grandes villes, elle présente des caractéristiques opposées à la bande 800MHZ car elle couvre une surface réduite et traverse moins facilement les murs.[17]

- La bande de fréquence B20 (800 MHZ)

Cette bande de fréquence est souvent appelée les fréquences en or car elle présente l'avantage de porter plus loin c'est-à-dire d'aller sur une très grande distance, ce qui limite le nombre de relais pour le déploiement. Elle pénètre également mieux à l'intérieur des maisons. Elle est parfaitement adaptée aux zones rurales. Comme désavantage cette bande de fréquence est très voisine aux fréquences 790MHZ de la TNT. [17]

Ces bandes de fréquences ont été distribuées dans certains pays comme suit :

- EUROPE :

L'Europe a fait le choix de réserver la bande de fréquence 800 MHZ (pour le dividende Numérique) et 2600 MHZ pour les réseaux LTE mais dans beaucoup de pays les opérateurs ont choisi la bande1800 MHZ initialement attribuée à la GSM.

- ASIE
  - ✓ THAILANDE

La Thaïlande a choisi les bandes 1800 MHZ et 2300 MHZ.

- Les ETATS-UNIS :

Les Etats-Unis ont choisi les bandes de fréquences 700 MHZ et 1700-2100 MHZ.

- AFRIQUE
  - ✓ Le MALI

Au Mali, l'orange opère sur la bande 800 MHZ et Malitel sur la bande 1800 MHZ

  - ✓ ALGERIE

En Algérie c'est la bande de fréquence 1800 MHZ qui est mise à la disposition des Opérateurs.

I.18. Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté les principaux composants et techniques utilisés dans les réseaux LTE. Ces derniers présentent les mêmes objectifs mais ils se différencient au niveau de quelques caractéristiques comme par exemple le débit offert et la qualité de service. Alors que la LTE n'a pas fini de nous montrer ces performances à l'heure actuelle nous avons la 5G ou l'ultra haut débit mobile. Elle ambitionne en effet d'offrir aux usagers des débits dépassant les 10Gbps avec 1 ms de latence et une réduction de 90% en utilisation d'énergie du réseau. Cette technologie abordera l'évolution au-delà de l'internet mobile vers l'IOT (Internet des Objets). Dans le chapitre suivant nous allons aborder le dimensionnement d'un réseau LTE.

II. Chapitre II : Dimensionnement d’un réseau LTE

CHAPITRE 2 DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU LTE

II.1. Introduction :

Le dimensionnement d'un réseau LTE est la première étape du processus global de la planification, permettant ainsi une première évaluation de la densité, de la configuration des sites demandés, de la capacité offerte et de la couverture à estimer conjointement avec la capacité. C'est une étape primordiale dans la conception d'un réseau, elle permet aux opérateurs de trouver une position optimale des sites, en tenant compte des caractéristiques de l'environnement, des caractéristiques des abonnés à desservir en termes de densité et de demande de trafic.

Cette étape est importante pour un opérateur de télécommunication qui a pour but d'offrir des services de voix et de données au public et ainsi les communications peuvent s'établir n'importe où dans la zone de couverture.

L'opérateur doit effectuer en premier lieu la planification de son réseau avant sa mise en œuvre afin d'optimiser de manière fiable le cout de déploiement.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le processus de planification et dimensionnement d'un réseau LTE en introduisant les concepts de base et les calculs mathématiques nécessaires au dimensionnement sur les deux phases : couverture et capacité. [2]

II.2. Processus de dimensionnement d'un réseau :

La planification en LTE, comme tout autre réseau cellulaire est une tâche très complexe. Par rapport à ses prédécesseurs, la planification de la couverture et de la capacité en LTE se font de manière conjointe, en une seule tâche d'où le nom « Dimensionnement ». [2]

Le processus de dimensionnement se résume en quatre étapes comme le montre la figure II.1 :

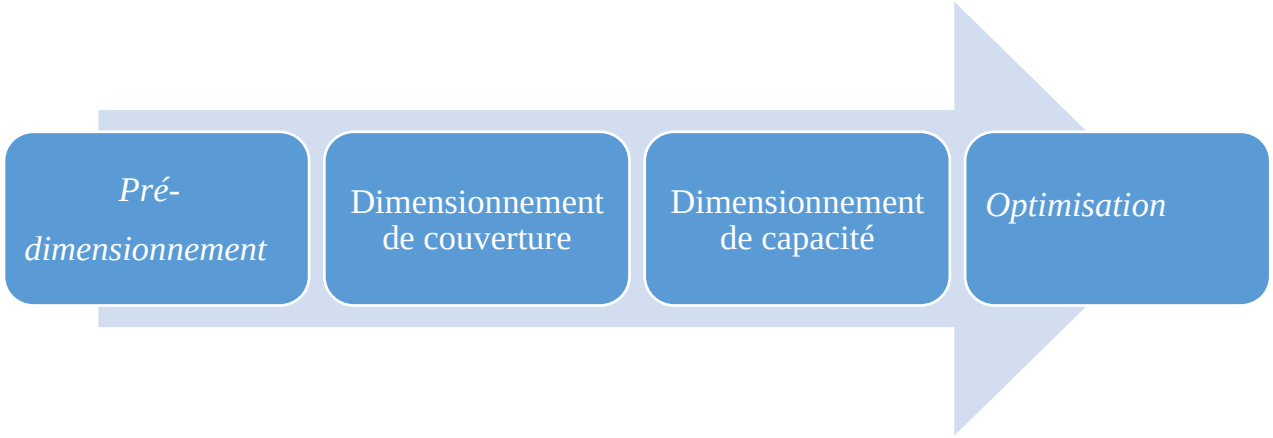


Figure II.1: Processus de dimensionnement d'un réseau LTE [5]

II.2.1. Pré-dimensionnement :

Le pré-dimensionnement nécessite la collecte des informations qui interviennent sur la zone de déploiement, comme informations nous pouvons citer : [3]

- Les informations détaillées sur l'eNodeB et l'UE.
- Les informations de la zone de déploiement (superficie, information démographiques).
- Les données géographiques (cartographique, population, zone à couvrir et taux de pénétration des abonnés dans cette zone (services demandés, trafic offert…)).
- Les services à offrir : voix, données.
- La liste des sites : Identifier les lieux pour placer les eNodeB.
- Type d'antenne à utiliser

II.2.2. Dimensionnement de la couverture :

L'analyse de la couverture reste fondamentalement l'étape la plus critique dans la conception d'un réseau LTE. Il est important de choisir un modèle de propagation approprié, le résultat final à obtenir est la taille de la cellule à couvrir ce qui donne une estimation sur le nombre total de site. Cette estimation basée sur les exigences de la couverture doit être vérifié aussi par les besoins de capacité. [5]

II.2.3. Dimensionnement de la capacité :

Le dimensionnement de la capacité est une étape qui consiste à sélectionner les positions géographiques adéquates des sites, la vérification de la taille des cellules et le nombre de sites

obtenus par l'analyse de la couverture doit être comparé avec l'analyse de la capacité afin de savoir si le système peut supporter la charge demandée sinon de nouveaux sites doivent être ajoutés dans le but de maximiser la couverture et la qualité.

II.2.4. Optimisation :

L'étape d'optimisation a pour but de maintenir les exigences de la qualité de service préétablis. Dans cette étape on compare les résultats obtenus du dimensionnement de la couverture et de la capacité et on considère le nombre de sites le plus grand. [5]

II.3. Dimensionnement d'un réseau LTE :

Le dimensionnement est une phase importante qui permet de déterminer le volume d'équipement et les logiciels à acquérir et à déployer afin de satisfaire ses abonnés.

Le dimensionnement des réseaux mobiles est un problème très complexe qui met en jeu à la fois des aspects théoriques et pratiques, c'est-à-dire trouver une meilleure architecture cellulaire en tenant compte de plusieurs critères qui sont :

- **Qualité de couverture :** elle permet de garantir un lien radio en tout point de la couverture.
- **Mobilité :** elle permet de faciliter le handover lors du changement de cellule. Chaque station de base doit connaitre ses voisines pour permettre à un utilisateur de se déplacer sans perte de connexion.
- **Absorption de la charge :** le réseau doit être capable de fournir un nombre de canaux de communication adapté à la densité de trafic associée à chaque cellule.

Dans la pratique le déploiement d'un réseau LTE demande l'optimisation des sites, sous les deux contraintes de types radio et trafic, il s'agit de tester en fonction du type d'antenne, de la puissance d'émission et de son orientation, la zone couverte par l'émetteur.

Avec une telle approche le réseau convergera vers une bonne configuration. Le principe est de répartir les émetteurs sur le terrain, établir des zones de couverture et les adapter en déplaçant les sites, en modifiant les puissances d'émission et en choisissant les orientations. Après une couverture assurée il faut rechercher une répartition des fréquences en tenant compte des sites qui sont voisines ainsi à ce moment nous pouvons rechercher une répartition des fréquences entre les sites. [2]

II.3.1. Dimensionnement orienté ouverture :

La prédiction d'une couverture est importante car elle conditionne à la fois des critères radio en prédisant des perturbations provoquées par certains phénomènes. Le problème de la couverture apparait lorsque les ondes émises par le mobile n'arrivent pas à la station de base la plus proche, ou bien celles émissent par l'antenne des eNodeB n'arrivent pas avec une puissance suffisamment détectable par la station mobile. Une mauvaise couverture provoque une élévation du taux d'échec d'accès, du taux de coupure de communication et du taux de handover. Ainsi les différentes étapes de dimensionnement de couverture sont :

- **Exigence de qualité :**

L'exigence de qualité de couverture est d'atteindre le débit binaire demandé avec une certaine probabilité en liaison montante et descendante. Comme par exemple 64 kbps doit être atteint avec une probabilité de 98% dans la zone de couverture.

- **Dimensionnement de la liaison montante :**

La plupart des systèmes de téléphonie mobile sont souvent limités par la liaison montante (Uplink). Il est donc important de commencer les calculs de bilan de liaison avec les exigences de couverture de la liaison montante que l'on expliquera par la suite.

- **Dimensionnement de la liaison descendante :**

Le bilan de liaison descendante est calculé pour déterminer les limites de chaque lien, déterminer le débit binaire qui peut être pris en charge dans la liaison descendante. Il dépend de quelques paramètres que l'on abordera dans ce mémoire. [5]

II.3.2. Bilan de la Liaison Radio (RLB) :

Pour planifier une liaison radio pour toute application sans fil, la première question à se poser est : Quelle est la distance maximale séparant l'émetteur du récepteur ?

Pour répondre à cette question la première chose à faire est de déterminer l'affaiblissement de parcours maximal (Maximum Allowable PathLoss MAPL), en passant par le bilan de liaison radio (RLB). Ce dernier est utilisé conjointement avec un modèle de propagation approprié pour enfin déduire la distance maximale séparant l'émetteur du récepteur. [2]

Pour le LTE, l'équation du RLB de base est comme suite (en dB) :

$$MAPL= PIRE-IM+RXg-K-Rx \quad [II.1]$$

Avec :

MAPL (Maximum Allowable Pathloss) : l'affaiblissement maximal de parcours, il s'exprime en dB. C'est le paramètre dont on veut déterminer à travers l'établissement d'un bilan de liaison.

PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) ou EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) : la puissance rayonnée équivalente à une antenne isotrope, elle s'exprime comme suite :

$$PIRE= P_{Tx}+G_{Tx}-L_{Tx} \quad [II.2]$$

IM : marge d'interférence

RXg : gain d'antenne de réception

K : perte de câble

Rx : sensibilité de réception

P_{Tx} : puissance d'émission de l'eNodeB au niveau du connecteur de l'antenne (43-49 dBm)

G_{Tx} : gain de l'antenne de l'eNodeB

L_{Tx} : ensemble des pertes d'alimentation entre l'eNodeB et le connecteur d'antenne

II.4. Modèle de propagation :

Le modèle de propagation est une procédure essentielle au début du déploiement du réseau. L'interface radio qui est le support entre les terminaux et les eNodeB est caractérisée par un affaiblissement de parcours. Le modèle de propagation permet d'estimer l'affaiblissement de parcours subit par l'onde radio c'est-à-dire d'estimer la valeur de l'atténuation du trajet. On distingue plusieurs types de modèles :

- **Les modèles empiriques :** sont des formules mathématiques utilisées pour prédire l'impact d'un émetteur sur une certaine zone de réception.
- **Les modèles physiques :** prédisent la propagation des ondes radio et calculent les trajets des ondes radio en tenant compte des phénomènes de réflexion et de diffraction.

II.4.1. Modèle de propagation en espace libre :

Le modèle de propagation en espace libre ou l'affaiblissement de parcours en espace libre est la perte produite lorsque le signal traverse un milieu de propagation vide ayant des obstacles comme la réflexion, la diffraction, la dispersion etc…

Le modèle de propagation en espace libre est le premier modèle qui a été proposé, il est utilisé en supposant que le chemin entre l'émetteur et le récepteur est complètement dégagé. L'affaiblissement de parcours en espace libre s'exprime de la façon suivante :

$$L_{FS} = 10log_{10}\left[\left(\frac{4\pi dF}{C}\right)^2\right] = 20log_{10}\left[\frac{4\pi dF}{C}\right] \quad [II.3]$$

Avec :

F : la fréquence

C : la célérité de la lumière

d : la distance parcourue

II.4.2. Modèle de propagation Standard :

Le modèle de propagation standard est un modèle particulièrement adapté pour la prédiction dans la bande allant de (150MHZ-3500MHZ) sur de longues distances (1km à 20 km). Il utilise le profil du terrain, prend en compte la diffraction, les hauteurs d'antenne afin de calculer la perte de chemin. Le modèle standard de propagation peut être utilisé pour toute technologie.

II.4.3. Le modèle empirique :

Les modèles empiriques de prédiction sont en réalité des formules mathématiques exprimant l'atténuation en fonction de plusieurs paramètres comme par exemple la fréquence d'émission, la hauteur des antennes, le degré d'urbanisation….

Ils ont l'avantage d'être simple et dépendent faiblement des caractéristiques d'un site raison pour laquelle ils sont couramment utilisés dans les communications cellulaires. On distingue ainsi les différentes sortes de modèles empiriques :

II.4.3.1. Le modèle Okumura-Hata :

Le modèle Okumura-Hata est le modèle le plus utilisé à l'heure actuelle au niveau des outils de planification cellulaire. Ce modèle tient compte de plusieurs facteurs dont la fréquence, la

distance entre l'émetteur et le récepteur, la hauteur de la station de base au mobile et aussi la nature de l'environnement en tenant compte du degré d'urbanisation (urbain, suburbain, rural). Il a pour principe le calcul de l'affaiblissement en espace libre et ajoute un facteur d'atténuation selon le degré d'urbanisation. [2]

Le modèle de Hata a été adopté pour les limites suivantes :

Fréquence (f) : 150 à 1000MHZ

Hauteur de la station de base (Hb) : 10 à 200m

Hauteur du terminal mobile (Hm) : 1 à 10m

Distance (d) :1 à 20 km

L0 : l'affaiblissement

Il s'exprime par la formule suivante :

$$L0=69.55 + 26.16\log_{10}(f)-13.82\log_{10}(Hb)+[44.9 - 6.55\log_{10}(Hb)].\log_{10}(d) \quad [II.4]$$

- Pour une grande ville ; l'expression est donnée comme suite :

$$L_{urbain}= L0 – a(Hm) \text{ avec } a(Hm) = [(1.1 \log_{10}(f)-0.7)\, Hm – (1.56 \log_{10}(f) – 0.8)] \quad [II.5]$$

- Pour une moyenne ville ; elle s'exprime ainsi :

$$L_{urbain\text{-}dense}= L0 – a(Hm) \text{ où } a(Hm) = 8.29[\log10(1.54Hm)]^2 - 1.1 \text{ pour } f \leq 200 \text{ MHZ} \quad [II.6]$$

$$L0 – a(Hm) \text{ où } a(Hm) = 8.29[\log10(1.54Hm)]^2 - 4.97 \text{ pour } f \geq 200 \text{ MHZ} \quad [II.7]$$

a=0 pour Hm= 1.5

- Pour un environnement banlieue, l'expression s'écrit :

$$L_{sous\text{-}urbain}= L0 - 2[\log_{10}(f/28)]^2 – 5.4 \quad [II.8]$$

- Pour un environnement rural les pertes ont pour expressions :

$$L_{rural}= L0 – 4.78\, [\log10\,(f)]^2 + 18.33\, \log10(f) – 35.94 \quad [II.9]$$

L'inconvénient du modèle Okumura-Hata est qu'il ne tient pas compte des masques de diffraction et sa bande de fréquence interdit son utilisation pour la planification en LTE donc un modèle amélioré a été proposé qui est le modèle COST 231 de HATA.

II.4.3.2. Le modèle cost 231 de Hata :

Le modèle cost 231 de Hata est un modèle développé ayant les mêmes caractéristiques que le modèle Okumura-Hata sauf que ce modèle utilise des bandes comprises entre 1500-2000 MHZ permettant ainsi d'étendre l'utilisation du modèle Okumura-Hata. Dans le déploiement LTE, pour une meilleure performance, de hautes antennes doivent être utilisées, tandis que le modèle COST-231 Hata doit être utilisé comme modèle de propagation radio puisqu'il présente de meilleurs résultats mais ce modèle ne donne pas de bons résultats pour une hauteur d'antenne moins que 50m. Il s'exprime par la formule suivante :

$$L0= 46.3+33.9\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(H_b) - a(H_m) + [44.9 - 6.55\log_{10}(H_b)].\log_{10}(d) + C \quad [II.10]$$

- Pour les villes petites villes (urbain) ; elle s'exprime :

$$a(H_m)= [(1.1\log_{10}(f)-0.7) * H_m] - 1.56\log_{10}(f)+ 0.8 \quad [II.11]$$

- Pour les villes denses (urbain dense) :

$$a(H_m)=[3.2\log_{10}(11.72*H_m)]^2 - 7.97 \quad [II.12]$$

Avec :

C : étant un terme constant, sa valeur est donnée :

Dans un milieu urbain : C = 0

Dans un milieu suburbain : C = -51.11

Dans un milieu rural : C = -30.21

II.5. Dimensionnement orienté ouverture en liaison descendante (Downlink) :

Pour différent types de morphologie (urbain, suburbain, rurale…) on doit effectuer des calculs selon les paramètres suivants :

II.5.1. Débit requis :

Pour le calcul du débit requis, on commence par l'exigence de la qualité qui est exprimée comme un débit binaire qui peut être fourni à un utilisateur individuel au niveau du bord de la cellule. Le débit binaire requis dépend du service pour lequel le système est dimensionné. Les calculs sont effectués par bloc de ressources. Ainsi le débit binaire requis noté D_{req} est divisé par le nombre de blocs de ressources N_{Rb} pour obtenir le débit binaire par bloc de ressource noté $D_{req,Rb}$. Il s'exprime comme suite :

$$D_{req,Rb} = D_{req}/N_{Rb} \quad [II.13]$$

Le nombre de N_{Rb} peut être choisi librement mais dans les limites de la bande passante comme nous pouvons le voir sur le tableau II.1:

Bande passante en MHZ	Nombre de ressource de bloc (N_{Rb})
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Tableau II.1: Quelques caractéristiques requises pour le débit [2]

Un nombre petit de N_{Rb} permet de satisfaire le débit binaire requis avec un minimum de ressource.

Un grand nombre de N_{Rb} permet la répartition des blocs sur un intervalle de fréquence, avec moins d'énergie utilisé par bloc.

Remarque :

Une ressource bloc est une unité bidimensionnelle dans le plan temps-fréquence, composé d'un groupe de 12 porteuses, chacune avec une bande de fréquence de 15khz et d'une fente (slot) de 0.5 ms. C'est une ressource physique utilisée pour la transmission des données.

II.5.2. Puissance de la sous-porteuse :

C'est le rapport entre la puissance maximale d'émission et le nombre de sous porteuse. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$P_{SC} = P_{Total\ émission} - 10log_{10}(Sub_{cr}) \quad [II.14]$$

Avec :

Sub_{cr} : l'espacement entre sous porteuse 15 KHZ

II.5.3. Le SINR (Signal to Interference and Noise Radio) requis au récepteur :

Le SINR est le rapport entre le signal utile et la somme des interférences provenant des cellules propres et voisines et la puissance du bruit reçue. Le SINR requis est un indicateur de la performance du système, plus il est faible plus le système est performant. Il s'exprime comme suit :

$$SINR = \frac{Puissance\ du\ signal}{Puissance\ d'interférence + Puissance\ du\ bruit} \quad [II.15]$$

$$SINR_{req} = 10log_{10}(SINR) \quad [II.16]$$

II.5.4. Sensibilité du récepteur :

La sensibilité du récepteur est le niveau de puissance de signal requis au niveau de l'antenne de réception du mobile pour pouvoir atteindre un niveau de qualité de signal acceptable en réception. [3]

$$S_{UE} = \text{Noise figure} + \text{Therminal Noise} + \text{SINR requis} \quad [II.17]$$

Avec :

NF : RF Noise Figure (dB) : c'est le facteur de bruit en radio fréquence, il dépend du mode de duplexage.

SINRreq : c'est la valeur du SINR requis au récepteur.

II.5.5. Les marges de bruit :

Le calcul de trajet maximal n'est pas possible sans calculer les marges de bruit, qui correspondent à l'environnement radio, pour éviter le phénomène de « Swiss Cheese » c'est-à-dire (surface avec trous de couverture). Ainsi nous avons plusieurs types de marge qui sont :

- **Marge de pénétration :**

La perte de pénétration est l'atténuation du signal due à la pénétration aux bâtiments. Elle dépend du type d'environnement comme nous pouvons le voir sur le tableau II.2.

Environnement	Perte de pénétration (dB)
Dense Urbaine	18-25
Urbaine	15-18
Suburbaine	10-12
Rurale	06-08

Tableau II.2: Les pertes de pénétration [2]

Cette marge dépend essentiellement de trois facteurs :

- **La fréquence du signal :** les pertes varient selon la fréquence du signal
- **Le type de bâtiment :** principalement le type de construction (brisque, bois, pierre, verre…)
- **La structure des bâtiments :** densité et épaisseur des murs, nombre et dimensions

Le meilleur moyen de déterminer la valeur de cette marche consiste à prendre des mesures expérimentales depuis la zone dont on veut faire la couverture car elle est assimilée à une

variable aléatoire. Elle prend une valeur de 20 dB ou plus pour la perte des bâtiments et une valeur autour de 8 dB pour la perte des véhicules.

- **La perte de types de signal (Body) :** Perte du corps

C'est l'affaiblissement dû à l'absorption d'une partie de l'énergie transmise par le corps humain (propre aux services vocaux). Sur le tableau II.3 nous pouvons voir le taux de perte pour un signal vocal.

Type de signal	Perte (dB)
VOIP	3
DATA	0

Tableau II.3: Les pertes selon le type de signal [2]

- **Marge de Shadowing :**

La marge de shadowing ou l'effet de masque est un phénomène dû aux obstacles qui existent dans un milieu de propagation radio comme les bâtiments et la morphologie du terrain. Le tableau suivant montre les marges d'évanouissement et les différentes probabilités de couverture. [2]

Environnement	Probabilité de couverture en (dB)				
	98%	95%	90¨%	85%	75%
Rurale - Suburbaine	5.5	3	0.06	-1	-4
Urbaine	8.4	5	2	0.2	-3.5
Urbaine Dense	10.6	6.7	3.1	1	-3

Tableau II.4: Marge de shadowing [2]

- **Evanouissement rapide :**

Perte de Rayleigh : c'est l'effet de Multi-trajet, elle apparait lorsque le signal émis passe par des chemins différents. A la réception, le récepteur reçoit le signal à partir des chemins différents.

- **Marge des lignes d'alimentation (Feeder) :**

La marge des lignes d'alimentation est une perte causée par différents dispositifs situés sur le trajet de l'antenne vers le récepteur comme par exemple la perte de la ligne d'alimentation qui dépend de la longueur de la ligne et les connecteurs. Sur la figure II.2 nous pouvons voir les connexions du système d'alimentations de l'antenne vers une station de base.

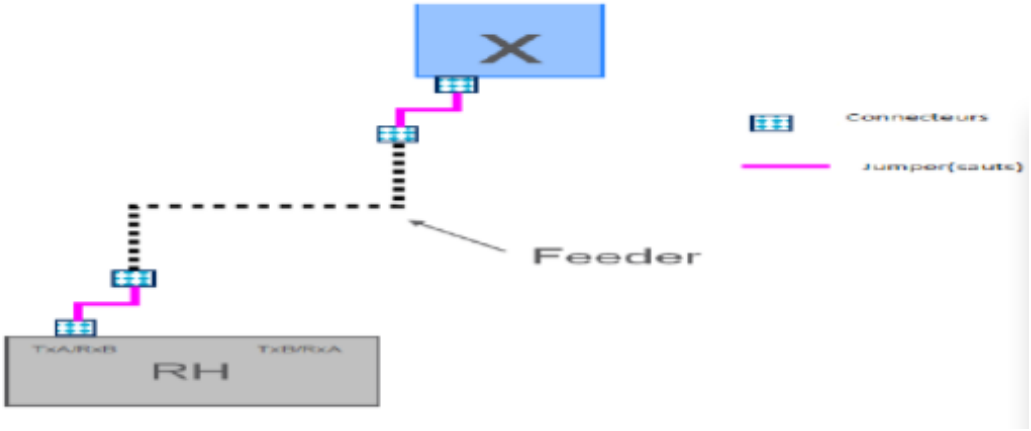


Figure II.2: Connexions du système d'alimentation de l'antenne

Le tableau II.5 nous montre les pertes de feeder (ligne d'alimentation)

Types de ligne	Pertes (dB/100m)		
	2600 (MHZ)	2100 (MHZ)	900 (MHZ)
0.5cm	11	10.8	9
0.875cm	6.3	6	4.9
1.25cm	4.6	4.5	3.2
1.625cm	3.8	3.5	2.6

Tableau II.5: Les pertes de la ligne d'alimentation [2]

❖ **Marge d'interférence :**

En LTE, un utilisateur n'interfère pas avec d'autres utilisateurs se trouvant dans la même cellule car ils sont séparés par le domaine fréquentiel et temporel mais on peut parler d'interférence avec les cellules voisines. Cette interférence est due à la réutilisation de la fréquence. La valeur de la marge d'interférence (IM) est fortement liée à la charge de la cellule (taux d'occupation des ressources), la distance entre deux sites etc… [3]

Ainsi la marge d'interférence est donnée par la formule suivante :

$$IM_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{SNR}{SINR}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{I+N_{th}.B_{Rx}}{N_{th}.B_{Rx}}\right) \quad [II.18]$$

Avec :

I : le niveau d'interférence provenant des cellules voisines

N_{th} : densité du bruit thermique (dB/HZ)

B_{Rx} : la largeur de bande de réception

Sur le tableau II.6 figure la marge d'interférence en fonction de la charge de la cellule.

Charge de la cellule (%)	Marge d'interférence (dB)
35	**1**
40	**1.3**
50	**1.8**
60	**2.4**
70	**2.9**
80	**3.3**
90	**3.7**
100	**4.2**

Tableau II.6: La marge d'interférence (dB) en fonction de la charge de la cellule

L'équation de bilan de liaison (MAPL) :

$$MAPL_{DL} = P_{sc} - S_{UE} - L_{feeder} + G_a - IM - M_P - M_{sh} \quad [II.19]$$

Avec :

P_{sc} : puissance de la sous-porteuse

S_{UE} : sensibilité du récepteur

L_{feeder} : perte de feeder

G_a : Gain de l'antenne d'émission

IM : marge d'interférence

M_P : marge de pénétration

M_{sh} : marge shadowing

II.6. Dimensionnement orienté couverture pour la liaison montante (Uplink) :

II.6.1. Le SINR requis :

Il indique la performance du système, comme dans le downlink.

II.6.2. La puissance de la sous-porteuse :

C'est la relation entre la puissance d'émission maximale et le nombre de sous porteuse. Elle s'exprime par la formule suivante.

$$P_{sc} = P_{\text{Total d'émission}} - 10\log_{10}(Sub_{cr}) \quad [II.20]$$

II.6.3. Sensibilité de récepteur l'eNodeB :

La sensibilité de l'eNodeB est la puissance de signal nécessaire pour éviter les coupures radio. Elle s'exprime comme suite :

$$S_{eNodeB} = \text{eNodeB Noise Figure} + \text{Bruit thermique} + \text{SINR requis} \quad [II.21]$$

II.6.4. Gain d'Antenne :

Le gain de l'antenne change avec le type d'antenne et la fréquence. Il est pratiquement fixé à 18 dBi pour les antennes tri-sectorielles.

II.6.5. Bilan de la liaison montante (Uplink) :

$$MAPL_{UP} = P_{sc} - S_{eNodeB} - L_{feeder} + G_a - IM - M_P - M_{sh} \quad [II.22]$$

II.7. Rayon de la cellule :

Après le calcul de l'affaiblissement de parcours maximal (MAPL) par l'établissement d'un bilan de liaison, on peut déterminer le rayon de la cellule noté R_{cell} en utilisant un modèle de propagation adéquat. Le rayon de la cellule s'exprime par la formule suivante : [3]

$$R_{cell} = 10^{\alpha} \quad [II.23]$$

Nous allons citer quelques exemples pour le principe du rayon de la cellule, en supposant qu'on est dans un environnement urbain alors on aura :

- Pour le modèle Okumura-Hata, on aura :

$$MALP = 69.55 + 26.16\log_{10}(F) - 13.96\log_{10}(H_b) - a(H_m) + [44.9 - 6.55\log_{10}(H_b).\log_{10}(R_{cell})] \quad [II.24]$$

Avec :

$$R_{cell} = 10^{\alpha} = 10^{\frac{MALP-69.55-26.16\log_{10}(F)+13.96\log_{10}(H_b)+a(H_m)}{[44.9-6.55\log_{10}(H_b)]}} \quad [II.25]$$

- Pour le modèle cost 231-Hata, on aura :

$$MALP=46.3 + 33.9\log_{10}(F) - 13.82\log_{10}(H_b) - a(H_m) + [44.9 - 6.55\log_{10}(H_b).\log_{10}(R_{cell})] \quad [II.26]$$

Alors le rayon de la cellule sera :

$$R_{cell} = 10^{\alpha} = 10^{\frac{MALP-46.3-33.9\log_{10}(F)+13.82\log_{10}(H_b)+a(H_m)}{[44.9-6.55\log_{10}(H_b)]}} \quad [II.27]$$

II.8. Le nombre de site :

Après avoir déterminé le rayon de la cellule qui s'exprime en (Km), on peut calculer maintenant la superficie de couverture de cellule appelée aussi « empreinte du site » noté s_{cell}. Cette dernière dépend du nombre de secteurs par site noté $N_{secteur}$. Ainsi sur la figure II.3 nous pouvons voir la configuration des secteurs :

Figure II.3: Configuration des secteurs cellulaires [3]

Nombre de site par secteur	Empreinte
Mono-sectorisé	$S_{cell} = 2.6*(R_{cell})^2$
Bi-sectorisé	$S_{cell} = 1.3*2.6*(R_{cell})^2$
Tri-sectorisé	$S_{cell} = 1.95*2.6*(R_{cell})^2$

Tableau II.7: Empreinte du site en fonction du nombre de secteurs [3]

La figure II.4 nous montre comment calculer la surface des sites à partir de deux modèles hexagonaux. Comme c'est le cas du site omni-sectorisé et du site tri-sectorisé sur la figure II.4 :

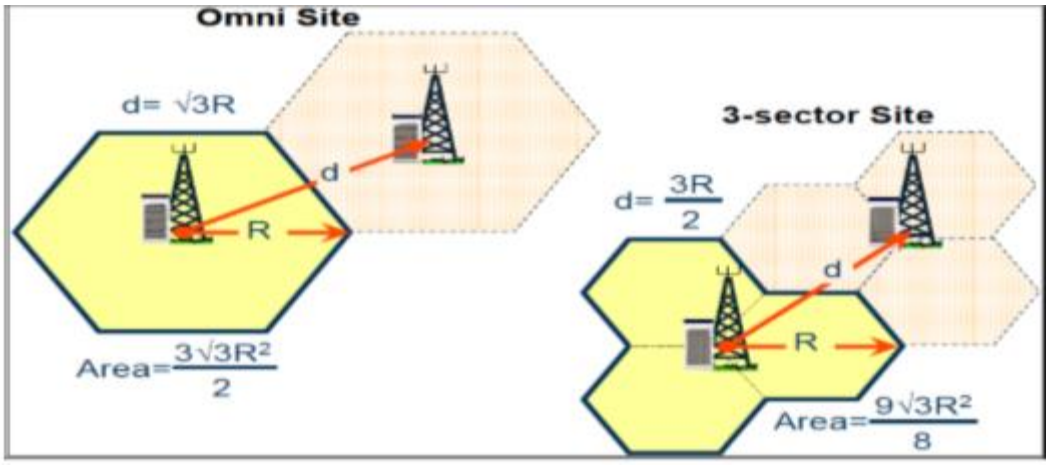


Figure II.4: Modèle hexagonale de la cellule [3]

Pour obtenir le nombre de sites on procède de la manière suivante en faisant le quotient entre la surface de la zone et la surface du site :

$$N_{secteur=\frac{S_{zone}}{Ssecteur}} \qquad [II.28]$$

Avec :

Sz : étant la surface totale de la zone, elle dépend du type de zone comme nous pouvons le voir sur le tableau II.8.

Type de zone	Surface de la zone (Km)
Urbaine dense	50
Urbain	400
Suburbain	200
Rurale	300

Tableau II.8: Surface de la zone

Après le calcul du nombre de sites tout en ayant la superficie totale de la zone de déploiement noté $S_{déploiement}$, on peut déterminer le nombre de sites demandés par la couverture noté $N_{couverture}$, avec la formule suivante :

$$N_{couverture}^{Xl} = \frac{S_{déploiement}}{S_{cell}^{Xl}} \quad [II.29]$$

Avec :

Xl : indice qui mentionne la liaison montante et descendante

Après le calcul de $N_{couverture}$, pour la liaison montante et la liaison descendante, on doit choisir le plus grand entre les deux pour que les deux liaisons soient équilibrées alors on aura :

$$N_{couverture} = max\left(N_{couverture}^{Up}, N_{couverture}^{Dl}\right) \quad [II.30]$$

II.9. Planification orienté capacité :

Le dimensionnement de la capacité nous permet de trouver la capacité maximale qui peut être supportée par une cellule. Son but est de déterminer le nombre de sites nécessaires pour les trafics des abonnés dans une zone donnée. La capacité est limitée par le nombre d'eNodeB installés dans le réseau et elle dépend de plusieurs facteurs comme le type de zone, le service, le nombre d'abonnés.

II.9.1. Calcul de la capacité en liaison montante et descendante :

Pour calculer la capacité en liaison montante et descendante, on doit faire appel aux paramètres suivants :

II.9.1.1. Calcul de l'efficacité de la bande spectrale :

Le LTE permet de délivrer des débits très élevés pour la liaison montante et descendante, comme tout système de communication à large bande, grâce à une efficacité spectrale améliorée et une largeur de bande disponible. L'efficacité spectrale dépend du type d'antenne MIMO, du débit requis et de la largeur de bande. Elle s'exprime par la formule suivante : [3]

$$\eta_{BW} = \frac{Débit_{Req}}{B_w} \qquad [II.31]$$

Nombre d'abonnés supportés par une cellule :

Le nombre d'abonnés supportés par une cellule est le rapport entre la capacité de la cellule et le débit à l'heure forte de la charge.

$$N^{Up}_{abonné/Cell} = {C_{Cell}}/{Throughtput^{Up}_{BH}} \qquad [II.32]$$

$$N^{Dl}_{abonné/Cell} = {C_{Cell}}/{Throughtput^{Dl}_{BH}} \qquad [II.33]$$

Avec :

C_{cell} : capacité de la cellule

$N_{abonné/Cell}{}^{Up}$ Et $N_{abonné/Cell}{}^{Dl}$: nombre d'abonnés par cellule pour la liaison montante et descendante.

$Throughput^{Dl}_{BH,} Throughput^{Ul}_{BH,}$: le débit à l'heure forte de la charge dans le sens montant et descendant.

$$Throughput^{Dl}_{BH} = Trafic_{day} \qquad [II.34]$$

Avec :

$Tafic_{day}$: Est la durée du trafic pendant une journée

II.9.1.2. Nombre des eNodeBs requis :

Dans cette partie nous allons calculer le nombre d'abonnés par site en fonction du nombre d'abonnés par cellule en prenant trois cellules par site dans les deux liaisons (sens montant et descendant). [3]

$$N_{abonné/Site}^{Up} = N_{abonné/Cell}^{Up} * 3 \quad [II.35]$$

$$N_{abonné/Site}^{Dl} = N_{abonné/Cell}^{Dl} * 3 \quad [II.36]$$

Pour le calcul du nombre total des sites :

$$N_{abonné/Site} = min < N_{abonné/Site}^{Up}, N_{abonné/Site}^{Dl} > \quad [II.37]$$

$$N_{Capacité}^{eNodeB} = N_{Total\ d'abonné}/N_{abonné/Site} \quad [II.38]$$

Avec :

$N_{Total\ d'abonné}$: C'est le nombre total d'abonné dans la zone de déploiement

$N_{Capacité}^{eNodeB}$: C'est le nombre d'eNodeB requis pour satisfaire la contrainte de la capacité

II.9.1.3. Nombre final d'eNodeB requis :

Nous allons déterminer le nombre final d'eNodeB mais pour cela on doit prendre en compte le nombre minimal des eNodeB requis pour établir la couverture demandée noté $N_{couverture}$ ainsi que le nombre minimum d'eNodeB pour satisfaire la demande en termes de capacité noté $N_{Capacité}^{eNodeB}$. Dans ce cas le nombre de sites demandés pour satisfaire la contrainte de couverture et de capacité est donné par l'expression suivante :

$$N^{eNodeB} = max < N_{Capacité}^{eNodeB}, N_{couverture} > \quad [II.39]$$

II.10. Dimensionnement de l'interface S1 et X2 :

Toujours dans la partie dimensionnement nous allons parler du dimensionnement de l'interface S1 et X2 car le dimensionnement de la capacité et de la couverture n'est pas assez suffisant pour établir un bon dimensionnement. Le dimensionnement de la couverture et de la capacité

est une étape préliminaire c'est-à-dire un accès vers le reste de dimensionnement. Comme seconde partie, nous allons nous s'intéresser à la capacité des interfaces entre les eNodeB.

II.10.1. L'interface X2 :

Avec une architecture de réseau d'accès plate en LTE, les eNodeB sont connectés deux à deux à l'interface X2 alors le nombre d'interface X2 est donnée par :

$$N_{X2} = \frac{N^{eNodeB}(N^{eNodeB}-1)}{2} \quad [II.40]$$

La capacité demandée par l'interface X2 dépend de l'architecture du protocole X2AP. ce protocole est utilisé pour gérer la mobilité entre UE et l'eUTRAN, il offre des fonctions comme : la gestion de la mobilité et la charge, la réinitialisation et la mise à jour de la configuration des eNodeBs.

II.10.2. L'interface S1 :

L'interface S1 est une interface qui transporte les données et la signalisation. Pour le calcul de sa capacité, on décompose cette dernière en somme d'une capacité sur le plan utilisateur et d'une capacité sur le plan contrôle. Elle s'exprime comme suite : [3]

$$C^{S1} = C^{S1}_{User-plane} + C^{S1}_{control-plane} \quad [II.41]$$

Comme le plan contrôle constitue 2% du plan utilisateur alors on aura :

$$C^{S1} = C_{abonné}\left(Trafic^{Up}_{abonné} + Trafic^{Dl}_{abonné}\right).102\% \quad [II.42]$$

II.11. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons parlé du principe de planification radio, particulièrement la phase de dimensionnement de l'eNodeB qui fait intervenir deux composantes : dimensionnement orienté couverture et capacité. Ces derniers s'avèrent essentielles pour le processus de planification radio d'une zone. Dans le chapitre trois nous allons parler des techniques d'optimisation et de dimensionnement d'un réseau LTE en se basant sur des mesures réelles à travers un logiciel.

III. Chapitre III : Simulation sur ATOLL

CHAPITRE 3 SIMULATION SUR ATOLL

III.1. Introduction :

La simulation des réseaux mobile est une technique par laquelle un simulateur (logiciel) modélise le comportement d'un réseau. Un réseau nécessite l'utilisation d'outil informatique ou plus précisément connue sous le nom de logiciel de planification ou planificateur.

Il existe de multitude de planificateur réseau, parmi ces logiciels nous pouvons citer :

Atoll, Nokia Planer, siemens planer, Ericsson planer etc….

L'objectif de ces planificateurs est de concevoir un réseau tout en respectant la compatibilité des réseaux de télécommunication.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une simulation sous le logiciel Atoll d'un réseau LTE.

Apres avoir fait le dimensionnement du réseau, nous allons faire la simulation du réseau Mobilis dans la ville de Mostaganem sur le logiciel Atoll, pour cela nous allons choisir le modèle numérique du terrain de la ville de Mostaganem, positionner les différents sites (en tenant compte de la longitude, latitude, hauteur de l'émetteur par rapport au sol, de l'azimut), choisir un modèle de propagation, définir le rayon couvert par chaque émetteur pour enfin aboutir aux différentes couvertures. [2]

III.2. Présentation du logiciel ATOLL :

Le logiciel Atoll est un logiciel commercialisé par la société Forsk, c'est un logiciel professionnel destiné aux opérateurs. Il est utilisé pour la planification des réseaux cellulaires qui peut être utilisé sur tout le cycle de vie des réseaux. Le logiciel Atoll exploite différentes données en entrée, il nous offre l'opportunité de choisir le type de réseau à dimensionner (GSM, UMTS ou alors LTE) dont les paramètres diffèrent en fonction de la technologie choisie comme le modèle de propagation, le type d'antenne et les caractéristiques du site pour planifier le réseau. Après la planification le logiciel Atoll nous permet de faire de multiples prédictions comme la couverture par niveau de champ, la couverture par émetteur, zone de recouvrement etc…

La planification d'un réseau est une étape primordiale. Les étapes à suivre lors de la planification d'un réseau sont :

- **Pré-planification :** cette partie consiste à préparer la planification du réseau pour cela on doit collecter les informations sur la zone où l'on veut couvrir (la population, les heures d'occupation…).

Dans le logiciel Atoll la pré-planification consiste à définir les éléments comme la zone géographique, la carte topographique, le nombre d'utilisateur….

- **Planification :** cette partie consiste à trouver les meilleurs emplacements pour les eNodeB dans le but d'avoir une très bonne couverture. Dans le logiciel Atoll, après la planification on obtiendra une couverture détaillée.
- **Vérification :** cette partie consiste à faire des réglages de paramètres pour corriger les erreurs produisent lors de l'installation. Elle a pour but d'assurer le bon fonctionnement du réseau.
- **Optimisation :** cette dernière partie consiste à vérifier la satisfaction des clients et résoudre leurs plaintes. [3]

III.3. Démarrage d'un projet Atoll :

III.3.1.Ouverture d'un nouveau projet :

Lorsqu'on ouvre un nouveau projet sur Atoll à travers la commande « fichier » on doit se baser sur un modèle qui contient les données et la structure des dossiers nécessaires à la technologie que l'on veut utiliser car une fois qu'on ouvre le nouveau projet Atoll, nous avons plusieurs modèles qui sont fournies par ce dernier comme : CDMA200 1xRTT, UMTS HSPA, GSM GPRS EDGE, Microwave Radio Link, Wi-Fi, Wimax, LTE….

Chaque modèle fournit des données pour la technologie appropriée, car les paramètres radio diffèrent selon le type de projet. Pour notre projet nous allons choisir le modèle LTE car il est utilisé pour modéliser la quatrième génération (4G).

Le logiciel Atoll possédant un modèle pour chaque technologie alors nous pouvons créer un document Atoll pour chaque modèle.

Pour créer un nouveau document à partir d'un modèle on procède comme suit :

Sélectionnez Fichier — Nouveau — A partir d'un modèle de document — LTE

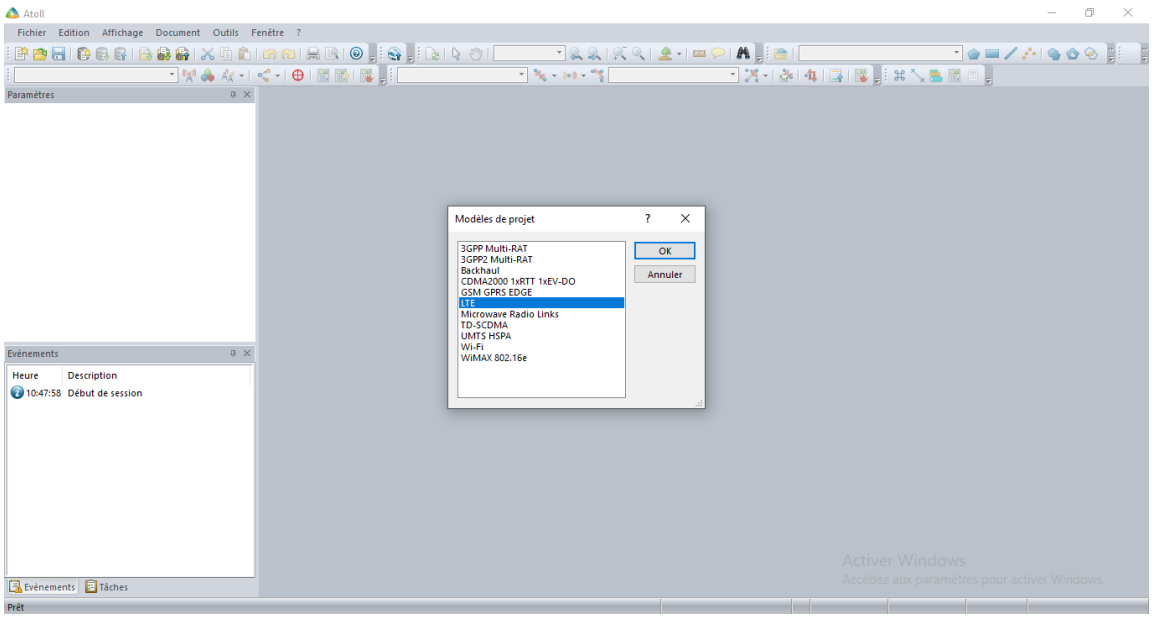


Figure III.1: Nouveau document Atoll avec le modèle LTE

- **Données géographiques :**

Plusieurs types de données géographiques peuvent être utilisés dans un document Atoll comme le modèle numérique du terrain (MNT), les images numérisées (images satellites), des cartes de population et des cartes de trafic de données.

III.3.2.Réglage des paramètres de la zone :

Pour le réglage des paramètres on procède comme suite :

Sélectionnez — Document — Propriétés

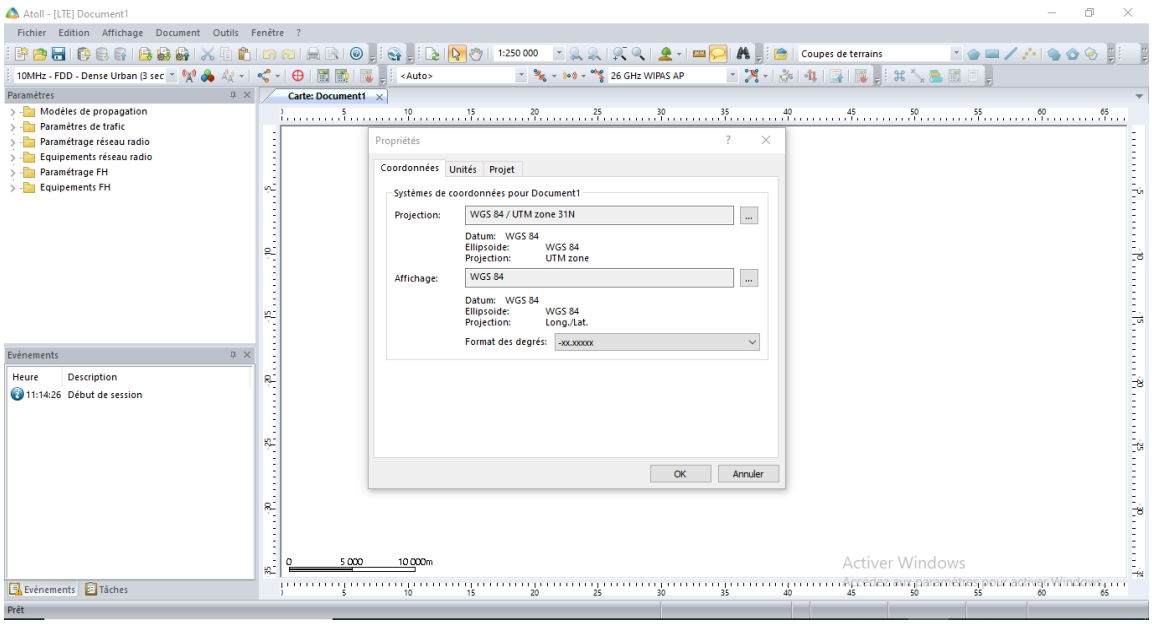


Figure III.2: Réglage des paramètres de projection et de formats

- **Les paramètres saisis sont :**

Projection -> WGS 84/ UTM Zone 31 N

Affichage -> WGS 84 (c'est la projection UTM sur le système géodésique WGS 84)

Format des degrés -> -xx.xxxxx (indique le format de latitude et de longitude des sites)

L'UTM est un type de projection conforme à la surface de la terre. C'est une projection cylindrique où l'axe du cylindre croise perpendiculairement l'axe des pôles de l'ellipsoïde terrestre au centre de l'ellipsoïde.

C'est un système de référence géospatiale qui permet d'identifier tous les points de la terre.

Pour ajouter un nouveau map on procède comme suit :

Sélectionnez Géo — cochez carte en ligne — insérez une nouvelle carte

CHAPITRE 3 SIMULATION SUR ATOLL

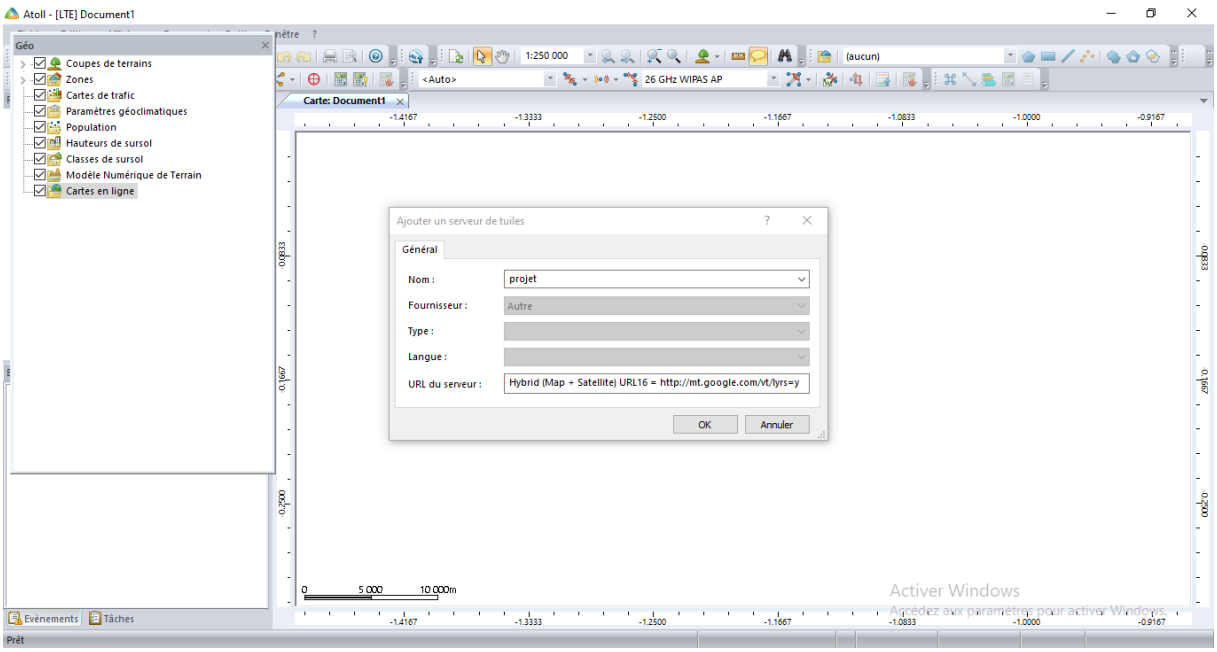


Figure III.3: L'ajout d'un map au niveau document

Certains types de données comme les images numérisées sont utilisées pour créer un affichage plus réaliste de la zone étudiée. Dans notre projet nous allons utiliser les données géographiques définis par le modèle numérique du terrain, comme on peut le voir sur la figure III.4.

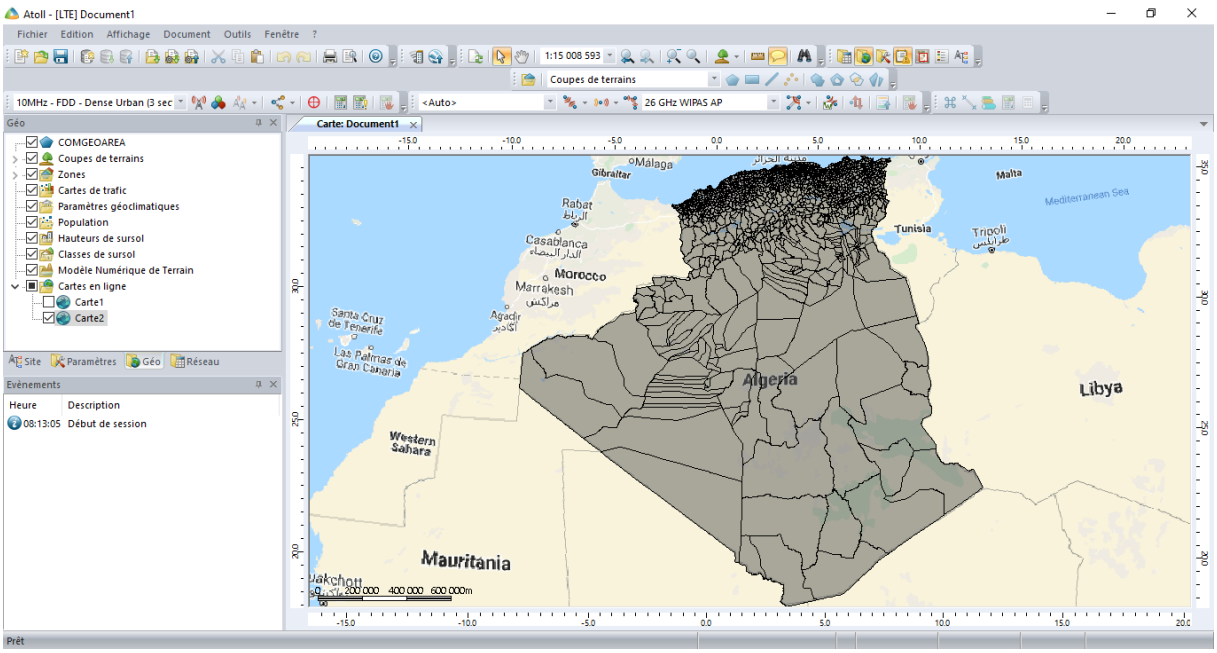


Figure III.4: Importation des données numériques

- **Création d'un site :**

Le site étant considéré comme l'eNodeB, dans Atoll il est défini comme étant le point géographique où l'on ajoutera des émetteurs, et chaque émetteur a plusieurs paramètres.

Remarque : chaque site est caractérisé par trois émetteurs.

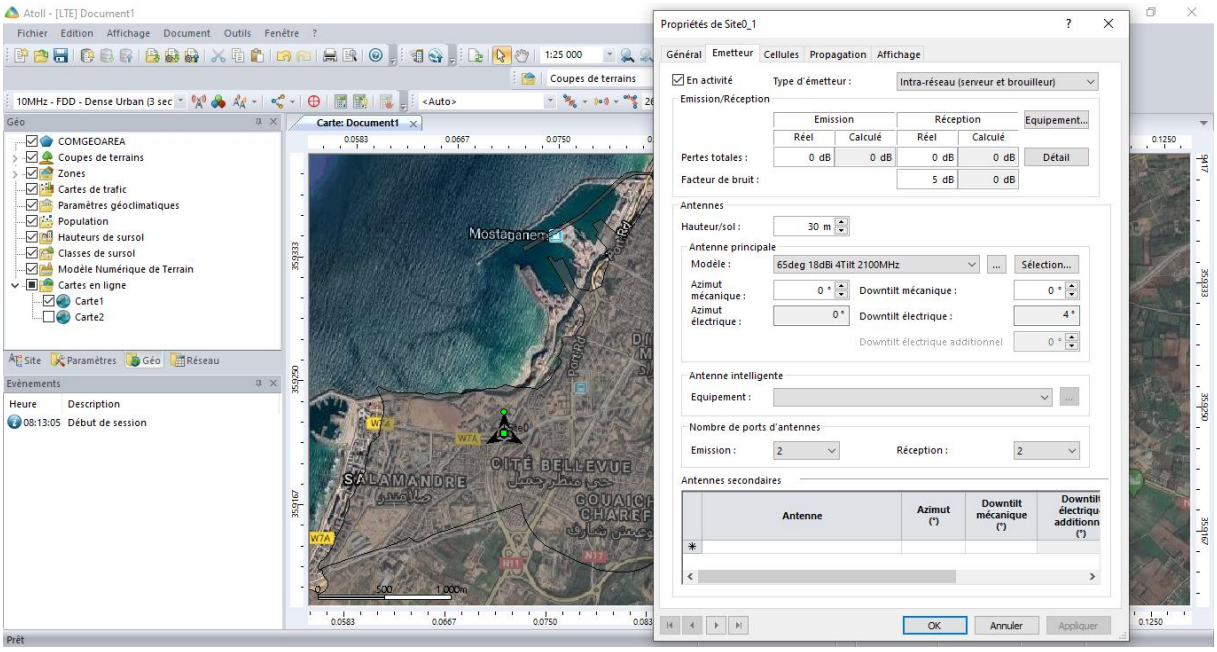


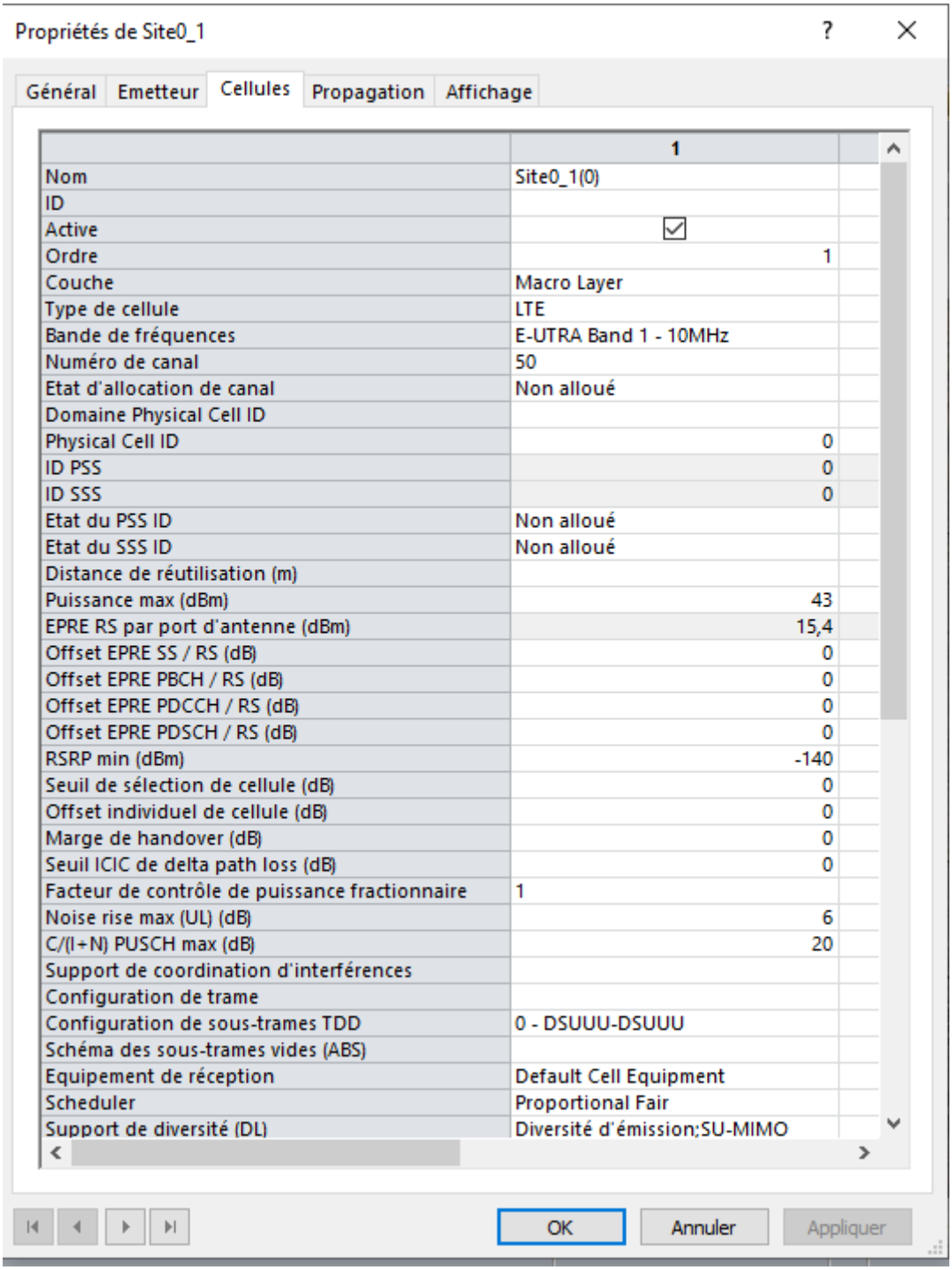
Figure III.5: Création d'un émetteur et ses caractéristiques

Le principal défi que les opérateurs doivent faire face est d'assurer une bonne couverture dans les zones denses en habitations. Pour se faire plusieurs paramètres liés aux émetteurs vont permettre d'atteindre nos objectifs comme :

- **Le tilt :** il peut être soit électrique, soit mécanique. Il a pour rôle d'ajuster l'inclinaison du lobe principale de l'émetteur par rapport à la verticale.
- **L'azimut :** il permet de changer l'orientation de l'antenne sur un plan horizontale pour mieux cibler la zone à couvrir.
- **La hauteur des émetteurs :** en changeant cette dernière, on permet à l'onde de se propager au-delà des bâtiments et donc éviter les effets << écran>> c'est-à-dire les réflexions dû à l'onde.

- **Création d'une cellule :**

Dans Atoll, chaque cellule est considérée comme un canal radio fréquence (RF) avec toutes ses caractéristiques sur un émetteur comme nous pouvons le voir sur la figure III.6.



	1
Nom	Site0_1(0)
ID	
Active	☑
Ordre	1
Couche	Macro Layer
Type de cellule	LTE
Bande de fréquences	E-UTRA Band 1 - 10MHz
Numéro de canal	50
Etat d'allocation de canal	Non alloué
Domaine Physical Cell ID	
Physical Cell ID	0
ID PSS	0
ID SSS	0
Etat du PSS ID	Non alloué
Etat du SSS ID	Non alloué
Distance de réutilisation (m)	
Puissance max (dBm)	43
EPRE RS par port d'antenne (dBm)	15,4
Offset EPRE SS / RS (dB)	0
Offset EPRE PBCH / RS (dB)	0
Offset EPRE PDCCH / RS (dB)	0
Offset EPRE PDSCH / RS (dB)	0
RSRP min (dBm)	-140
Seuil de sélection de cellule (dB)	0
Offset individuel de cellule (dB)	0
Marge de handover (dB)	0
Seuil ICIC de delta path loss (dB)	0
Facteur de contrôle de puissance fractionnaire	1
Noise rise max (UL) (dB)	6
C/(I+N) PUSCH max (dB)	20
Support de coordination d'interférences	
Configuration de trame	
Configuration de sous-trames TDD	0 - DSUUU-DSUUU
Schéma des sous-trames vides (ABS)	
Equipement de réception	Default Cell Equipment
Scheduler	Proportional Fair
Support de diversité (DL)	Diversité d'émission;SU-MIMO

Figure III.6: Configuration de la cellule ou antenne

Remarque : pour la création d'une cellule nous avons

- Pour un milieu urbain : une puissance max (dBm) = 43
- Pour un milieu dense urbain : une puissance (dBm) = 46

III.4. Etude du cas de la ville Mostaganem

III.4.1. Couverture

Dans la pratique le déploiement d'un réseau LTE nécessite l'optimisation du placement des sites, sous deux contraintes, radio et trafic, c'est à dire tester en fonction du type d'antenne, la puissance d'émission, l'orientation et la couverture par l'émetteur. Une telle approche permet de converger le réseau vers une bonne configuration, ainsi nous avons comme principe :

- Répartir les émetteurs sur le terrain
- Etablir les zones de couverture en déplaçant les sites sur différentes zones, en modifiant les puissances d'émission et en choisissant les orientations.
- Après avoir fait la couverture, il est nécessaire de rechercher une répartition des fréquences en tenant comptes des sites voisins.
- Dans le cas où l'on n'arrive pas à avoir une bonne couverture, il est nécessaire de densifier le réseau : soit en rajoutant des sites, soit en remplaçant les émetteurs omnidirectionnels par les émetteurs tri-sectoriels. [2]

Dans notre cas, nous allons effectuer la simulation de la couverture radio dans la ville de Mostaganem. L'objectif de cette simulation est d'obtenir une bonne couverture de la ville de Mostaganem pour assurer une bonne qualité de service.

Pour cela l'objectif primaire de cette simulation est de sélectionner un bon emplacement pour chaque site pour avoir une meilleure couverture du réseau Mobilis dans la ville de Mostaganem.

Remarque : pour les différentes positions des sites (voir annexes).

Pour positionner les sites il nous faut la carte géographique de la ville de Mostaganem, pour cela nous avons utilisé le logiciel Google Earth qui nous a procuré la carte et la vue aérienne de la ville de Mostaganem (voir figure III.7 et III.8).

Figure III.7: La carte de la ville de Mostaganem via (Google Earth)

Figure III.8: Vue aérienne de la ville de Mostaganem

La zone qui doit être couverte est défini sur la figure III.9.

Figure III.9: La zone précise à couvrir (ville de Mostaganem) via Google

Comme on peut le voir sur la figure III.10, les sites et les émetteurs sont positionnés de la manière suivante dans la ville de Mostaganem sur la carte :

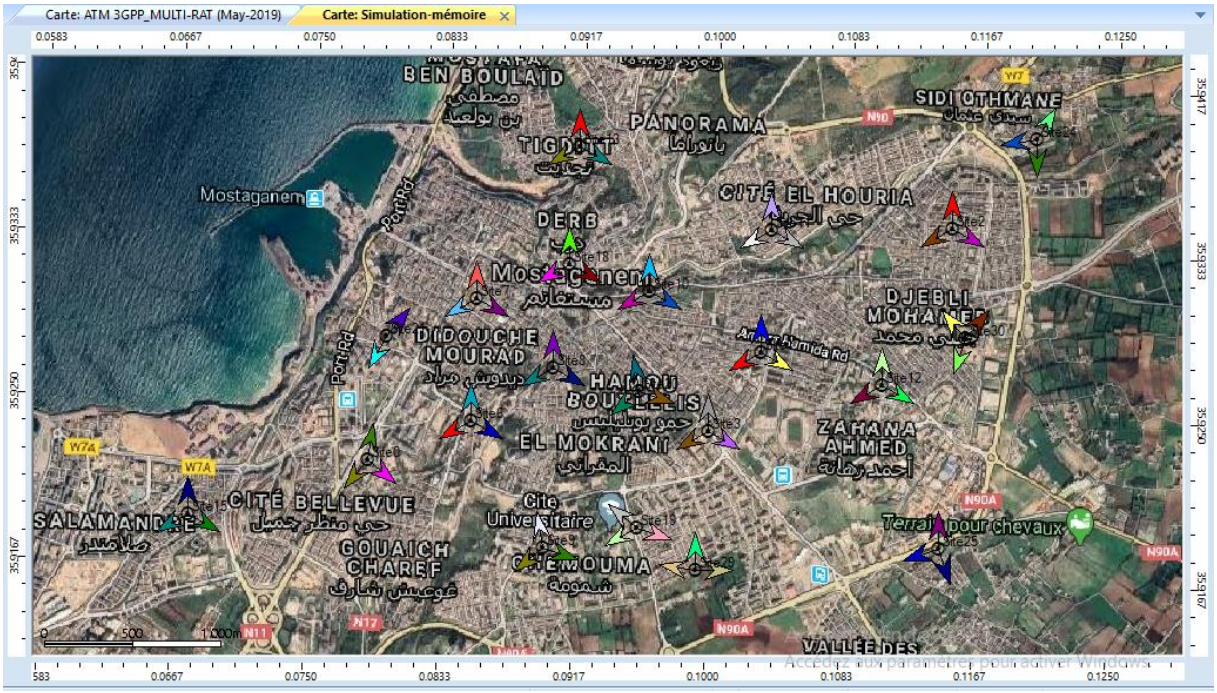


Figure III.10: Dispositions des sites et des émetteurs

Une fois les sites positionnés, on doit simuler le comportement du réseau donc pour cela nous devons effectuer le calcul de la couverture radio. Dans notre cas l'étude se fait dans une zone urbaine.

Dans cette étude on doit tenir compte de la résolution qui permet de régler le pas de simulation, un pas très grand fournira des résultats très approximatifs alors qu'un pas trop petit alourdira très fortement le temps de calcul.

III.4.2. Prédiction de couverture

Les prédictions de couverture sont utilisées pour analyser la qualité du signal, ainsi dans Atoll nous avons deux types de prévisions de couverture LTE :

- Prévisions de couverture utilisées pour analyser le niveau de signal sur la liaison montante et la liaison descendante.
- Des prévisions de couverture utilisées pour analyser la qualité du signal, avec ses prévisions, il est possible d'étudier la zone de couverture en termes d'efficacité de service et de la capacité de chaque cellule du réseau.

Dans notre cas nous allons étudier trois types de prédictions :

- **La couverture par niveau de signal :**

CHAPITRE 3 SIMULATION SUR ATOLL

Pour faire une couverture par niveau de signal, on doit sélectionner les prévisions et choisir le type de prévision.

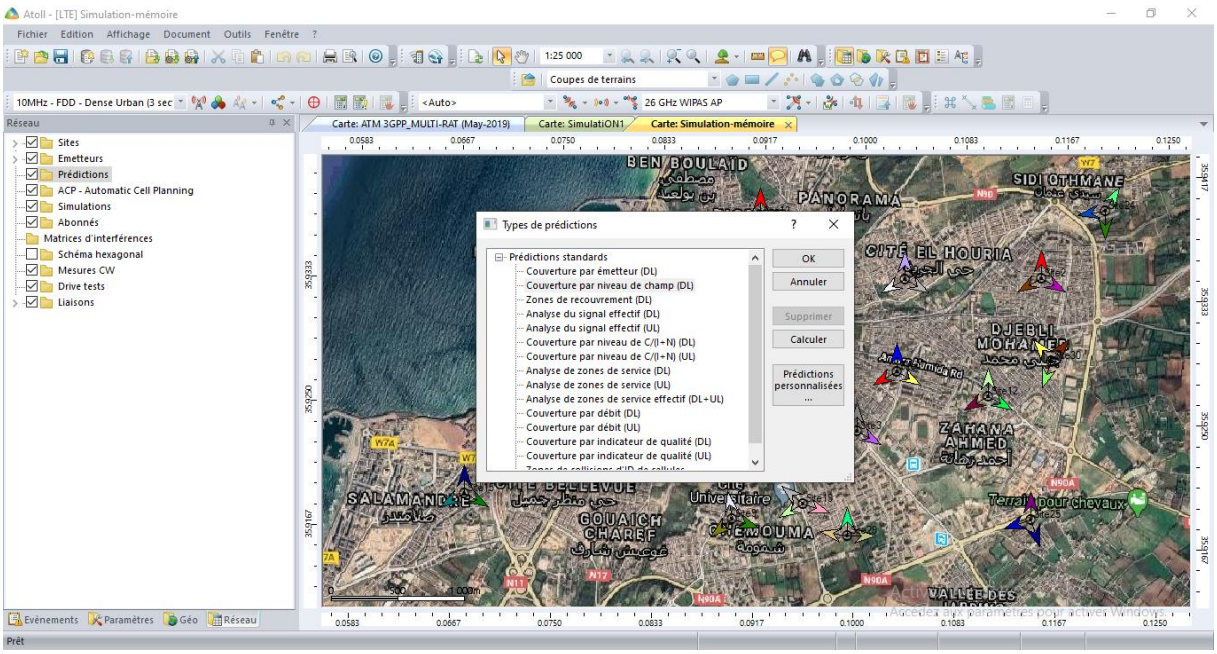


Figure III.11: Création d'une couverture par niveau de signal

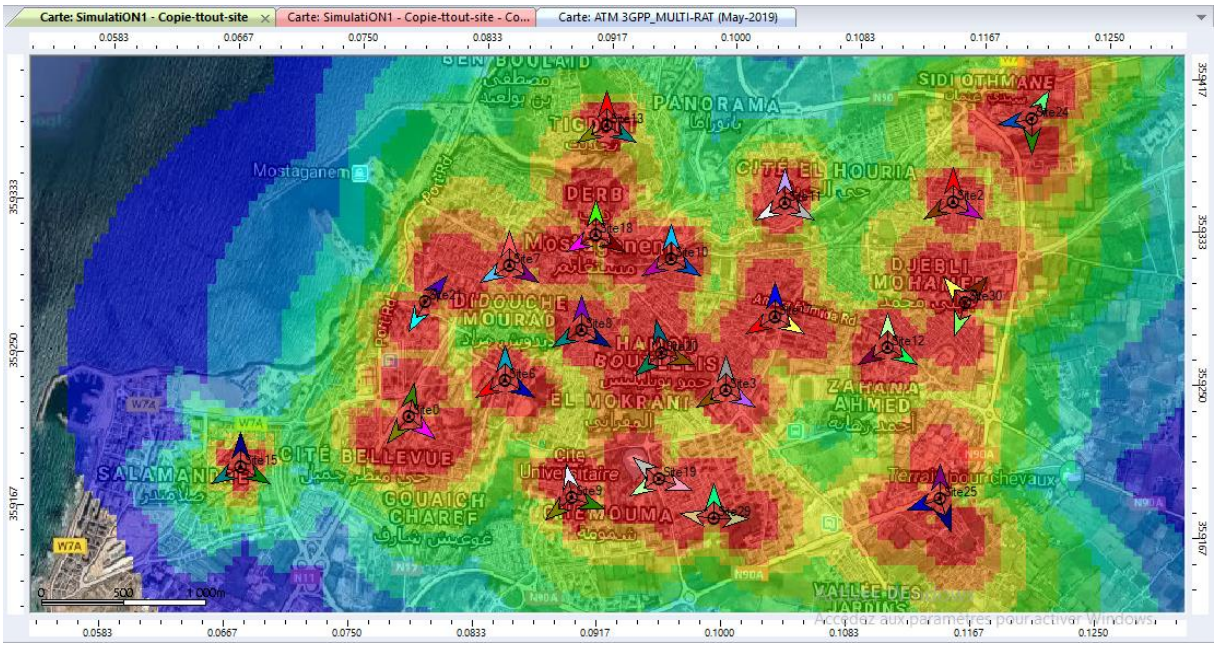


Figure III.12: Résultat de la prédiction de couverture par niveau de signal

Nous remarquons sur la figure III.12 que le centre de la ville de Mostaganem est bien couvert avec un haut niveau de signal mais nous constatons également que les alentours sont mal couverts d'où la nécessite de déployer de nouveau site (figure III.13).

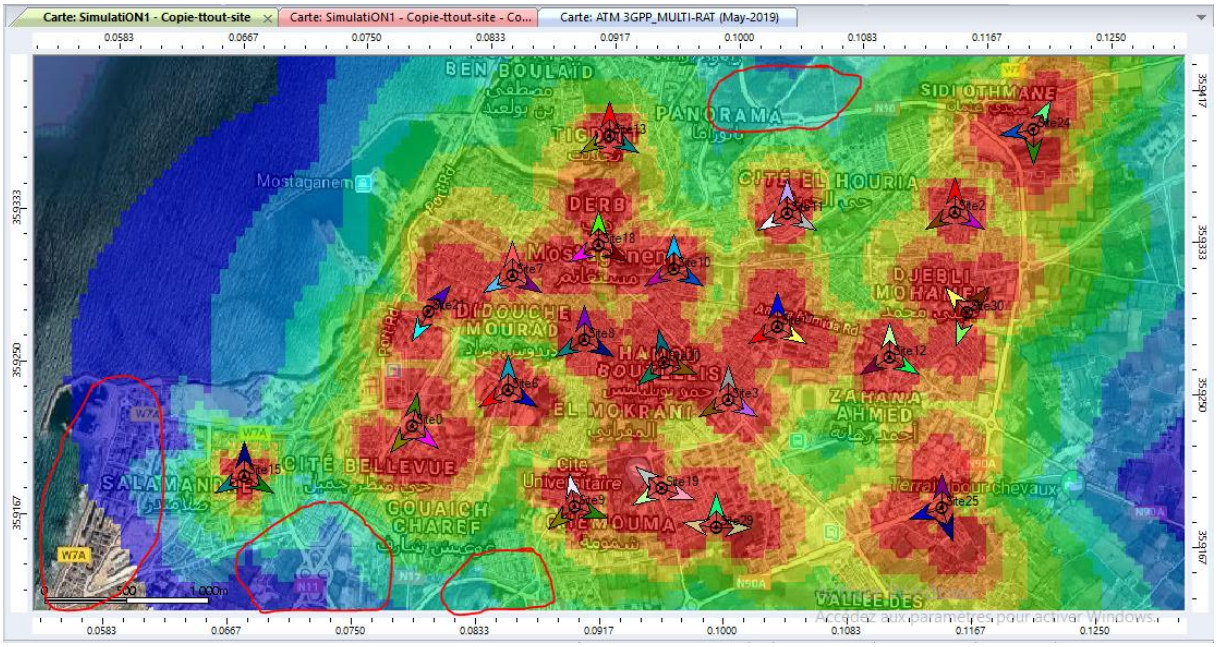


Figure III.13: Zones à recouvrir

Nous remarquons sur la figure III.13 que les valeurs de puissance de signal les plus élevées sont concentrées autour des sites (les zones en rouges) et ces valeurs diminuent en s'éloignant des sites à cause de l'atténuation comme on peut le voir à travers les couleurs (jaune, vert, bleu turquoise, bleu).

Nous constatons également qu'il y'a absence total du signal dans certaines zones (les zones encerclées par la couleur rouge). Ces zones ne sont pas couvertes par le réseau Mobilis. D'où la nécessité de déployer de nouveau site.

L'histogramme suivant nous montre la surface des zones couvertes en fonction du meilleur niveau de signal.

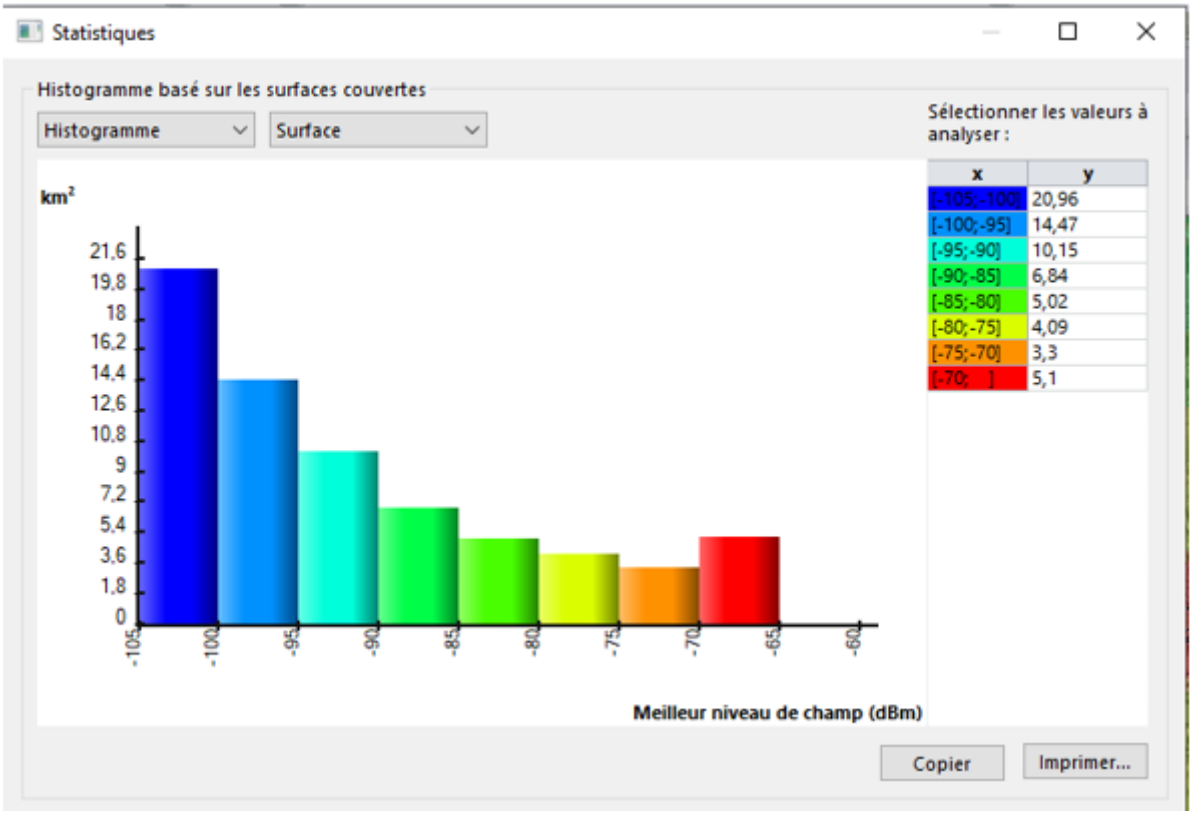


Figure III.14: Histogramme de la couverture par niveau de signal

Pour avoir une bonne couverture de la ville de Mostaganem nous allons déployer de nouveau site (Figure III.15**).**

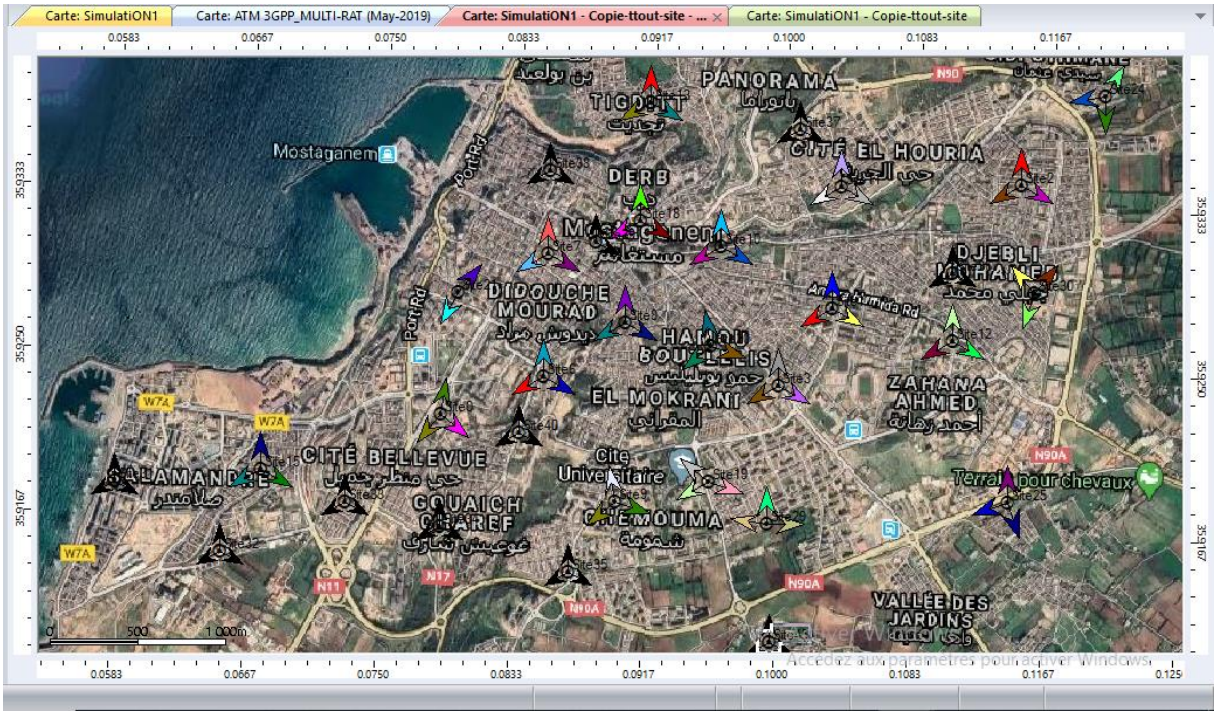


Figure III.15: Disposition de nouveau site dans la ville de Mostaganem

Sur la figure III.15 nous pouvons voir la disposition des nouveaux sites (couleur noir).

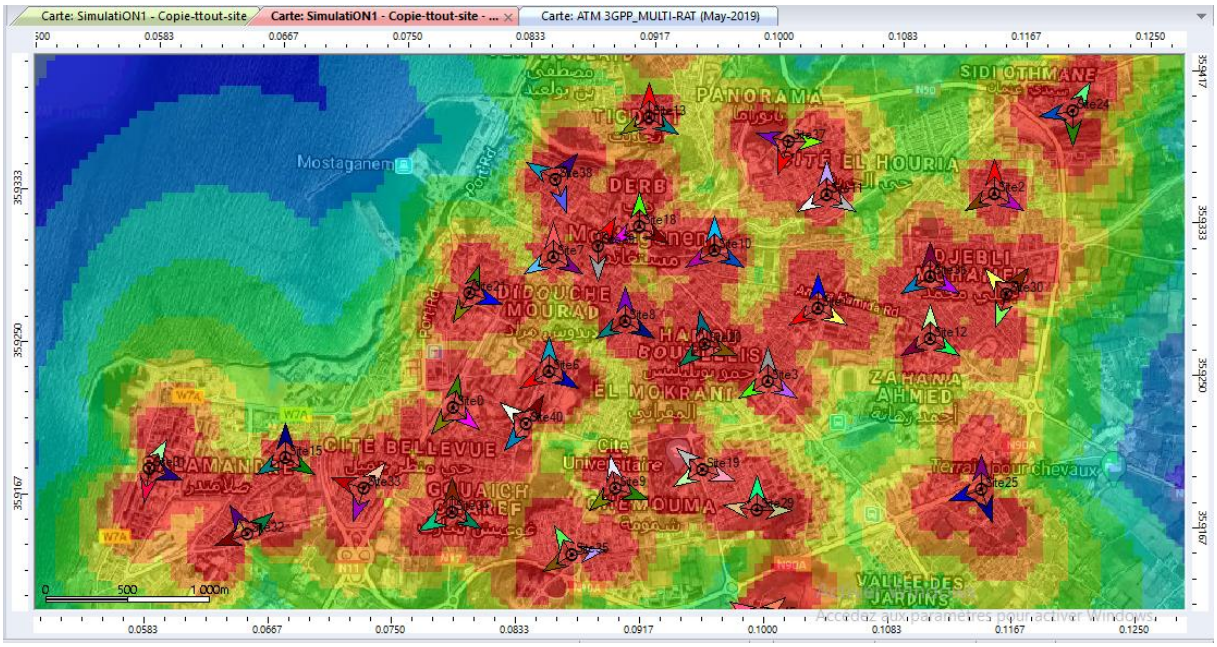


Figure III.16: Résultat de la nouvelle prédiction de la couverture par niveau de signal

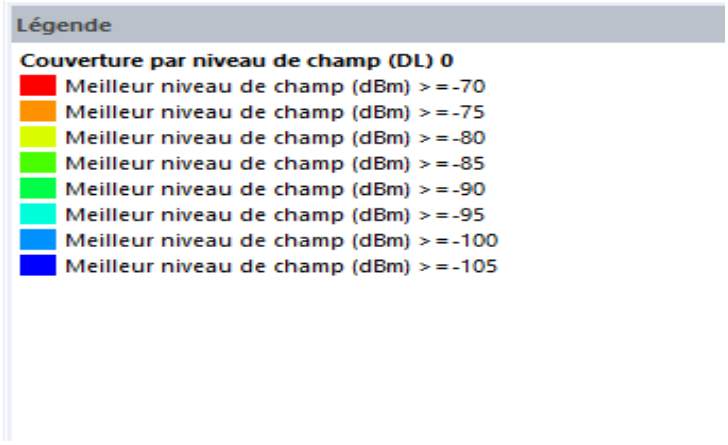


Figure III.17: Légende de la nouvelle prédiction de la couverture par niveau de signal

Après le déploiement des nouveaux sites dans la ville, nous constatons que la ville de Mostaganem est bien couverte par rapport à la première simulation car les zones qui n'étaient pas couvertes sont bien couvertes maintenant sur la figure III.16 donc la répartition des sites est bien planifiée comme nous le montre l'histogramme (Figure III.18**).**

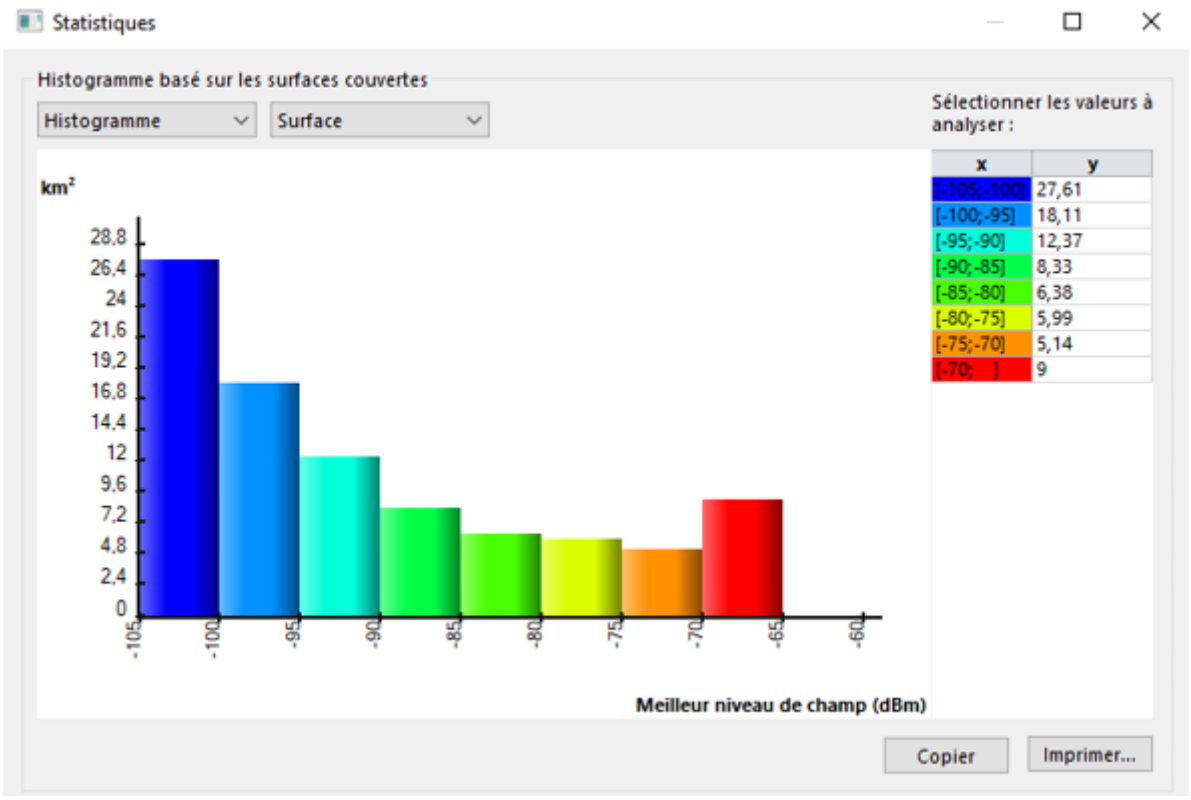


Figure III.18: Histogramme de la nouvelle couverture par niveau de signal

- **Prédiction de couverture par émetteur**

Cette prédiction permet d'avoir une vue globale de tous les émetteurs du réseau qui est très utiles pour supprimer les émetteurs inutiles (voir figure III.19).

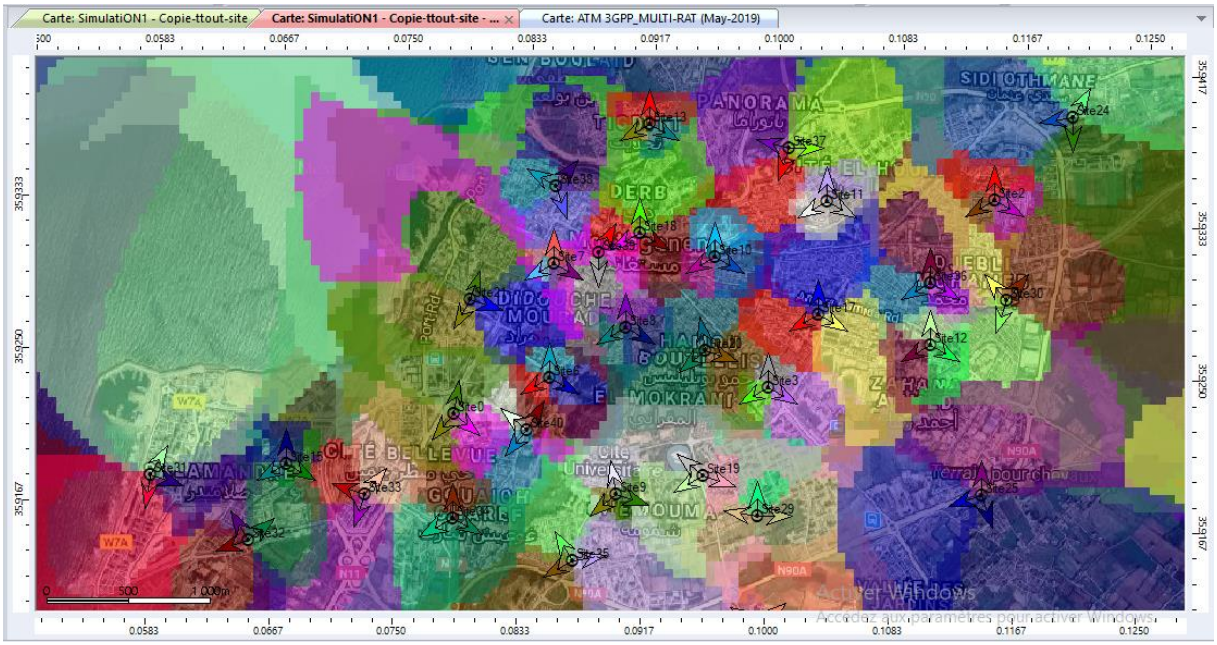


Figure III.19: Résultat de la prédiction de la couverture par émetteur

❖ **Calcul de la zone de chevauchement**

Les zones de chevauchement sont des zones couvertes par le signal d'au moins deux émetteurs ainsi le résultat de la simulation nous donne une carte de recouvrement qui nous permet de distinguer les zones où le mobile sera couvert par un ou plusieurs émetteurs. Autrement dit ces zones correspondent à l'endroit où s'effectue les handovers. Pour faciliter la procédure de sélection des cellules, il est important de limiter la couverture à 3 serveurs au maximum.

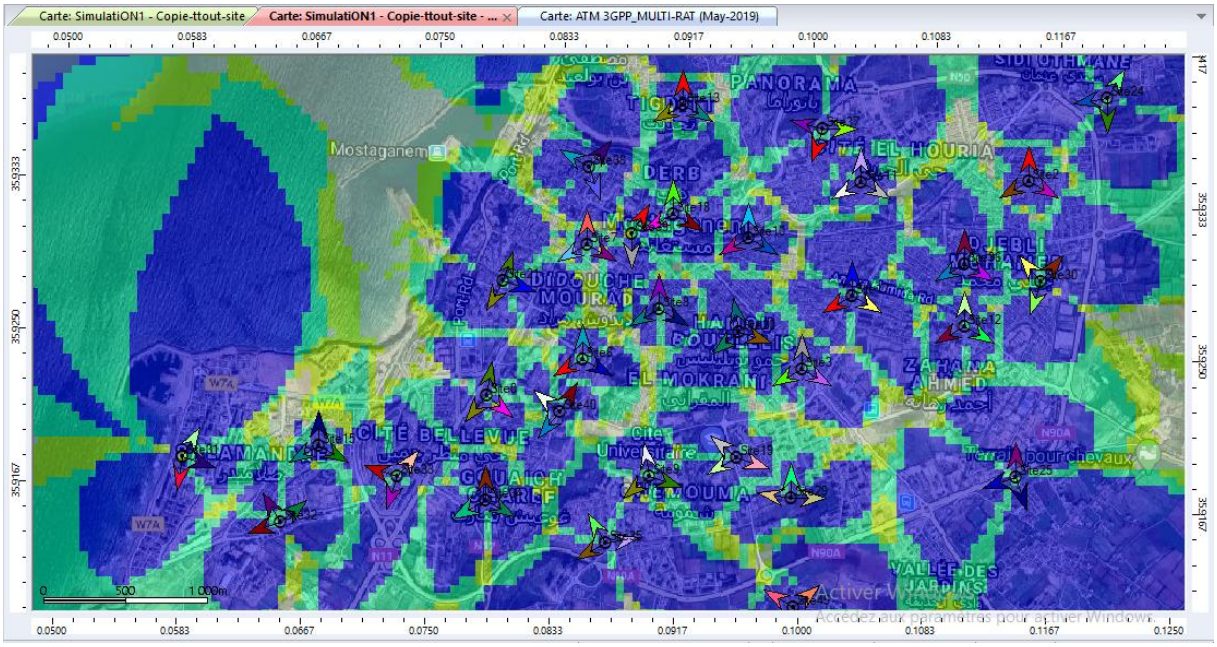
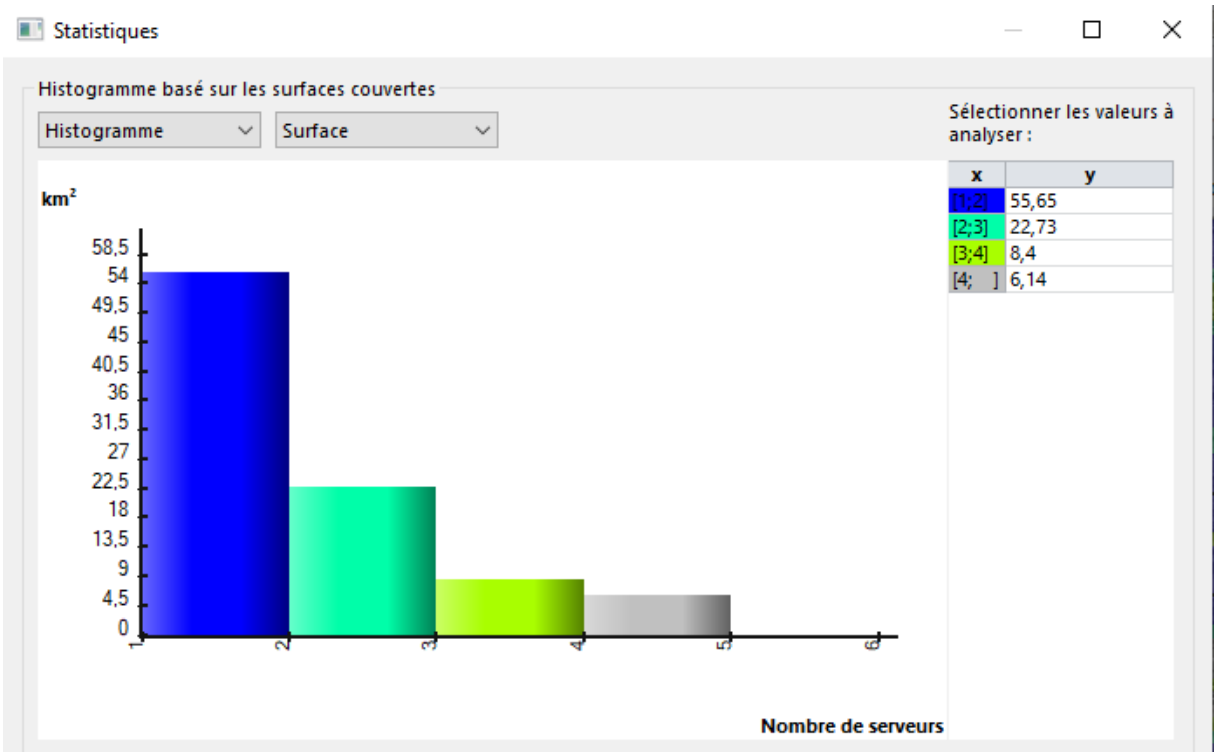


Figure III.20: Carte de recouvrement

Nous constatons sur la figure III.20 que le réseau supportera les handovers entre chaque cellule qui le compose et l'histogramme de la figure III.21 nous le confirme davantage.



x	y
[1;2]	55,65
[2;3]	22,73
[3;4]	8,4
[4;]	6,14

Figure III.21: Histogramme de couverture par les zones de chevauchement

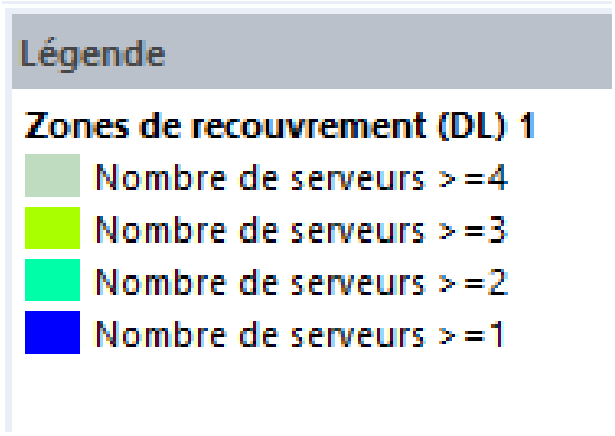


Figure III.22: Légende de la carte de recouvrement

A travers la légende nous pouvons conclure que la totalité de la zone est couverte par un seul serveur. En bordure de cellule on a deux ou trois serveurs ce qui correspond aux zones d'intersections des cellules.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre de simulation, nous avons effectué la couverture de la ville de Mostaganem avec l'outil Atoll qui est une solution pour la planification d'un réseau en tenant compte des emplacements des sites, le modèle numérique du terrain, le paramétrage des sites, l'élaboration des cartes de prédiction de couverture et de la qualité du signal dans la zone géographique de déploiement. Nous constatons à travers la simulation que la ville est couverte mais cette simulation aurait pu avoir une bonne suite si on avait effectué un stage pour pouvoir comparer les résultats de la simulation à ceux du terrain car avec les données que nous avons pu acquérir certaines localités de la ville de Mostaganem ne sont pas couvertes par le réseau LTE par l'opérateur Mobilis.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le progrès dans le domaine des télécommunications est croissant. De nos jours un abonnement est susceptible non seulement d'établir une connexion à tout moment pour récupérer ce dont nous avons besoin mais il est capable également d'accéder à une multitude de service à travers le même réseau. C'est le principe de convergence auxquels répondent les réseaux de nouvelle génération et particulièrement LTE et LTE-Advanced.

L'objectif principale de ce projet est de planifier et de dimensionner la technologie LTE dans un réseau qui existe déjà. Pour cela dans le premier chapitre nous avons fait une étude générale du réseau LTE ou nous avons parlé de son architecture, de ses caractéristiques, de son architecture protocolaire de l'interface radio et ainsi que de ses avantages.

La deuxième partie était basée sur la planification détaillée du réseau orienté ouverture et capacité, de dimensionnement de l'interface S1 et l'interface X2. Le chapitre est caractérisé par une complexité et comprend plusieurs taches dont l'établissement du bilan de liaison, le choix du modèle de propagation adéquat pour le dimensionnement de la couverture, le calcul de la capacité de la cellule pour le dimensionnement de la capacité.

Dans le dernier chapitre nommé troisième chapitre nous avons présenté l'outil « ATOLL » dans sa version 3.3.0 qui est une solution robuste pour la planification. Cet outil permet aux opérateurs d'offrir des meilleurs résultats avec moins de coût.

Notre simulation est à base d'un modèle appelé macro/micro. Il a pour principe de couvrir les sites à macro cellules et de corriger les trous de couverture avec des sites à micros cellules.

Cette méthode est utilisée généralement pour bénéficier d'une large couverture et avoir une meilleure qualité de signal.

A cause de la crise sanitaire que nous traversons actuellement, nous n'avons pas eu l'occasion d'effectuer un stage pour avoir plus de données concernant le projet (les opérations effectuées dans la partie dimensionnement du réseau pour aboutir à la disposition des différents sites), pour comparer les résultats de la simulation avec l'emplacement des sites mentionnés dans la base de données (daté du 2019) à ceux existant en réalité, car dans certaines localités de la ville de Mostaganem le réseau LTE n'est pas déployé (toute la ville de Mostaganem n'est pas couverte par le réseau LTE par l'opérateur Mobilis avec les données à notre possession « Base de données »).

Conclusion générale

Le travail effectué est basé sur des données réelles, et le déploiement des sites qu'on propose pourrait être justifié dans le cadre d'un stage au sein d'un espace Mobilis. En contrepartie, et en absence de stage pour des raisons de confinement, ces résultants pourraient être exploités par l'opérateur Mobilis offrant ainsi une répartition optimale des sites servant de meilleure couverture du réseau sur la zone spécifiée qui est la ville de Mostaganem.

Ce projet était l'occasion d'approfondir mes connaissances sur les réseaux mobiles et particulièrement la quatrième génération LTE/LTE-Advanced. Ces derniers constituent la solution la plus recherchée par les opérateurs télécom pour remédier au compromis de dimensionnement, face aux exigences des consommateurs.

Références bibliographiques

1. ‘’LTE et les réseaux 4G’’ Groupe Eyrolles 2012 par Yannick Bouguen, Eric Hardouin, Francois-Xavier Wolff. ISBN : 978-2-212-12990-8
2. CHICHAOUI Dihia, MOUDIR Sonia << Dimensionnement d’un réseau 4G LTE >> Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018
3. KHELIFI salim, HADDAD Aissa << Dimensionnement et planification d’un réseau mobile 4G/LTE>> Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, Septembre 2018
4. BOUSLAH Yasser, JOUINI Monaim << Dimensionnement et planification d’un réseau 3G/4G >> Institut Supérieur des Etudes Technologiques en Communications de Tunis, 2015
5. ZENATI Ilyas, BOUFERSAKHA Oussama << Dimensionnement et planification d’un réseau LTE >> Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen, juin 2017
6. FIKRI Hajar << Déploiement d’un réseau LTE >> Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès, juin 2013
7. <<Notion d’information LTE et LTE-Advanced>> juin 2015
8. << Généralités et Architecture de la 4G>> sur Orange Developer
9. AMARA Mohyiddine, Guerroudj Mustapha << conception d’une plateforme de la couche physique LTE/LTE – Adavnced>> Université Dr Moulay Tahar de Saida, 2015
10. DJAMI Schehrazed, Toulmout Chafia << Contribution à l’optimisation d’un réseau LTE : Adaptation du HandOver>> Université M’Hamed Bougara – Boumerdes, juin 2017
11. Diallo Mamadou Lamine, Takouche Karim « Sécurité des réseaux 4G/LTE » Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018
12. Hales Nabil, Tsouri Ben Tsouri Zakaria « Dimensionnement de la couverture et capacité d’un réseau d’accès LTE » Université Saad Dahlab de Blida, 2017
13. Hacini Kamel, Khelifi Reda « Transition 2G/3G/4G en communication mobile : cas site université d’ATM Mobilis » Université Mohammed Seddik Benyahia de Jijel, 2019

14. La mise en place d'un outil d'optimisation d'un réseau LTE – Advanced pour Tunisie TELECOM

Sites web :

15. https://wikimemoires.net/2013/07/evolution-lte-architecture-de-lte-et-interface-radio/
16. http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2010/LTE/enodeb.html
17. https://www.igen.fr/0-apple/4g-lte-explications-sur-les-bandes-de-frequences-109169
18. https://fr.m.wikipedia.org/wiki/SC-FDMA
19. http://4glte.over-blog.com/2015/05/pdp-context-ou-eps-bearer.html
20. https://www.officeeasy.fr/guides/amplificateur-gsm/ampgsm113.php
21. http://4glte.over-blog.com/article-evolution-de-la-1g-vers-la-4g-82164235.html
22. https://www.netmanias.com/en/?m=view&id=techno&no=11863
23. https://lte.ma/la-nouvelle-technologie-lte-advanced-pro-est-dans-lagenda-des-grands-operateurs-telecoms

Annexes

Disposition des sites

Emetteur	Longitude (X)	Latitude (Y)	Hauteur par rapport au sol (m)	Azimute électrique	Azimute mécanique
Emetteur0_1	0,07875	35,92206	35	00	10
Emetteur0_2	0,07875	35,92206	35	00	130
Emetteur0_3	0,07875	35,92206	35	00	220
Emetteur2_1	0,11474	35,9346	14	00	0
Emetteur2_2	0,11474	35,9346	14	00	120
Emetteur2_3	0,11474	35,9346	14	00	240
Emetteur3_1	0,09987	35,92401	17	00	0
Emetteur3_2	0,09987	35,92401	17	00	120
Emetteur3_3	0,09987	35,92401	17	00	240
Emetteur6_1	0,08511	35,92416	14	00	0
Emetteur6_2	0,08511	35,92416	14	00	120
Emetteur6_3	0,08511	35,92416	14	00	240
Emetteur7_1	0,08519	35,9304	19	00	0
Emetteur7_2	0,08519	35,9304	19	00	120

Emetteur7_3	0,08519	35,9304	19	00	240
Emetteur8_1	0,09014	35,92701	22	00	0
Emetteur8_2	0,09014	35,92701	22	00	120
Emetteur8_3	0,09014	35,92701	22	00	240
Emetteur9_1	0,0898	35,91788	19	00	110
Emetteur9_2	0,0898	35,91788	19	00	230
Emetteur9_3	0,0898	35,91788	19	00	350
Emetteur10_1	0,09597	35,93102	17	00	0
Emetteur10_2	0,09597	35,93102	17	00	120
Emetteur10_3	0,09597	35,93102	17	00	240
Emetteur11_1	0,10346	35,93426	14	00	0
Emetteur11_2	0,10346	35,93426	14	00	120
Emetteur11_3	0,10346	35,93426	14	00	240
Emetteur12_1	0,11066	35,92657	19	00	0
Emetteur12_2	0,11066	35,92657	19	00	120
Emetteur12_3	0,11066	35,92657	19	00	240
Emetteur13_1	0,09136	35,93823	14	00	0
Emetteur13_2	0,09136	35,93823	14	00	120
Emetteur13_3	0,09136	35,93823	14	00	240
Emetteur14_1	0,09611	35,9472	21	00	20

Emetteur14_2	0,09611	35,9472	21	00	160
Emetteur14_3	0,09611	35,9472	21	00	280
Emetteur15_1	0,06758	35,91904	18	00	0
Emetteur15_2	0,06758	35,91904	18	00	120
Emetteur15_3	0,06758	35,91904	18	00	240
Emetteur16_1	0,10243	35,96441	24	00	0
Emetteur16_2	0,10243	35,96441	24	00	120
Emetteur16_3	0,10243	35,96441	24	00	240
Emetteur17_1	0,10308	35,92807	18	00	0
Emetteur17_2	0,10308	35,92807	18	00	120
Emetteur17_3	0,10308	35,92807	18	00	240
Emetteur18_1	0,09092	35,93223	27	00	0
Emetteur18_2	0,09092	35,93223	27	00	120
Emetteur18_3	0,09092	35,93223	27	00	240
Emetteur19_1	0,09562	35,91903	20	00	110
Emetteur19_2	0,09562	35,91903	20	00	240
Emetteur19_3	0,09562	35,91903	20	00	310
Emetteur20_1	0,095544	35,92593	22	00	110
Emetteur20_2	0,095544	35,92593	22	00	230
Emetteur20_3	0,095544	35,92593	22	00	350

Emetteur21_1	0,07963	35,92833	22	00	20
Emetteur21_2	0,07963	35,92833	22	00	110
Emetteur21_3	0,07963	35,32833	22	00	210
Emetteur22_1	0,10807	35,97786	19	00	10
Emetteur22_2	0,10807	35,97786	16	00	90
Emetteur22_3	0,10807	35,97786	19	00	190
Emetteur24_1	0,11985	35,93926	19	00	30
Emetteur24_2	0,11985	35,93926	19	00	180
Emetteur24_3	0,11985	35,93926	19	00	260
Emetteur25_1	0,11445	35,91841	28	00	0
Emetteur25_2	0,11445	35,91841	28	00	160
Emetteur25_3	0,11445	35,91841	28	00	250
Emetteur29_1	0,09937	35,91696	21,4	00	0
Emetteur29_2	0,09937	35,91696	21,4	00	90
Emetteur29_3	0,09937	35,91696	21,4	00	280
Emetteur30_1	0,11575	35,92911	25	00	40
Emetteur30_2	0,11575	35,92911	25	00	200
Emetteur30_3	0,11575	35,92911	25	00	320

Dispositions de nouveaux sites pour une bonne couverture

Emetteur	Longitude (X)	Latitude (Y)	Hauteur par rapport au sol (m)	Azimut électrique	Azimute mécanique
Emetteur31_1	0,05846	35,9182	25	00	30
Emetteur31_2	0,05846	35,9182	25	00	110
Emetteur31_3	0,05846	35,9182	25	00	190
Emetteur32_1	0,06515	35,91477	21.5	00	50
Emetteur32_2	0,06515	35,91477	21.5	00	250
Emetteur32_3	0,06515	35,91477	21.5	00	330
Emetteur33_1	0,07292	35,91749	18	00	40
Emetteur33_2	0,07292	35,91749	18	00	200
Emetteur33_3	0,07292	35,91749	17	00	290
Emetteur34_1	0,0789	35,91634	17	00	0
Emetteur34_2	0,0789	35,91634	17	00	120
Emetteur34_3	0,0789	35,91634	17	00	240
Emetteur35_1	0,08701	35,91421	21	00	80
Emetteur35_2	0,08701	35,91421	21	00	240
Emetteur35_3	0,08701	35,91421	21	00	330
Emetteur36_1	0,11053	35,92999	15	00	0
Emetteur36_2	0,11053	35,92999	15	00	120
Emetteur36_3	0,11053	35,92999	15	00	240

Emetteur37_1	0,100759	35,9371	17	00	90
Emetteur37_2	0,100759	35,9371	18.5	00	200
Emetteur37_3	0,100759	35,9371	17	00	285
Emetteur38_1	0,0852	35,93467	18	00	40
Emetteur38_2	0,0852	35,93467	17	00	160
Emetteur38_3	0,0852	35,93467	14	00	300
Emetteur39_1	0,08814	35,9311	16	00	30
Emetteur39_2	0,08814	35,9311	16	00	180
Emetteur40_1	0,08369	35,92124	24	00	30
Emetteur40_2	0,08369	35,92124	24	00	220
Emetteur40_3	0,08369	35,92124	24	00	310
Emetteur45_1	0,09976	35,91098	22	00	50
Emetteur45_2	0,09976	35,91098	20	00	150
Emetteur45_3	0,09976	35,91098	20	00	300

Résumé

A l'heure actuelle, l'information est la clé essentielle du succès, quel que soit le domaine où l'on se trouve, les réseaux de télécommunications sont les plus sollicités. D'énormes quantités d'informations circulent sur les réseaux chaque seconde. Il est primordial d'assurer la disponibilité de ces réseaux afin de garantir une bonne transmission des données en toutes circonstances.

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude nous proposons une simulation avec l'outil de planification de la couverture radio et la capacité du réseau LTE en tenant compte de plusieurs paramètres comme les modèles de propagation, tout en choisissant le modèle le plus utilisé en termes de fiabilité et d'économie. Afin d'avoir une bonne couverture radio du réseau tout en respectant les contraintes reliées à la qualité de service.

L'objectif recherché dans ce travail est de comprendre le principe de la planification et dimensionnement d'un réseau LTE afin d'avoir une meilleure couverture de la ville de Mostaganem avec la 4G à travers le logiciel ATOLL. Et ce par des mesures réelles des différentes données (la puissance de la sous porteuse, la sensibilité du récepteur, l'affaiblissement de parcours maximal…).

Ce projet regroupe les modules suivants :

- Etude théorique de la technologie 4G/LTE
- Etude des différents modèles de propagation appliqués pour la planification afin de pouvoir dimensionner la zone à étudier.
- La simulation avec un modèle de propagation le plus approprié c'est-à-dire qui permet à l'opérateur de déployer le réseau 4G avec un minimum de coût tout en conservant une bonne qualité de service.

Mots clés : modèle de propagation, 3G, 2G, 4G, eNodeB, planification, dimensionnement, bilan de liaison.

Abstract

Today, information is the key to success, whatever field you are in, telecommunications networks are the most used. Huge amounts of information circulate on networks every second. It is essential to ensure the availability of these networks in order to guarantee good data transmission in all circumstances.

As part of this end of study project, we propose a simulation with the radio coverage planning tool and the capacity of the LTE network taking into account several parameters such as propagation models, while choosing the most suitable model used in terms of reliability and economy. In order to have good radio coverage of the network while respecting the constraints related to quality of service.

The objective sought in this work is to understand the principle of planning and sizing of an LTE network in order to have better coverage of the city of Mostaganem with 4G through the ATOLL software. And this by real measurements of the various data (the power of the sub-carrier, the sensitivity of the receiver, the maximum path loss, etc.).

This project brings together the following modules:

- Theoretical study of 4G / LTE technology
- Study of the different propagation models applied for planning in order to be able to size the area to be studied.
- Simulation with the most appropriate propagation model, that is to say, which allows the operator to deploy the 4G network at a minimum of cost while maintaining good quality of service.

Key words : propagation model, 3G, 2G, 4G, eNodeB, planning, dimensioning, link budget.