

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

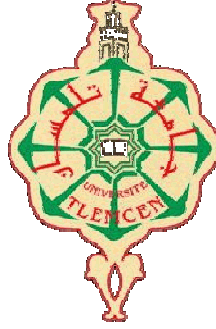
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par :

BELKADI Nezha

BENAMRANE Meriem

Sujet

**Etude et mise en place d'une application
d'aide au déploiement d'un réseau WiMAX
mobile (IEEE802.16e)**

Soutenu publiquement, le 27/06/2019, devant le jury composé de :

Mr. HADJILA. M	Maitre de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
Mr. ZERROUKI. H	Maitre de Conférences	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. MERZOUGUI. R	Maitre de Conférences	Univ. Tlemcen	Examineur



“ Nous avons construit un monde où l’intelligence est la première des facultés, où la science et la technique nous tirent en avant et nous chutons, en produisant plus de misères, de famines, de maladies. “

Michel Serres

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... ✍
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour,
Le respect, la reconnaissance... ✍
Aussi, c'est tout simplement que... ✍*



Nous dédions ce mémoire



Je dédie ce mémoire

A mes chers parents

Ma très chère maman source de tendresse, mon très cher papa l'homme de ma vie.

Aucun mot, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, ma gratitude et l'amour éternel. Vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter.

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir. Que Dieu, le tout puissant, vous préserve, vous accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et vous protège de tout mal.

A mon adorable sœur et mon cher frère

Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre tendresse, pour donner du goût et du sens à ma vie. En témoignage de mon amour et de ma grande affection, je vous prie de trouver dans ce travail l'expression de mon estime et mon sincère attachement. Je prie Dieu, le tout puissant, pour qu'il vous donne bonheur et prospérité.

A mes chers grands parents

Merci pour vos prière vos douaa qu'ils m'ont soutenus durant toute mes années d'étude, Que ce modeste travail, soit l'expression de vos vœux,

Je prie dieu le tout puissant pour qu'il vous préserve et pour qu'il vous procure santé et longue vie.

A mon binôme Nezha

Merci d'être mon amie, merci pour ta patience, ta tolérance,

Pour les bons moments qu'on a partagés, aussi pour ton soutien et ton dévouement à ce travail, je te dédie le fruit de nos efforts et te souhaite un avenir à la hauteur de tes ambitions.

A ma grande famille

À mes tantes, à mes oncles ainsi que tous mes cousins et cousines,

Pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé.

A mes cher(e)s ami(e)s

Et surtout Soumia et Meriem, Je vous remercie pour les moments inoubliables que nous avons partagés ensemble et pour le plaisir dont j'ai jouis avec vous.

Meriem





À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mon cher grand-père maternel et ma chère grand-mère paternelle

*Que ce modeste travail soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières.
Que Dieu vous préserve santé et longue vie.*

À mes chères sœurs et mon cher frère

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amour et mon attachement.

Puisse nos fraternels liens se pérenniser et consolider encore.

Je ne pourrais d'aucune manière exprimer ma profonde affection et mon immense gratitude pour tous les sacrifices consentis, votre aide et votre générosité extrêmes ont été pour moi une source de courage, de confiance et de patience.

J'implore DIEU qu'il vous apporte bonheur, amour et que vos rêves se réalisent.

À la mémoire de mon grand-père et ma grande -mère

*J'aurais tant aimé que vous soyez présents.
Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde*

À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses et à mes chers cousins et cousines

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À ma chère binôme Meriem

Ma douce sœur qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, et qui m'a soutenu et encouragé pendant tous les moments difficiles vécus.

Je te souhaite tout le succès que tu mérites dans ta vie.

À tous mes amis

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous souhaite un avenir plus brillant et plus heureux,



Nezha

Remerciements

*Nous tenons particulièrement à remercier **Allah** le tout puissant, qui nous a donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, qui n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.*

Nous remercions infiniment, Monsieur ZERROUKI Hadj, Maitre de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, qui nous a confié ce travail riche d'intérêt et nous a guidé à chaque étape de sa réalisation.

Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil, malgré vos obligations professionnelles, vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre gentillesse méritent toute admiration. Nous saisissons cette occasion pour vous exprimer notre profonde gratitude, tout en vous témoignant notre respect.

Nous remercions Monsieur, HADJILA Mourad, Maitre de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, pour l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail, Nous sommes très honorées de vous avoir comme président de jury de notre mémoire.

Nos vifs remerciements à Monsieur, MERZOUGUI Rachid, Maitre de conférences à l'université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, c'est pour nous un grand honneur de vous voir siéger dans notre jury.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Aussi, nous tenons à remercier infiniment, nos chers parents, pour leurs contributions, leurs soutiens et leurs patiences au long de nos études.



Résumé

Le WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) est une technologie sans fils actuelle de la famille des normes IEEE, dont la norme 802.16 fait partie, définissant les connexions à haut-débit par onde radio. Elle dispose d'un ensemble de techniques hertziennes permettant de connecter un utilisateur distant au réseau IP par l'intermédiaire d'un lien radio.

La norme 802.16e (WiMAX mobile), c'est une norme qui a été développée dans le but de pouvoir offrir à un utilisateur en mouvement les mêmes qualités de service et de sécurité offertes à un utilisateur fixe, bénéficiant des services d'un fournisseur d'accès. De plus, plusieurs mécanismes sont introduits dans le WIMAX mobile pour pouvoir supporter les services de mobilité.

Ce projet de fin d'étude est pour but de permettre de mieux compréhension la technologie WiMAX mobile, son fonctionnement, ses domaines d'application et son déploiement sur une zone bien déterminée. L'objectif est l'étude et la mise en place d'une application d'aide à l'ingénierie de cette technologie. Nous présentons les différentes étapes de la planification, tout en précisant les modèles de propagation pouvant être utilisés. Le choix du dimensionnement, le calcul de débit et la portée d'une cellule WiMAX, le nombre d'utilisateurs et des stations de base sont aussi étudiés.

Mots clés : WiMAX mobile, IEEE 802.16e, dimensionnement, planification, capacité, couverture, déploiement.

Abstract

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) is a current wireless technology in the IEEE family of standards, including the 802.16 standard, defining high-speed radio wave connections. It has a set of wireless techniques for connecting a remote user to the IP network via a radio link.

The 802.16e (Mobile WiMAX) standard is a standard that was developed in order to offer a mobile user the same quality of service (QoS) and security offered to a fixed user, who benefits from the services of an access provider. In addition, several mechanisms are introduced in mobile WIMAX to support mobility services.

This project is intended to provide a better understanding of mobile WiMAX technology, its operation, its domains of application and its deployment over a specific area. The objective is the study and the implementation of an application to help the engineering of this technology. We present the different stages of planning, while specifying the propagation models that can be used. The choice of dimensioning, the throughput calculation and the range of a WiMAX cell, the number of users and base stations are also studied.

Keywords: Mobile WiMAX, IEEE 802.16e, Dimensioning, Planning, Capacity, Coverage, Deployment.

Table de matières

Dédicaces	i
Remerciements	iii
Résumé et Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des abriviations	xii
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux sans fils.

I.1 Introduction	3
I.2 Différentes générations de téléphonie mobile	3
I.2.1 Le GSM	3
I.2.1.1 Présentation de GSM	3
I.2.1.2 Principe de fonctionnement de GSM	4
I.2.2 Le GPRS.....	4
I.2.2.1 Présentation de GPRS	4
I.2.2.2 Le principe de fonctionnement de GPRS.....	5
I.2.3 L'UMTS.....	5
I.2.3.1 Présentation de l'UMTS.....	5
I.2.3.2 Le principe de fonctionnement de l'UMTS	5
I.2.4 Le LTE	5
I.2.4.1 Présentation de LTE	5
I.2.4.2 Le principe de fonctionnement de LTE :	6
I.3 Les technologies sans fil	6
I.4 Catégories des réseaux sans fil	6
I.5 Réseaux personnels sans fil	8
I.5.1 Bluetooth.....	8
I.5.1.1 Présentation de la technologie Bluetooth.....	8
I.5.1.2 Le principe de fonctionnement du Bluetooth	9
I.5.2 ZigBee	10
I.5.2.1 Présentation de la technologie ZigBee	10
I.5.2.2 Le principe de fonctionnement de ZigBee.....	10
I.5.3 Les liaisons infrarouges	11
I.5.3.1 Présentation des liaisons infrarouges	11
I.5.3.2 Principe de fonctionnement de l'infrarouge	11
I.6 Les réseaux locaux sans fil	12

I.6.1 Le WiFi	12
I.6.1.1 Présentation du Wi-Fi (802.11)	12
I.6.1.2 Les modes d'opération d'IEEE 802.11	12
I.6.1.3 Les différentes normes WiFi	13
I.6.2 L'Hyperlan.....	14
I.6.2.1 Présentation de L'Hyperlan	14
I.6.2.2 Le principe de fonctionnement d'Hyperlan	14
I.7 Les réseaux métropolitains sans fil	15
I.7.1 Le WiMAX.....	15
I.7.1.1 Présentation de WiMAX.....	15
I.8 Les réseaux étendus sans fil	16
I.9 Conclusion.....	16

CHAPITRE II : Etude de la technologie WiMAX mobile (IEEE 802.16e).

II.1 Introduction	17
II.2 Historique du WiMAX	17
II.3 Généralité sur le réseau WiMAX.....	18
II.3.1 Normalisation et le standard IEEE802.16.....	19
II.3.1.1 IEEE 802.16-2001	19
II.3.1.2 IEEE 802.16c-2002	19
II.3.1.3 IEEE 802.16a-2003	19
II.3.1.4 IEEE 802.16-2004	19
II.3.1.5 IEEE 802.16e-2005	20
II.3.2 Les bandes des fréquences utilisées par le WiMAX.....	20
II.3.3 Application du WiMAX	21
II.4 Architecture du réseau WiMAX	21
II.5 Fonctionnement de WiMAX	22
II.5 .1 La boucle locale	22
II.5 .2 La fonction desserte.....	22
II.5 .3 La fonction collecte	23
II.6 Structure en couches protocolaires.....	23
II.6.1 La couche MAC	23
II.6.1.1 SSCS (<i>Service Specific Convergence Sublayer</i>)	24
II.6.1.2 La sous-couche commune (<i>Common Part Sublayer</i>).....	24
II.6.1.3 La sous couche de sécurité (<i>Security Sublayer</i>)	24
II.6.2 La couche physique (PHY).....	25
II.6.2.1 Les types de la couche physique	25
II.6.2.2 Technique de Multiplexage.....	26
II.6.2.3 Les systèmes MIMO : Multiple Input Multiple Output	28
II.6.2.4 Modulation adaptative.....	28
II.6.2.5 Techniques de Duplexage	29

II.7 Les topologies WiMAX	30
II.7.1 Le Mode PMP (<i>Point-Multi-Point</i>) :	30
II.7.2 Le mode Mesh	31
II.8 WiMAX mobile	32
II.8.1 La structure en couche.....	32
II.8.1.1 La couche physique.....	32
II.8.1.2 La couche MAC.....	35
II.8.2 L'architecture du WiMAX mobile	36
II.9 Comparaison entre WIMAX mobile et LTE	38
II.10 Conclusion	39

CHAPITRE III : Dimensionnement d'un réseau WiMAX mobile (IEEE 802.16e)

III.1 Introduction	40
III.2 Dimensionnement et planification d'un réseau WiMAX	40
III.2.1 Processus de dimensionnement du réseau WiMAX.....	40
III.2.2 Choix de la bande de fréquence	40
III.2.3 Choix du mode de duplexage.....	42
III.2.4 Choix de la largeur de bande	42
III.3 Dimensionnement par la couverture	42
III.3.1 Bilan de liaison.....	43
III.3.1.1 PIRE (<i>Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente</i>)	44
III.3.1.2 Sensibilité du récepteur	45
III.3.1.3 Gain de sous canalisation sur la liaison montante	46
III.3.1.4 Définition des marges	46
III.3.1.5 MAPL (<i>Maximum Allowable Path Loss</i>)	48
III.3.2 Modèles de propagation radio applicable pour le WiMAX	49
III.3.2.1 Modèle Espace libre	49
III.3.2.2 Modèle Okumura-Hata	49
III.3.2.3 Modèle COST 231 Hata	50
III.3.2.4 Modèle WALFISCH Ikegami.....	51
III.3.2.5 Les modèles d'Erceg SUI	52
III.3.3 Détermination de la portée d'une cellule	53
III.4 Dimensionnement de capacité	54
III.4.1 Distribution de modulation.....	54
III.4.2 Distribution des Applications	56
III.4.2.1 Flux de service	56
III.4.2.2 Paramètres d'applications	58
III.4.2.3 Modèle de trafic et QoS.....	59
III.4.2.3.1 Taux de contention (<i>Contention Rate = CR</i>).....	59
III.4.2.3.2 Rapport de souscription.....	59
III.4.2.4 Distribution d'application et tendances du marché	60

III.4.3 Débit de WiMAX.....	61
III.4.4 Nombre maximum d'utilisateurs par secteur.....	62
III.5 Conclusion.....	63

CHAPITRE IV : Conception et réalisation de l'outil de dimensionnement du réseau WiMAX mobile.

IV.1 Introduction.....	64
IV.2 Présentation du logiciel MATLAB.....	64
IV.2.1 Pourquoi opter pour MATLAB ?.....	64
IV.2.2 Définition du MATLAB.....	64
IV.2.3 Création d'une interface graphique MATLAB.....	65
IV.3 Outil de dimensionnement WiMAX mobile.....	68
IV.3.1 Interface d'accueil.....	68
IV.3.2 Dimensionnement par couverture.....	69
IV.3.2.1 Interface « Bilan de liaison ».....	69
IV.3.2.2 Interface dimensionnement de couverture.....	71
IV.3.3 Dimensionnement par capacité.....	73
IV.4 Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76
Bibliographie.....	77

Liste des figures

Figure I.1: Architecture du réseau d'accès LTE.	6
Figure I.2: Classification des réseaux sans fil en fonction du rayon de la zone de couverture	7
Figure I.3: Exemple d'architecture de réseaux sans fil.....	7
Figure I.4: Exemple d'un réseau personnel sans fil WPAN.....	8
Figure I.5: Diagramme topologique d'un réseau de type Maître/Esclave.	9
Figure I.6: Domaines d'applications du Bluetooth.....	9
Figure I.7: Représentation de la topologie en étoile.....	10
Figure I.8: Représentation de la topologie point à point.....	11
Figure I.9: Exemple d'infrarouge.....	11
Figure I.10: Mode de fonctionnement Ad-hoc du WiFi.	12
Figure I.11: Mode de fonctionnement Infrastructure du WiFi.	13
Figure I.12: Principe de fonctionnement de WIMAX.	15
Figure II.1: Historique du WiMAX	18
Figure II.2: Les différentes configurations du WiMAX	18
Figure II.3: Architecture de base WIMAX.....	22
Figure II.4: Connexions LOS et NLOS.....	23
Figure II.5: Pile protocolaire de WiMAX.....	24
Figure II.6: Modulation OFDM	26
Figure II.7: Description fréquentielle de l'OFDM	27
Figure II.8: Modulation adaptative.	28
Figure II.9: Le duplexage TDD.....	29
Figure II.10: Le duplexage FDD.....	30
Figure II.11: Le mode PMP du WiMAX.....	30
Figure II.12: Le mode mesh du WiMAX.....	31
Figure II.13: Structure de la trame TDD.....	34
Figure II.14: Le WiMAX fixe et le WiMAX mobile	36
Figure II.15: Architecture du WiMAX mobile.....	38
Figure III.1: Gestion des ressources radios dans le réseau WiMAX	41
Figure III.2: Algorithme du dimensionnement de couverture.....	43
Figure III.3: Equilibrage des liens montants et descendants.....	44
Figure III.4: Partitionnement de la bande passante du canal.....	57
Figure III.5: Nombre maximal d'utilisateurs par algorithme de calcul de secteur.....	62

Figure IV.1:Interface de démarrage du logiciel MATLAB	65
Figure IV.2:Fenêtre principale du MATLAB.	66
Figure IV.3:Commande Window du MATLAB.....	66
Figure IV.4 :Fenêtre principale du nouveau GUI.....	67
Figure IV.5:Interface graphique MATLAB vierge	67
Figure IV.6:Interface des propriétés des objets.	68
Figure IV.7:Page d'accueil de l'application.	68
Figure IV.8:Interface calculatrice de Bilan de Liaison.	70
Figure IV.9:Interface calculatrice de la portée et le nombre de stations de base pour modèle de propagation « Okumura-Hata ».....	72
Figure IV.10:Interface calculatrice de la capacité du WiMAX mobile.....	74

Liste des tableaux

Tableau I.1: Différentes révisions de la norme IEEE 802.11.....	14
Tableau II.1: Différentes normes du WiMAX.....	20
Tableau II.2: Les différents types de couches physiques.....	26
Tableau II.3: Les paramètres de S-OFDMA.....	33
Tableau II.4: Codes et modulations supportés en WiMAX Mobile.....	35
Tableau II.5: Comparaison entre WiMAX mobile et LTE.....	38
Tableau III.1: Duplexage TDD et FDD.....	42
Tableau III.2: Les valeurs constantes pour les paramètres du modèle SUI.....	53
Tableau III.3: Empreinte du site en fonction du nombre de secteur.....	54
Tableau III.4: Modulation et codage pris en charge dans wimax mobile.....	54
Tableau III.5: Hypothèses de distribution de la modulation.....	55
Tableau III.6: Hypothèses de distribution d'application.....	58
Tableau IV.1: Paramètres de bilan de liaison.....	69
Tableau IV.2: Comparaison des résultats dans lien montant et descendant.....	70
Tableau IV.3: Résultats de sensibilité et de MAPL pour chaque type de modulation.....	71
Tableau IV.4: Paramètres de calculs de la portée et nombre de station de base.....	71
Tableau IV.5: Résultat de dimensionnement de couverture des modèles de propagation.....	72
Tableau IV.6: Paramètres de calcul de la capacité.....	73
Tableau IV.7: Résultats du nombre d'utilisateurs pour chaque modulation.....	75

Liste des abréviations

- A**
- AAS:** Adaptive Antenna System.
- ADSL:** Asymmetric Digital Subscriber Line.
- AES:** Advanced Encryption Standard.
- AMC:** Advanced Modulation and Coding.
- AP:** Access Point.
- ARQ:** Automatic Repeat Request.
- ASN:** Access Serving Network.
- ASN-GW:** Access Service Network Gateway.
- ATM:** Asynchronous Transfer Mode.
- B**
- BE:** Best Effort Service.
- BLR:** Boucle Locale Radio.
- BPSK:** Binary Phase-Shift Keying.
- BS:** Base Station.
- BSS:** Basic Service Set.
- BTS:** Base Transceiver Station.
- B3G:** Beyond 3G.
- C**
- CBR:** Constant Bit Rate Service.
- CC:** Convolutional Code.
- CN:** Core Network.
- CR:** Contention Rate.
- CS:** Convergence Sublayer.
- CSN:** Connectivity Service Network.
- CTC :** Convolutional Turbo Code.
- CS :** Convergence Sublayer.
- D**
- DL:** Down Link.
- DSL:** Digital subscriber line.
- DVB-S:** Digital Video Broadcasting-Satellite.
- E**
- eNodeB:** Evolved Node B.
- EPC:** Evolved Packet Core Network.
- ESS:** Extended Service Set.
- ETSI:** European Telecommunications Standards Institute.
- F**
- FBSS:** Fast Base Station Switching.
- FCH:** Frame Control Header.
- FDD:** Frequency Division Duplexing.
- FDMA:** Frequency Division Multiple Access.
- FEC:** Forward Error Correction.
- FTP:** File Transfer Protocol.
- FUSC:** Full Usage of Sub-Channels.
- G**
- G:** Génération.
- GPRS:** General Packet Radio Service.
- GSM:** Global System for Mobile Communications.
- H**
- HARQ:** Hybrid Automatic Repeat Request.
- HHO:** Hard Hand Off.
- HSPA:** High Speed Packet Access.
- HyperLan:** High Performance Local Area Network.
- HyperMan:** High Performance Radio Metropolitan Area Network.
- I**
- IBSS:** Independent Basic Service Set.
- IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- IP:** Internet Protocol.

<p>L</p> <p>LAN: Local Area Network.</p> <p>LDPC: Low Density Parity Check Code.</p> <p>LOS: Line Of Sight.</p> <p>LTE: Long Term Evolution.</p> <p>LTE-A: Long Term Evolution Advanced.</p> <p>M</p> <p>MAC: Medium Access Control.</p> <p>MAC CPS: MAC Common Part Sublayer.</p> <p>MAN: Metropolitan Area Network.</p> <p>MANET: Mobile Ad-hoc Networks.</p> <p>MAPL: Maximum Allowable Path Loss.</p> <p>MDHO: Macro Diversity Handover.</p> <p>MIB: Management Information Base.</p> <p>MIMO: Multiple Input Multiple Output.</p> <p>MS : Station Mobile.</p> <p>N</p> <p>NAP: Network Access Provider.</p> <p>NLoS: Non Line of Sight.</p> <p>NSP: Network Service Provider.</p> <p>O</p> <p>OCR: Coding Rate.</p> <p>OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access.</p> <p>OSI: Open Systems Interconnection.</p> <p>OSR: Subscription Report.</p> <p>P</p> <p>PDA: Personnel Digital Assistant.</p> <p>PHY : physique Layer.</p> <p>PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente.</p> <p>PMP: Point-Multi-Points.</p> <p>PUSC: Partial Usage of Sub-Channels.</p> <p>Q</p> <p>QAM: Quadrature Amplitude Modulation.</p>	<p>QoS: Quality of Service.</p> <p>QPSK: Quaternary Phase Shift Keying.</p> <p>R</p> <p>RAN: Radio Access Network.</p> <p>RNC:Radio Network Controller.</p> <p>RTG: Receive/Transmit.</p> <p>RTG: Receive Transition Gap.</p> <p>S</p> <p>SAP: Service Access Point.</p> <p>SC: Single Carrier.</p> <p>SDU: Service Data Unit.</p> <p>SIM: Subscriber Identity Module.</p> <p>SISO: Single Input Single Output.</p> <p>SMS: Short Message Services.</p> <p>SOFDMA: Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access.</p> <p>SS: Security Sublayer.</p> <p>SS: Subscriber Station.</p> <p>SSCS: Service Specific Convergence Sublayer.</p> <p>STC: Space Time Coding.</p> <p>Std: Standard.</p> <p>SUI: Sandford University Intérim.</p> <p>T</p> <p>TDD: Time Division Duplexing.</p> <p>TDMA: Temporal Division Multiple Access.</p> <p>TS: Time Slot.</p> <p>TTG: Transmit Transition Gap.</p> <p>TUSC: Tile Usage of Sub-Channels.</p> <p>U</p> <p>UE: User Equipment.</p> <p>UL: UpLink.</p> <p>UL CQICH : Channel Quality Indicator Channel.</p> <p>UMTS: Universal Mobile Telecommunications System</p>
---	---

V

VBR: Variable Bit Rate Service.

VoIP: Voice Over Internet Protocol.

W

WAP: Wireless Application Protocol.

Wi-Fi: Wireless Fidelity.

WIMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

WLAN: Wireless Local Area Network.

WMAN: Wireless Metropolitan Area Network.

WPAN: Wireless Personal Area Network.

WWAN: Wireless Wide Area Network.

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, les systèmes de communication sans fil sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive des câbles. L'accès à l'Internet est devenu vital, dans ce contexte, l'utilisateur a pu bénéficier de l'accroissement du nombre et du type de terminaux et exige à présent que ses services soient accessibles n'importe où et n'importe quand.

En effet, il existe aujourd'hui de nombreuses technologies sans fil standardisées, chacune présente un équilibre entre différents facteurs (portée, débit, capacité, services, niveau d'interférences...etc).

Depuis quelques années, le Wifi révolutionne les réseaux mais on parle déjà d'une nouvelle technologie : le WiMAX, qui est basé sur les standards IEEE 802.16x. Bien que les connexions haut-débit de type ADSL se multiplient dans le monde, elles ne permettent pas la souplesse d'utilisation que procure par exemple un réseau sans fil Wifi. Cependant, le Wifi ne permet qu'un débit et une portée très faibles rendant par la même occasion son utilisation limitée. Les réseaux IEEE802.16, une technologie en pleine expansion, promettent un apport très encourageant pour le monde des télécommunications.

L'objectif du WiMAX est de fournir un accès à internet haut débit aux zones non couvertes par les technologies filaires classiques. Il a été montré qu'en théorie, cette technologie permet d'obtenir des débits montants et descendants de 70 Mbit/s avec une portée de 50 kilomètres. Pour une meilleure qualité de service, la technologie WiMAX est associée à des modulations haut débit telle que l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [1].

Avec cette évolution rapide de nouvelles techniques multimédias mobiles et la diversité des services offerts, il est ainsi crucial pour les opérateurs des réseaux mobiles d'entamer une planification, dont les procédures et démarches sont à la fois complexes, coûteuses et robustes tenant compte des tendances de la technologie. Cette conscience de l'importance de la planification et du dimensionnement a été reconnue avec le déploiement des réseaux mobiles actuels et leur besoin d'aboutir à un réseau de meilleure qualité et capacité avec le moindre coût. La problématique devient encore plus complexe avec la diversité des services offerts aux utilisateurs et des équipements de constructeurs différents, les fluctuations du trafic et de l'environnement, les évolutions de la norme et de la technologie elle-même, les coûts de l'infrastructure, etc.... [2].

La planification est une phase très importante pour le déploiement des réseaux. En effet, elle sert à prévoir les ressources nécessaires (équipement, fréquence, bande passante,...) pour servir un ensemble des abonnés. De même, elle permet de gérer la qualité de service (QoS).

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressées à l'étude du dimensionnement et la planification d'un réseau WiMAX mobile en utilisant Matlab® comme un environnement de simulation, pour développer notre outil de dimensionnement, afin de déterminer le nombre de stations de base requises pour le dimensionnement par couverture, et le nombre d'utilisateurs pouvant être supportés dans une cellule pour le dimensionnement par capacité.

Pour cela, notre mémoire est structuré autour de quatre chapitres, organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous introduisons les différentes générations de téléphonie mobile, de la 1G jusqu'à la 4G, puis dans la deuxième partie de ce chapitre, nous donnons un aperçu sur les différents types des réseaux sans fil, ainsi qu'une classification de ces réseaux.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la technologie WiMAX mobile, où nous nous sommes intéressées à la présentation des détails de ce réseau, tel que ses caractéristiques techniques, son architecture et son principe de fonctionnement, aussi nous achevons ce chapitre par une comparaison entre le WiMAX mobile et LTE.

Dans le troisième chapitre, nous exposons tous les formules mathématiques et les calculs nécessaires, ainsi que les démarches de la planification et le dimensionnement orienté couverture et capacité du réseau WiMAX mobile.

Le quatrième chapitre portera sur la conception et la réalisation des interfaces graphiques de notre outil de dimensionnement du réseau WiMAX mobile, ainsi nous exposons les résultats de la simulation de ce standard avec des exemples de calculs.

Finalement, ce mémoire se termine par une conclusion générale, qui présente une récapitulation de tous ce que nous avons traités.

CHAPITRE I

Généralités sur les réseaux sans fil

I.1 Introduction

Un système de communication, ou réseau, désigne tout ensemble d'éléments capables de véhiculer de l'information d'une source vers une destination. Le téléphone en est la meilleure illustration. Apparus plus récemment, de nouveaux types de réseaux transportant d'autres formes d'informations, telles que les données informatiques ou la vidéo. Ces systèmes ont pratiquement toujours été astreints à des supports fixes [3].

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

I.2 Différentes générations de téléphonie mobile

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

I.2.1 Le GSM

I.2.1.1 Présentation de GSM

Les systèmes de téléphonie mobile de 1^{ère} génération (1G) n'étaient que partiellement normalisés et n'offraient qu'une couverture nationale, le réseau de 2^{ème} génération (2G) *Global System for Mobile communication* (GSM), est entièrement normalisé. Cette spécification d'ensemble rend possible l'interconnexion des différents réseaux GSM exploités par les opérateurs de tous les pays [5].

Le réseau GSM est encore principalement utilisé pour établir des communications vocales. Cependant, ils offrent également des services de transmission de données très intéressantes pour l'échange de messages courts (les fameux "SMS" *Short Message Services*) ou de données en mode circuit 9,6 ou 14,4 Kbits/s [5].

I.2.1.2 Principe de fonctionnement de GSM

La 2^{ème} génération a marqué une rupture avec 1G grâce au passage de l'analogique au numérique, cette norme offre la possibilité aux utilisateurs de partager un même canal de transmission, ceci est possible grâce à l'utilisation du mécanisme de division de fréquence FDMA et de temps TDMA [6].

Les réseaux cellulaires reposent sur l'utilisation d'un émetteur récepteur central au niveau de chaque cellule, appelé station de base (BTS : *Base Transceiver Station*) plus le rayon d'une cellule est petit, plus la bande passante disponible est élevée. La carte SIM permet ainsi d'identifier chaque utilisateur, indépendamment du terminal utilisé lors de la communication avec une station de base.

La communication entre une station mobile et station de base se fait par l'intermédiaire d'un lien radio, c'est-à-dire, les antennes-relais qui réceptionnent le signal électromagnétique, pour le convertir en signal électrique, sans ces émetteurs-récepteurs, constitués par les antennes-relais, la téléphonie mobile n'existerait pas [7].

Il existe 3 catégories d'antennes :

- Les antennes pico-cellulaires qui ont une couverture de quelques dizaines de mètres.
- Les antennes micro-cellulaires qui ont une couverture de quelques centaines de mètres.
- Les stations macro-cellulaires, qui sont les plus répandues. Elles sont généralement placées sur des pylônes ou des toits d'immeubles.

En milieu rural, ces antennes auront un champ de couverture de 10 à 30 km, (on limite le nombre de fréquences utilisatrices), tandis qu'en milieu urbain, la zone de couverture est limitée à 500 m et la puissance est partagée sur de nombreuses bandes de fréquences utilisatrices [1].

I.2.2 Le GPRS

I.2.2.1 Présentation de GPRS

La technologie GPRS est communément appelée 2.5G, car elle est vue comme une première étape d'évolution de la transmission des données bas débit en mode circuit du GSM, vers la transmission des données en mode paquet à très haut débit de l'UMTS (Système mobile de troisième génération), son débit théorique est d'ordre de 114 Kbits/s, plus proche de 40 Kbits/s dans la réalité.

Le GPRS utilise la transmission des paquets de taille variable. Cette méthode est plus adéquate à la transmission des données du fait que les ressources ne sont allouées que lorsque des données sont échangées, contrairement au mode circuit en GSM où un circuit est établi pour toute la durée de la communication. Contrairement au GSM où l'utilisateur occupe un TS (*Time Slot*) dans la trame TDMA, le GPRS offre à l'utilisateur la possibilité d'occuper de 2

à 8 TS suivant le type de codage utilisé et un débit variable par TS [8]. Un réseau GPRS est un réseau IP. Qui est donc constitué de routeurs IP.

I.2.2.2 Le principe de fonctionnement de GPRS

Le réseau GPRS et le réseau GSM fonctionnent en parallèle : le premier est utilisé pour le transport des données, le second pour les services classique de voix. Les deux réseaux utilisent les mêmes équipements du GSM, mais ils se séparent ensuite, le GPRS pouvant être relié à divers réseau de données fixes, reposant sur plusieurs protocoles (IP, X.25) ou à un autre réseau GPRS (exploité par un autre operateur) [5].

I.2.3 L'UMTS

I.2.3.1 Présentation de l'UMTS

La technologie UMTS (*Universal Mobile Télécommunication Système*), appelée aussi plus généralement la troisième génération (3G), représente l'évolution des systèmes 2^{ème} génération, permettant de fournir aux utilisateurs une meilleure qualité de service, notamment en ce qui concerne les services offerts (haut débit pour les données) et la vitesse de transfert. UMTS a été conçu de manière à assurer les débits : 144 Kbits/s en environnement rural d'un déplacement 500 km/h et 384 Kbits/s en urbain d'un déplacement 120 km/h et 2 Mbits/s pour des distances plus proche de l'antenne [8].

I.2.3.2 Le principe de fonctionnement de l'UMTS

Le réseau UMTS se divise en deux domaines : le domaine équipement utilisateur (UE : *User Equipment*) et le domaine infrastructure [1]. Le domaine infrastructure comporte deux parties : le réseau d'accès radio (RAN : *Radio Access Network*) et le réseau cœur (CN : *Core Network*).

I.2.4 Le LTE

I.2.4.1 Présentation de LTE

L'évolution à long terme est l'équivalent français du terme anglais LTE. Elle désigne un projet œuvrant à rédiger des techniques qui permettront d'améliorer la norme UMTS des réseaux cellulaires 3G, vers la 4^{ème} génération, pour faire face aux futures évolutions technologiques. Les buts pour suivis pour la LTE consistent en une amélioration de l'efficacité spectrale qui permettra le transfert des données à très haut débit, de l'ordre de 50 Mbps, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule plus élevé que dans l'UMTS et une latence plus faible. La 4^{ème} génération présente, pour l'amélioration des services, des plateformes multi-technologiques capables de supporter de nouvelles applications innovatrices [9].

I.2.4.2 Le principe de fonctionnement de LTE :

Le réseau d'accès LTE est constitué d'un nœud unique l'*Evolved Node B* ou eNodeB, représenté à la (figure I.1.). Il regroupe en une entité unique les fonctionnalités des nœuds eNodeB et RNC de l'UMTS. La principale fonction de l'eNodeB est d'acheminer les flux de données de l'UE vers l'EPC (*Evolved Packet Core Network*) [9].

Cette technologie utilise Le multiplexage OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) apporte une optimisation dans l'utilisation des fréquences en minimisant les interférences. Le recours à des techniques d'antennes multiples (déjà utilisés pour le Wi-Fi) permet de multiplier les canaux de communication parallèles, ce qui augmente le débit total et la portée [4].

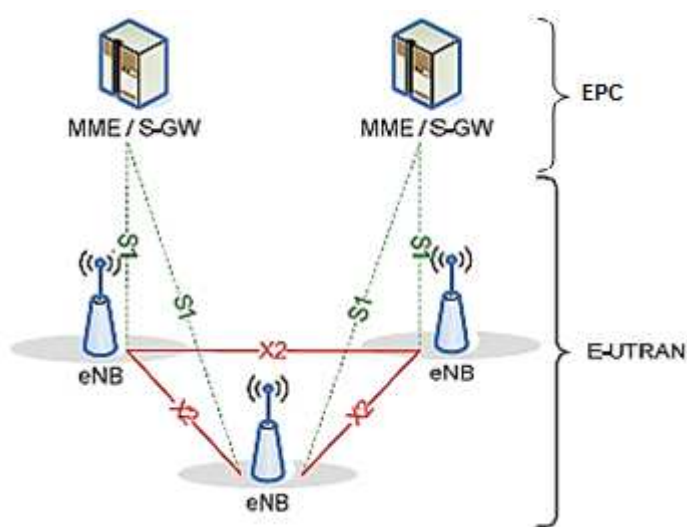


Figure I.1 : Architecture du réseau d'accès LTE.

I.3 Les technologies sans fil

Aujourd'hui, la majorité des ordinateurs et la quasi-totalité des appareils mobiles (tel que les téléphones portables) disposent de moyens de connexion à un ou plusieurs types de réseaux sans fil comme le WiFi, le Bluetooth ou l'infrarouge. Ainsi, il est très facile de créer en quelques minutes un réseau « sans fil » permettant à tous ces appareils de communiquer. Un réseau sans fil est un ensemble d'appareils connectés entre eux et qui peuvent s'envoyer et recevoir des données sans aucune connexion filaire physique reliant ces différents composants entre eux ne soit nécessaire [10].

I.4 Catégories des réseaux sans fil

Il existe plusieurs catégories de réseaux sans fil qui diffèrent par le périmètre géographique (figure I.2) qu'ils couvrent ainsi que par les types d'applications supportées (figure I.3) [11].

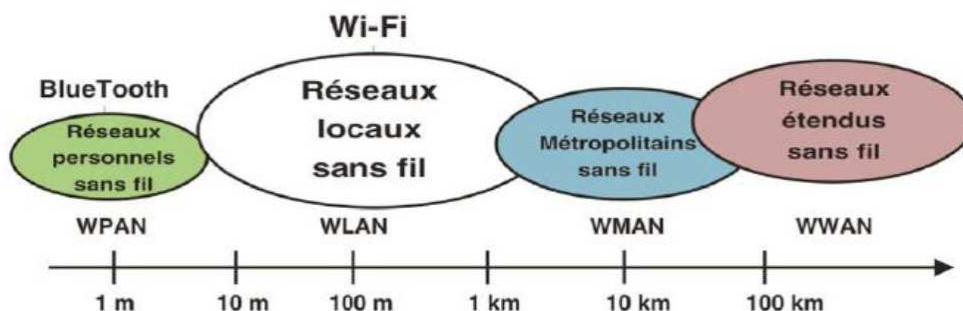


Figure I.2 : Classification des réseaux sans fil en fonction du rayon de la zone de couverture. [14]

- **WPAN :** Les réseaux sans fil personnels ou *Wireless Personal Area Network* (WPAN), sont des réseaux sans fil à très faible portée (de l'ordre d'une dizaine de mètres). Ce type de réseau a recours aux technologies Bluetooth, ZigBee et infrarouge.
- **WLAN :** Les réseaux locaux sans fil ou *Wireless Local Area Network* (WLAN) sont généralement utilisés à l'intérieur d'entreprises, d'universités mais également chez les particuliers depuis le développement des offres à haut débit. Ces réseaux sont principalement basés sur la technologie IEEE 802.11 ou sur la technologie Hiperlan1 et son remplaçant Hiperlan2.

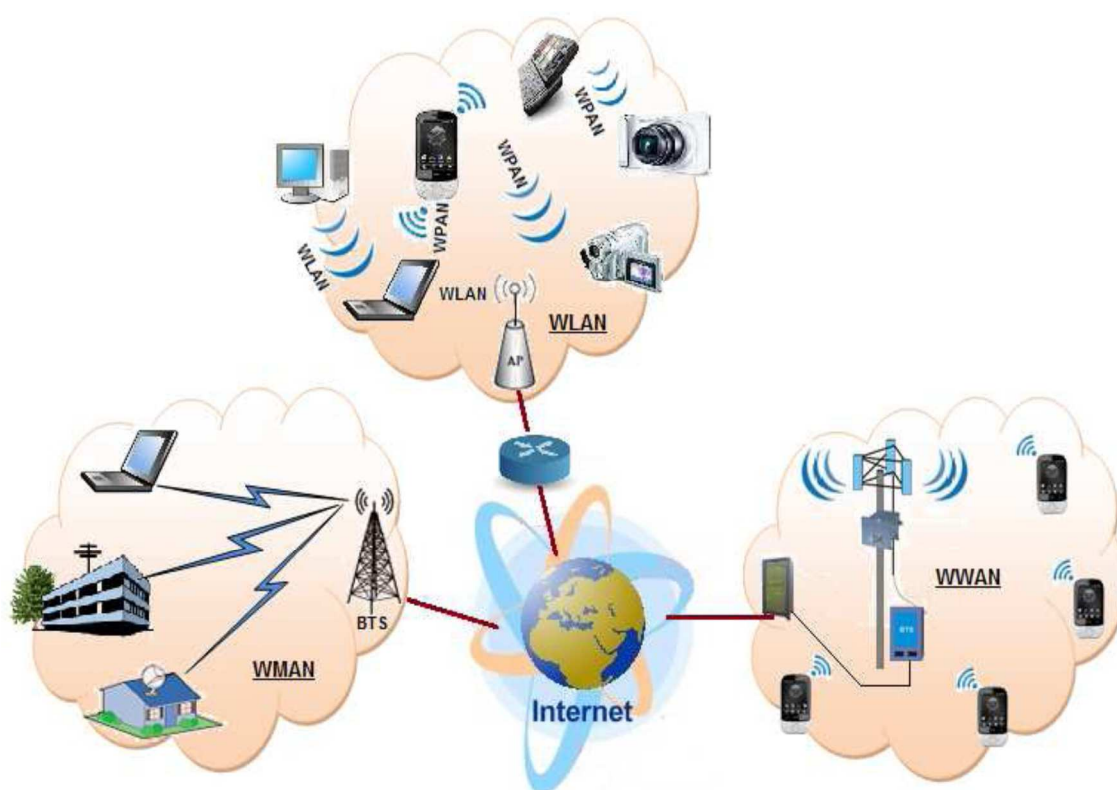


Figure I.3 : Exemple d'architecture de réseaux sans fil.

- **WMAN :** Les réseaux métropolitains sans fil ou *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) également appelés boucle locale radio (BLR) étaient à l'origine prévus pour

interconnecter des zones géographiques difficiles d'accès à l'aide d'un réseau sans fil. Les réseaux basés sur la technologie IEEE 802.16 ont une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (50km de portée théorique annoncée). La norme de réseau métropolitain sans fil la plus connue est le WiMAX.

- **WWAN** : Les réseaux sans fil étendus ou *Wireless Wide Area Network* (WWAN) regroupent notamment les différents réseaux téléphoniques de première et deuxième génération mais également les réseaux satellitaires. Les réseaux cellulaires téléphoniques reposent sur des technologies comme GSM (*Global System for Mobile Communication*), GPRS (*General Packet Radio Service*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*). Les réseaux satellites s'appuient quant à eux sur les normes comme DVB-S (*Digital Video Broadcasting-Satellite*) pour transmettre l'information et proposent des débits élevés.

I.5 Réseaux personnels sans fil

Ce type de réseau (WPAN) sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ou un assistant personnel (PDA : Personnel Digital Assistant)) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. La figure I.4 représente un exemple de réseau personnel sans fil WPAN [12].

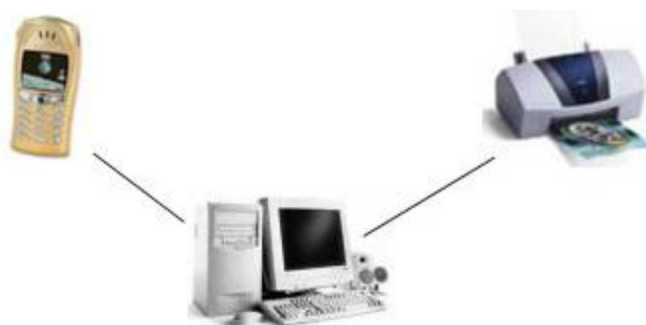


Figure I.4 : Exemple d'un réseau personnel sans fil WPAN.

Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN :

I.5.1 Bluetooth

I.5.1.1 Présentation de la technologie Bluetooth

Lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1 Mbps pour une portée maximale d'une trentaine de mètres. Bluetooth, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, possède l'avantage d'être très peu gourmand en énergie, ce qui le rend particulièrement adapté à une utilisation au sein de petits périphériques. La version 1.2 réduit notamment les interférences avec les réseaux Wi-Fi [7].

L'objectif du Bluetooth est de permettre de transmettre des données ou de la voix entre des équipements possédant des circuits radio de faible cout. Ainsi, la technologie Bluetooth est principalement prévus pour relier entre eux des périphériques sans utiliser une liaison filaire [1].

I.5.1.2 Le principe de fonctionnement du Bluetooth

Le standard Bluetooth est basé sur un mode de fonctionnement maître/esclave. Ainsi, on appelle « pico réseau » (en anglais *piconet*) le réseau formé par un périphérique et tous les périphériques présents dans son rayon de portée. Il peut coexister jusqu'à 10 pico réseaux dans une même zone de couverture. Un maître (M) peut être connecté simultanément à un maximum de 7 périphériques esclaves actifs (S).

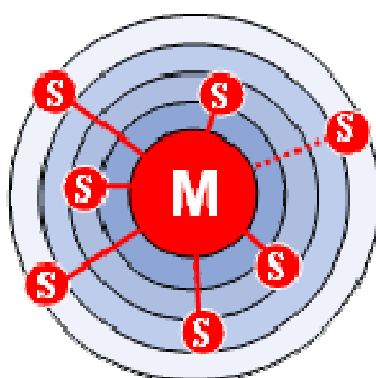


Figure I.5 : Diagramme topologique d'un réseau de type Maître/Esclave.

En réalité, à un instant donné, le périphérique maître ne peut se connecter qu'à un seul esclave à la fois. Il commute donc très rapidement d'un esclave à un autre afin de donner l'illusion d'une connexion simultanée à l'ensemble des périphériques esclaves [13].



Figure I.6 : Domaines d'applications du Bluetooth. [7]

I.5.2 ZigBee

I.5.2.1 Présentation de la technologie ZigBee

ZigBee connu aussi sous la norme IEEE 802.15.4 désigne une technologie pour la communication sans fil robuste. ZigBee est aujourd'hui utilisé dans de nombreux équipements, très généralement embarqués, qui imposent une très faible consommation d'énergie, et se suffisent d'un très faible débit de données et une portée de quelques dizaines de mètres (jusqu'à 100m). Ces équipements peuvent être opérationnels dans une maison ou dans l'industrie [13]. Le protocole ZigBee n'utilise que quatre couches sur les sept du modèle OSI. Il comprend :

- **La couche physique** : supporte la gestion des fréquences d'émission et de réception, le débit des données envoyées ou reçues, le type de modulation et le codage numérique des informations.
- **La couche d'accès au médium ou MAC** (*Medium Access Control*) : s'appuie sur les ressources de la couche physique. C'est la couche principale pour les aspects logiciels qui définit la façon dont un nœud du réseau pourra dialoguer (transmettre ou recevoir).
- **La couche réseau** : assure principalement les règles d'établissement d'un réseau, l'association et l'interconnexion de tous les nœuds dans le réseau, le transfert des informations entre les entités de ce réseau via une route, ainsi que la structure des messages (trames) qui seront échangés.
- **La couche application** : utilise les couches inférieures pour une application communicante donnée. Elle donne entre autres une signification aux informations échangées dans le réseau.

I.5.2.2 Le principe de fonctionnement de ZigBee

Le réseau ZigBee est un réseau maillé sans fil. Chaque nœud (module) doit s'identifier avant de rejoindre le réseau. La norme IEEE 802.15.4 met en place deux topologies :

a) Topologie étoile

Dans la topologie étoile, toutes les communications passent par le nœud coordinateur qui assure le rôle de relais entre les nœuds terminaux. Si un dispositif A souhaite dialoguer avec un dispositif B, la communication doit impérativement passer par le coordinateur [1].

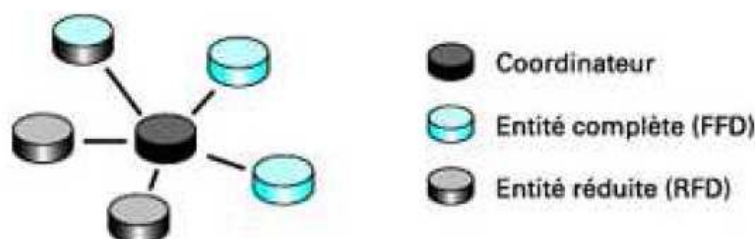


Figure I.7 : Représentation de la topologie en étoile.

b) Topologie Point à Point

Les dispositifs sont capables de dialoguer directement entre eux s'ils sont à proximité ou bien d'utiliser le coordonnateur pour contacter un dispositif à plus longue distance. Dans cette topologie, les dispositifs sont plus compliqués et intègrent entièrement le protocole ZigBee. Une mécanique de tables de liaison permet également à chaque dispositif de jouer le rôle de coordonnateur, permettant à deux dispositifs éloignés de dialoguer par l'intermédiaire d'un élément à portée [1].

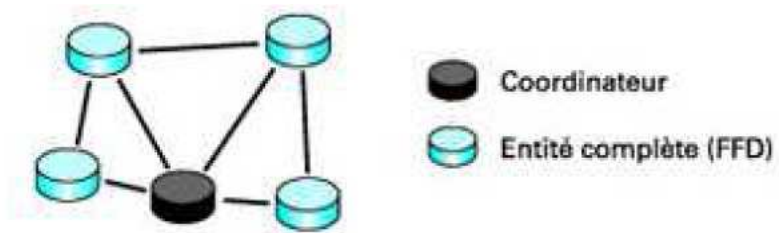


Figure I.8 : Représentation de la topologie point à point.

I.5.3 Les liaisons infrarouges

I.5.3.1 Présentation des liaisons infrarouges

Elles sont omniprésentes dans la maison. Par exemple, on peut citer les télécommandes. Cette solution est très simple et pas cher. Par contre, elles sont très sensibles au positionnement des appareils (ils doivent être en face l'un de l'autre) et aux perturbations lumineuses. La liaison fonctionne sur quelques mètres pour une vitesse de quelques Mégabits par secondes [12].

I.5.3.2 Principe de fonctionnement de l'infrarouge

Un système infrarouge comprend trois éléments : l'émetteur, le diffuseur (parfois ces deux éléments sont combinés en une seule unité) et le récepteur. L'émetteur achemine le signal audio au diffuseur qui effectue sa conversion en rayonnement infrarouge. Le récepteur décode le signal infrarouge et restaure le signal audio original qui peut être écouté sur un casque ou des écouteurs stéthoscopiques [1].



Figure I.9 : Exemple d'infrarouge. [7]

I.6 Les réseaux locaux sans fil

Le réseau local sans fil WLAN est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture [7]. Il existe différentes technologies utilisées pour les WLAN.

I.6.1 Le WiFi

I.6.1.1 Présentation du Wi-Fi (802.11)

IEEE 802.11 ou WIFI est un standard international décrivant les caractéristiques du réseau LAN sans fil (WLAN). Il connecte des ordinateurs portables, des équipements de bureau, des équipements personnels (PDA) en créant un réseau sans fil couvrant un rayon de dizaines de mètres et tolérant une mobilité à très petite vitesse [14].

I.6.1.2 Les modes d'opération d'IEEE 802.11

Le standard IEEE 802.11 décrit deux modes d'architecture : l'un appelé mode infrastructure ou Basic Service Set (BSS) et l'autre mode Ad-hoc ou sans infrastructure aussi appelé *Independent Basic Service Set (IBSS)*. Les deux modes sont présentés ci-dessous.

a) Le mode Ad-Hoc

Le mode Ad-hoc ou l'IBSS permet à plusieurs stations de communiquer directement entre elles sans avoir besoin d'un AP (*Access Point*) central. En fonctionnant en mode Ad-hoc, les stations étant à portée les unes des autres peuvent se découvrir et communiquer directement, à condition qu'elles utilisent le même canal [15].

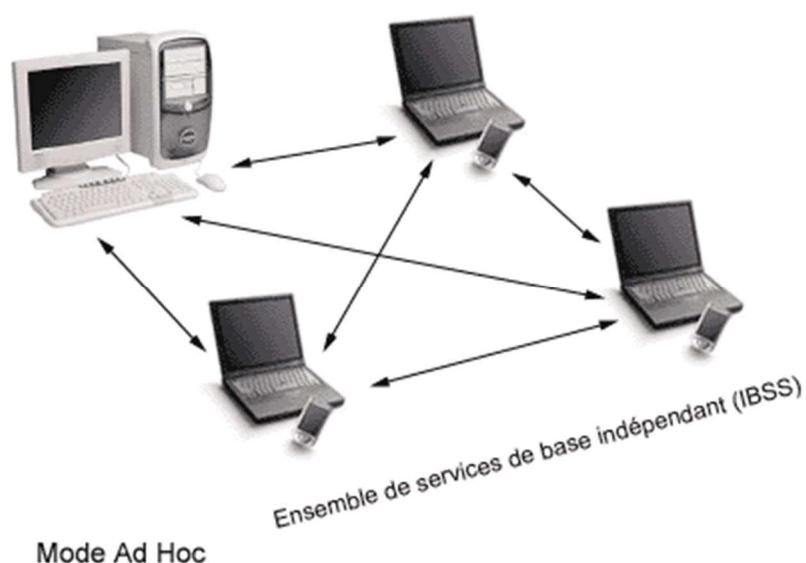


Figure I.10 : Mode de fonctionnement Ad-hoc du WiFi.

b) Le mode infrastructure

Le mode infrastructure fonctionne avec une station particulière, un AP, dont le rôle est de coordonner et de centraliser les échanges. Lorsque plusieurs stations sont connectées à l'AP, elles peuvent communiquer entre elles via l'AP qui sert de passerelle obligatoire [15].

Le mode infrastructure est divisé en deux architectures :

- **L'architecture BSS (*Basic Service Set*)**: composée d'une seule cellule couverte par un seul point d'accès (AP) qui est l'intermédiaire permettant l'échange d'informations entre plusieurs stations.
- **L'architecture ESS (*Extended Service Set*)** : composée de plusieurs points d'accès connectés par un système de distribution, et formant un large réseau composé de plusieurs cellules [14].

L'architecture du mode infrastructure est illustrée dans la figure ci-dessous :

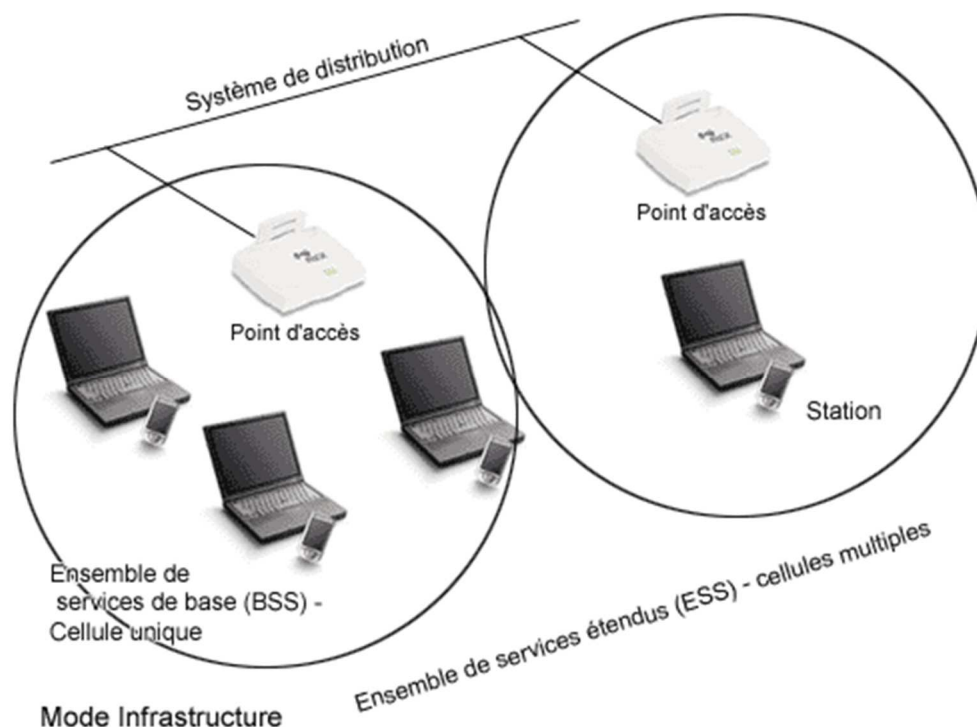


Figure I.11 : Mode de fonctionnement Infrastructure du WiFi.

I.6.1.3 Les différentes normes WiFi

La norme IEEE 802.11 est en réalité la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mbps. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit (c'est le cas des

normes 802.11a, 802.11b et 802.11g, appelées normes 802.11 physiques) ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité. Voici un tableau présentant les différentes révisions de la norme 802.11 et leur signification [16].

802.11a (WiFi5)	1999	54 Mbit/s théoriques Bande des 5 GHz Incompatible avec 802.11b, g et n
802.11b (WiFi)	Septembre 1999	11 Mbit/s théoriques Bande des 2.4GHz
802.11g	Juin 2003	54 Mbit/s théoriques Bande des 2.4 GHz Compatibilité ascendante avec la norme 802.11b
802.11i	Juin 2004	Améliore la sécurité des transmissions S'appuie sur l' <i>AES (Advanced Encryption Standard)</i> Chiffrement des communications pour les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g.
802.11n	Ratification prévue fin 2006 mais...!	Evolution rétrocompatible des normes 802.11b/g. Débits de 300 Mbit/s

Tableau I.1 : Différentes révisions de la norme IEEE 802.11.

I.6.2 L'Hyperlan

I.6.2.1 Présentation de L'Hyperlan

L'Hyperlan (*High Performance Local Area Network*) est une norme européenne. A la base, elle offre un débit de 20Mbits/s, mais la version L'HiperLAN2 permet d'atteindre 54Mbits/s sur un rayon d'action identique à celui du Wifi. Cette solution exploite la gamme de fréquence de 5GHz alors que le Wifi utilise les 2,4GHz. Cela autorise aujourd'hui son exploitation pour un usage local, sous certaines conditions qui notamment concernent la puissance des émetteurs. Il faut noter que cette solution perd sur terrain au profit du Wifi [12].

I.6.2.2 Le principe de fonctionnement d'Hyperlan

Hyperlan type 1, un mécanisme de routage multi-sauts est implanté. Les nœuds envoient des paquets hello qui leur permettent de connaître leur voisinage. Ces informations de voisinage sont propagées dans tout le réseau et permettent ainsi à un nœud d'en reconstruire la topologie. C'est un protocole à état de lien qui utilise un système de relais multipoints pour optimiser les diffusions d'informations.

Hyperlan 2 peut aussi fonctionner sans infrastructure fixe. Dans ce cas, un mobile est élu pour jouer le rôle de contrôleur central et les autres vont s'attacher à lui. Bien entendu, dans ce type de configuration il n'est pas question de réseau ad hoc au sens où le groupe MANET

l'entend. Tout au plus, les mobiles pourront communiquer directement entre eux (un saut), ou alors par l'intermédiaire du contrôleur central (deux sauts).

L'accès au medium reflète ces choix architecturaux, et c'est le contrôleur central qui décide de l'ordonnancement des communications dans la zone qu'il gère. Ces communications se font grâce à des trames de durée fixe (2 ms) qui sont elles-mêmes d'écopées en différents champs de longueur variable et qui portent les informations de contrôle du point d'accès ou les données dans un sens ou dans l'autre [17].

I.7 Les réseaux métropolitains sans fil

Le réseau métropolitain sans fil WMAN est connu sous le nom de *Boucle Locale Radio* (BLR). Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. La norme 802.16 est généralement appelée WiMax. La boucle locale radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunications. Le MAN est utilisé généralement dans les universités, les campus ou dans les villes. Le support physique d'interconnexion utilisé dans les WMAN est habituellement la fibre optique [7].

I.7.1 Le WiMAX

I.7.1.1 Présentation de WiMAX

Egalement connu sous la désignation IEEE 802.16, le WiMAX est un standard de transmission sans fil à haut débit. Fonctionnant à 70 Mbit/s, il est prévu pour connecter les points d'accès Wi-Fi à un réseau de fibres optiques, ou pour relayer une connexion partagée à haut débit vers de multiples utilisateurs (figure I.12). Avec une portée théorique de 50 km, il devrait permettre, à terme, le développement de réseaux métropolitains (WMAN) reposant sur un unique point d'accès, au contraire d'une architecture basée sur de nombreux points d'accès Wi-Fi [7].

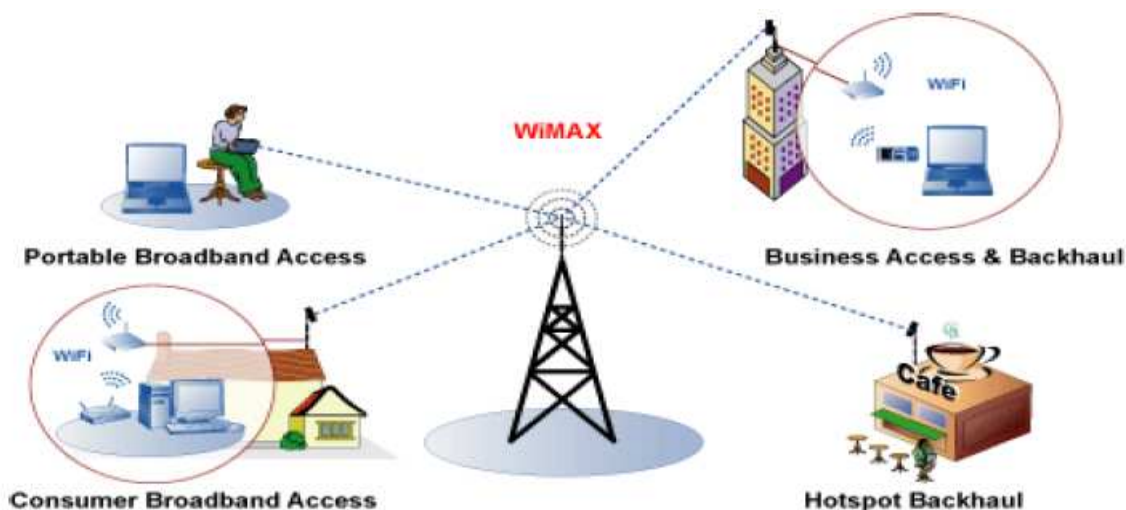


Figure I.12 : Principe de fonctionnement de WiMAX.

I.8 Les réseaux étendus sans fil

Les réseaux étendus sans fil (WWAN) est également connus sous le nom des réseaux cellulaires mobiles. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes [18] :

- **GSM** (*Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile*)
- **GPRS** (*General Packet Radio Service*)
- **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunication System*)
- **LTE** (*Long Term Evolution*).

I.9 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons étudié les différentes spécificités des réseaux sans fils possèdent des caractéristiques et des équipements propres qui diffèrent de ceux employés dans les réseaux traditionnels.

Les réseaux sans fils en général sont des technologies intéressantes et très utilisés dans de divers domaines comme l'industrie, la santé et le domaine militaire. Cette diversification d'utilisation revient aux différents avantages qu'apportent ces technologies, comme la mobilité, la simplicité d'installation (absence de câblage) c'est-à-dire les connexions sans fils permettent de connecter différents appareils sans câble. La liaison peut-être soit de type hertzien, soit par la lumière infrarouge.

Les réseaux sans fil ne visent toutefois pas à remplacer les réseaux filaires mais plutôt à leurs apporter les nombreux avantages découlant d'un nouveau service : la mobilité de l'utilisateur.

Dans le chapitre suivant, on va s'intéresser aux réseaux métropolitains en particulier, l'étude du standard WiMAX mobile.

CHAPITRE II

***Etude de la technologie WiMAX mobile
(IEEE802.16 e)***

II.1 Introduction

WiMAX ou *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, est une nouvelle technologie émergente dans le domaine de communication qui est basé sur le standard IEEE802.16. Cette technologie est également le nom d'un forum regroupant les grands acteurs des technologies de l'information et de la communication (les industriels, les opérateurs, les équipementiers et les fournisseurs), dont l'objectif est de certifier la compatibilité et l'interopérabilité des produits WiMAX. [4]

Dans la réalité, le WiMAX ne permet de franchir que de petits obstacles tels que des arbres ou une maison mais ne peut en aucun cas traverser les collines ou les immeubles. Le débit réel lors de la présence d'obstacles ne pourra ainsi excéder 20Mbit/s.

Les premiers déploiements en WiMAX devraient permettre à des zones isolées, mal desservies par le DSL ou le câble ou souhaitant tirer profit d'une connexion sans fil, de disposer d'un accès Internet large bande. Le développement du WiMAX pourrait donc jouer un rôle important dans l'aménagement numérique du territoire.

Le débit et la portée présentent les atouts du WiMAX. Il fonctionne à 70 Mbit/s maximum théoriquement dans des conditions extrêmement favorables, 12 Mbit/s pratiquement et peut couvrir des zones de rayon allant jusqu'à 50 Km [2].

II.2 Historique du WiMAX

Le WiMAX forum est le nom d'un consortium créé en 2001, notamment par Intel et Alvarion. Ce consortium a pour but de permettre la convergence et l'interopérabilité entre les différents standards de réseaux sans fils : HiperMan qui était proposé en Europe par l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) et le standard développé par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineer*) et dénommé IEEE-802.16.

Aujourd'hui, le WiMAX forum rassemble plus de 300 fournisseurs et opérateurs de télécommunication dont des entreprises bien connues comme AT&T Wireless, Intel, Fujitsu, Alcatel, Motorola, Nokia, Siemens, France Telecom [19].

La figure II.1 représente l'évolution historique du WiMAX en termes de débit et l'évolution technologique à partir de l'année où le WiMAX est approuvé jusqu'à l'apparition de la version mobile.

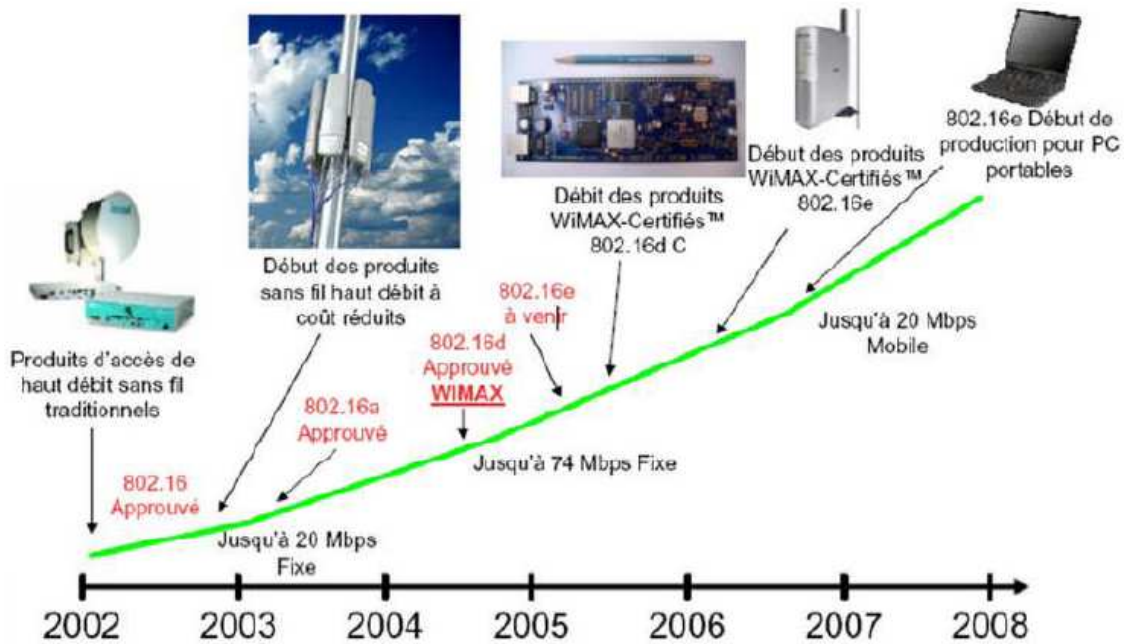


Figure II.1 : Historique du WiMAX. [14]

II.3 Généralité sur le réseau WIMAX

Le réseau WiMAX est basé sur différentes versions de la norme 802.16 et existe dans deux configurations fixe et mobile. La configuration fixe est utilisée pour concurrencer les technologies d'accès DSL. La configuration mobile peut concurrencer les hot spots du WiFi comme elle peut également concurrencer les réseaux cellulaires (Figure II.2). Ainsi le WiMAX est considéré comme une technologie B3G (*Beyond 3G*) [6].

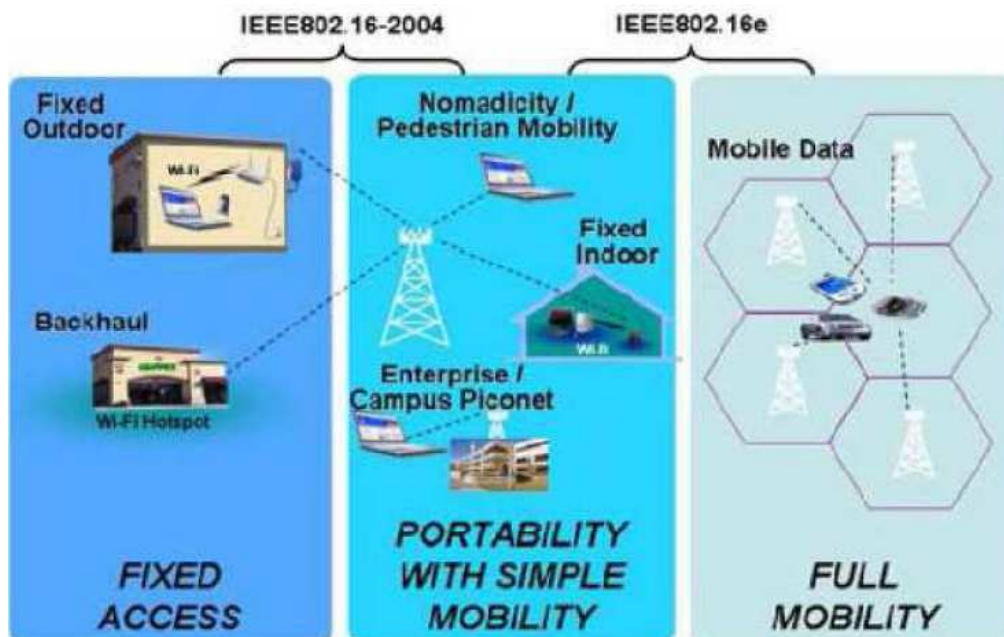


Figure II.2 : Les différentes configurations du WiMAX. [1]

II.3.1 Normalisation et le standard IEEE802.16

WiMAX réunit donc plusieurs standards, tous à des états d'avancement différents, qui sont autant d'axes de travail du groupe IEEE 802.16.

II.3.1.1 IEEE 802.16-2001

L'IEEE 802.16 a été approuvé par l'IEEE pour la première fois en décembre 2001. Le spectre de fréquences utilisé était entre 10 et 66 GHz, ce qui ne permettait que des applications en ligne de vue. Ce standard spécifiait une couche physique utilisant une technique de modulation mono-porteuse et une couche MAC à multiplexage temporel qui supporte des deux méthodes de duplexage FDD (*Frequency Division Duplexing*) et TDD (*Time Division Duplexing*) [20].

II.3.1.2 IEEE 802.16c-2002

IEEE 802.16c est un amendement actualisant et élargissant le standard IEEE 802.16-2001. C'est aussi une norme publiée en janvier 2003, qui corrige des erreurs et des incohérences liées à ce standard. Cette version établit, d'autre part, la liste des fonctions et caractéristiques à mettre en œuvre dans le cas d'implémentation typique de réseaux sans fil utilisant la bande de fréquences comprises entre 10 et 66 GHz. Ce protocole est aujourd'hui obsolète et remplacé par le standard 802.16d [20].

II.3.1.3 IEEE 802.16a-2003

Cette extension du standard IEEE 802.16 a été ratifiée en janvier 2003. Elle opère sur une bande de fréquences comprises entre 2 et 11 GHz et permet des débits allant jusqu'à 70 Mbits/s. Le standard prend donc en charge des applications à faible latence telles que la vidéo et la voix. Cet amendement a été principalement développé pour permettre des applications sans "ligne de vue". C'est-à-dire, que la transmission n'est pas interrompue par les obstacles physiques. Il supporte la topologie point à multipoints et la topologie maillée. Une station de base peut couvrir, théoriquement, une zone de 50 Km de rayon.

IEEE 802.16a, prévu pour un usage « en fixe » (antenne fixe vers antennes fixes), permet d'opérer dans les bandes de fréquences non libres (bandes 2,56 GHz et 3,5 GHz) et libres (comme la bande 5,8 GHz). Ce protocole est aujourd'hui lui aussi obsolète et remplacé par le standard IEEE 802.16d [20].

II.3.1.4 IEEE 802.16-2004

Le standard IEEE 802.16-2004 est prévu pour un usage fixe, c'est-à-dire un usage via une antenne fixée sur le toit par exemple, semblable aux antennes TV. Le WiMAX opère dans les bandes de fréquence 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est

nécessaire, ainsi que la bande libre des 5.8 GHz. Le débit théorique est de 75 Mbits par seconde sur une portée de 10 km [14].

II.3.1.5 IEEE 802.16e-2005

Celle-ci prévoit, à partir d'une station de base vers des clients mobiles se déplaçant à moins de 120 km/h, la transmission de données à des débits jusqu'à 30 Mbits/s sur une bande de fréquences comprises entre 2 et 6 GHz (zone de couverture d'un rayon inférieur à 3,5 km). Ce standard permet de mixer les zones de couverture par interopérabilité entre liaisons fixes et liaisons mobiles. De même, celui-ci donne la possibilité au client mobile de passer automatiquement d'une station à une autre sans perte de connexion (*Roaming*) [21].

L'évolution du standard IEEE 802.16 est regroupée dans le Tableau suivant :

Standard	Description	Publié
IEEE std 802.16-2001	Définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10 GHz jusqu'à 66 GHz.	8 avril 2002
IEEE std 802.16c-2002	Définit les options possibles pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.	15 janvier 2003
IEEE std 802.16a-2003	Amendement au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 GHz et 11 GHz.	1 avril 2003
IEEE std 802.16-2004 (également désigné p802.16d)	Il s'agit de l'actualisation (la révision) des standards de base 802.16a et 802.16c.	1 octobre 2004
IEEE std 802.16e- (également désigné IEEE std 802.16-2005)	Apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile du standard. Jusqu'à 122 Km/h.	7 décembre 2005
IEEE 802.16f	Spécifie la MIB (<i>Management Information Base</i>), pour les couches MAC (<i>Media Access Control</i>) et PHY (<i>Physical</i>).	22 janvier 2006
IEEE 802.16m (2009)	Débit en nomade ou stationnaire jusqu'à 1Gbits/s et 100 Mbits/s en mobile grandes vitesse. Convergence des technologies WiMAX. WiFi et 4G (LTE)	2009

Tableau II.1 : Différentes normes du WiMAX.

II.3.2 Les bandes des fréquences utilisées par le WiMAX

Le standard 802.16 utilise les bandes de fréquences suivantes [22] :

- **De 10 à 66 GHz** : Dans ce cas le LOS (*Line of Sight*) est exigé, vu que la longueur d'onde est courte et le risque d'atténuation se présente. Cette bande de fréquence offre l'avantage d'avoir des débits élevés. Le type de la couche physique utilisé dans ces

fréquences est le Wireless Man-SC. Celle-ci supporte les deux types de duplexage FDD et TDD.

- **De 2 à 11 GHz** : Le mode NLOS est supporté dans cette bande de fréquence. Ces fréquences utilisent les trois types de couches PHY, à savoir la Wireless MAN-SC, la Wireless MAN-OFDM et la Wireless MAN-OFDMA.
- **5.7 GHz** : Contrairement aux autres bandes de fréquences, celle-ci n'exige pas de licence, ce qui permet d'utiliser cette technologie en toute liberté. Cependant, cette liberté d'utilisation de cette catégorie de bande fréquences cause des interférences.

II.3.3 Application du WIMAX

Le caractère de mobilité ainsi que les coûts d'installations réduits, ouvre la voie à de nombreuses applications pour le WIMAX [14] :

- ✓ Offres commerciales grand public triple play : données, voix, télévision.
- ✓ Couvertures conventionnelles de zones commerciales (« hot zones ») : zones d'activité économique, parcs touristiques, centres hôteliers... .
- ✓ Déploiements temporaires : chantiers, festivals, infrastructure de secours sur une catastrophe naturelle... .
- ✓ Gestion de réseaux de transports intelligents.
- ✓ Zone hospitalière étendue (lieu médicalisé).
- ✓ Sécurité maritime et sécurité civile.
- ✓ Systèmes d'information géographique déportés.
- ✓ Métrologie (télémessure, pilotage à distance, relevés géophysiques...).

II.4 Architecture du réseau WiMAX

L'architecture de la technologie WIMAX se compose de stations de base (BS, *Base Station*), et des stations d'abonnés (SS, *Subscriber Station*). La station de base joue le rôle d'une antenne centrale chargée de communiquer et de desservir les stations mobiles qui servent les clients utilisant le WiFi ou l'ADSL [19].

Voici un exemple d'architecture générale d'un réseau d'accès à large bande représenté schématiquement par la figure II.3.

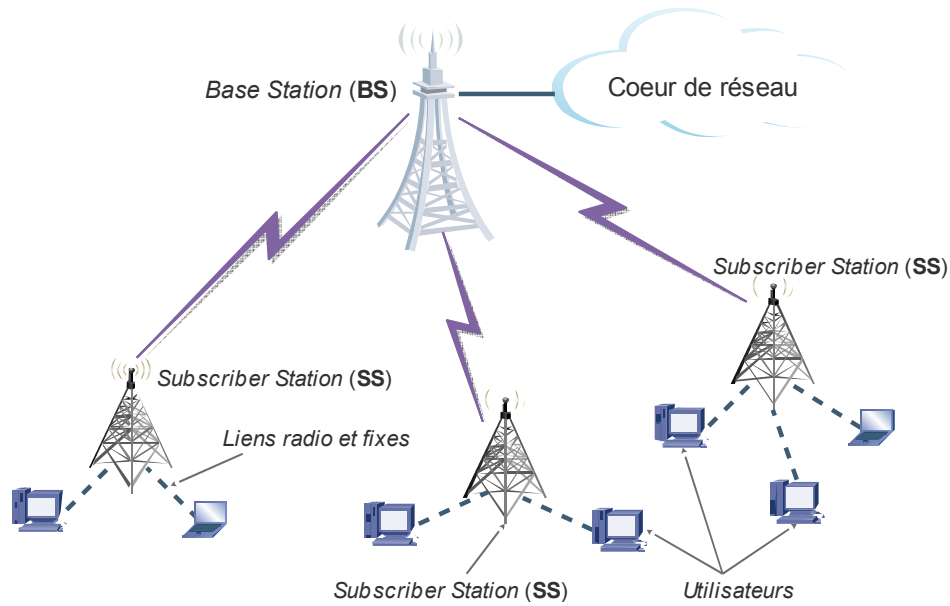


Figure II.3 : Architecture de base WiMAX. [2]

II.5 Fonctionnement de WiMAX

II.5.1 La boucle locale

Quand on parle de boucle locale, on parle généralement des câbles qui partent du répartiteur, c'est-à-dire l'endroit situé dans le central téléphonique et où se font l'ensemble des connexions entre les abonnés et les infrastructures, jusqu'à la prise téléphonique. La boucle locale n'est pas nécessairement constituée par des câbles, elle peut également utiliser les ondes hertziennes, on parle alors de Boucle Locale Radio (BLR).

La boucle locale radio est une technologie de connexion sans fil à haut débit. Elle utilise les ondes hertziennes et peut être qualifiée de bidirectionnelle puisque la communication peut se faire dans le sens opérateur/client mais également dans le sens contraire (client/opérateur).

Le principe est simple. D'un côté, l'opérateur émet des paquets de données sous formes d'ondes radios grâce à des antennes reliées à de l'équipement spécialisé, de l'autre un client est muni d'une antenne et un modem afin de réceptionner ces paquets [21].

II.5.2 La fonction desserte

Le but de la desserte est de relier le client final à un réseau donné afin qu'il puisse accéder à Internet et/ou aux autres services. Pour cela, le client doit posséder un récepteur WiMAX et se trouver dans le champ d'action d'un émetteur WiMAX. La transmission entre le client et son hot spot WiMAX est dite en « non ligne de vue » (NLoS), c'est-à-dire que le client ne se trouve pas en vue directe avec l'antenne.

En effet, les bâtiments ou la végétation que l'on trouve dans les villes forcent le signal à être détourné grâce à l'utilisation de la modulation de fréquence OFDM [2].

II.5.3 La fonction collecte

Le standard WIMAX permet une connexion sans fil entre une station de base et des stations d'abonnés sans nécessiter une ligne visuelle (LOS ou NLOS). Dans un réseau, la collecte consiste à relier les points d'accès au *backbone* de l'opérateur (dorsale) assurant ainsi la connexion avec l'Internet [2].

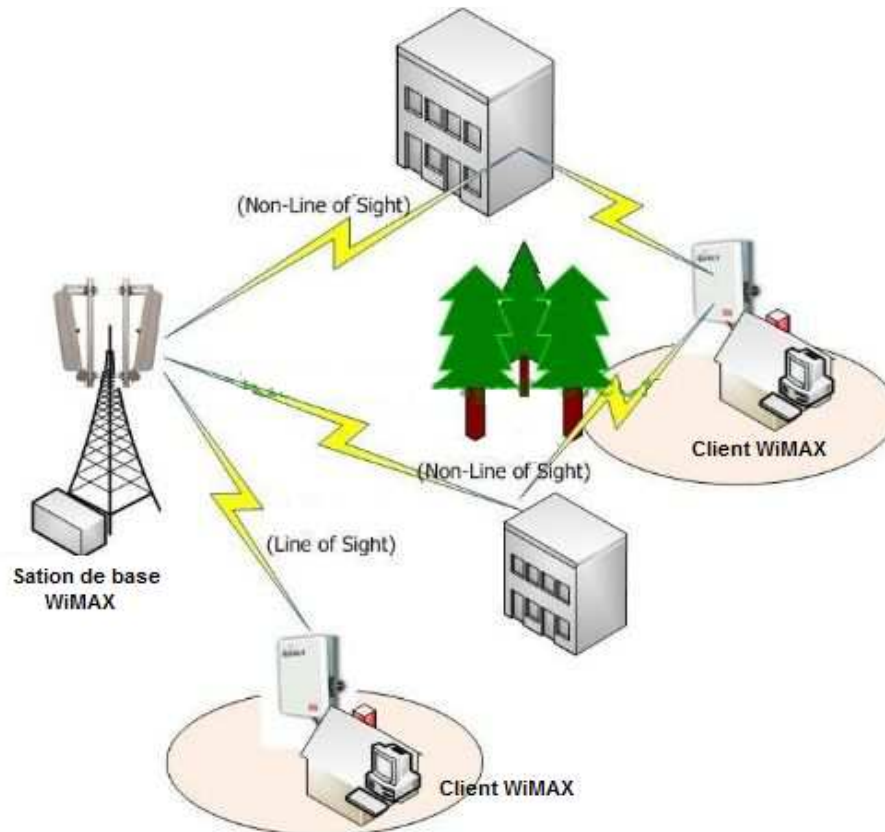


Figure II.4 : Connexions LOS et NLOS.

II.6 Structure en couches protocolaires

La figure II.5 représente l'architecture en couches de la norme IEEE 802.16. Elle est constituée de deux couches : La couche physique (PHY) et la couche MAC [23].

II.6.1 La couche MAC

La couche MAC prend en charge le transport des cellules ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) mais aussi celui des paquets IP et joue un rôle important dans la gestion de la qualité de service (QoS). Elle est composée principalement de trois sous-couches [19] :

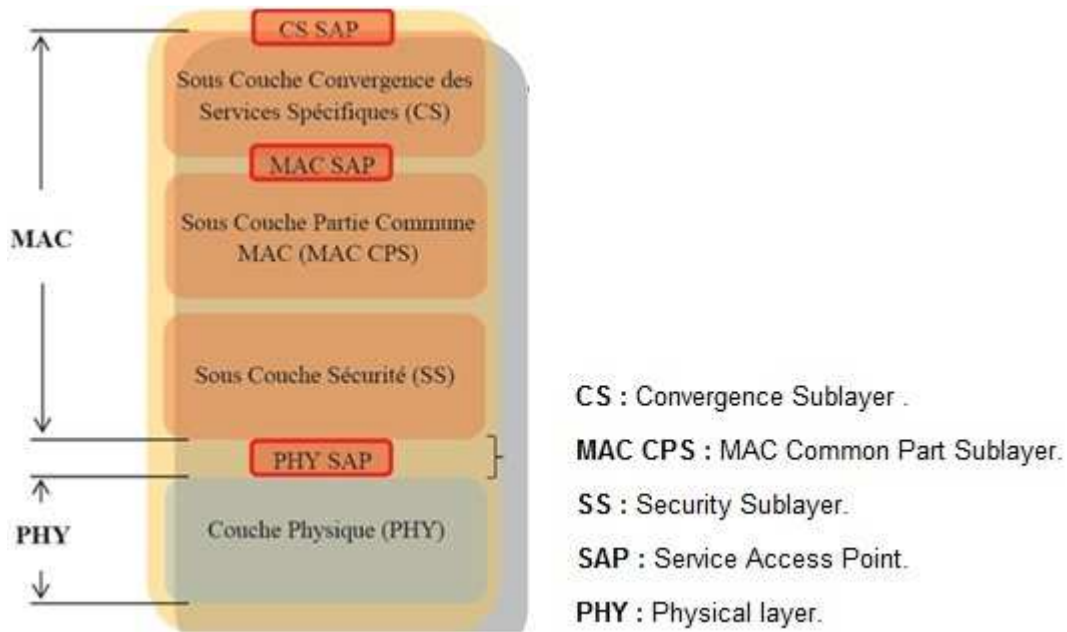


Figure II.5 : Pile protocolaire de WiMAX.

II.6.1.1 SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer*)

Elle inclut un service spécifique de convergence des couches supérieures du modèle OSI avec les sous-couches MAC. Deux sous-couches sont définies : la sous-couche de convergence ATM, relative aux services ATM, et la sous-couche de convergence de paquets, qui sont définis pour faire la correspondance des services par paquet, tels qu'IPv4, IPv6 et Ethernet. C'est cette sous-couche qui s'occupe de la transmission des SDU (*Service Data Unit*) à la connexion MAC désirée et de la préservation ou l'activation de la QoS, ainsi que l'allocation de la bande passante.

II.6.1.2 La sous-couche commune (*Common Part Sublayer*)

Dans la sous-couche commune chaque service est associé à une connexion, du fait que la couche MAC soit orientée connexion. Ceci permet la demande de la bande passante, de la QoS ...etc. Dans le but de faciliter la gestion du trafic et la QoS, le transport de connexion s'est unidirectionnel.

La couche MAC réserve certaines connexions pour les *broadcast* et le *multicast*. Dans le cas du *multicast*, les stations d'abonnés doivent rejoindre un groupe pour pouvoir bénéficier des informations transmises.

II.6.1.3 La sous couche de sécurité (*Security Sublayer*)

La sous-couche de sécurité contient les fonctions de sécurité relatives aux trames de la couche MAC. Elle comprend deux protocoles, selon (Thomas Hardjono 2005), le protocole d'encapsulation qui définit l'ensemble des algorithmes utilisés pour le cryptage des paquets de

données échangés entre la BS et la SS, et le « Key Management Protocol » utilisé pour la gestion du matériel de chiffrement [22].

II.6.2 La couche physique (PHY)

Le standard IEEE 802.16 définit plusieurs spécifications possibles de la couche physique. Ces spécifications dépendent du type de modulation utilisé ainsi que de la bande de fréquence, le choix de la spécification de la couche physique est couplé au type d'application / déploiement visé [2].

II.6.2.1 Les types de la couche physique :

Le standard WiMAX définit cinq (5) couches physiques, chacune étant spécifique à une bande de fréquence ou à un type d'application [6].

- **Wireless MAN-SC** : Utilise la modulation SC (*Single Carrier*) comme technique de transmission, l'accès est par TDMA, elle supporte le duplexage TDD et FDD. Cette interface est utilisée pour la transmission LOS dans la bande de fréquence 10-66 GHz.
- **Wireless MAN-SCa** : Utilise la modulation SC comme technique de transmission. L'accès est par TDMA, elle supporte le duplexage TDD et FDD. Cette interface est utilisée pour la transmission NLOS dans les bandes nécessitant des licences de 2-11 GHz.
- **Wireless MAN-OFDM** : Utilise l'OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) à 256 porteuses comme technique de transmission. L'accès est par TDMA, elle supporte le duplexage TDD et FDD. Elle est utilisée pour la transmission NLOS dans les bandes nécessitant des licences de 2-11 GHz.
- **Wireless MAN-OFDMA** : Utilise l'OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*) à 2048 porteuses. Dans ce système l'accès multiple se fait par l'adressage d'un sous ensemble de sous porteuses pour un récepteur individuel. Elle supporte le duplexage TDD et FDD. Elle est utilisée pour la transmission NLOS dans les bandes nécessitant des licences de 2-11 GHz.
- **Wireless HUMAN** : Cette interface est utilisée pour la transmission NLOS dans la bande de fréquences libres de 2-11 GHz. La norme ne spécifie pas une technique de transmission propre à elle. N'importe quelle technique de transmission NLOS (SC, OFDM, OFDMA) peut être utilisée, mais avec certaines contraintes spécifiées à cette interface. Seulement le duplexage TDD est utilisé.

Les différents types de couches physiques définies par l'IEEE 802.16 sont regroupés dans le (tableau II.2) suivant, avec [20]:

- **AAS (Adaptive Antenna System)** :c'est l'utilisation de plus qu'un seul élément d'antenne, en orientant des faisceaux vers des utilisateurs multiples simultanément.
- **ARQ (Automatic Repeatre Quest)** :c'est le processus de la retransmission automatique des PDU (Protocol Data Unit) erronés ou perdus.
- **STC (Space Time Coding)** :c'est l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission au lieu d'une seule antenne, dans le but de créer une diversité spatiale.
- **Mesh** : topologie Mesh (maillée).

Désignation	Fréquence	LOS/NLOS	options	Duplexage
WirelessMan-SC	10-66 GHz	LOS		TDD, FDD
WirelessMan-SCa	2.5-11 GHz	NLOS	AAS ,ARQ,STC	TDD, FDD
WirelessMan-OFDM	2.5-11 GHz	NLOS	AAS ,ARQ,STC,Mesh	TDD, FDD
WirelessMan-OFDMA	2.5-11 GHz	NLOS	AAS ,ARQ,STC	TDD, FDD
WirelessMan-HUMAN	2.5-11 GHz	NLOS	ARQ,STC,Mesh	TDD

Tableau II.2 : Les différents types de couches physiques.

II.6.2.2 Technique de Multiplexage

a) Le multiplexage par répartition orthogonal de fréquence (OFDM)

La norme 802.16-2004 utilise le multiplexage par répartition orthogonal de fréquence (OFDM). Le principe de l'OFDM est la transmission sur plusieurs fréquences orthogonales. Ce principe va diminuer la perception des interférences notamment en NLOS (*Non Line Of Sight*). La modulation OFDM permet de moduler en fréquence jusqu'à 256 sous porteuses .Chaque porteuse a de plus, une bande passante faible par rapport à la bande totale utilisée, ce qui provoque une grande tolérance aux problèmes de multi trajets .La figure ci-dessous représente d'une manière simple la modulation OFDM [24].



Figure II.6 : Modulation OFDM.

b) L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

Dans la technique OFDMA, les sous porteuses actives sont divisés en des sous ensembles de sous porteuses (*subchannels*). Dans le sens descendant (*downlink*), un *subchannel* peut être prévu pour différents groupes de récepteurs ; dans le sens montant (*uplink*), un émetteur peut attribuer un ou plusieurs *subchannels*, et plusieurs émetteurs peuvent transmettre simultanément. Les sous porteuses formant un seul *subchannel*, mais n'ont pas besoin d'être adjacents [14].

Les symboles OFDMA sont similaires à ceux de l'OFDM. Chaque symbole consiste en :

- Des sous porteuses de données (OFDM) ou des sous canaux (OFDMA) pour transporter des données.
- Des sous porteuses pilotes servant comme référence de fréquences.
- Des sous porteuses DC désignant la fréquence centrale.
- Des sous porteuses de garde pour assurer un espace entre les signaux pour éviter les interférences.

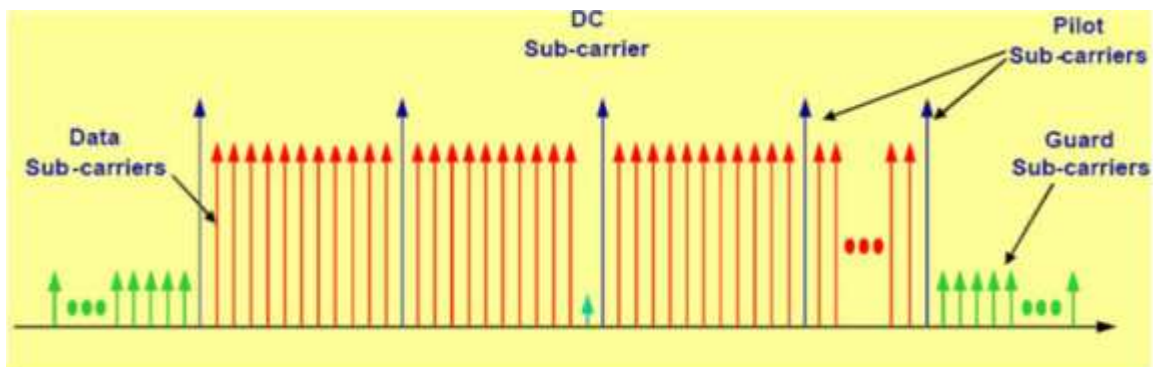


Figure II.7 : Description fréquentielle de l'OFDM.

Le symbole OFDMA est divisé en des sous canaux (*subchannels*), de supporter l'accès multiple, et pour une meilleure adaptation aux techniques avancées des antennes. Pour le *downlink* on dispose de deux modes d'utilisation des *subchannels* :

- ❖ FUSC (*Full Usage of Subchannels*)
- ❖ PUSC (*Partial Usage of Subchannels*)

Pour l'*uplink*, on fait la permutation premièrement (partition en des *subchannels*), ensuite on fait l'attribution des porteuses pilotes et des porteuses données dans chaque *subchannel*. D'autres types de permutation peuvent être aussi utilisées, dont on peut citer l'AMC (*Advanced Modulation and Coding*) et le TUSC (*Tile Usage of Subchannels*). Un slot dans l'OFDMA est la plus petite unité d'allocation des données possible. Pour qu'il soit bien défini, il exige les 2 dimensions : temps et *subchannels*.

La définition des slots OFDMA dépend de la structure du symbole OFDMA, qui varie pour l'*uplink* et le *downlink*, pour le FUSC et le PUSC, et pour les permutations des sous porteuses. Par exemple si on utilise le mode PUSC pour l'*uplink* avec une certaine permutation, le slot utilisé est égal à 1 *subchannel* x 3 symboles OFDM [14].

II.6.2.3 Les systèmes MIMO : Multiple Input Multiple Output

MIMO est un type de multiplexage spatial, c'est une technique très puissante pour Les systèmes multiple-antenne. En principe, MIMO augmente le débit des abonnés dans la proportion du nombre d'antennes de transmission du faite que chaque antenne porte un flux unique des symboles de donnés. Par conséquence ; si le nombre des antennes de transmission est M et le débit des données par chaque flux est R alors le débit total du système est $M \times R$.

MIMO fournit un accroissement multiplicatif du débit, en comparaison avec l'architecture Single Input Single Output (SISO), tout en codant soigneusement le signal transmis à travers les antennes, les symboles OFDM, et les fréquences.

Il existe plusieurs types de récepteurs pour le MIMO, mais une restriction pour tous ces récepteurs est que le nombre des antennes de réception doit être plus grand, ou au moins égal au nombre des antennes de transmission, mais pas plus petit, sinon les données ne peuvent être décodées correctement au niveau de la réception [19].

II.6.2.4 Modulation adaptative

L'utilisation de la modulation adaptative permet à un système sans fil de choisir la modulation d'ordre le plus élevé selon les conditions du canal. On peut voir une évaluation générale des conditions du canal requis pour différentes techniques de modulation. A mesure que l'on augmente la portée, on dégrade vers le bas aux modulations inférieures (c.-à-d., BPSK), mais en tant que tu es dans un environnement indoor étroit tu peux utiliser des modulations d'ordre plus supérieur comme la QAM pour augmenter le débit. En outre, la modulation adaptative permet au système d'éliminer l'interférence d'évanouissement et autres [24]. La figure II.5 représente un schéma de modulation adaptative :



Figure II.8 : Modulation adaptative.

II.6.2.5 Techniques de Duplexage

Le duplexage est le processus utilisé pour créer des canaux bidirectionnels pour la transmission des données en *uplink* et *downlink*, sachant que le multiplexage utilisé est du type TDM (*Time Division Multiplexing*). Le standard 802.16 2004 supporte 2 techniques de duplexage [14].

a) Le mode duplex TDD

En mode TDD, la trame est séparée en deux sous-trames successives (figure II.9), la première pour le lien descendant et la seconde pour la voie montante. La durée totale d'une trame est constante et est comprise entre 2 et 20 ms (la durée est fixée par l'opérateur lors de la mise en place du réseau). Cependant le rapport entre la partie descendante et montante est adaptatif en fonction du trafic sur le réseau. Ce partage de la trame entre les deux voies est paramétré au niveau des couches réseaux.

Des temps de transitions sont nécessaires entre les changements d'états (montant et descendant) pour permettre aux équipements de passer du mode d'émission au mode de réception et inversement. Ces temps sont appelés respectivement TTG (*Transmit Transition Gap*) et RTG (*Receive Transition Gap*) et ne sont pas forcément de durée égale [2].

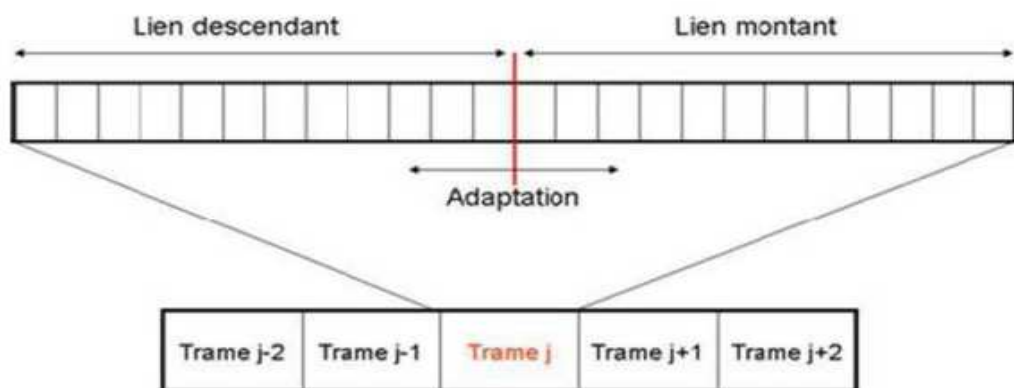


Figure II.9 : Le duplexage TDD. [1]

b) FDD (*Frequency Division Duplexing*)

Le FDD est un duplexage fréquentiel. La voie montante et descendante utilise les mêmes intervalles de temps mais avec des fréquences séparées (Figure II.10) [6]. Deux types de duplexage FDD sont prévus dans 802.16-2004 [14] :

- a) **FDD full-duplex** : une full-duplex SS (**Subscriber Station**) est capable d'écouter continuellement le canal *downlink*, ce qui lui permet de transmettre et de recevoir simultanément.
- b) **FDD half-duplex** : une *half-duplex* SS peut écouter le canal *downlink* seulement lorsqu'elle ne transmet pas sur le canal *uplink*, donc elle n'est pas capable de

transmettre et de recevoir simultanément. Une *half-duplex* SS est moins coûteuse, moins complexe qu'un full duplex SS, mais elle n'a pas la même efficacité qu'une *full-duplex* SS.

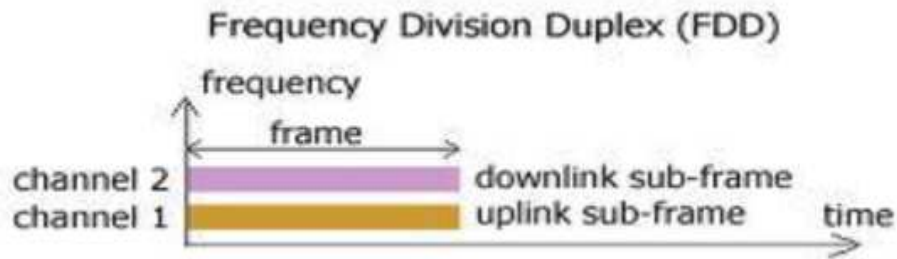


Figure II.10 : Le duplexage FDD. [19]

II.7 Les topologies WiMAX

Deux topologies peuvent être définies pour un réseau WiMAX : La topologie en étoile ou Point-Multi-Points (PMP), et la topologie maillée.

II.7.1 Le Mode PMP (*Point-Multi-Point*) :

Il s'agit du mode de communication de base pour le 802.16. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une transmission d'un point central vers plusieurs points dans le réseau, ce concept est présenté dans la Figure II.11. Dans cette configuration, le lien descendant DL (Down Link), depuis la BS (*Base Station*) vers l'utilisateur SS (*Subscriber Station*) fonctionne en mode PMP : la BS est l'élément qui contrôle les transmissions dans sa zone de couverture sans coordination avec les autres stations (BS ou SS).

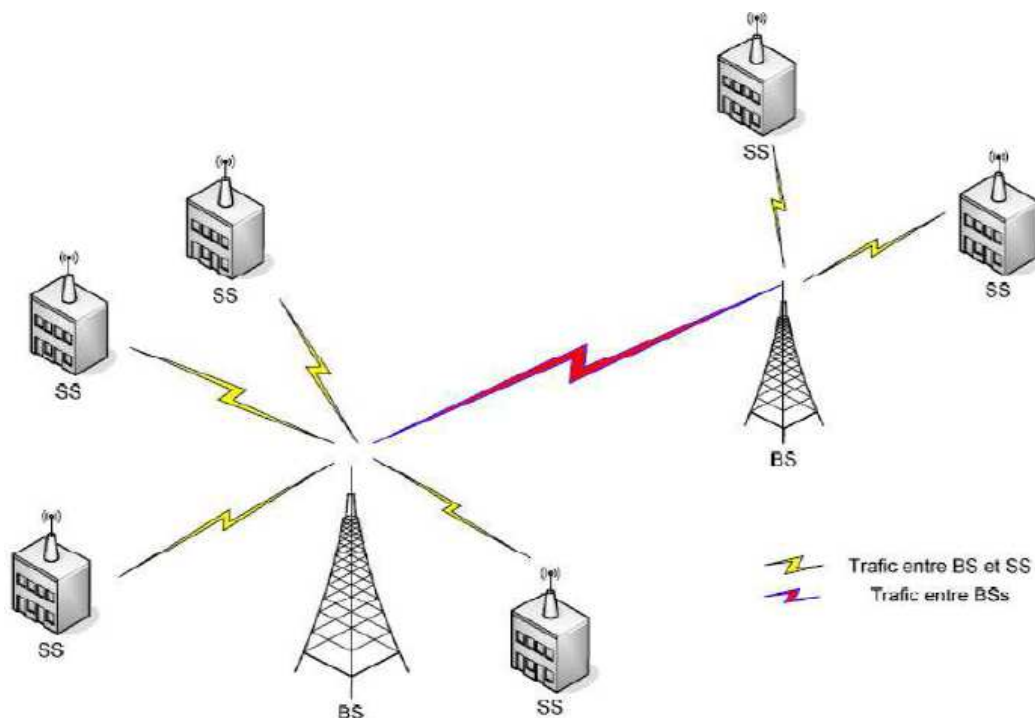


Figure II.11 : Le mode PMP du WiMAX.

II.7.2 Le mode Mesh

La différence majeure entre le mode PMP et le mode Mesh est détaillée dans ce qui suit, En mode PMP, le trafic se fait uniquement depuis ou vers la BS, alors que dans le cas du Mesh, les SS peuvent communiquer directement entre elles sans passer par la BS.

Pour assurer le bon fonctionnement de ces deux types de communications, un mécanisme d'ordonnancement est nécessaire. L'ordonnancement peut être distribué ou centralisé au niveau de la BS, on parle dans ce dernier cas de topologie Mesh BS, ou bien être une combinaison des deux.

Contrairement au mode PMP, où la BS était la seule entité qui contrôle et initie les transmissions, dans le mode Mesh, le processus est géré de façon coordonnée entre les Mesh SS et la Mesh BS. En effet, les Mesh SS peuvent également transmettre au même titre que la Mesh BS.

Dans le cas d'un ordonnancement centralisé, les ressources sont distribuées d'une manière centralisée. En effet, la Mesh BS doit gérer toutes les requêtes de ressources provenant des Mesh SS saut-par-saut, la Mesh BS gère les requêtes du premier saut et puis du second etc. La Mesh BS détermine les ressources requises pour chaque lien, en Up Link ou en Down Link. Elle transmet ensuite l'information à tous les nœuds [24].

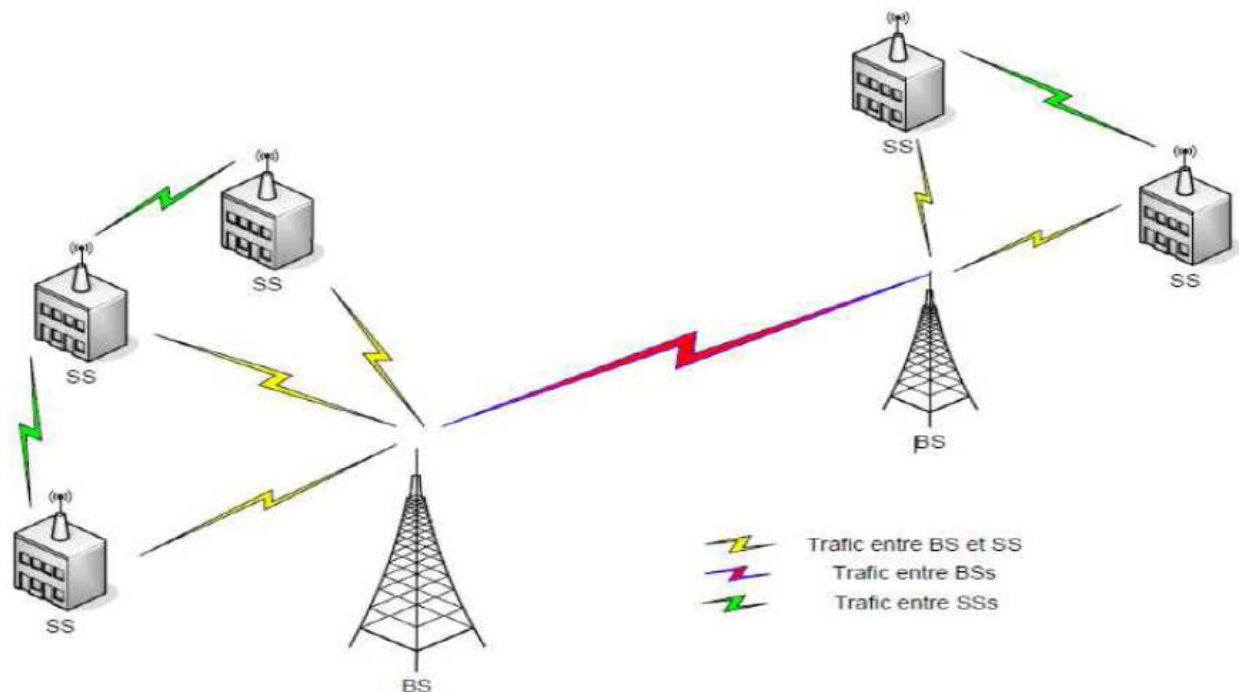


Figure II.12 : Le mode mesh du WiMAX.

II.8 WiMAX mobile

Le WiMAX mobile (Standard IEEE 802.16e) est la version qui apporte la mobilité au WiMAX fixe tout en restant interopérable avec celui-ci. A partir d'une station de base (BS) vers des clients mobiles (MS) se déplaçant à moins de 120 km/h en passant d'une antenne à l'autre, l'IEEE 802.16e prévoit la transmission de données à des débits allant jusqu'à 30 Mb/s sur une zone de couverture d'un rayon inférieur à 3.5 km.

Pour bénéficier des services de cette technologie, les équipements mobiles devront intégrer un composant dédié. Au niveau de l'interface physique, IEEE 802.16e utilise la méthode d'accès « OFDMA » (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) qui permet d'adapter les canaux de manière dynamique [23].

II.8.1 La structure en couche

II.8.1.1 La couche physique

Le WiMAX mobile porte des nouvelles améliorations pour la couche physique l'OFDMA, connue dans 802.16e sous le nom de SOFDMA (*Scalable OFDMA*), et porte des caractéristiques importantes pour les réseaux fixes et mobiles. SOFDMA introduit beaucoup de variations à l'interface Wireless MAN-OFDMA du standard 802.16-2004, non pas seulement pour améliorer sa fonction mais aussi pour être capable de supporter la mobilité des utilisateurs (Effet Doppler, Handover).

Une des plus importantes caractéristiques introduites par 802.16e est que SOFDMA supporte les NFFT suivants : 2048, 1024, 512, 128, dans le but d'accommoder avec les différentes largeurs du canal possibles. Le nouveau standard introduit un autre type de codage correcteur d'erreurs, optionnel, qui est le codage LDPC (*Low Density Parity Check Code*).

a) *Le scalable OFDMA*

Le modèle IEEE802.16e est basé sur le concept du scalable OFDMA (S-OFDMA). Ce dernier supporte un large choix de bande passante (de 1,25 Mhz à 20 Mhz) pour amplement satisfaire la nécessité d'allocation de spectre ainsi que les exigences du modèle d'utilisation.

L'évolutivité est réalisée par l'adaptation de la taille de la FFT tout en fixant l'espacement de fréquence des sous-porteuses à 10,94 KHz. Comme la bande passante et la durée des symboles sont fixées, l'impact sur les couches supérieures sera minimal lors de l'adaptation de la bande passante [25].

Les paramètres du S-OFDMA sont listés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Valeurs			
Bande passante du système (Mhz)	1.25	5	10	20
Fréquence d'échantillonnage (Fp en Mhz)	1.4	5.6	11.2	22.4
Nombre total des sous porteuses (Nfft)	128	512	1024	2048
Nombre de sous canaux	2	8	16	32
Espacement de fréquence de sous-porteuse	10.94 Khz			
Temps symbole utile (Tb= 1/f)	91.4 micro secondes			
Temps de garde (Tg=Tb/8)	11.4 micro secondes			
Durée des symboles OFDMA (Ts= Tb + Tg)	102.9 micro secondes			
Nombre des symboles OFDMA (5 ms Frame)	48			

Tableau II.3 : Les paramètres de S-OFDMA [25].

b) Structure de trame TDD

La norme 802.16e supporte le TDD, le full et half duplex FDD, toutefois la version initiale de la certification du WiMAX Mobile inclus seulement le TDD. Afin de faire face aux problèmes d'interface, le TDD requiert un système de synchronisation mais reste toujours le mode préféré pour les raisons suivantes :

- Permet l'adaptation du débit en sens montant et descendant pour supporter d'une manière optimale un trafic asymétrique dans les deux sens, alors que FDD présente des débits fixes en général.
- Assure la réciprocité du canal pour une meilleure adaptation du lien, MIMO et autres technologies d'antennes avancées.
- Requiert seulement un seul canal pour les deux sens.
- La conception des émetteurs/récepteurs est beaucoup plus facile et moins coûteuse.

La figure ci-dessous présente la structure de la trame OFDM pour le cas du TDD. Chaque trame est divisée en sous trames DL et UL séparées par des transmit/receive (TTG) et receive/transmit (RTG) afin d'empêcher toute collision entre la transmission en sens montant et celle du sens descendant.

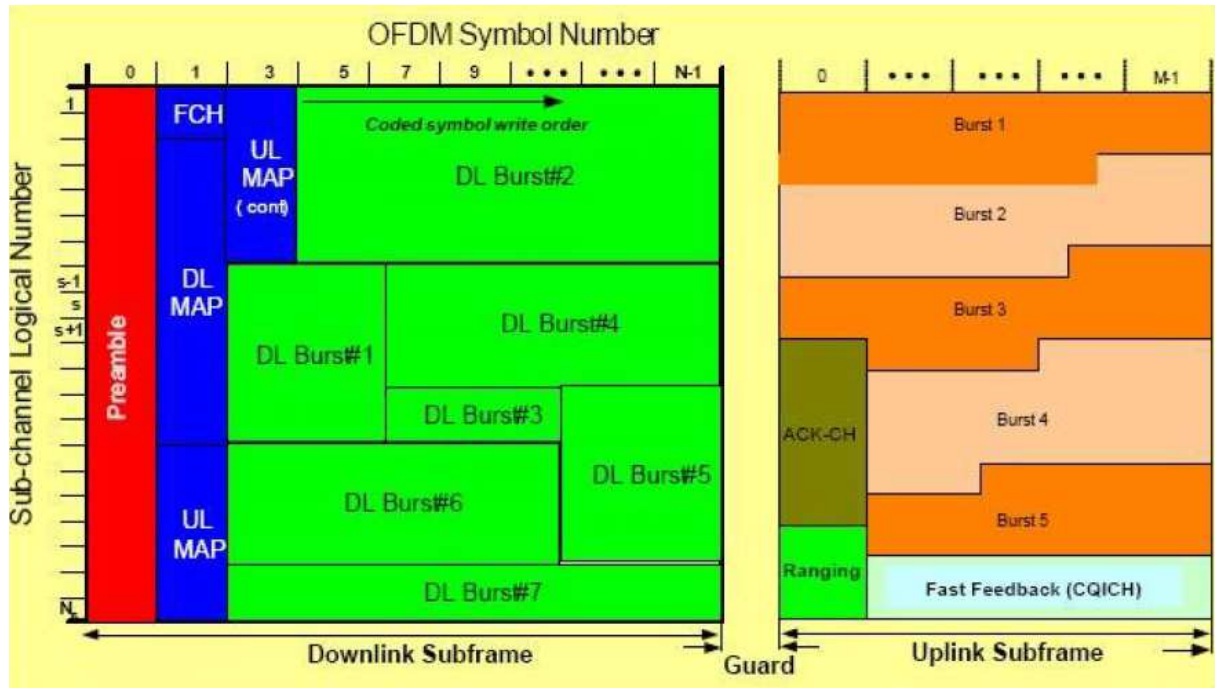


Figure II.13 : Structure de la trame TDD.

Dans une trame, les informations de contrôle suivantes sont utilisées pour assurer un bon fonctionnement du système :

- **Preamble** : c'est le premier symbole OFDM de la trame, utilisé pour la synchronisation.
- **Frame Control Header (FCH)** : fourni des informations sur la configuration de la trame tel que la longueur des messages MAP, les coding schèmes et les sous canaux utilisables.
- **DL-MAP et UL-MAP** : fournissent l'allocation des sous canaux et d'autres informations de contrôle supplémentaires pour les sous trames DL et UL.
- **UL Ranging** : sous canal alloué aux terminaux mobiles afin d'exécuter réglage en temps, puissance et fréquence ainsi que des requêtes de bandes passantes.
- **UL CQICH** : canal alloué pour le MS pour donner des informations sur l'état du canal.
- **UL ACK** : alloué pour le MS pour renvoyer des informations concernant l'acquittement du DL HARQ.

c) Les composants complémentaires de couche physique

Adaptive modulation and coding (AMC), *Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)* et *Fast Channel Feedback (CQICH)* ont été introduits dans la version mobile du WiMAX pour améliorer la performance et la couverture.

Le support de la QPSK, 16 QAM et 64 QAM est indispensable dans le sens descendant alors que dans le sens ascendant, la 64 QAM est optionnelle.

Les codes *Covolutional Code* (CC) et *Convolutional Turbo* (CTC) avec un taux de codage variable sont aussi dans la norme. Le tableau suivant résume les différents codages et modulations qui peuvent être utilisés en WiMAX mobile [25].

Notons que les codes et modulations optionnels en sens ascendant sont notés en italique.

		DL	UL
Modulation		QPSK ,16QAM ,64QAM	QPSK ,16QAM ,64QAM
Code Rate	CC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	CTC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
	Répétition	x2, x4, x6	x2, x4, x6

Tableau II.4 : Codes et modulations supportés en WiMAX Mobile [25.]

II.8.1.2 La couche MAC

D'autres tâches supplémentaires, reliées à la gestion de la mobilité, sont associées à la couche MAC dans la norme 802.16e.

a) Contrôle de puissance

La gestion des ressources radio est nécessaire pour remédier à l'effet du bruit du canal afin d'aboutir à une bonne qualité de signal ainsi qu'à un débit élevé, tout en économisant la puissance des stations mobiles le plus possible. Le WiMAX mobile supporte deux modes pour un contrôle efficace de la puissance, le mode « *sleep* » et le mode « *idle* ».

- **Le mode « *sleep* »** est un état au cours duquel le MS mène des périodes, pré négociées, d'absence par rapport à l'interface air de la station de base. Ces périodes sont caractérisées par l'indisponibilité du MS en point de vue trafic ascendant ou descendant. Ce mode vise à économiser la puissance au niveau du MS ainsi que les ressources au niveau de la BS (Base Station). Aussi, le mode « *sleep* » fournit une flexibilité pour les MS, en les permettant de parcourir d'autres stations de base pour rassembler de l'information afin d'assurer le « *handover* ».
- **Le mode « *idle* »** fournit un mécanisme de disponibilité périodique pour le trafic « *downlink* » en diffusion, sans que le MS soit inscrite au niveau d'une station de base spécifique.

b) Le mécanisme de « *Handover* »

Trois méthodes de « *handover* » sont supportées par le standard 802.16e, à savoir : le « *Hard handoff* » (HHO), le « *Fast Base Station Switching* » (FBSS) et le « *Macro Diversity*

Handover » (MDHO). De ceux-ci, le HHO est obligatoire alors que FBSS et MDHO sont deux modes optionnels.

Le WiMAX forum a développé plusieurs techniques pour l'amélioration du HHO au niveau du standard 802.16e. Ces améliorations ont été développées dans le but de garder un délai handover inférieur à 50 millisecondes [2].

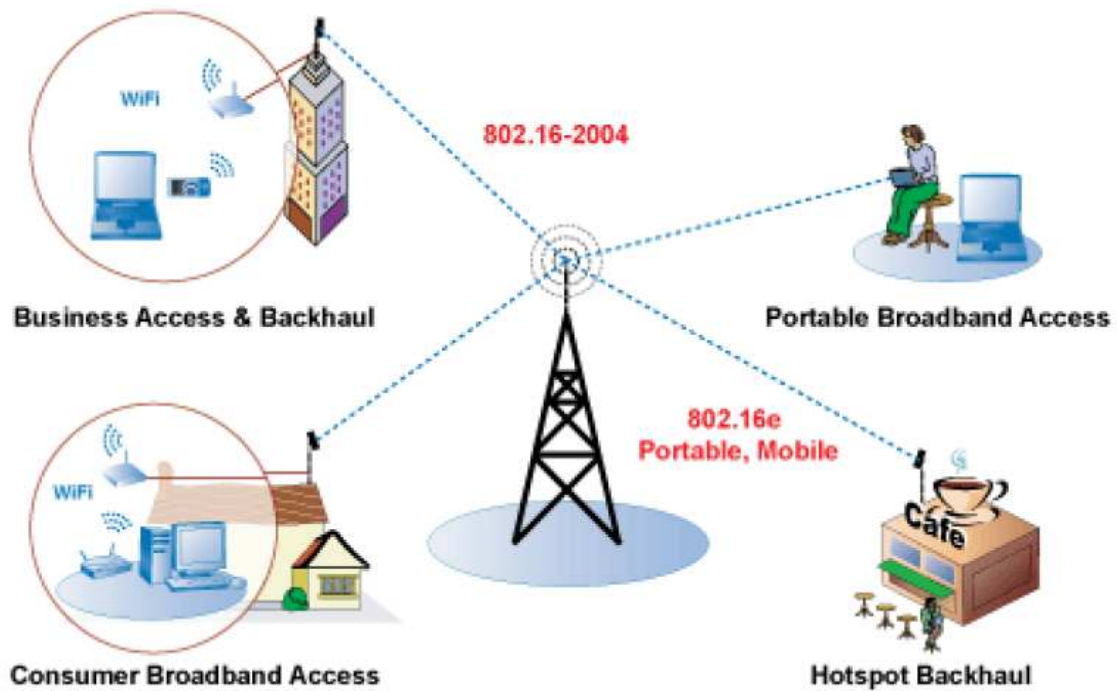


Figure II.14 : Le WiMAX fixe et le WiMAX mobile. [22]

II.8.2 L'architecture du WiMAX mobile

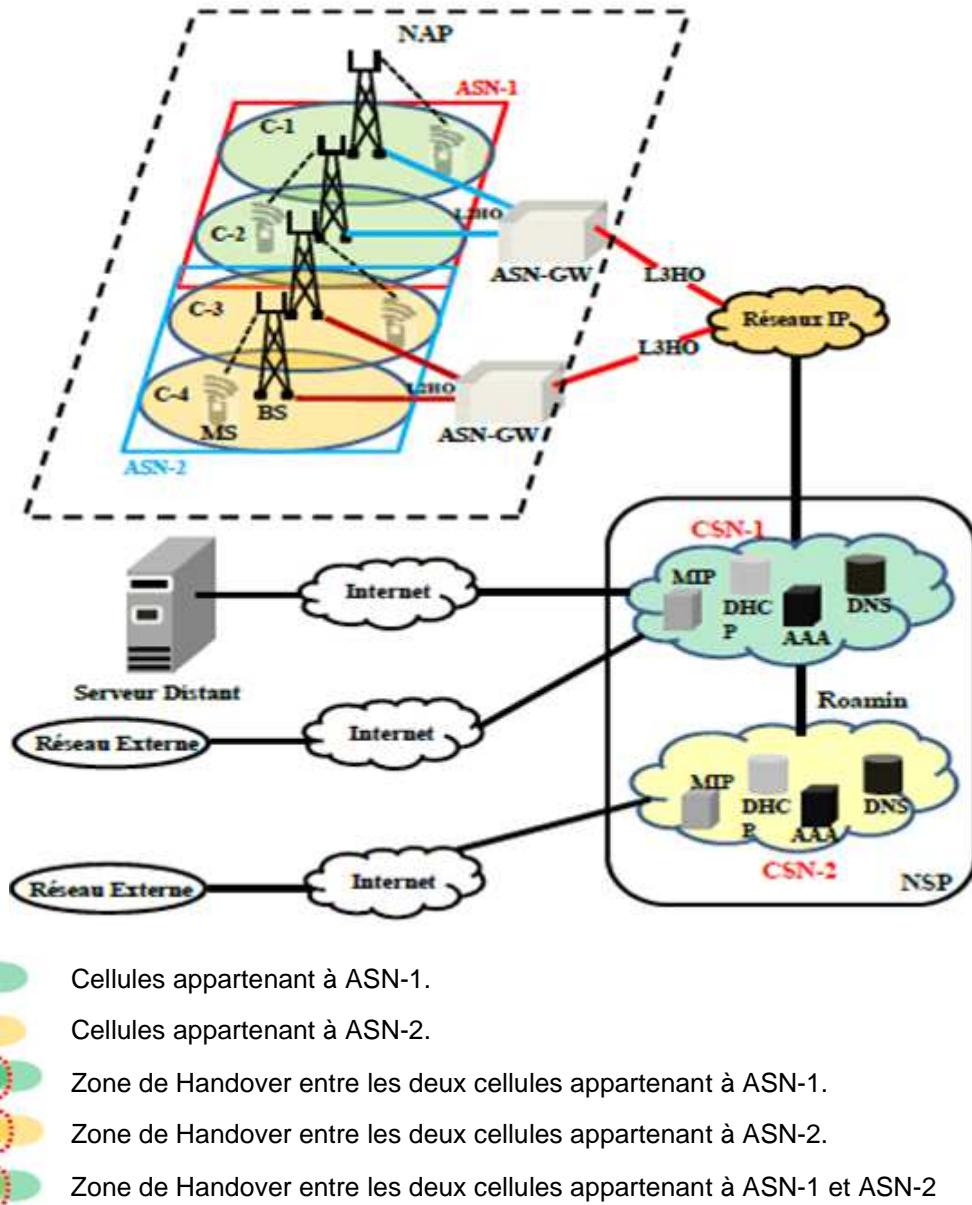
L'architecture du WiMAX est composée de terminaux mobiles (MS) qui communiquent via un lien radio avec une station de base (BS) qui joue le rôle d'un relais avec une infrastructure terrestre fondée sur le protocole IP. Les BSs sont connectées à un élément du réseau appelé « ASN-GW » utilisé comme passerelle (*Gateway*) pour gérer le raccordement des BSs avec le réseau IP. L'IEEE 802.16e est composé aussi du NAP (*Network Access Provider*) qui est l'entité responsable de fournir l'infrastructure nécessaire pour l'accès radio à un ou plusieurs fournisseurs de services. Elle contrôle un ou plusieurs ASN (*Access Service Network*) qui est formée d'une ou plusieurs BS, et d'un ou plusieurs ASN-GW.

La dernière composante de l'IEEE 802.16e est le NSP (*Network Service Provider*). Cette entité fournit l'accès au réseau IP et offre aux abonnés l'accès aux services réseau. Le NSP Contrôle un ou plusieurs CSN (*Connectivity Service Network*) qui est le cœur du réseau

WiMAX. Les fonctions des différents éléments formant l'architecture du réseau WiMAX mobile sont décrites ici [23] :

- **Network Access Provider (NAP)** : Une entreprise qui fournit l'infrastructure d'accès radio à un ou plusieurs fournisseurs de services de réseau.
- **Network Service Provider (NSP)** : Une entité qui fournit la connectivité IP et les services réseau aux abonnés compatibles avec le niveau de service établi.
- **Connectivity Serving Network (CSN)** : Représentation logique des fonctions du NSP, par exemple :
 - Raccordement à Internet.
 - Authentification, autorisation et gestion de l'adresse IP et la QoS.
- **Access Serving Network (ASN)** : Représentation logique des fonctions du NAP, exemple :
 - Interface d'entrée au réseau 802.16.
 - Gestion des ressources radio et contrôle d'admission ainsi la mobilité .Elle contient une ou plusieurs stations de bases responsables de la communication avec les abonnés, et un ou plusieurs ASN-GW qui constituent une passerelle qui assure la connexion des BSs avec le CSN.
- **ASN Gateway (ASN GW)** : Il sert à représenter une agrégation du plan de contrôle des entités fonctionnelles avec la fonction correspondante dans l'ASN ou la fonction résidente dans le CSN, ou une autre fonction dans l'ASN.
- **La station de base** : Située dans l'ASN et responsable de la communication sans fil avec les abonnés.
- **Les terminaux d'abonnés** : Sont des équipements spéciaux équipés d'une carte WiMAX qui permet la communication avec ce réseau. Ils sont situés dans la zone de couverture d'une BS pour pouvoir communiquer avec cette dernière.

L'architecture de l'IEE 802.16e est illustrée ci-dessous :



- Cellules appartenant à ASN-1.
- Cellules appartenant à ASN-2.
- Zone de Handover entre les deux cellules appartenant à ASN-1.
- Zone de Handover entre les deux cellules appartenant à ASN-2.
- Zone de Handover entre les deux cellules appartenant à ASN-1 et ASN-2

L2HO : Handover de niveau 2

L3HO : Handover de niveau 3

Figure II.15 : Architecture du WiMAX mobile.

II.9 Comparaison entre WIMAX mobile et LTE

Le tableau ci-dessous présente les éléments clés d'une comparaison entre le WiMAX mobile et la LTE. On se focalise dans cette comparaison surtout sur la couche physique [25].

	802.16 e	LTE
Cœur de réseau	IP	IP
Max des débits Lien descendant Lien montant (pour 20 MHz)	75 Mb/s 25 Mb/s	100 Mb/s 50Mb/s
Technologie d'accès	OFDMA	OFDM , SC- FDMA

Technique avancée des antennes	MIMO	MIMO
Bande Passante du canal	1.25 à 20 MHz	1.25 à 20 MHz
Mobilité supportée	120Km/h	>350Km/h
Totale mobilité	Oui	Oui
Economie d'énergie	Oui	Oui
Couverture de la cellule (zone dense)	2 – 7 Km	5 Km
Capacité de cellule	100 - 200 utilisateurs	> 200 à 5 MHz > 400 pour une large BP
Héritage	IEEE 802.16a jusqu'à 802.16d	GSM , GPRS , UMTS ,HSDPA
Mode de duplexage	FDD + TDD	FDD + TDD
Efficacité spectrale	3.75 Bit/Sec/Hz	5 Bit/Sec/Hz

Tableau II.5 : Comparaison entre WiMAX mobile et LTE.

Les paramètres présentés dans ce tableau montrent que les deux technologies présentent quasiment les mêmes caractéristiques. Par contre, au niveau du marché, il existe une différence que ce soit dans le temps d'apparition ou de la License. Malgré son manque de maturité, le WiMAX mobile se montre comme le premier à faire son apparence sur le marché alors que le LTE vient d'être plus ou moins standardisé.

Suite à cette observation, on peut conclure que les fournisseurs de services mobiles ont tendance à choisir le WiMAX mobile en considérant bien sûr sa disponibilité mais n'empêche que la plupart des grands fournisseurs utilisant actuellement l'UMTS/HSPA opteront pour le LTE [25].

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le standard 802.16 (WiMAX) du point de vue technique. En effet, ce standard qui est une technologie de communication numérique sans fil d'accès au réseau métropolitain présente de nombreux avantages tels que son accessibilité longue distance, son très haut débit, son faible coût et sa variété d'utilisation. Donc, nous avons présenté les couches protocolaires et les différentes techniques de multiplexage et de modulation de la norme IEEE 802.16. Ainsi, la dernière mouture de standard qui nous intéresse dans ce chapitre est le standard IEEE802.16e, qui couvre les terminaux mobiles et définit des mécanismes évolués de gestion.

Dans les prochains chapitres, nous nous intéresserons à l'aspect mathématique et technique pour la planification et dimensionnement du réseau WiMAX mobile.

CHAPITRE III

Dimensionnement d'un réseau WiMAX mobile (IEEE802.16 e)

III.1 Introduction

La planification joue un rôle crucial dans l'orientation des stratégies adoptées par les opérateurs. Elle peut être considérée comme un élément essentiel pour garantir le succès du déploiement d'un réseau. L'objectif de cette opération est de minimiser le coût de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau, en tenant compte de la répartition d'abonnés, de la situation géographique de la zone à couvrir et des contraintes de qualité de services.

Ce chapitre décrit les fondements du dimensionnement de norme IEEE 802-16.e-2005 pour le WiMAX mobile, En effet, il détermine la taille des cellules, le nombre des stations nécessaires pour assurer la couverture totale de la zone, il s'agit d'un dimensionnement par la couverture. L'estimation de trafic écoulé consiste à définir le trafic écoulé dans une cellule, ceci est influencé par le nombre d'abonnés dans une cellule, par la modulation et la distribution d'application (WWW, FTP, VoIP,...), il s'agit d'un dimensionnement par la capacité.

III.2 Dimensionnement et planification d'un réseau WiMAX

III.2.1 Processus de dimensionnement du réseau WiMAX

L'opération de dimensionnement se base sur des données de départ obtenues suite à des statistiques et estimations pour aboutir à des résultats permettant au réseau de couvrir la totalité de la zone considérée en divers services [2].

Il permet principalement de mieux répartir les abonnés, dans une situation géographique avec des données de propagation bien spécifiée, en tenant compte de la couverture radio, de la taille des cellules et de la topologie du réseau en présence des contraintes de la QoS, tout en assurant la minimisation du coût de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau.

L'étape de la planification constitue une étape primordiale dans la conception d'un réseau cellulaire. Cette phase permet aux concepteurs de trouver une disposition optimale des sites radio. Le succès de cette phase est conditionné par la réalisation d'un bon dimensionnement du réseau [24].

III.2.2 Choix de la bande de fréquence

Lors de la planification d'un réseau, il faut faire un choix entre les bandes de fréquence disponibles. Un certain nombre de contraintes doivent être prises en compte avant la sélection des bandes :

- Disponibilité (licence) du spectre.
- Agrégation de la demande en termes de capacité dans la zone de service.
- La densité des utilisateurs dans la zone de service.
- Les spécificités géographiques de la zone.

- Le niveau d'interférences dans les bandes dépourvues de licence.
- Le coût de l'équipement radio.

La sélection de la bande de fréquence à utiliser a une influence capitale sur le dimensionnement et la planification du réseau. A basses fréquences, les caractéristiques de propagation du signal sont meilleures, seulement la bande passante disponible est limitée.

Le choix entre les bandes avec et sans licence n'est pas facile à faire. La nature des bandes sous licence 3.5 GHz, 10.5 GHz et 26 GHz protège le réseau des interférences inter systèmes et limite le nombre d'opérateurs à une certaines zone géographique. Les bandes sans licence présentent des niveaux d'interférences difficilement prédictibles pouvant constituer des problèmes dans certaines zones [19].

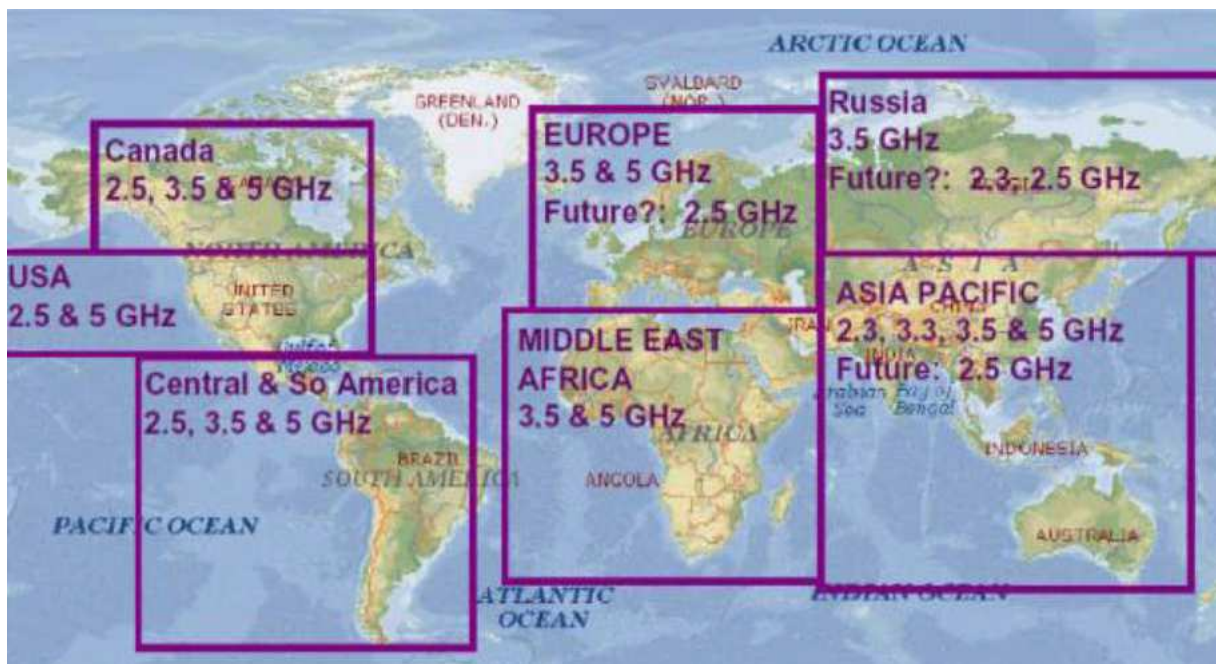


Figure III.1 : Gestion des ressources radios dans les réseaux sans fils cas d'un réseau WiMAX [28].

La sélection de la bande de fréquence à utiliser a une influence capitale sur le dimensionnement et la planification du réseau. A basses fréquences, les caractéristiques de propagation du signal sont meilleures, seulement la bande passante disponible est limitée. Il est important de vérifier si le nombre d'utilisateurs se connectant à une station de base est limité par la capacité ou par la couverture de la BS. Dans les zones rurales ou à population peu dense, le nombre de clients pouvant être connectés dépend de la couverture de la station de base. En revanche, dans les zones à population dense, pour garantir une certaine qualité de service (QoS), il est nécessaire d'avoir des BS additionnels car le nombre de client de la zone de couverture sera élevé [27].

III.2.3 Choix du mode de duplexage

Le choix du duplexage doit être tenu en compte lors du déploiement d'un réseau WiMAX Mobile. En effet, ce choix agit sur la qualité du réseau et le coût d'installation [28].

La bande utilisant le mode FDD requiert une paire de canaux ; un canal pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante et le mode TDD ne demande qu'un seul canal. Le choix du mode de duplexage dépend de la disponibilité de la largeur de bande de fréquence à la disposition de l'opérateur. Selon le choix de ce dernier, l'équipementier ajustera les paramètres de la station de base afin que ceux-ci puissent être compatibles avec le réseau. [29]. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des modes de duplexage fixés par la norme.

	TDD	FDD
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité : Usage d'un seul canal fréquentiel - Adapté pour les flux. - Asymétriques. - Moins de complexité. - Coût plus faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bien adapté aux services de voix. - Désignée pour les trafics - Symétriques. - Ne nécessite pas de temps de garde. - Moins de latence.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Requiert un système de Synchronisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Usage d'une paire de fréquences entraîne une diminution de l'efficacité spectrale. - Coût du spectre.

Tableau III.1 : Duplexage TDD et FDD [2].

III.2.4 Choix de la largeur de bande

Les largeurs de bandes qui peuvent être utilisées dans la technologie WiMAX mobile sont : 1.25 MHz, 3.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 20 MHz.

III.3 Dimensionnement par la couverture

Dans le dimensionnement par couverture, nous devons estimer la distance maximale entre un émetteur et un récepteur, tout en répondant aux exigences de performances dans les conditions de propagation.

Donc, le premier pas à faire est de déterminer l'affaiblissement de parcours maximal (*Maximum Allowable Path Loss* MAPL), en passant par le bilan de liaison.

Nous allons suivre le calcul suivant, comme indique la figure (III.2) :

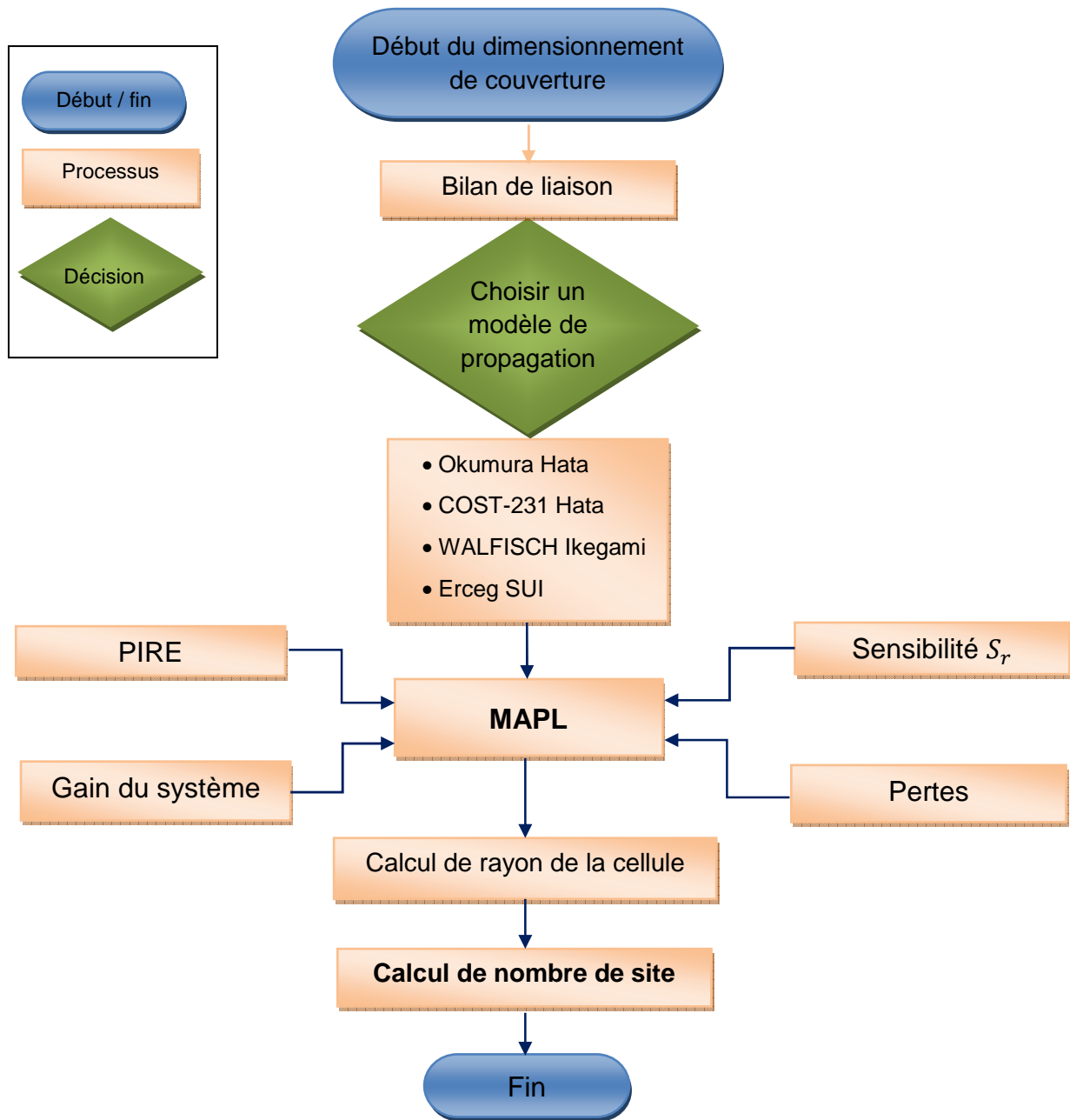


Figure III.2 : Algorithme du dimensionnement de couverture.

III.3.1 Bilan de liaison

Un équilibrage de puissance est nécessaire pour les liaisons montantes et descendantes, pour cela un ajustement des paramètres des liaisons est nécessaire pour les équilibrer. Une liaison équilibrée signifie un fonctionnement symétrique du système en tout point de la couverture, qui est illustré dans la figure (III.3) [24].

L'analyse du bilan de liaison est une partie nécessaire du procédé de planification qui aide à dimensionner la couverture requise, la capacité et la qualité exigées par le réseau. Il est utile pour le calcul de l'atténuation de parcours maximale entre la station de base et le récepteur. Cette atténuation détermine la portée de chaque station de base, sa couverture et le nombre nécessaire pour couvrir une zone donnée [27].

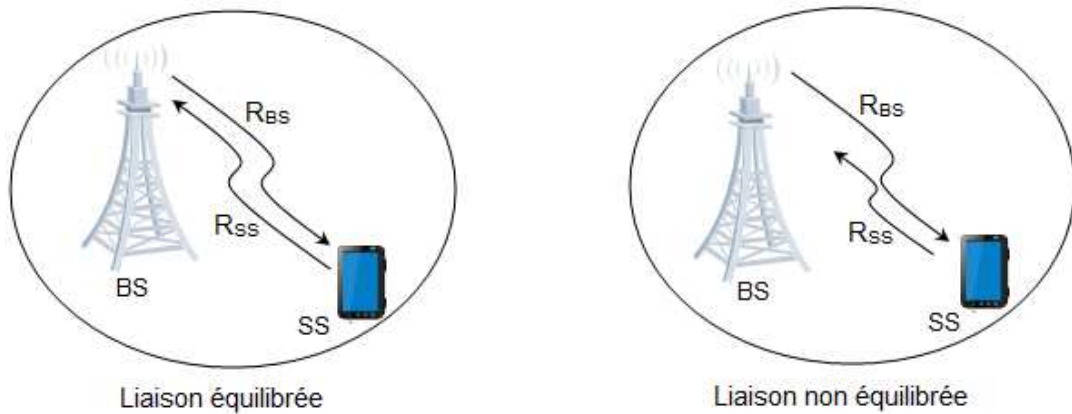


Figure III.3 : Equilibrage des liens montants et descendants.

III.3.1.1 PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente)

La puissance rayonnée par une antenne est appelée PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente). Elle correspond à la puissance qu'il faudrait fournir à une antenne isotrope pour obtenir le même champ à la même distance. La PIRE est donnée par la formule suivante [2] :

$$PIRE [dB] = P_{Tx} [dBm] - L_c [dB] + G [dBi] \quad (III.1)$$

P_{Tx} : Puissance d'émission.

L_c : Pertes de câble et de connecteur.

G : Gain d'antenne.

❖ Pour la liaison descendante :

$$PIRE = P_{Tx_{DL}} - (L_f + L_c + L_j) + G_{Tx_{DL}} + G_d \quad (III.2)$$

$P_{Tx_{DL}}$: Puissance d'émission en sens descendant (Downlink).

L_f : Pertes d'alimentation (feeder).

L_c : Pertes de connecteur.

L_j : Pertes de jumpers.

$G_{Tx_{DL}}$: Gain d'antenne d'émission en sens descendant (Downlink).

G_d : Gain de diversité.

❖ Pour la liaison montante :

$$PIRE = P_{Tx_{UL}} - L_b + G_{Tx_{UL}} + G_d \quad (III.3)$$

$P_{Tx_{UL}}$: Puissance d'émission en sens montant (Uplink).

L_b : Pertes de corps (body).

$G_{Tx_{UL}}$: Gain d'antenne d'émission en sens montant (Uplink).

G_d : Gain de diversité.

III.3.1.2 Sensibilité du récepteur

La sensibilité du récepteur est la quantité de puissance en dBm qu'un récepteur doit recevoir pour réaliser une performance spécifique en bande de base. Elle est donnée par :

$$S_r = SNR_{S_r} + 10 \log(W) + F + N_0 \quad (III.4)$$

Où :

SNR_{S_r} : est le rapport signal sur bruit en dB.

W : est la bande passante du canal efficace en Hz.

F : est le facteur du bruit en dB.

N₀ : est le niveau du bruit thermique en dBm.

$$N_0 = 10 \log(K.T.10^3) \quad (III.5)$$

K: la constante de Boltzmann = $1.38064852 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$

T: la température.

La sensibilité du récepteur peut être évaluée en prenant en compte les particularités de la technologie WIMAX et de scénario considérée. La technique OFDM dans le standard IEEE 802.16 n'alloue pas toute la bande passante de canal pour la transmission de l'information. Tout d'abord, le FTT consomme une partie de la bande passante du canal par l'opération de l'échantillonnage qui réduit la bande passante efficace par un facteur F_s/BW .

Où :

F_s : Est la fréquence de l'échantillonnage en MHz défini comme l'équation suivante :

$$F_s = \text{floor} \left(n \times \frac{BW}{8000} \right) \times 8000 \quad (III.6)$$

Où :

n : est le facteur de l'échantillonnage.

BW : est la bande passante du canal en Hz.

Deuxièmement, la bande du garde ne transporte pas l'information. D'où la notion d'efficacité de la bande passante de l'OFDM, elle est définie dans l'IEEE 802.16 standard par l'équation :

$$BW_{\text{efficacité}} = \frac{F_s \times N_{\text{used}}}{BW \times N_{\text{FFT}}} \quad (III.7)$$

Où :

N_{used} : est le nombre de sous porteuse utilisées.

N_{FFT} : est la longueur FTT dans OFDM PHY.

L'efficacité de la fréquence est réduite, aussi par la technique de sous canalisation, qui sont les intervalles de gardes trouvés (1/4, 1/8, 1/16, 1/32). En OFDM, jusqu'à 16 sous canaux

peuvent être employés. Si moins de 16 sous canaux sont utilisés, la transmission s'est concentrée sur un sous-ensemble de porteuses disponibles. Par exemple, en utilisant juste une seule sous porteuse, la puissance est concentrée en 1/16 des sous porteurs disponibles. Donc la bande passante est réduite par un facteur de $N_{\text{sous canaux}}/16$ où $N_{\text{sous canaux}}$ est limité à 16. L'insertion de ce nouveau facteur de la réduction dans l'équation de BW donne :

$$BW_{\text{efficacité}} = \frac{F_s \times N_{\text{used}} \times N_{\text{sous canaux}}}{BW \times N_{\text{FFT}} \times 16} \quad (\text{III.8})$$

La bande passante utilisée dans cette équation peut être obtenue par le calcul suivant :

$$W = BW_{\text{efficacité}} \times BW = \frac{F_s \times N_{\text{used}} \times N_{\text{sous canaux}}}{N_{\text{FFT}} \times 16} \quad (\text{III.9})$$

Dans la spécification de l'OFDM du standard IEEE 802.16, le facteur du bruit est égal à 5 dB, on lui ajoute toutefois une marge de l'implémentation qui est à 7 dB, le résultat du facteur du bruit sera finalement $F = 12$ dB. Pour la température $T = 290$ K, on obtient un bruit thermique $N_0 = -174$ dBm. Ces deux valeurs sont généralement utilisées dans la plupart des applications pratiques. Finalement, la sensibilité du récepteur pour la couche PHY basée sur l'OFDM est donnée par :

$$S_r = -102 + SNR + 10 \times \log \left(\frac{F_s \times N_{\text{used}} \times N_{\text{sous canaux}}}{N_{\text{FFT}} \times 16} \right) \quad (\text{III.10})$$

Dans cette expression, un facteur de correcteur a été ajouté à 60 dB pour la conversion de l'échelle de fréquence Hertz à Mégahertz [28].

III.3.1.3 Gain de sous canalisation sur la liaison montante

Dans la direction de la liaison montante, les données seront envoyées simultanément sur toutes les sous-porteuses. Un gain de sous canal de liaison montante est pris en compte, en fonction du nombre de sous-canaux utilisés par utilisateur et est défini comme [30] :

$$G_{s_can_UL} = -10 \log \frac{N_{\text{sous canaux utilisés}}}{N_{\text{sous canaux}}} \quad (\text{III.11})$$

Où :

$N_{\text{sous canaux utilisés}}$: est le nombre de sous-canaux utilisés dans la liaison montante.

$N_{\text{sous canaux}}$: Nombre total de sous canaux dans la liaison montante.

III.3.1.4 Définition des marges

Après avoir calculé la sensibilité du récepteur et la PIRE dans les sections précédentes, la question qui se pose maintenant : est-ce qu'on peut calculer l'affaiblissement de parcours maximum ? On doit répondre immédiatement par « non ». Car, il est indispensable de comptabiliser un ensemble de marges de sécurité, qui correspondent à l'environnement radio,

pour éviter le phénomène « *Swiss Cheese* » (surface avec trous de couverture), et enfin atteindre notre objectif de couverture.

❖ Marge de pénétration

On parle d'un utilisateur situé à l'intérieur d'un bâtiment, ou dans une zone à haute densité de bâtiment, ou à l'intérieur d'un véhicule.

Par conséquent, on distingue 4 types de couverture : *Outdoor*, *indoor*, *deep indoor* et *incar*. Chacune de ces dernières est caractérisée par une marge de pénétration qui comptabilise les pertes additionnelles introduites.

Cette marge dépend essentiellement de trois facteurs :

- ✓ La fréquence du signal RF : les pertes varient selon la fréquence du signal.
- ✓ Le types de bâtiments : essentiellement le matériel de construction (brique, bois, pierre, verre...).
- ✓ La structure des bâtiments : densité et épaisseur des murs, nombre et dimensions des fenêtres,...

La marge de pénétration est assimilée à une variable aléatoire Gaussienne, le meilleur moyen de déterminer sa valeur, consiste à prendre des mesures expérimentales depuis la zone concernée.

❖ Marge de shadowing (marge de fading)

Le *shadowing*, ou l'effet de masque, ou autrement le *slow fading*, est la variation du signal dite à moyenne échelle (Ce phénomène est dû aux obstacles qui existent dans milieu de propagation radio, talque les bâtiments et la morphologie du terrain (vallées collines, etc).

Les mesures réelles du terrain ont montré que l'effet de masque est une valeur aléatoire Log-Normale (c.-à-d. son Logarithme est une variable aléatoire Gaussiennes de moyenne nulle et de variance qui dépend de la densité de l'environnement.

❖ Marge d'interférence

L'interférence est un intervenant très gênant dans les réseaux cellulaires, faute de la réutilisation de fréquence. D'autre source d'interférence peuvent être prises en compte, tel que les interférences des autres systèmes, on parle donc de l'interférence inter-système (pour ceci, on introduit une marge de sécurité pour maintenir l'équilibre du bilan de liaison : la marge d'interférence (*Interference margin*) [31].

III.3.1.5 MAPL (*Maximum Allowable Path Loss*)

La différence entre la puissance de l'émetteur et la sensibilité du récepteur donne l'affaiblissement maximum qu'on peut tolérer. C'est le paramètre qu'on veut déterminer à travers l'établissement d'un bilan de liaison. Comme il y a 2 stations qui sont à la fois émettrices et réceptrices, on fait ce calcul pour les 2 cas, et on prend le plus petit des deux. Pour calculer l'atténuation de parcours maximale, on utilise la formule suivante [27, 30] :

$$MAPL = PIRE - S_r + G - L - Mg \quad (III.12)$$

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (dB).

G : Gain d'antenne (dBi)

S_r : Sensibilité du récepteur (dBm).

L : Les pertes

Mg : Les marges

❖ Pour la liaison montante

$$MAPL = PIRE + G_{Rx_{UL}} + G_d - S_r - \log(M_f) - M_{ff} - M_{int} - L_{pb} + G_{scan_{UL}} \quad (III.13)$$

Avec :

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente.

G_{Rx_UL} : Gain d'antenne.

G_d : Gain de diversité.

S_r : Sensibilité du récepteur.

M_f : Marge de fading (évanouissement lent).

M_{ff} : Marge de fast fading (évanouissement rapide).

M_{int} : Marge d'interférence.

L_{pb} : Perte de pénétration de bâtiments.

❖ Pour la liaison descendante :

$$MAPL = PIRE + G_{Rx_{DL}} + G_d - S_r - L_b - L_{pb} - \log(M_f) - M_{ff} - M_{int} \quad (III.14)$$

Avec :

PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente.

G_{Rx_DL} : Gain d'antenne.

G_d : Gain de diversité.

M_{ff} : Marge de fast fading.

M_f : Marge de fading.

M_{int} : Marge d'interférence.

L_b : Pertes de corps (body).

L_{pb} : Perte de pénétration de bâtiments.

III.3.2 Modèles de propagation radio applicable pour le WiMAX

Les modèles de propagation simulent la manière avec laquelle les ondes radio se propagent dans l'environnement d'un point à l'autre. Afin de modéliser exactement le comportement des ondes radio, les caractéristiques de l'environnement telles que la topologie du terrain (par exemple, colline ou appartement) doivent être prises en considération. La couverture au sol telle que des bâtiments et des arbres doit également être expliquée (connue en tant que « sursol » ou « clutter ») : Un modèle de propagation modélise la manière avec laquelle les ondes radio réagissent aux changements d'altitude et au sursol (réflexion, diffraction, et dispersion) [32].

III.3.2.1 Modèle Espace libre :

Le modèle de l'affaiblissement du parcours espace libre est habituellement le point de référence duquel tous les modèles de propagation prennent origine (standard), il est employé pour déterminer l'affaiblissement de parcours en espace libre. Ce modèle se base sur l'équation de Friis qui montre que la puissance reçue chute

La perte de chemin du modèle d'espace libre est [19] :

$$L_{fs} = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (\text{III.15})$$

Avec :

L_{fs} : est La perte de chemin de l'espace libre en dB.

d : distance entre l'émetteur et le récepteur en Km.

f : fréquence en MHz.

III.3.2.2 Modèle Okumura-Hata

C'est le modèle le plus utilisé au niveau des outils de planification cellulaire, il basé sur des mesures effectués dans les environnements de Tokyo par Okumura. Ce modèle est appliqué pour des cellules de taille relativement grandes (de rayon supérieur à 1 Km). Les conditions d'applications du modèle sont les suivant [2] :

$$L_{u-okum} = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_{bs}) - a(h_{ms}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{bs})) \times \log(d) \quad (\text{III.16})$$

$a(h_{ms})$: est un terme correctif dépendant de la hauteur de l'antenne de station mobile.

h_{bs} : Hauteur de la station de base.

❖ Pour les villes de taille moyenne ou petite

$$a(h_{ms}) = [1.1\log(f) - 0.7]h_{ms} - [1.56\log(f) - 0.8] \quad (\text{III.17})$$

❖ Pour les villes de grande taille

$$a(h_{ms}) = 3.2(\log(11.75 \times h_{ms}))^2 - 4.97 \quad (\text{III.18})$$

Ce modèle est adapté à :

- $f \in [150 : 1000]$ MHz.
- $30 \text{ m} \leq h_{bs} \leq 200 \text{ m}$.
- $1 \text{ m} \leq h_{ms} \leq 10 \text{ m}$.
- $1 \text{ Km} \leq d \leq 20 \text{ Km}$.

III.3.2.3 Modèle COST 231 Hata

Le modèle COST 231-Hata s'applique aux fréquences comprises entre 1500 et 2000 MHz. Les paramètres intervenant dans l'expression du modèle sont les suivants [24] :

- $30 \text{ m} \leq h_{bs} \leq 200 \text{ m}$.
- $1 \text{ m} \leq h_{ms} \leq 10 \text{ m}$.
- $1 \text{ Km} \leq d \leq 20 \text{ Km}$.

En environnement urbain, l'affaiblissement L_u exprimé en dB est donné par :

$$L_{u \text{ cost-231}} = 46.33 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_{bs}) - a(h_{ms}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{bs})] \log(d) + C_m \quad (\text{III.19})$$

Avec :

❖ Pour les villes de taille moyenne ou petite

$$a(h_{ms}) = [1.1 \log(f) - 0.7]h_{ms} - [1.56 \log(f) - 0.8] \quad (\text{III.20})$$

$$C_m = 0 \text{ dB}$$

❖ Pour les villes de grande taille

$$a(h_{ms}) = 3.2(\log(11.75 \times h_{ms}))^2 - 4.97 \quad (\text{III.21})$$

$$C_m = 3 \text{ dB}$$

f: fréquence porteuse du signal en MHz.

h_{bs} : Hauteur de la station de base en mètres.

h_{ms} : Hauteur de la station mobile en mètres.

d : distance entre la station de base et station mobile en Km.

III.3.2.4 Modèle COST-231 WALFISCH Ikegami

Ce modèle est utilisé pour les environnements urbains et sous urbains. Il est conçu initialement pour les fréquences inférieurs à 2GHz, mais il peut être étendu pour atteindre des fréquences jusqu'à 6GHz. Il y a trois paramètres qui composent ce modèle [28] :

$$L_{u-Walf} = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (III.22)$$

L_0 : Perte en espace libre.

L_{rts} : Perte par diffraction du toit vers la rue.

L_{msd} : Perte par diffraction multi masques.

$$L_0 = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (III.23)$$

Avec :

d : distance du récepteur en Km.

f : fréquence utilisée en MHz.

$$L_{rts} = \begin{cases} -16.9 - 10\log(W) + 10\log(f) + 20\log(\Delta h_{ms}) + L_{origine} & \text{pour } h_{roof} > h_{ms} \\ 0 & \text{pour } L_{rts} < 0 \end{cases} \quad (III.24)$$

Où :

$L_{origine}$: Facteur de correction empirique prenant en compte l'orientation de rue.

W : est la largeur de rue en mètre.

$$L_{origine} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi & \text{pour } 0 \leq \varphi \leq 35 \text{ degré} \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35) & \text{pour } 35 \leq \varphi \leq 55 \text{ degré} \\ 4 - 0.114(\varphi - 55) & \text{pour } 55 \leq \varphi \leq 90 \text{ degré} \end{cases} \quad (III.25)$$

φ : Angle d'incidence du trajet radio par rapport à l'orientation de la rue

$\Delta h_{ms} = h_{roof} - h_{rec}$: Différence en mètre entre la hauteur des bâtiments (h_{roof}) et celle du récepteur (h_{rec}).

$$L_{msd} = \begin{cases} L_{beh} \cdot K_a \cdot K_d \cdot \log(d) + K_f \cdot \log(f) - 9\log(b) \\ 0 & \text{pour } L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (III.26)$$

b : séparation entre les bâtiments en mètres.

$$L_{beh} = \begin{cases} -18\log(1 + \Delta h_{bs}) & \text{pour } \Delta h_{bs} > \Delta h_{roof} \\ 0 & \text{pour } \Delta h_{bs} \leq \Delta h_{roof} \end{cases} \quad (III.27)$$

$$K_a = \begin{cases} 54 & \text{pour } \Delta h_{bs} > \Delta h_{roof} \\ 54 - 0.8 \times h_{bs} & \text{pour } d \geq 0.5\text{Km et } \Delta h_{bs} \leq \Delta h_{roof} \\ 54 - 0.8 \times \Delta h_{bs} \left(\frac{d}{0.5}\right) & \text{pour } d < 0.5\text{Km et } \Delta h_{bs} \leq \Delta h_{roof} \end{cases} \quad (III.28)$$

$$K_d = \begin{cases} 18 & \text{pour } \Delta h_{bs} > \Delta h_{roof} \\ 18 - 15 \times \left(\frac{\Delta h_{bs}}{\Delta h_{roof}} \right) & \text{pour } \Delta h_{bs} \leq \Delta h_{roof} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & : \text{ Pour les cités de taille moyenne et centres sous urbains} \\ & \text{ avec une densité d'arbre modérée.} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & : \text{ Pour les centres métropolitains avec } \Delta h_{bs} = h_{bs} - h_{roof} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

III.3.2.5 Les modèles d'Erceg SUI

Pour des fréquences au-dessous de 11 GHz, le standard 802.16 inclut des modèles de propagations connus sous le nom de SUI (*Sandford University Intérim*). En réalité, les modèles SUI sont définis pour des services de boucle locale multipoint opérant dans la bande fréquence allant de 2.5 GHz à 2.7 GHz. L'usage de ces modèles peut être étendu pour couvrir la bande des 3.5 GHz avec l'introduction de facteurs de correction.

Dans ce modèle, la hauteur de l'antenne de la station de base varie entre 10 m à 80 m, et pour la hauteur de l'antenne de la station mobile varie entre 2 et 10 m. Le rayon de la cellule se situe entre 0.1 Km à 8 Km:

Les modèles corrigés se basent sur l'équation suivante [28]:

$$L_{u-SUI} = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S \quad \text{pour } d > d_0 \quad (\text{III.31})$$

Où :

d : est la distance entre la BS et l'antenne réceptrice (CPE) en mètre.

d₀ : 100m.

S : représente l'effet de masque qui suit une distribution log-normale. Les valeurs typiques de S sont entre 8.2 et 10.6 dB dépendant de l'environnement.

Avec :

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (\text{III.32})$$

$$\gamma = a - b \cdot h_{bs} + \frac{c}{h_{bs}} \quad (\text{III.33})$$

h_{bs} : La hauteur de la station de base (10m < h_{bs} < 80m).

a, b, c : sont des constants qui dépendent du type de terrain, et qui sont illustrées par le tableau III.2 suivant :

Paramètres du modèle	Terrain de type A	Terrain de type B	Terrain de type C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

Tableau III.2 : Les valeurs constantes pour les paramètres du modèle SUI [2].

Les modèles SUI s'appliquent à trois types de terrain qui sont [28] :

Type A : Terrain présentant trop de relief avec une densité moyenne ou grande arbre. Il est souvent utilisé pour le milieu urbain avec un maximum d'affaiblissement.

Type C : Il est associé au terrain plat à faible densité d'arbres et présente un minimum d'affaiblissement utilisé beaucoup souvent dans les zones rurales.

Type B : Ce type est intermédiaire, il s'applique aussi en cas de terrain plat, par conséquent il est utilisé pour caractériser les zones suburbaines.

Les termes X_f et X_h sont les facteurs de correction de la fréquence et de la hauteur du récepteur. Ils sont définis :

$$X_f = 6 \times \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (\text{III.34})$$

$$X_h = -10.8 \times \log\left(\frac{h_{ms}}{2}\right) : \text{Pour les terrains de type A et B.} \quad (\text{III.35})$$

$$X_h = -20 \times \log\left(\frac{h_{ms}}{2}\right) : \text{Pour les terrains de type C.} \quad (\text{III.36})$$

f : Fréquence en MHz,

h_{ms} : La hauteur de l'antenne réceptrice exprimée en mètre. Elle se varie entre 2 m 10 m

III.3.3 Détermination de la portée d'une cellule

La couverture d'une surface consiste à déterminer le nombre de stations de base requises pour couvrir une surface donnée. Pour cela, le rayon de couverture ou la portée d'une station de base doit être calculée. Il s'agit en premier, d'estimer l'affaiblissement de parcours maximum. Ensuite, il est question de calculer la portée maximale en utilisant les modèles de propagation conformément au type de terrain d'étude [28].

Avec : Pour déterminer le nombre de stations de base, on utilise la formule suivante :

$$N_{BS} = \frac{S_{total}}{S_{BS}} \quad (\text{III.37})$$

N_{BS} : Nombre de stations de base requises pour la couverture.

S_{total} : Surface totale à couvrir.

S_{BS} : Surface couverte par une station de base basée sur la puissance maximale.

On peut calculer la surface couverte par une station de base appelée empreinte du site, qui dépend du nombre de secteurs par site. (Tableau III.3) [33]

Nombre de secteur par site	Empreinte
1	$S_{\text{BS}} = 2.6 \times R^2$
2	$S_{\text{BS}} = 1.3 \times 2.6 \times R^2$
3	$S_{\text{BS}} = 1.95 \times 2.6 \times R^2$

Tableau III.3 : Empreinte du site en fonction du nombre de secteur.

Si on suppose qu'une cellule est hexagonale, alors :

$$S_{\text{BS}} = 3\sqrt{3} \times \frac{R^2}{2} \quad (\text{III.38})$$

$$S_{\text{BS}} = 2.6 \times R^2 \quad (\text{III.39})$$

Où R est la portée de la station de base ou le rayon de la cellule.

III.4 Dimensionnement de capacité

III.4.1 Distribution de modulation

La répartition de la modulation de la zone couverte doit être disponible afin d'analyser efficacement la capacité d'une station de base. Selon la norme IEEE-802.16e-2000, la prise en charge de QPSK, 16QAM et 64QAM est obligatoire dans le DL (Downlink) avec WiMAX mobile. Dans l'UL (Uplink), 64QAM est facultatif. Code convolutionnel (CC) et Turbo convolutionnel Code (CTC) avec taux de code variable et codage de répétition sont pris en charge comme indiqué dans le tableau (III.4) [34].

	Downlink (DL)	Uplink (UL)
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Code Convolutionnel (CC)	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
Turbo Convolutionnel Code (CTC)	1/2, 2/3, 3/4, 5/6	1/2, 2/3, 5/6
Répétition	x2, x4, x6	x2, x4, x6

Tableau III.4 : Modulation et codage pris en charge dans wimax mobile.

Pour dériver un algorithme analytique pour le calcul de la capacité WiMAX mobile, on suppose un exemple réaliste de la distribution de la modulation qui est présenté dans le tableau. L'hypothèse appartient à la direction DL dans un environnement urbain et est extrapolée à partir de différentes expériences de mesure. La valeur k désigne le nombre de bits par symbole dans chaque type de modulation [35].

Type de modulation	Taux de codage global (OCR)	Poids (%P)	K
BPSK	1/2	5.0%	1
QPSK	1/2	2.5%	2
	3/4	2.5%	2
16-QAM	1/2	5.0%	4
	3/4	5.0%	4
64-QAM	2/3	40.0%	6
	3/4	40.0%	6

Tableau III.5 : Hypothèses de distribution de la modulation.

La bande passante brut du canal DL est donnée par :

$$BW_{raw} = \frac{FFT_{used} \times \sum(\%P.K.OCR)}{T_s} \quad (III.40)$$

FFT_{used} : est le nombre de sous-porteuses de données qui dépend de la largeur de bande du canal, de la direction et de son schéma de permutation.

$\%P$: représente le pourcentage (poids).

K : pour le nombre de bits par symbole.

OCR : pour le taux de codage global (*Coding Rate*).

T_s : est le temps symbole OFDMA.

On note que la quantité de FFT utilisée dans chaque direction dépend du mode de permutation. Le mode de permutation obligatoire dans le standard WiMAX mobile est le sous-canalisation partiellement utilisée, PUSC (*Partial Usage of Sub-Channels*).

Les T_s peuvent être obtenus à partir de l'équation suivante :

$$T_s = T_g + T_b \quad (III.41)$$

$$T_s = [G + 1] \times T_b \quad (III.42)$$

Et tandis que l'équation a besoin d'une valeur G comme entrée pour la caractéristique préfixe cyclique du symbole OFDM.

Où G est le rapport $\frac{T_g}{T_b}$, cette valeur peut être : 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 et $T_b = \frac{1}{\Delta f}$.

Avec l'espacement de sous porteuses Δf donné comme [2] :

$$\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}} \quad (III.43)$$

$$F_s = \text{floor} \left(\frac{n \times BW}{8000} \right) \times 8000 \quad (III.44)$$

Où :

F_s : est la fréquence d'échantillonnage.

n : est le facteur d'échantillonnage.

BW : est la largeur de bande nominale du canal.

III.4.2 Distribution des Applications

Un élément clé de la planification du réseau consiste à estimer le nombre d'utilisateurs que chaque station de base peut prendre en charge. Pour avoir une idée du nombre maximum d'abonnés qu'une station de base typique peut servir à informer sur les différents types de trafic possibles et dont les paramètres sont essentiels. Toutefois, les réseaux WiMAX mobiles n'ayant pas encore été déployés à grande échelle, les tendances du marché et les demandes des utilisateurs ne sont pas clairement déterminées.

D'autre part, il est notoirement difficile de traiter les réseaux de données par paquets d'applications mixtes avec des méthodes statistiques pour le cas général. L'ingénierie du trafic pour la répartition de la bande passante entre les différentes connexions actives est généralement laissée à la configuration de l'opérateur et n'est pas incluse dans la norme.

On a essayé d'examiner et d'introduire les différentes classes d'application de WiMAX et de spécifier une approximation fiable des paramètres souhaités et du pourcentage d'utilisation associé à chacune des applications [35].

III.4.2.1 Flux de service

Nous avons éprouvé les flux de service pris en charge par WiMAX mobile. Nous examinerons les paramètres du point de vue d'un ingénieur de la circulation. En général, les flux de service liés à chaque application peuvent être identifiés avec deux types principaux d'attribution de débit de trafic :

❖ Le débit réservé du trafic

Qui correspond au débit d'informations engagé pour le flux. Le débit de données inconditionnellement dédié au flux et qui peut donc être directement soustrait de la taille de canal utilisateur disponible pour déterminer la capacité restante.

❖ Débit de trafic soutenu

C'est le débit d'information maximum autorisé par le système. Le trafic, soumis par une station d'abonné à des débits limités par les débits minimal et maximal, est traité par la station de base sur une base non garantie.

Sur la base des méthodes d'allocation de débit de trafic ci-dessus, trois flux de service peuvent être définis pour prendre en charge les applications WiMAX mobile. Ces services sont les suivants :

- ✓ **CBR (Constant Bit Rate Service)** qui a un taux de trafic maximum réservé. Ce service est adapté aux applications avec des contraintes de latence et de débit strictes et celles qui génèrent un flux continu de paquets de taille fixe tels que la VoIP.
- ✓ **VBR (Variable Bit Rate Service)** qui a un taux de trafic minimum réservé et un débit maximal soutenu. Ces types de flux de services sont adaptés aux applications qui génèrent des charges de trafic fluctuantes, y compris des flux vidéo compressés.
- ✓ **BE (Best Effort Service)** qui sont destinés aux flux de service avec les exigences de QoS les plus faibles en termes de latence d'accès au canal et sans bande passante Garantie. Les services Best effort conviennent aux applications telles que la navigation sur le Web et les transferts de fichiers pouvant tolérer des interruptions intermittentes et une réduction du débit sans conséquence grave. Pour les services au mieux, le trafic affecté est envoyé sous forme de capacité excédentaire disponible après avoir satisfait d'autres types de services garantis.

La figure suivante illustre schématiquement la bande passante disponible partitionnée en fonction des 3 flux de service ci-dessus.

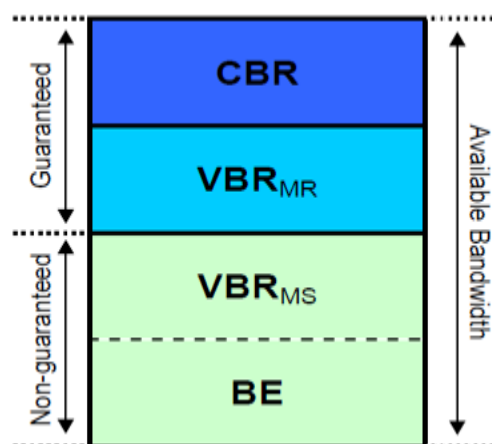


Figure III.4 : Partitionnement de la bande passante du canal.

III.4.2.2 Paramètres d'applications

Les différentes classes d'application de WiMAX, leurs paramètres et le pourcentage d'utilisation lié à chacun des applications sont présentées.

Plusieurs applications sont définies sur la base du standard IEEE-802.16e-2005. Le forum WiMAX a réparti ces applications en cinq grandes classes, comme indiqué dans le tableau (III.6) [34].

Application	Débit de données (kbps)	Poids
Jeu interactif multi joueur	50	25%
VOIP et vidéo conférence	32	10%
Diffusion multimédia	64	12.5%
Navigation web et messagerie instantanée	Nominal	32.5%
Téléchargement de contenu multimédia	Best effort (BE)	20%

Tableau III.6 : Hypothèses de distribution d'application.

Pour satisfaire aux spécifications de qualité de service requises pour chaque application, un certain nombre de paramètres importants doivent être respectés. Ces paramètres sont les suivants: taux d'erreur sur les bits, gigue, latence et débit minimal.

La liste ci-dessus est triée dans un ordre décroissant de sensibilité au délai. La sensibilité de latence donne une priorité d'allocation à l'application souffrant.

Selon les types de services étudiés dans la dernière section, le premier groupe d'applications peut être classé dans les services VBR. La première classe d'application a besoin d'un débit minimum de 50 kbps pour chaque utilisateur. La deuxième classe appartient au type de service CBR avec un débit moyen de 32 kbps réservé à chaque utilisateur. Le groupe d'applications Streaming Media peut être classé en services VBR avec un débit de données limité à 64 kbps.

Les deux dernières classes d'application peuvent être considérées comme un type de service BE. Le groupe d'applications de navigation Web peut recevoir le débit nominal de l'utilisateur et la classe FTP est prise en charge avec la capacité restante attribuée à chaque abonné disponible après avoir satisfait à d'autres types de services garantis. Cependant, l'autre facteur important pour l'estimation de la capacité d'une station de base typique est la demande de l'utilisateur et la tendance de chaque type d'utilisateur [2].

III.4.2.3 Modèle de trafic et QoS

Le dimensionnement d'un réseau WiMAX doit tenir compte de la demande de trafic des utilisateurs et des applications qu'il utilise, afin que la densité de dimensionnement des stations de base et du réseau fédérateur puisse répondre à la demande. Une autre tâche importante dans la fourniture de services consiste à prendre en charge les paramètres de qualité de service de chaque connexion sur la bande passante requise. Dans notre algorithme actuel, nous bénéficions de deux mesures OSR et CR afin d'appliquer le contrôle de la qualité de service sur le trafic attendu, qui sera expliqué dans cette section [35].

III.4.2.3.1 Taux de contention (Contention Rate = CR)

Le taux de contention dépend des applications et des services demandés par l'abonné. Si ces services ne s'adressent qu'à la consultation des boîtes de messageries électroniques et à la navigation du web, ceci nous mène à fixer un taux de contention élevé. Avec ce dernier, nous ne pourrions pas utiliser une bande passante plus large avec des applications comme la vidéoconférence. C'est pour cela que l'opérateur fixe le CR pour chaque abonné. *Exemple* : Nous pouvons prendre un CR = 1/5 d'un service bien déterminé, donc la bande passante peut être partagée entre 5 abonnés [2].

III.4.2.3.2 Rapport de souscription

OSR est le rapport de la demande totale de l'abonné sur la capacité de référence de la station de base en tenant compte de la modulation adaptative. La capacité de référence de la station de base correspond au débit disponible du schéma de modulation le plus bas desservi par cette station de base, le niveau de modulation le plus bas est BPSK 1/2. La capacité de référence pour notre système peut être obtenue comme :

$$C_{ref} = \frac{FFT_{used}}{2T_s} \quad (III.45)$$

Où :

Les valeurs de FFT_{used} et T_s dépendent respectivement de la bande passante du canal et du facteur de préfixe cyclique.

La capacité de demande totale de l'abonné correspond à la répartition des abonnés en fonction de leur type de service. Considérez qu'il y a deux classes d'abonnés résidentielle et entreprise. Supposons que la classe résidentielle occupe 60% des utilisateurs sous la couverture de notre station de base alors que les utilisateurs de la classe entreprise sont confinés à 40%. Dans ce cas, la capacité totale pour le calcul de l'OSR serait :

$$C_{tot} = N \times (60\% \times 1024 + 40\% \times 4096) \quad (III.46)$$

$$OSR = \frac{C_{tot}}{C_{ref}} \quad (III.47)$$

Où :

N : fait référence au nombre d'utilisateurs connectés à la station de base.

Comme mentionné précédemment, OSR est une mesure de QoS dans la planification cellulaire. Un compromis équitable entre OSR et CR du modèle de trafic nous fournira une bonne mesure de contrôle de QoS. Ceci est dû au fait que les CR nous aident à avoir un modèle réaliste du trafic utilisé basé sur la distribution de modulation des abonnés dans la zone de couverture, tandis que l'OSR nous donne une idée de la demande de trafic que l'opérateur a engagée [35].

III.4.2.4 Distribution d'application et tendances du marché

L'étude de la demande de trafic des fournisseurs de services existants peut nous donner une idée de la distribution possible des applications des abonnés lors de l'utilisation de services sans fil à large bande métropolitains.

Il est bon de mentionner que certains avantages, tels que des débits de données très élevés et des fonctionnalités d'interopérabilité, font de WiMAX mobile la technologie la plus avancée.

Maintenant que tous les paramètres de distribution d'application sont complètement définis, la bande passante minimale du trafic exigeant peut être calculée. L'expression "demande minimale" signifie ici que nous ne comptons que sur le débit de données minimum requis pour les applications, y compris la bande passante garantie. Ce fait nous permet de dériver la capacité maximum supportable d'un secteur générique. Dans notre algorithme, la demande de trafic est catégorisée en 2 classes d'abonnés. Ajouter plus de classes est une tâche facile. Les relations ci-dessous conduisent le chemin de calcul de la demande de trafic pour les abonnés résidentiels et d'entreprise et la demande totale de trafic pour DL [35].

$$D_{reserved} = 25\% \times 50 + 10\% \times 32 + 12.5\% \times 64 \quad (III.48)$$

$$D_{shared-R} = 32.5\% \times BW_R + 20\% \times (BW_R - (50 + 32 + 64)) \quad (III.49)$$

$$D_{shared-B} = 32.5\% \times BW_B + 20\% \times (BW_B - (50 + 32 + 64)) \quad (III.50)$$

$$Traffic_R = N \times (\%N_R) \times (D_{reserved} + \frac{D_{shared-R}}{CR_R}) \quad (III.51)$$

$$Traffic_B = N \times (\%N_B) \times (D_{reserved} + \frac{D_{shared-B}}{CR_B}) \quad (III.52)$$

$$Traffic_{Total} = Traffic_R + Traffic_B \quad (III.53)$$

Les paramètres sont les suivants :

D_{reserved} : Débit de données minimum garanti (garanti) pour les applications CBR / VBR.

$D_{\text{shared-R}}$: Taux de données partagées pour les utilisateurs de la classe résidentielle avec des applications BE.

$D_{\text{shared-B}}$: Taux de données partagé pour les utilisateurs Business Class avec des applications BE.

BW_R : Débit de données des abonnés de la classe résidentielle basé sur l'accord de l'utilisateur.

BW_B : Débit de données des abonnés Business Class basé sur l'accord de l'utilisateur

N : Nombre total d'utilisateurs connectés au secteur.

$\%N_R$: Pourcentage des abonnés de la classe résidentielle dans la zone à l'étude.

CR_R : Contention Ratio pour les abonnés de la classe résidentielle.

$\%N_B$: Pourcentage d'abonnés à la classe affaires dans la zone étudiée.

CR_B : Ratio de contention pour les abonnés de classe affaires.

III.4.3 Débit de WiMAX

❖ Calcul du débit théorique

Le débit d'un réseau mesure la quantité d'information que le réseau peut transmettre, Le débit de WiMAX varie pour chaque profil, il est donné par l'équation suivante [2] :

$$\text{Débit}_{\text{théorique}} = \text{floor} \left(n \times \frac{BW}{8000} \right) \times 8000 \times \frac{N_{\text{used}}}{N_{\text{FFT}}} \times \frac{1}{1+G} \times \text{coderate} \times d \quad (\text{III.54})$$

BW : la Bande passante.

n : Facteur d'échantillonnage (F_s / BW), utilisé pour déterminer l'espacement entre les sous porteuses, ses valeurs sont données par la norme.

N_{used} : Nombre de sous porteuses des données (192)

G : temps de garde (1/4, 1/8, 1/16, 1/32).

N_{fft} : Nombre de sous porteuses dans le symbole OFDM (256).

d : Nombre de bits/symbole de modulation (efficacité de la modulation).

coderate : Rendement du codage FEC.

❖ Calcul du débit utile

Les symboles OFDM contenus dans une trame ne sont pas tous utilisés pour le transport des données, certains symboles sont utilisés pour transmettre les messages de signalisation tel que [2] :

- Le préambule : qui occupe 3 symboles OFDM.
- Les messages *UL_Map*, *DL_Map* : qui dépendent de nombre d'utilisateurs actifs et de type de modulation utilisée par le système.

$$\text{Débit}_{\text{utile}} = \text{Débit}_{\text{théorique}} \times \frac{\text{Nombre de symbole utile}}{\text{Nombre de symbole total}} \quad (\text{III.55})$$

III.4.4 Nombre maximum d'utilisateurs par secteur

Le taux d'utilisation du réseau est donc le rapport du débit utile au débit nominal :

$$\text{Taux d'utilisation} = \frac{\text{Débit utile}}{\text{Débit nominal}} \quad (\text{III.56})$$

Le taux d'utilisation est inférieur à 100%. Ceci est dû entre autres aux pertes sur la voie de communication et à l'intervalle de temps laissé entre l'envoi de deux messages.

Dans cette section, nous avons l'intention de dériver un algorithme pour calculer le montant maximal pour les utilisateurs qui peuvent être simultanément pris en charge par un secteur par rapport à l'information précédemment obtenue. La figure suivante donne un aperçu de cette méthodologie.

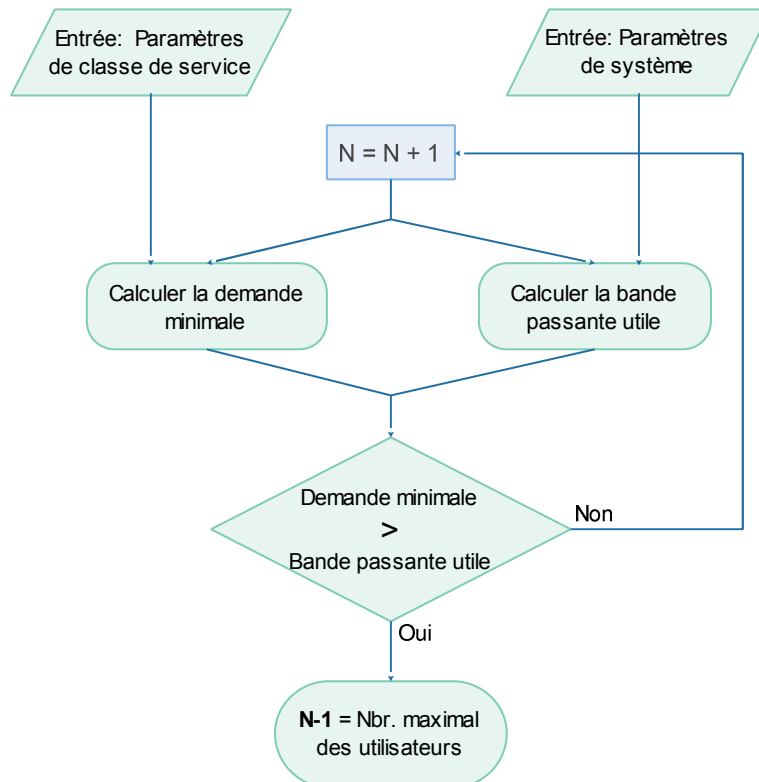


Figure III.5 : Nombre maximal d'utilisateurs par algorithme de calcul de secteur.

L'algorithme peut être implémenté dans les directions DL et UL, séparément. Cela fonctionne comme suit [35] ; D'abord, nous commençons avec un seul utilisateur essayant de se connecter au secteur. Comme deuxième étape, en fonction des deux types d'entrée, le débit

de données de la demande minimale et la bande passante disponible doivent être calculés dans chaque direction. Les premières données peuvent être obtenues conformément à l'équation (III.54) (débit théorique) et la seconde par des procédures de suppression de frais généraux décrites dans la dernière section. Ces deux valeurs sont comparées pour vérifier si la charge dans DL et UL peut être desservie.

Si la bande passante disponible est suffisante, le nombre d'abonnés augmente de un et le processus de disponibilité du canal est revérifié en comparant le débit de données supplémentaire que cet utilisateur supplémentaire demandera à la surcharge qu'il impose à la bande passante utile. Chaque fois que le débit minimum demandé dépasse la quantité de BW disponible dans chaque direction, l'algorithme s'arrête et introduit le nombre maximum d'abonnés pouvant être desservis simultanément par le secteur avec des paramètres déjà entrés.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié le déploiement et le dimensionnement d'un réseau WiMAX mobile, qui consiste premièrement un dimensionnement par couverture sert à déterminer la portée c.-à-d. la zone à couvrir (taille de la cellule) tout on choisit un modèle de propagation pour arriver en fin à estimer le nombre de stations de base qui consiste à satisfaire les contraintes de couverture. La deuxième partie, est un dimensionnement par capacité, pour l'estimation de trafic par cellule ainsi le nombre maximum d'abonnés. Nous avons aussi introduit les concepts mathématiques et les calculs nécessaires pour la conception de notre outil de planification lequel on va développer par la suite.

CHAPITRE IV

Conception et réalisation de l'outil de dimensionnement de réseau WiMAX mobile

IV.1 Introduction

Le dimensionnement et l'amélioration des réseaux mobiles dotés de technologie radio avancées, requièrent une bonne compréhension du milieu de propagation, mais en plus des connaissances en systèmes d'antenne, en transmission et réception. Le dimensionnement d'un tel réseau WiMAX permet d'une part, d'assurer la meilleure couverture possible de la zone de déploiement, et d'autre part à répondre aux exigences de capacité et du trafic, pour les différents services, tout en gardant un bon compromis qualité/cout.

Dans le chapitre précédent, il était question de présenter les étapes générales de dimensionnement du réseau WiMAX, afin de parvenir à des résultats fiables pouvant être judicieusement interprétés. Donc, après ces phases traitées dans le chapitre précédent, nous entamons l'étape finale de notre travail, en précisant tout d'abord le langage de programmation adopté, pour l'élaboration de notre outil de dimensionnement. Ensuite, nous présenterons nos résultats de simulation avec le langage MATLAB et analyser en termes de couverture et capacité.

IV.2 Présentation du logiciel MATLAB

IV.2.1 Pourquoi opter pour MATLAB ?

MATLAB est le logiciel le plus accessible et le plus productif conçu pour les ingénieurs et les scientifiques. Pour des tâches d'analyses de données, de développement d'algorithmes et de création de modèles, il fournit un environnement qui encourage l'exploitation et la découverte. MATLAB associe un langage haut niveau à un environnement bureau élaboré pour les flux de travail itératifs scientifiques et techniques.

IV.2.2 Définition du MATLAB

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple, avec ses fonctions spécialisées, il peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Les graphiques intégrés permettent de visualiser facilement les données afin d'en dégager des informations. Grâce à la vaste bibliothèque de boîtes à outils prédéfinies, vous pouvez commencer directement par les algorithmes essentiels à votre domaine. Les outils et les fonctionnalités MATLAB sont tous testés rigoureusement. Ils sont conçus pour fonctionner conjointement.

MATLAB est un interpréteur : les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne. Il fonctionne dans plusieurs environnements tels que X-Windows, Windows, Macintosh. Il existe deux modes de fonctionnement :

1. **Mode interactif :** MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
2. **Mode exécutif :** MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).

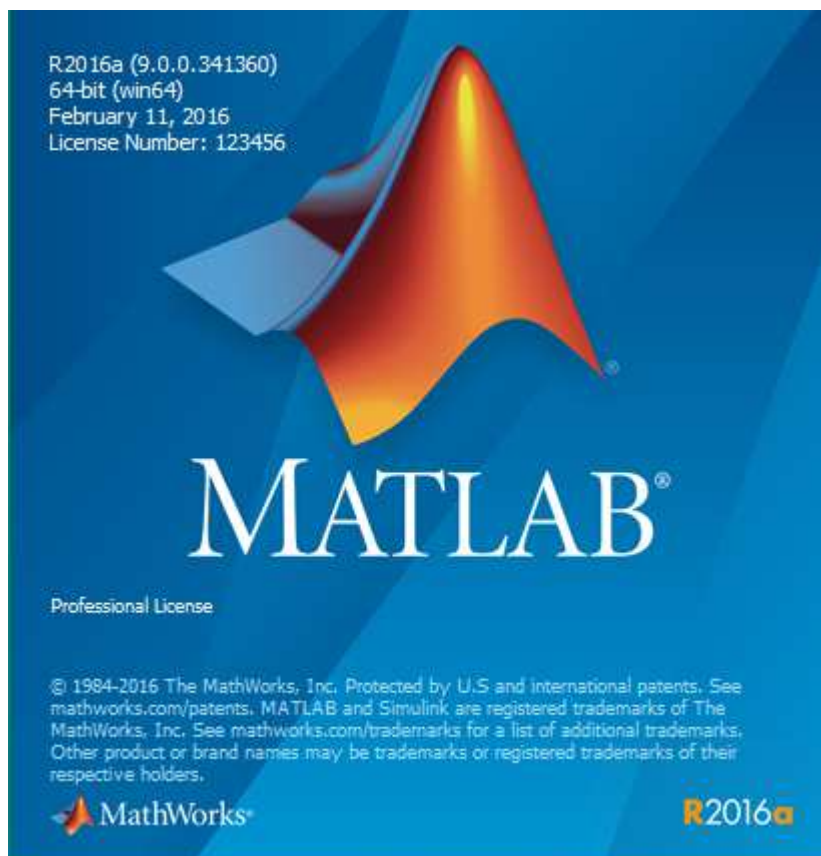


Figure IV.1 : *Interface de démarrage du logiciel MATLAB.*

IV.2.3 Création d'une interface graphique MATLAB

Pour réaliser une interface graphique sous MATLAB, il faut suivre les étapes suivantes :

- Aller à l'écran de base (Figure IV.2), qui comprend l'écran de commande Windows, ainsi que des fenêtres complémentaires, permettant de suivre le fonctionnement général d'une application.

Les instructions frappées (ou collées) dans la *Commande Window* s'exécutent directement.

- Taper l'instruction « guide » dans la *commande Window*, voir la figure IV.3.

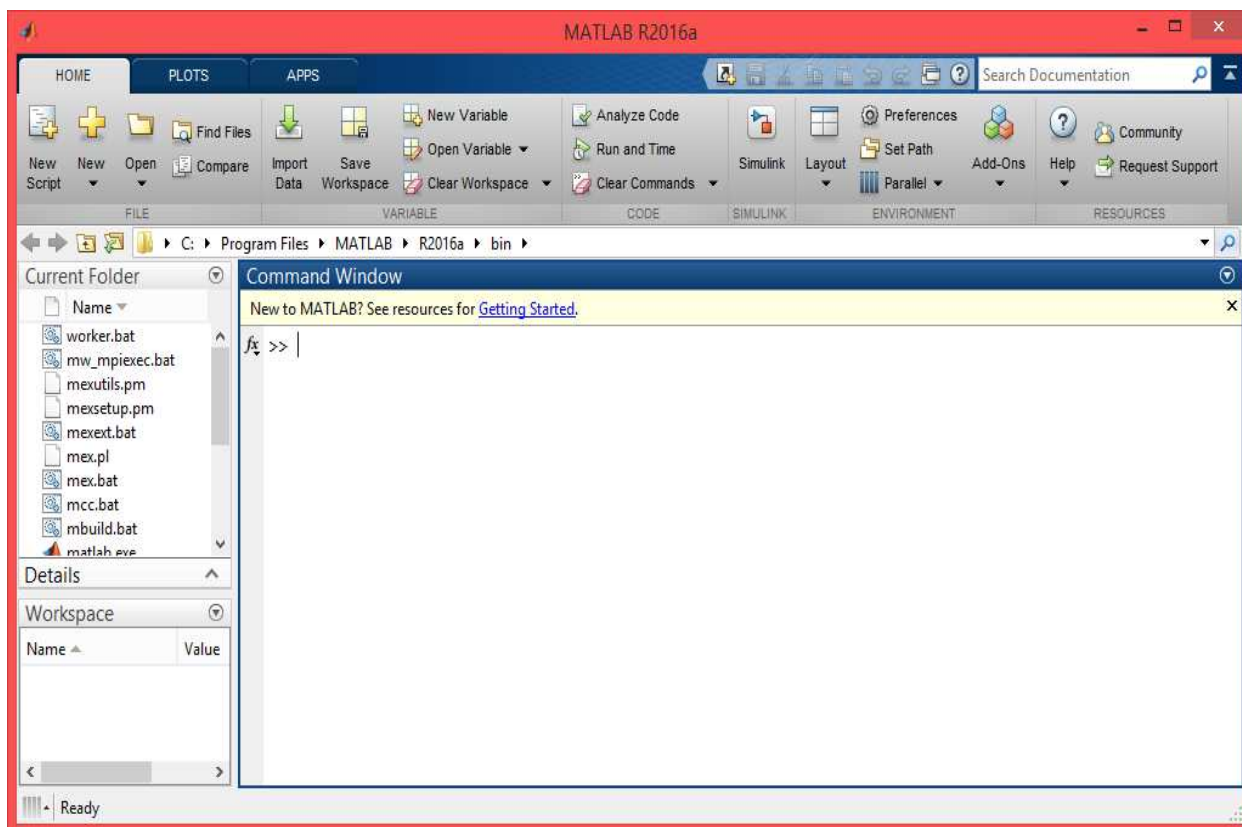


Figure IV.2 : Fenêtre principale du MATLAB.

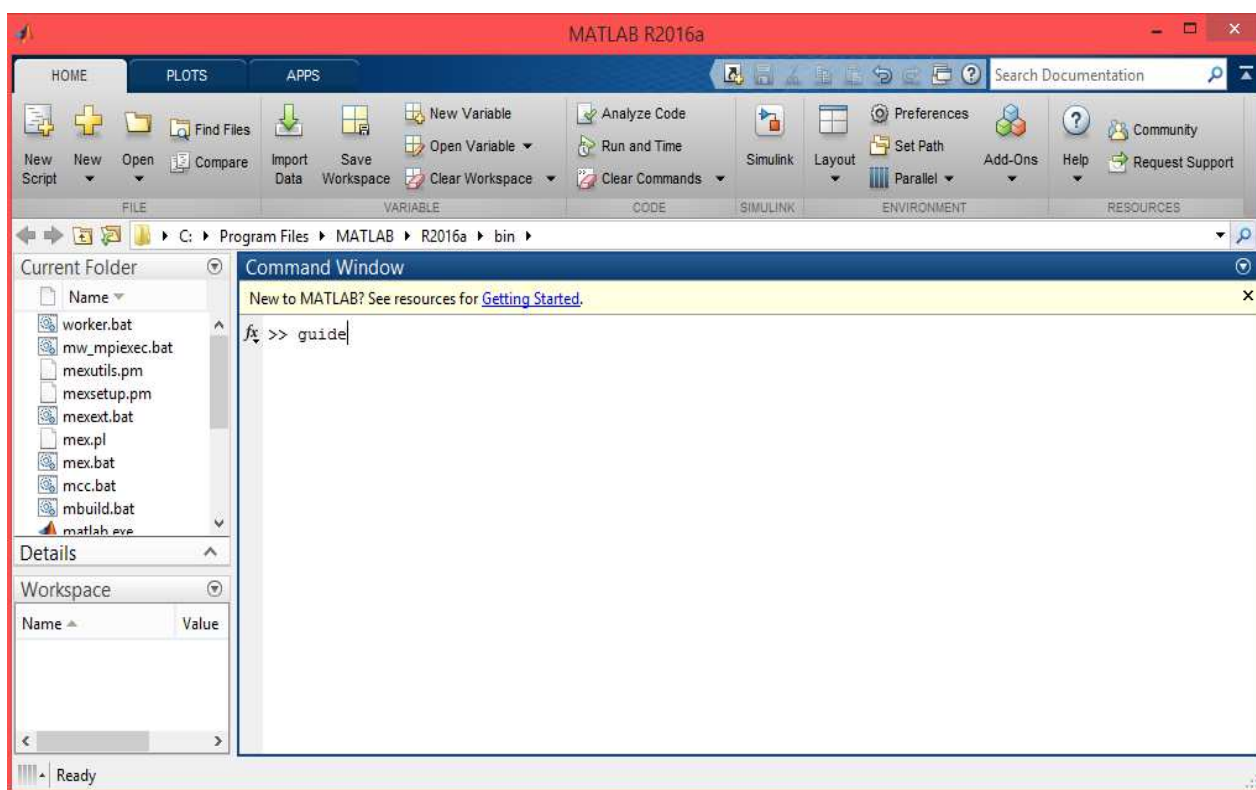


Figure IV.3 : Commande Window du MATLAB.

- Après cette étape, appuyer sur « entrer » pour obtenir la figure suivante.

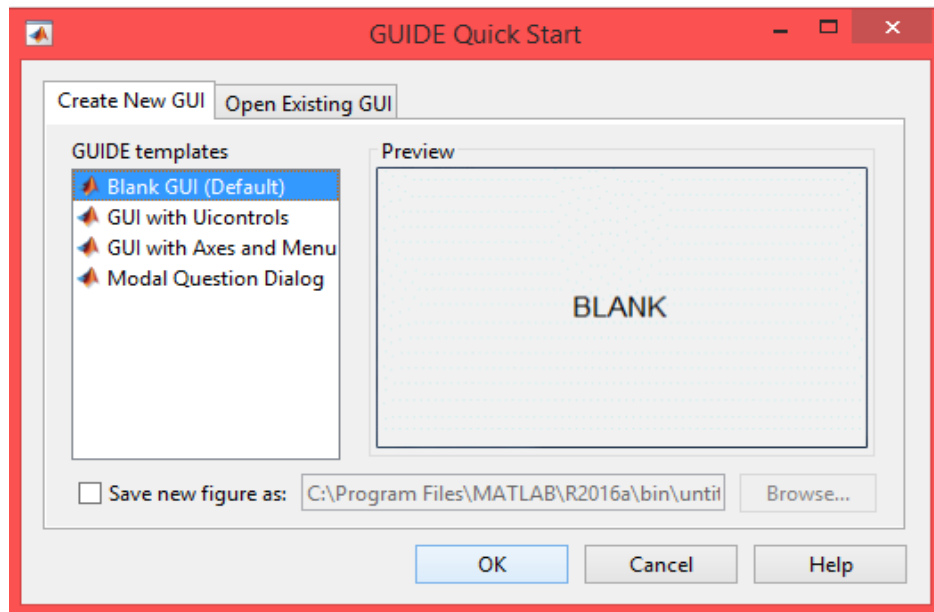


Figure IV.4 : Fenêtre principale du nouveau GUI.

- Il suffit d'appuyer sur « OK » pour obtenir la figure suivante, qui représente une interface graphique vide (vierge).

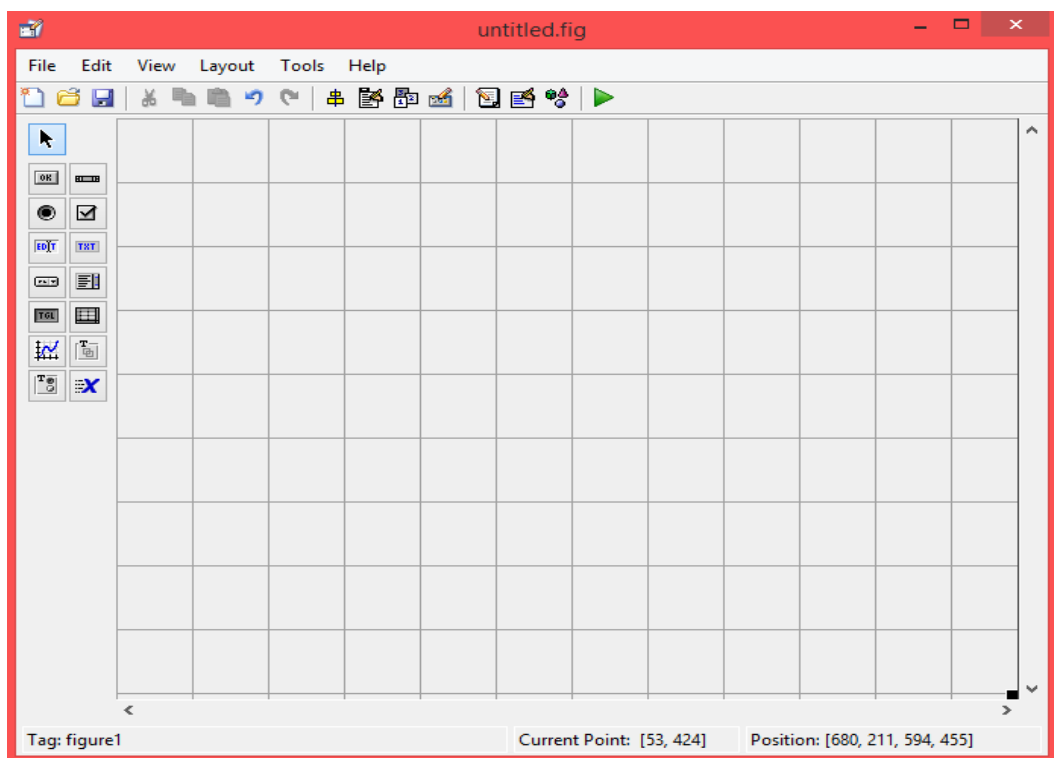


Figure IV .5 : Interface graphique MATLAB vierge.

Le placement des objets est réalisé par sélection dans une boîte à outils, leur mise en place et leur dimensionnement se font à l'aide de la souris.

- Un double-clic sur un objet permet de faire apparaître le *Property Inspector* où les propriétés des objets sont facilement éditables (Figure IV.6). Leurs modifications et la visualisation de ces modifications sont immédiates.

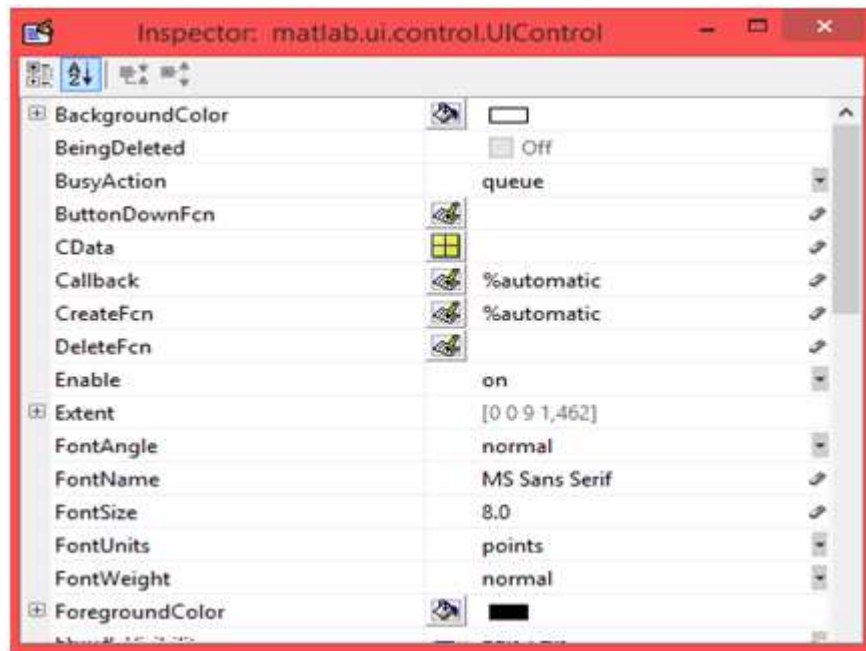


Figure IV.6 : Interface des propriétés des objets.

IV.3 Outil de dimensionnement WiMAX mobile

IV.3.1 Interface d'accueil

Lorsque l'utilisateur démarre l'application, il se retrouve face à une page de bienvenue, telle que présente la figure (IV.7). Cette page contient le bouton « Démarrer » pour le démarrage de notre application.



Figure IV.7 : Page d'accueil de l'application.

IV.3.2 Dimensionnement par couverture

IV.3.2.1 Interface « Bilan de liaison »

C'est la première interface qui apparaît après l'interface du démarrage, pour calculer le bilan de liaison de chaque lien, il faut d'abord remplir les champs d'entrés qui sont représentés dans le tableau (IV.1).

Paramètres de la station de base	valeurs						
Profil	Standard	BS avec 2x2 MIMO			BS avec 2x2 MIMO avec 2 AAS		
Puissance Tx (DL)	35 dBm						
Gain d'antenne Tx (DL)	16 dBi						
Pertes de connecteurs	1 dB						
Gain d'antenne Tx (UL)	16 dBi						
Paramètres du mobile CPE	valeurs						
Puissance Tx(UL)	27 dBm						
Gain d'antenne Tx (UL)	2 dBi						
Pertes de corps	0 dB						
Gain d'antenne Rx(DL)	2 dBi						
Paramètres de modulation	Valeurs						
profil	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 1/3	64QAM 2/3	64QAM 3/4
SNR requis	5	8	10.5	14	16	18	20
Paramètres OFDM	Valeurs						
Largeurs de bande	1.25 Mhz	3.5 Mhz	5 Mhz	10 Mhz	20 Mhz		
Nombre total de sous porteuses (NFFT)	128	256	512	1024	2048		
Nombre de sous porteuses utilisées	85	211	421	841	1681		
Gain de sous-canalisation	6						
Intervalle de garde	1/4	1/8	1/16	1/32			
Marges	valeurs						
Log normal fade margin	5						
Marge de Fast Fading	3 dB						
Marge d'interférences	2 dB						
Type de zone	Urbaine		Suburbaine			Rurale	

Tableau IV.1 : Paramètres de bilan de liaison.

Après avoir appuyé sur le bouton « Calculer », on obtient les résultats de la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) en Uplink (UL) et en Downlink (DL), la perte de chemin maximal MAPL dans le lien montant et descendant, ainsi que la sensibilité du récepteur qui sont indiqués dans le tableau IV.2. La figure suivante représente l'interface de bilan de liaison radio.

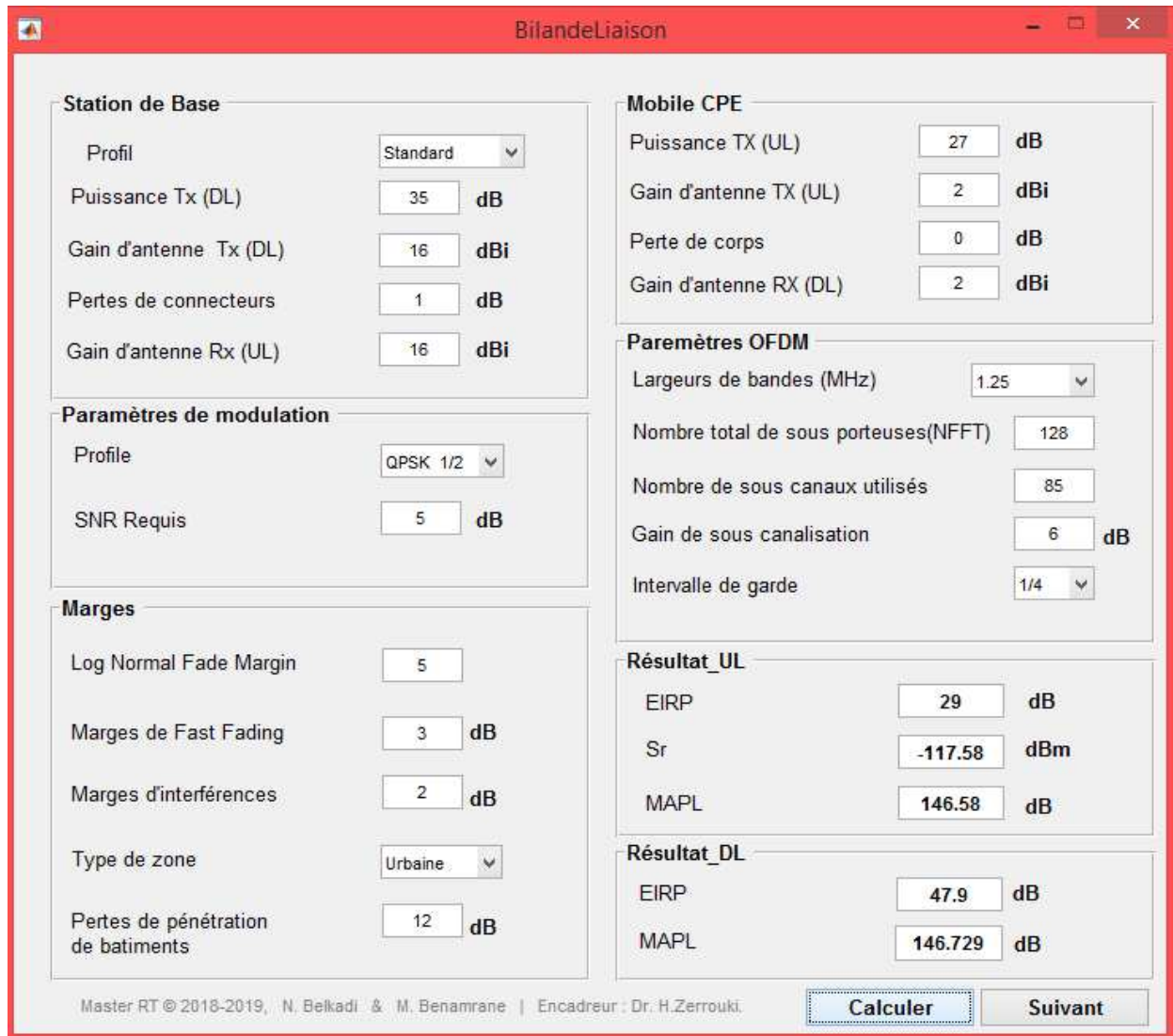


Figure IV.8 : *Interface calculatrice de Bilan de Liaison.*

Paramètres calculés	Lien montant (UL)	Lien descendant (DL)
PIRE	29 dB	47.9 dB
MAPL	146.58 dB	146.729 dB
Sr	-117.58 dBm	

Tableau IV.2 : *Comparaison des résultats dans lien montant et descendant.*

- **Analyse des résultats**

On remarque que la valeur de MAPL est relativement la même dans le lien montant et le lien descendant, ce qui indique qu'il y a une liaison équilibrée à un fonctionnement symétrique.

Dans l'interface graphique du bilan de liaison, on a calculé l'affaiblissement maximal tolérable en UI et DL et la sensibilité, pour chaque type de modulation et pour une largeur de bande de 10 MHz. Les résultats de simulation sont illustrés dans le tableau IV.3.

Type de modulation	SNR requis	Sensibilité (dBm)	MAPL_DL (dB)	MAPL_UL (dB)
QPSK 1/2	5	-102.139	130.709	131.139
QPSK 3/4	8	-99.1392	127.709	128.139
16 QAM 1/2	10.5	-96.6392	125.209	125.639
16 QAM 3/4	14	-93.1392	121.709	122.139
64 QAM 1/3	16	-91.1392	119.709	120.139
64 QAM 2/3	18	-89.1392	117.709	118.139
64 QAM 3/4	20	-87.1392	115.709	116.139

Tableau IV.3 : *Résultats de sensibilité et de MAPL pour chaque type de modulation.*

IV.3.2.2 Interface dimensionnement de couverture

Il est très important de déterminer le nombre des cellules de la zone à couvrir, si on veut vraiment optimiser le réseau et minimiser le coût de l'équipement. Dans cette étape, nous voulons estimer le nombre de stations de base (sites) par le dimensionnement de couverture.

Cette phase doit passer par le calcul du rayon de la cellule. Plus le rayon augmente, plus on aura moins de cellules, donc moins de station de base.

La variation de rayon de couverture est due à la topologie de la zone de couverture, comme on a dit précédemment, ainsi que le type de modèle de propagation choisi. Les calculs ont été effectués en utilisant les paramètres présentés dans le tableau suivant :

Couverture de la cellule	Valeurs
Hauteur de l'antenne de la station mobile	1.5 m
Hauteur de l'antenne de la station de base	35 m
Fréquence de porteuse	3500 MHz
Surface de la zone à couvrir	50 Km ²
Modèle de propagation	Okumura-Hata, Cost-231 Hata, Walfisch Ikegami, Erceg SUI

Tableau IV.4 : *Paramètres de calculs de la portée et nombre de station de base.*

Pour chaque modèle de propagation, on calcule la portée, la surface de couverture d'une station de base, la distance qui sépare chaque deux station de base et en fin le nombre de station de base nécessaire pour la couverture de la zone de déploiement.

La figure suivante représente l'interface calculatrice de la portée et le nombre de stations de base dans le cas du modèle de propagation Okumura-Hata.

Figure IV.9 : Interface calculatrice de la portée et le nombre de stations de base pour modèle de propagation « Okumura-Hata »

Le tableau suivant récapitule tous les résultats obtenus pour les quatre modèles de propagation (Okumura-Hata, Cost-231 Hata, Walfisch Ikegami et Erceg SUI).

Modèle de propagation	Portée (Km)	Surface d'une BS (Km ²)	Distance d (Km)	Nombre de BS
Okumura-Hata	1.34	4.66	2.32	11
Cost -231 Hata	1.07	2.96	1.85	17
Walfisch Ikegami	1	2.6	1.73	20
Erceg SUI	1.22	3.9	2.12	13

Tableau IV.5 : Résultat de dimensionnement de couverture pour tous les modèles de propagation.

- **Analyse et comparaison des résultats**

On observe que la portée d'une cellule diffère pour chaque modèle de propagation utilisé, elle dépend fortement de la zone de transmission, ce qui exprime l'influence de l'affaiblissement de parcours due à la propagation NLOS (*Non-line-of-sight*). En effet, la portée est importante dans le cas d'une zone rurale où il n'y a pas beaucoup d'obstacles entre station de base BS et la station mobile MS (propagation LOS : *line-of-sight*). En conséquence, la variation du rayon est due à la topologie de la zone de couverture.

Par la suite, pour savoir la configuration optimale, on a calculé le nombre de station de base pour chaque modèle de propagation.

De plus, on voit dans le tableau précédent, lorsqu'on utilise le modèle Okumura-Hata on a besoin seulement de 11 BS (stations de base), afin de satisfaire une couverture totale. Pour les mêmes paramètres de simulation, on a besoin de 17 BS, 20 BS et 13 BS, respectivement, pour les modèles de propagation, Cost-231 Hata, Walfisch Ikegami et Erceg SU1.

Si bien claire que la configuration optimale des nombres de station de base à déployer, est celle du modèle Okumura-Hata, car il ne nécessite que 11 BS. Aussi, il permet de maximiser le rayon de couverture.

IV.3.3 Dimensionnement par capacité

Le tableau ci-dessous présente les paramètres utilisés dans le calcul de la capacité du WiMAX mobile :

Paramètres de la classe résidentielle	valeurs						
Débit de données	1024 Kbps						
Pourcentage	60 %						
Taux de contention	30						
Paramètres de la classe entreprise	Valeurs						
Débit de données	4096 Kbps						
Pourcentage	40 %						
Taux de contention	10						
Rapport de souscription (OSR)	50						
Paramètres de système	Valeurs						
Type de modulation	QSPK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 1/3	64QAM 2/3	64QAM 3/4
Bande passante	1.25 MHz, 3.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 20 MHz						
Taux de préfixe cyclique	1/4, 1/8, 1/16, 1/32						

Tableau IV.6 : Paramètres de calcul de la capacité.

L'interface, de la figure IV.10, représente le calcul de dimensionnement par capacité du WiMAX mobile en UL et DL, en utilisant les paramètres présentés dans le tableau ci-dessus.

Les résultats du dimensionnement de capacité, sont groupés dans un seul panel. Cette interface est destinée à afficher, le nombre maximal d'utilisateurs par secteur, le rapport de souscription (OSR) réalisé, et pour le sens montant (UL) et descendant (DL), les informations suivantes :

- Débit maximal de la cellule.
- Débit minimal de la cellule.
- La bande passante disponible.

Figure IV.10 : Interface calculatrice de la capacité du WiMAX mobile.

• Analyse des résultats

Comme on peut le constater, dans la figure IV.10, sur la base des paramètres d'entrée, 74 utilisateurs peuvent être pris en charge avec le secteur spécifié. C'est là que, selon les données de sortie, la limite de l'algorithme concerne la capacité de la liaison descendante de la figure III.5 du chapitre précédent.

En d'autres termes, le secteur avec les paramètres spécifiés peut prendre en charge 74 utilisateurs de trafic mixte sur la base des hypothèses de modulation, de distribution d'applications et de la demande de trafic. Tandis que, la demande de bande passante du 75^{ème} (74+1) utilisateurs, ne peut pas être satisfaite dans la direction DL.

Le débit de données maximal disponible dans le DL est de 35000 kbps et diminue à 8752.74 kbps lorsque le nombre d'utilisateurs atteint 74. Le débit de données minimal pour 74 utilisateurs en connexion simultanée est de 31118.7 kbps et peut être rempli avec la bande passante disponible en DL.

Comme une étude comparative, et pour une largeur de bande passante de 5 MHz et un taux de préfixe cyclique de 1/8. Les résultats de simulation de nombre d'utilisateurs pour chaque type de modulation sont indiqués dans le tableau suivant.

Type de modulation	Nombre maximal d'utilisateurs par secteur
BPSK 1/2	74
QPSK 1/2	74
QPSK 3/4	111
16-QAM 1/2	295
16-QAM 3/4	443
64-QAM 2/3	4719
64-QAM 3/4	5309

Tableau IV.7 : Résultats du nombre d'utilisateurs pour chaque modulation.

Il est clair que le nombre maximal d'utilisateurs augmente proportionnellement avec l'augmentation de type de modulation et le taux de code convolusionnel, cela due à l'augmentation des nombre de bits par symbole de modulation (efficacité de la modulation).

Vu que chaque modulation se caractérise par une efficacité spectrale différente, la capacité effective du canal ne peut être déterminée qu'en connaissant le profil (couple modulation/codage) utilisé par chaque client partageant ce canal, ce qui est difficile à relever. La difficulté de prévoir la distribution des abonnés dans la zone, surtout avec l'introduction des concepts de nomadisme et de mobilité, nous supposons lors de notre dimensionnement que les abonnés sont distribués uniformément dans la zone objet d'étude et qu'ils utilisent tous le même type d'équipement.

IV.4 Conclusion

Nous avons pu évaluer, dans ce chapitre, les compétences du réseau WiMAX mobile, et étudier les processus de dimensionnement, en utilisant les deux approches : dimensionnement orienté couverture et orienté capacité. Nous avons évoqué tous les étapes en relation avec la réalisation de l'application. Ainsi, nous avons exposé des aperçus d'écran témoignent les différentes étapes de notre outil.

Nous avons, enfin, développé une application permettant de faciliter le processus de dimensionnement du réseau WiMAX mobile. En effet, cette application est composée d'un ensemble d'interfaces graphiques permettant à l'utilisateur ou à l'opérateur de calculer certains paramètres et arriver au choix du modèle de propagation le plus adéquat, tout en optimisant les ressources et garantissant la qualité de couverture et les besoins en capacité satisfaisants.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les réseaux de télécommunications sont de plus en plus sollicités. D'énormes quantités d'informations circulent sur les réseaux à chaque seconde. Il est primordial d'assurer la disponibilité de ces réseaux afin de garantir la transmission de ces données en toutes circonstances

L'objectif de ce mémoire était d'étudier la technologie WiMAX et de dimensionner un réseau WiMAX mobile pour une zone spécifique.

Au début, nous avons détaillé les différentes générations des réseaux sans fils, ainsi leurs propres équipements et caractéristiques. Par la suite, nous avons entamé le second chapitre, où nous avons présenté la technologie WiMAX (le standard IEEE 802.16) qui fait partie des réseaux métropolitain et leurs caractéristiques, leurs fonctionnement et avantages. Ainsi le standard IEEE 802.16e « WiMAX mobile » qui est le plus intéressant.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié le déploiement et la planification du réseau WiMAX mobile qui consiste à déterminer, parmi un ensemble de sites potentiels, ceux à utiliser afin de couvrir une zone géographique donnée, après une étude des modèles de propagation supportés par cette technologie ainsi que le bilan de la liaison, nous a ramené à étudier la relation entre le débit et la portée, en utilisant les concepts mathématiques « modèle empirique ». Le but de ce modèle consiste à minimiser le coût du réseau, tout en maximisant sa serviabilité.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté l'outil développé sous l'environnement Matlab, en décrivant les interfaces graphiques avec des valeurs réelles pour les interpréter par la suite dans le cadre de validation de notre solution de déploiement du réseau WiMAX mobile.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. Aboura Wissam, Benhabib Imane, « *Etude et caractérisation de la couche physique du standard IEEE802.16/WIMAX* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2013.
- [2]. Redaoui Adil, « *Etude de dimensionnement et planification d'un réseau sans fil WIMAX (IEEE 802.16)* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Sidi Bel Abbès, 2018.
- [3]. Khouni Sadika, « *Simulation et optimisation d'un réseau GSM en utilisant la technologie OFDM* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Sétif, 2010.
- [4]. Bouchentouf Hadjer, Boudghene Stambouli Riyad, « *Etude des performances des réseaux 4G (LTE)* », Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2013.
- [5]. Khaldoun Al Agha, Guy Pujolle, Guillaume Vivier, « *Réseaux de mobiles et réseaux sans fil* », Edition Eyrolles, p. 510, 2001. ISBN : 978-2-212-11018-0.
- [6]. Chamek Linda, « *Localisation des mobiles par une stratégie de prédiction* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Informatique, Université de Boumerdes, 2011.
- [7]. Bouazzaoui Samira, Derkali Zahira, « *Conception des réseaux sans fils IEEE 802.11 en mode infrastructure et Ad-Hoc* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2016.
- [8]. Adouane Nassim, Maafa Yacine « *Dimensionnement d'Interfaces dans les Réseaux GSM et UMTS* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Bejaïa, 2015.
- [9]. Seide Germine, « *Planification d'un réseau de quatrième génération à partir d'un réseau de troisième génération* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées en Informatique, Université de Montréal, 2011.
- [10]. M. Haddache, « *Cours sur les réseaux sans fil* », Cours en ligne, Université de Bouira, 2010/2011.
- [11]. Emmanuel Conchon, « *Définition et mise en œuvre d'une solution d'émulation de réseaux sans fil* », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [12]. Belabdelli Abdelheq, Oukaz Mokhtar, « *Dimensionnement d'un réseau sans fil wifi* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de l'ingénieur d'état en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2012.
- [13]. Pierre Lafaye de Micheaux, « *Le fonctionnement du Bluetooth* », <https://web.maths.unsw.edu.au/~lafaye/CCM/bluetooth/bluetooth-fonctionnement.htm>, Consulté en Janvier 2019.

- [14]. Kahoul kenza, « *Etude et simulation du standard de transmission de données sans fil : WIMAX par OPNET comparé avec Wifi* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en sciences et technologies, Université de Biskra, 2018.
- [15]. Lucien Loiseau, « *De l'exploitation des réceptions opportunistes dans les mécanismes de relayage pour les réseaux sans fil* », Thèse de Doctorat, Université de Bretagne, 2013.
- [16]. Alain Dessureault, « *Les réseaux sans fil* », http://www.icriq.com/fr/productique_tfp.html/-/asset_publisher/MeX1/content/les-reseaux-sans-fil/maximized, Consulté en Janvier 2019.
- [17]. Dominique Dhoutaut, « *Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation* » Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [18]. Omar Cheikh rouhou, « *Sécurité des réseaux ad-hoc* », Mémoire pour l'obtention du diplôme national d'Ingénieur en Génie Informatique, Université de Sfax, 2004.
- [19]. Selmen Bensaid, Meriem Ferjani, « *Développement d'un outil de planification d'un réseau WiMAX* », Rapport de projet de fin d'étude, Université Virtuelle de Tunis, 2011.
- [20]. Tandjaoui Amel Faiza, « *Modélisation et analyse stochastique des systèmes WiMAX* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Informatique, Université d'Oran. 2006.
- [21]. Soilihi Moussa Mohamed, « *Etude de la technologie WIMAX et proposition d'une plateforme de conception et de déploiement* », Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur technologique (DIT) en Informatique, Ecole supérieure de technologie et de management de Dakar, 2009.
- [22]. Chafika TATA, « *Optimisation de la performance dans les réseaux WIMAX fixes* », Mémoire pour l'obtention de la maîtrise en Télécommunications, Université de Québec, 2009.
- [23]. Merah Hocine, « *Conception d'un modem de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à base de la technologie MC-CDMA* », Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de Magister en Electronique, Université de Sétif, 2012.
- [24]. Madjoubi Djamel, Slimani Warda, « *Etude et dimensionnement d'un réseau WiMAX fixe* », Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Bejaia, 2015.
- [25]. El hadj Paul, Dahbi Nabil, « *Etude de la technologie WiMAX mobile* », 3eme année ingénieur VAP RSM, Université de Telecom SudParis, 2010.
- [26]. Rebah Asma, Meghouche Selma, « *Méthodologie de la gestion d'un spectre et l'implémentation des points d'accès (AP) dans un réseau – Algérie Télécom Boumerdes* », Projet de fin d'étude pour L'obtention du diplôme de Master en recherche opérationnelle, Université de Boumerdes, 2016.

- [27]. Youssoupha Casse, « *Etude et mise en place d'un réseau WIMAX dans la région de Dakar* », Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme supérieure de technologie Télécommunications et réseaux, Ecole supérieure polytechnique Sénégal, 2010.
- [28]. Alix Koyangozo, « *Architecture et planification de réseau WIMAX* », Mémoire de fin de cycle a l'obtention d'un Master, Université de Sénégal. 2010.
- [29]. Benyahia Mohamed, Bentrar Kamal, « *Dimensionnement d'un réseau sans fil WiMAX* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2011.
- [30]. Benyam Getenet, « *Dimensioning and Radio Network Planning of Mobile WiMAX* », Thèse de doctorat, Université Addis Ababa, 2013.
- [31]. <https://fr.scribd.com/doc/264524439/dimensionnementlte?fbclid=IwAR3M1yjAi330MtkjeinNjz9-hMp21pVuGSaMddswITpD2BDqjDPPjOWOrH4>, Consulté en Avril 2019.
- [32]. Mellouk Sanaa, « *Etude et dimensionnement d'un réseau WIMAX FIXE* », Mémoire pour obtenir le diplôme de Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2014.
- [33]. Ayad Hanane, Mekidiche Radjaa Asma, « *Optimisation de la couverture radio 4G LTE-A des opérateurs de télécommunications* », Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université de Tlemcen, 2018.
- [34]. S. O. Ajose and O. L. Erhuen, « *Mobile Wimax network planning and optimization* » International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 6, No. 1, February 2014.
- [35]. Amir Masoud, Ahmad zadeh, « *Capacity and cell-range estimation for multi traffic users in Mobile WiMAX* », Thèse de doctorat, Université de Borås Suède, 2008.

Résumé

Le WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) est une technologie sans fil actuelle de la famille des normes IEEE, dont la norme 802.16 fait partie, définissant les connexions à haut-débit par onde radio. Elle dispose d'un ensemble de techniques hertziennes permettant de connecter un utilisateur distant au réseau IP par l'intermédiaire d'un lien radio.

La norme 802.16e (WiMAX mobile), c'est une norme qui a été développée dans le but de pouvoir offrir à un utilisateur en mouvement les mêmes qualités de service et de sécurité offertes à un utilisateur fixe, bénéficiant des services d'un fournisseur d'accès. De plus, plusieurs mécanismes sont introduits dans le WiMAX mobile pour pouvoir supporter les services de mobilité.

Ce projet de fin d'étude est pour but de permettre de mieux compréhension la technologie WiMAX mobile, son fonctionnement, ses domaines d'application et son déploiement sur une zone bien déterminée. L'objectif est l'étude et la mise en place d'une application d'aide à l'ingénierie de cette technologie. Nous présentons les différentes étapes de la planification, tout en précisant les modèles de propagation pouvant être utilisés. Le choix du dimensionnement, le calcul de débit et la portée d'une cellule WiMAX, le nombre d'utilisateurs et des stations de base sont aussi étudiés.

Mots clés : WiMAX mobile, IEEE 802.16e, dimensionnement, planification, capacité, couverture, déploiement.