

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID TLEMCCEN**



**Département de Génie Electronique et Electrique
MEMOIRE**

Présenté par
MELLOUK SANAA

Pour obtenir
LE DIPLOME DE MASTER

Spécialité : **Télécommunications**

Intitulé :

Etude et dimensionnement d'un réseau WiMAX fixe

Option : **RMS**
(Réseaux Mobiles et Services)

Devant les membres du jury:

M^r MERZOUGUI	Président	Université Abou-bekr Belkaid Tlemcen
M^{elle} DJELTI	MCB	Université Es-Sénia Oran (Encadreur)
M^{elle} BENMOSTEFA	MAA	Université Aboubekr Belkaid Tlemcen (Examineur)

Année Universitaire : 2013/ 2014

DÉDICACE

*À MA CHÈRE MÈRE QUI M'A MIS AU MONDE ET
QUI M'A TANT DONNÉ POUR FAIRE DE MOI CE QUE*

JE SUIS

À MON MARI À MES DEUX SOEURS À

MA GRANDE MÈRE À

MES ONCLES

ET SURTOUT À NOUNOU

À MES TANTES À MES BEAUX PARANTS

ET À MA TRÈS CHÈRE PETITE FILLE SERINE

À TOUS CEUX QUI COMPTENT POUR MOI,

À TOUS CEUX POUR QUI JE COMPTE.

JE LEUR DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL EN GUISE

DE RECONNAISSANCE

MELLOUKSANAA

Remerciements

C'est un devoir bien agréable que de venir rendre hommage, au terme de ce travail, à ceux sans lesquels il n'aurait pas pu être réalisé.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus sincères à M^{elle} DJELTI Hamida, pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils fructueux qu'il m'a prodigués le long de mon projet.

Je tiens en outre à remercier Mr MERZOUGUI Rachid, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire et pour son estimable aide et ses précieux conseils.

Je voudrais aussi adresser mes plus vifs remerciements à Melle BENMOSTEFA Naima, d'avoir accepté l'évaluation de ce travail.

Je ne manquerais pas de saluer tous ceux qui ont de près ou de loin participé à l'accomplissement de ce travail.

Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciement.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableau.....	viii
Résumé.....	ix
Introduction générale.....	1

Chapitre I :Généralités sur le réseau WiMAX

I.1 Introduction.....	4
I.2 L'historique du WiMAX.....	4
I.2.1 Origines du WiMAX.....	4
I.2.2 Les différentes normes.....	5
I.2.3 Apport de WiMAX.....	6
I.3 Architectures du réseau WiMAX.....	6
I.3.1 Le sous système radio : Accès Service Network (ASN).....	8
I.3.2 Le CSN: Connectivity Service Network.....	8
I.3.3 Principe de fonctionnement du WiMAX.....	8
I.4 Les Types du WiMAX.....	10
I.4.1 WIMAX fixe.....	10
I.4.2 WiMAX mobile.....	10
I.5 Les applications du WiMAX.....	11
I.6 La desserte avec WiMAX.....	12
I.7 WiMAX face à WiFi.....	13
I.8 Conclusion.....	14

Chapitre II : Etude technique de la technologie Wimax

II.1 Introduction	16
II.2 Etude technique de WiMAX	16
II.2.1 La couche MAC	17
II.2.2 La couche physique	18
II.3 Les techniques de multiplexage	18
II.3.1 Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence	18
II.3.2 Les avantages de l'OFDM	20
II.3.3 Les inconvénients de l'OFDM	21
II.3.4 L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)	21
II.3.5 MIMO : Multiple Input Multiple Output	24
II.3.6 Modulation adaptative	24
II.4 Techniques de Duplexage	25
II.4.1 TDD (Time Division Duplexing) :	25
II.4.2 FDD (Frequency Division Duplexing)	26
II.5 Architecture en couche de la norme 802.16e ou WiMAX mobile	27
II.5.1 La couche Physique	27
II.5.1 La couche MAC	27
II.5.1.1 Contrôle de puissance	27
II.5.1.2 «Hand Over »	28
II.6 Conclusion	29

Chapitre III : Dimensionnement d'un réseau Wimax

III.1 Introduction	31
III.2 Dimensionnement d'un réseau WiMAX	31
III.2.1 Processus de dimensionnement du réseau WiMAX	31
III.2.2 Choix de la bande de fréquence	31
III.2.3 Choix du type de Dimensionnement	32
III.3 Modèles de propagation	32

III.3.1 Rôle des modèles de propagation	32
III.3.2 Types de modèles de propagation.....	33
III.3.2.1 Le modèle de propagation (Espace libre)	33
III.3.2.2 Modèle COST 231 Hata	34
III.3.2.3 Modèle d’Erceg	35
III.4 Bilan de Liaison	37
III.4.1 Puissance émise	37
III.4.2 Sensibilité de réception	38
III.4.3 Affaiblissement maximum tolérabsle	39
III.5 Dimensionnement suivant la portée ou la couverture.....	39
III.5.1 Détermination de la portée d’une cellule	39
III.5.2 Dimensionnement suivant la capacité	40
III.5.2.1 Détermination du Trafic par abonné	40
III.5.2.2 Détermination du Trafic agrégé pour une zone donnée.....	41
III.5.2.3 Détermination de la capacité moyenne par secteur	41
III.6 Débit - Portée	42
III.7 Conclusion	43

ChapitreIV :Résultats du dimensionnement

IV.1 Introduction.....	44
IV.2 Outil de dimensionnement.....	44
IV.3 Dimensionnement orienté couverture ou portée	44
IV.3.1 calcul de pertes du chemin	44
IV.3.2 Calcul de la portée de la station de base	47
IV.4 Dimensionnement orienté capacité.....	53
V.5 Conclusion	55
Conclusion générale.....	56
Bibliographie.....	58

Liste des tableaux

Tableau I.1 : <i>Les différentes normes d'IEEE 802.16x</i>	5
Tableau I.2 : <i>Paramètres techniques d'IEEE 802.16d.</i>	10
Tableau I.3 : <i>Comparaison entre WiMAX et WiFi</i>	13
Tableau III.1 : <i>Spécificités techniques des différentes normes IEEE 802.16x</i>	32
Tableau III.2 : <i>Paramètres de validité du modèle Hata-Okumura.</i>	35
Tableau III.3: <i>Valeurs des paramètres en fonction du type de terrain.</i>	36
Tableau IV.1: <i>Pertes du chemin pour une fréquence de 1,9 GHz, l' hauteur de l'antenne réceptrice est de 2 m.</i>	45
Tableau IV.2: <i>Pertes du chemin pour une fréquence de 3,5 GHz, l'hauteur de l'antenne réceptrice est de 6 m.</i>	46
Tableau IV.3: <i>Les valeurs de la sensibilité et l'affaiblissement selon la modulation</i>	49

Liste des figures

Figure I.1 : <i>Historique du WiMAX.</i>	5
Figure I. 2 : <i>Exemple d'un réseau WiMax</i>	7
Figure I. 3 : <i>Architecture du réseau Wimax</i>	8
Figure I. 4 : <i>LOS & NLOS</i>	9
Figure I. 5 : <i>Exemple d'un réseau WiMAX avec les deux variantes fixe et mobile</i>	11
Figure I. 6 : <i>La desserte avec WiMAX .</i>	12
Figure II. 1 : <i>Couches protocolaires d'IEEE 802.16</i>	16
Figure II. 2 : <i>Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence</i>	18
Figure II. 3 : <i>Transmission des données par bloc dans l'OFDM.</i>	19
Figure II. 4 : <i>Différence entre les signaux SC et OFDM reçus</i>	19
Figure II. 5 : <i>Composants fréquentiels (ou sous porteuses) du symbole OFDM-256</i>	20
Figure II. 6 : <i>Description fréquentielle de l'OFDMA</i>	21
Figure II. 7 : <i>Exemple de slot dans l'OFDMA</i>	23
Figure II. 8 : <i>Trame OFDMA avec différentes zones de permutations</i>	23
Figure II.9 : <i>Schéma simplifié d'un système MIMO</i>	24
Figure II. 10 : <i>Couche physique adaptative</i>	25
Figure II. 11 : <i>Duplexage TDD, (figure extraite de la norme)</i>	26
Figure II.12 : <i>duplexage FDD, extraite de la norme</i>	26
Figure III.1 : <i>Equilibrage des liens montants et descendants</i>	37
Figure IV.1 : <i>Interface calculatrice des pertes du chemin</i>	45
Figure IV. 2 : <i>Variation du path loss en fonction de la portée.</i>	47
Figure IV. 3 : <i>Exemple de bilan de liaison</i>	48
Figure IV. 4 : <i>Variation de l'affaiblissement en fonction de la portée.</i>	50
Figure IV. 5 : <i>Variation du path loss en fonction de la hauteur d'antenne réceptrice</i>	50

Figure IV. 6: <i>Variation de l'affaiblissement en fonction de l'hauteur de l'antenne réceptrice, pour différentes portée (2000, 3000 et 4000 m).</i>	51
Figure IV.7: <i>Evolution du débit en fonction de la portée.</i>	52
Figure IV. 8: <i>Interface calculatrice du nombre de station de base</i>	53
Figure IV. 9: <i>Interface calculatrice du nombre de la capacité.</i>	54

Introduction générale

De nos jours la demande de connexions à Internet haut débit se fait croissante. Conjointement, les accès de type ADSL se multiplient, mais ces technologies présentent certaines limites relatives aux débits et à la portée, et ne permettent pas la souplesse qu'offre une connexion sans fil.

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. Plusieurs kilomètres et est donc destiné principalement aux réseaux métropolitains.

En effet, la portée prévue des ondes est d'environ 50 km. Néanmoins cette portée est théorique et la portée réelle devrait se situer plutôt aux alentours de 8 ou 10 km. Ce qui reste néanmoins suffisant pour proposer une connectivité à l'échelle d'une ville.

Le WiMAX offre la possibilité de couvrir une large bande d'ondes soit de 2 à 66 GHz. Avec ce grand choix de fréquences, il est plus facile d'interagir avec divers types de produits existant sur le marché. Les technologies cellulaires, Wifi, Bluetooth et autres types d'ondes à courte portée pourront ainsi être relayées à des antennes qui ont une portée théorique de 50 Km et un débit de 75Mbit/s.

Les entreprises de télécommunications espèrent ainsi faire d'importantes économies en ayant la possibilité d'installer rapidement des antennes qui pourraient raccorder environ 60 entreprises avec des lignes de type T1 et des centaines de ménages avec des liens de type DSL- 1Mbit/s. Mais ces espoirs sont limités par quelques réalités physiques du terrain, la couverture efficace dans une région densément peuplée étant d'environ 3 Km à 10 Mbit/s. La portée des ondes est affectée par les objets pouvant se trouver entre les antennes, les interférences radioélectriques ainsi que le déplacement trop rapide des utilisateurs. L'adoption du Wi MAX risque donc d'être freinée par l'émergence de technologies par câble comme

l'ADSL2+ qui sera en mesure d'atteindre un débit de 30 Mbit/s. Avec les services actuels comme le modem câble «Internet haute vitesse extrême» le débit offert est de 6,5 Mbit/s.

Le dimensionnement d'un tel réseau WiMAX est une phase hyper importante pour le déploiement des réseaux. En effet, elle sert à prévoir les ressources nécessaires (équipement, fréquence, bande passante,...) pour servir un ensemble d'abonnés, ainsi, elle permet de gérer la qualité de services.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre est destiné à la description générale du réseau sans fil WiMAX et son principe de fonctionnement, il établit un état de l'art des différentes normes WiMAX.

Le second chapitre, est consacré à l'étude technique du standard IEEE 802.16 ainsi qu'à la description de différentes techniques de multiplexages.

Le troisième chapitre traite les données indispensables au processus de dimensionnement.

Le quatrième chapitre expose les résultats obtenus de dimensionnement orienté couverture et capacité du standard IEEE 802.16.

I.1 Introduction

Le WiMax (pour Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une solution hertzienne des réseaux WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). C'est une technologie prometteuse alliant portée, haut débit, différents services supportés, qualité de service, interopérabilité, efficacité en termes de coût, mobilité...

Ce chapitre établit une présentation détaillée de WiMAX en explorant les différentes technologies utilisées dans ce réseau, pour passer après à une comparaison entre le WiMAX et son concurrent le WiFi pour finir par spécifier ses avantages et ses inconvénients.

I.2 L'historique du WiMAX

I.2.1 Origines du Wimax

Le réseau WiMAX a été, à l'origine, créé par les sociétés Intel et Alvarion en 2002 [1], poussé par un consortium d'une cinquantaine de membres, dont Intel, Nokia, Fujitsu Microelectronics et China Motion Telecom et ratifié par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineer*) sous le nom de IEEE 802.16 . Plus exactement, WiMax est le label commercial délivré par le WiMax Forum aux équipements conformes à la norme IEEE 802.16 qui est apparue en 2001.

La norme 802.16 a connu de nombreuses évolutions au fur et à mesure qu'elle gagne en popularité. Destinées originellement à desservir les zones les plus éloignées en haut débit en tant que réseau d'accès, cette norme s'oriente de plus en plus vers la mobilité notamment dans la version 802.16 e.

Le WiMAX est principalement fondé sur une topologie en étoile bien que la topologie maillée soit possible. La communication peut être réalisée en ligne de vue (LOS : *Line Of Sight*) ou non (NLOS). La dernière mouture du standard qui nous intéresse ici est le standard IEEE 802.16 2005 qui couvre les terminaux mobiles et définit des mécanismes évolués de gestion des handovers [1].

Il est à noter que l'infrastructure point-Multipoints de la boucle locale radio, bien qu'utilisant les technologies LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) et MMDS (*Microwave Multipoint Distribution System*) dans les bandes 3,5 et 26 GHz a souffert d'un manque de standardisation de l'ensemble du dispositif. Les candidats ont peu à peu déclaré forfait.

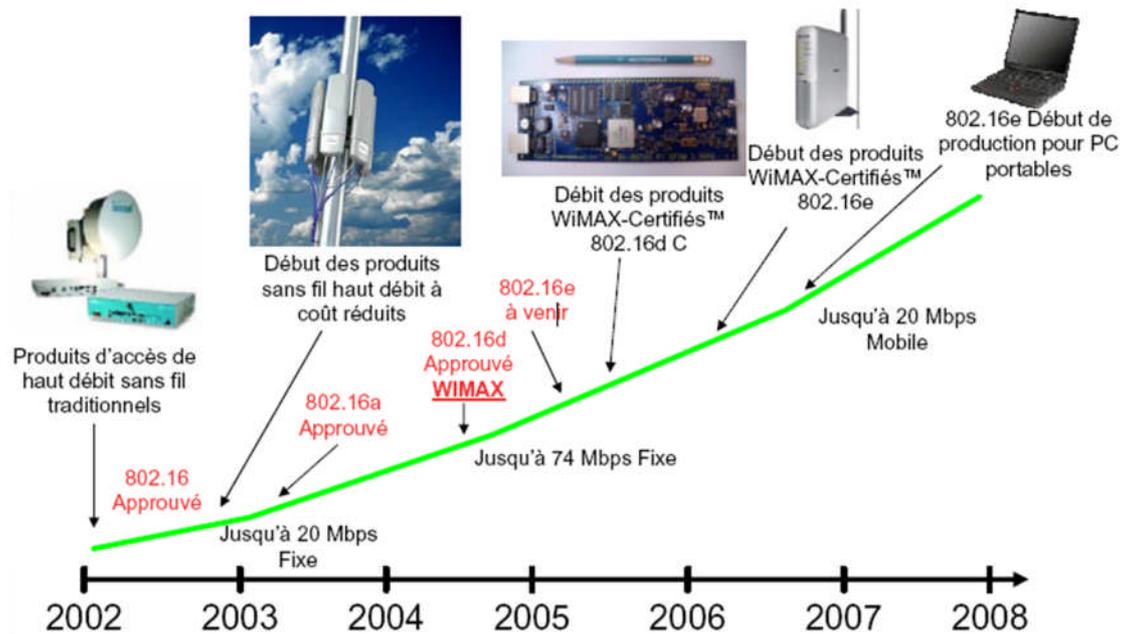


Figure I.1 : Historique du WiMAX.

I.2.2 Les différentes normes

Le WiMAX est une famille des normes, qui définit des connexions à haut débit par voie radio. Le développement des normes de 802.16 et leurs spécificités techniques sont expliqués dans le tableau I.1 [2] :

Standard	Description	Publié	Statut
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-1882	définit les options possibles pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.	15 janvier 2003	obsolètes
IEEE std 802.16a-2003	amendement au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 GHz.	1er avril 2003	
IEEE std 802.16-2004 (également désigné 802.16d)	il s'agit de l'actualisation (la révision) des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c.	1er octobre 2004	obsolète/actifs
IEEE 802.16e (également désigné IEEE std 802.16e-2005)	apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile du standard, jusqu'à 120 km/h.	7 décembre 2005	actifs
IEEE 802.16f	Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC (Media Access Control) et PHY (Physical)	22 janvier 2006	

Tableau I.1 : Les différentes normes d'IEEE 802.16x.

D'abord conçu pour la partie 10-66 GHz en 2001 dédié aux systèmes LOS, 802.16 s'est intéressé par la suite aux bandes 2-11 GHz pour donner naissance en 2003 à 802.16a pour les systèmes NLOS. En Europe, c'est autour des 3,5 GHz que 802.16a peut se déployer ; aux États-Unis, c'est dans des bandes proches de celles utilisées par le Wi-Fi, 2,4 et 5 GHz. Cette partie de la bande est celle qui a le plus d'activités au sein du WiMAX Forum aujourd'hui. 802.16a a été amendé depuis, par 802.16-2004, et en tout rigueur on ne devrait plus parler de cette version a. Conduite par le groupe de travail IEEE 802.16 d, cette version amendée est parfois également appelée 802.16d. À côté de 802.16-2004, qui est le WiMAX de l'année 2005, on trouve également 802.16.2, qui définit l'interopérabilité entre toutes les solutions 802.16 et les solutions (comme Wi-Fi) qui sont présentés sur les mêmes bandes de fréquence. Le standard IEEE 802.16 e est la version la plus avancé et la plus intéressant. Cette version apporte la mobilité.

I.2.3 Apport de WiMAX

L'objectif du WiMAX est de fournir une connexion Internet à haut débit sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres de rayon. Le standard WiMAX possède l'avantage de permettre une connexion sans fil entre une station de base et des milliers d'abonnés sans nécessiter de ligne visuelle directe (en anglais *Line Of Sight*, parfois abrégée LOS) ou NLOS pour *Non Line Of Sight*). 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 20 Mbit/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 Mbits/s pratiquement et peut couvrir des zones de rayon allant jusqu'à 50 Km.

I.3 Architectures du réseau WiMAX

L'architecture de la technologie WiMax se compose principalement de stations de base (*BS, Base Station*), et des stations mobiles (*SS, Subscriber Station*). La station de base joue le rôle d'une antenne centrale chargée de communiquer et de desservir les stations mobiles qui, à

leur tour, servent les clients utilisant le WIFI ou l'ADSL. La figure (I.2) représente l'architecture générale d'un réseau d'accès à large bande :

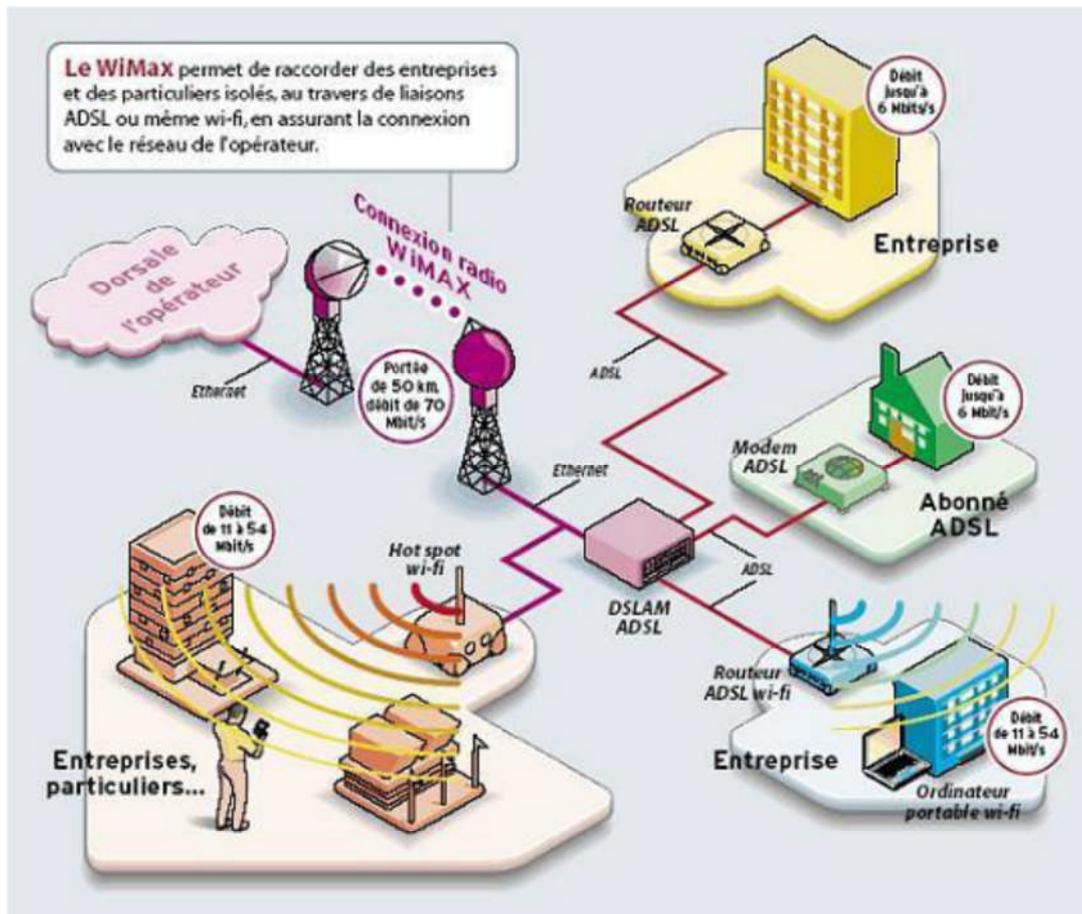


Figure I.2 : Exemple d'un réseau WiMax

La Figure I.2 illustre un exemple d'un réseau WiMAX avec ses deux variantes, à savoir fixe et mobile. Tel que le montre la figure I.2, ce réseau se compose essentiellement d'une station de base, qui joue le rôle d'un nœud émetteur, et des stations réceptrices qui jouent le rôle des clients WiMAX. Nous allons ultérieurement présenter le principe de fonctionnement d'un tel type de réseau.

Au départ dans la version 802.16a et 802.16d il s'agissait de liaisons point à multipoints qui offrent la possibilité de se déplacer dans un secteur donné. Des extensions sont étudiées en particulier à partir de la naissance de 802.16e pour permettre de se déplacer entre secteurs ou entre stations de base. Ceci correspond à des applications nomades (on est mobile, mais lors de la transmission de données on est fixe) ou mobiles (on est mobile aussi en cas de transmission de données) [3].

I.3.1 Le sous système radio : Accès Service Network (ASN)

C'est le réseau d'accès radio du WiMAX, il regroupe un ou plusieurs passerelles et des stations de base BS. L'ASN assure la couverture radio et la gestion des fonctionnalités d'accès MAC comme le paging, la gestion des ressources radio (RRM Radio Resource Management) et la mobilité entre les BS (pour la norme 802.16 e). Les passerelles ASN-GW assurent l'interconnexion avec le CSN.

I.3.2 Le CSN: Connectivity Service Network

C'est un ensemble de fonctionnalités assurant la connectivité IP aux stations d'abonnés WiMAX. Le CSN regroupe des passerelles pour l'accès Internet, des routeurs, des serveurs et des « proxy » de sécurité ainsi que des bases de données. Il permet également le contrôle d'admission et gère la mobilité inter-ASNs (pour la norme 802.16e). La figure I.3 illustre l'architecture complète d'un réseau WiMAX, ainsi que son interconnexion avec un réseau IP.

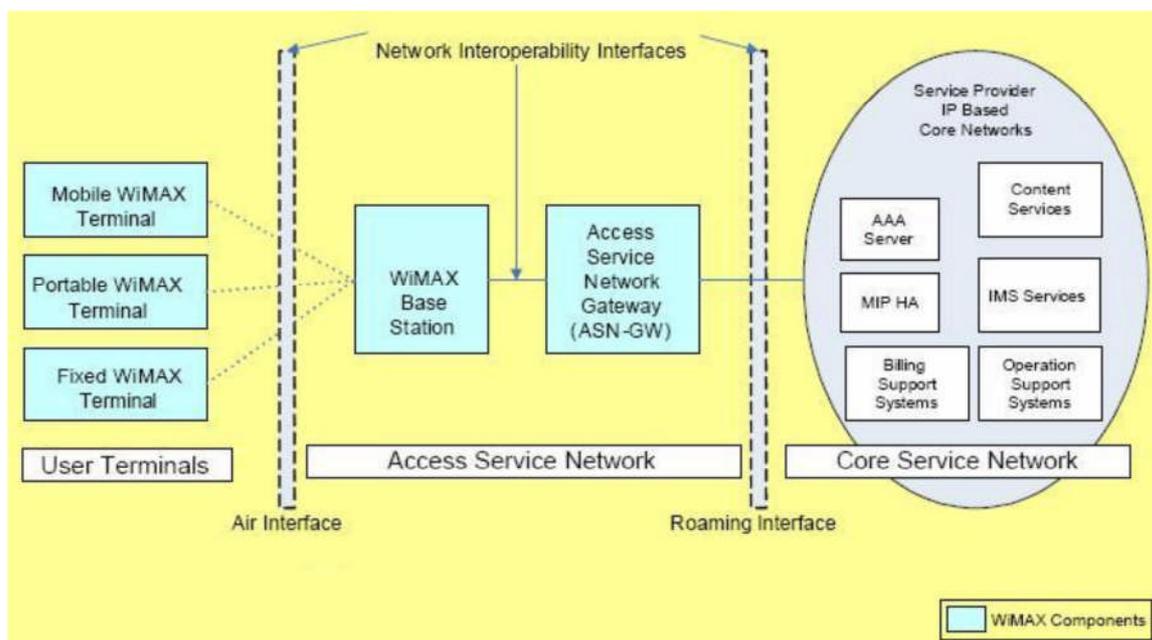


Figure I.3 : Architecture du réseau Wimax [4].

I.3.3 Principe de fonctionnement du WIMAX

Le principe de fonctionnement du WIMAX est simple : une station émettrice (station de base) émet des ondes radio (hertziennes), dans la bande de fréquence de 2,5 GHZ (3,5 GHZ en Europe), qui sera captée par plusieurs antennes d'abonnés, ainsi que par d'autres stations WiMAX conçues pour jouer le rôle de relais.

Dans un système WiMAX, la station de base est connectée au réseau public en utilisant la fibre optique, le câble, la liaison à ondes radio, ou n'importe autre connexion point à point haute vitesse, connu sous le nom de *backhaul*. Dans certains cas comme dans les réseaux de topologie maillée, la connexion PMP (Point à Multipoint) est aussi utilisée. La station de base sert ses abonnés en utilisant des connexions point à multipoints. Elle utilise la couche MAC pour leur allouer des liens montants, entre les stations clients SSs et la BS, et des liens descendants, reliant la BS aux SSs, selon les besoins en bande passante. Les SSs peuvent représenter un seul utilisateur, comme elles peuvent former un réseau sans fil ou filaire.

Le mode Ligne Of Sight (LOS) utilise une antenne qui pointe directement la station de base du WiMAX. Dans ce cas, les hautes fréquences sont utilisées. Celles-ci peuvent atteindre les 66 MHz où il y a moins d'interférences et plus de bande passante (Pareek 2006).

Un signal émis par une station de base peut franchir de petits obstacles, tels que les maisons et les arbres. On parlera alors d'une communication NLOS (Non Line Of Sight). Une communication NLOS connaît une diminution en termes de débit, qui pourra atteindre les 20Mbits/s. En outre, les grands obstacles tels que les collines et les grands immeubles ne peuvent malheureusement pas être franchis par les signaux WiMAX. Les connexions LOS sont donc plus puissantes et plus stables que les connexions NLOS, qui connaissent un taux d'erreur plus élevé [5].

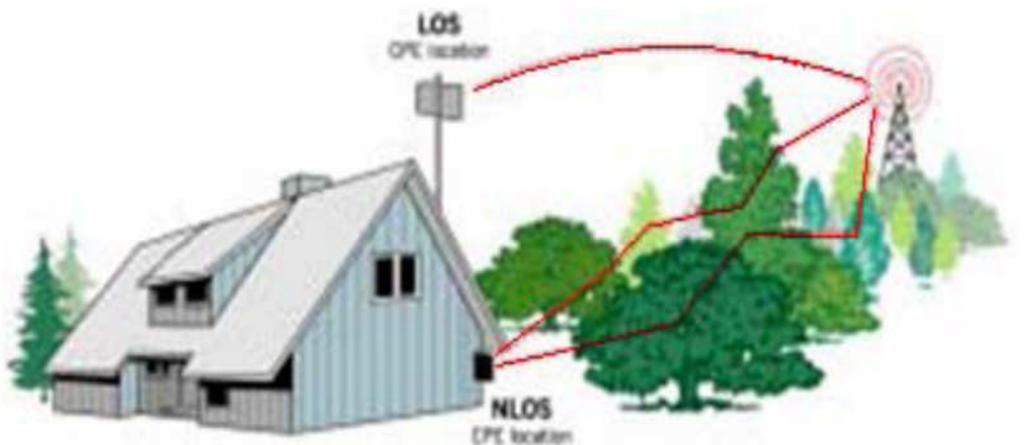


Figure I.4 : LOS & NLOS

Une station de base (Base Transceiver Station : BTS) permet d'atteindre des milliers d'utilisateurs équipée par des antennes situés sur un toit d'un immeuble.

Le WiMax a la possibilité de franchir de petits obstacles comme des collines ou des arbres. Différents moyens sont mis en œuvre afin de pouvoir envoyer un signal :

- NLOS (Non-line-of-sight)
- LOS (Line-of-sight)

I.4 Les Types du WIMAX

I.4.1 WIMAX fixe

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. Le tableau I.2 résume les principales propriétés du standard IEEE 802.16d.

<u>WiMAX Fixe 802.16d</u>
Mode : Nomade
Distance d'émission théorique : 5km en ville et jusqu'à 50km (zone rurale)
Distance d'émission testée : 1Km en ville et jusqu'à 20 Km en campagne
Débit théorique : 70 MBits / sec
Débit pratique : 40 MBits / sec
Couche PHY : OFDM (max : 256)
Couche MAC : TDMA
Bandes de fréquences : 2,5GHz et 3,5GHz (licences), 5GHz (sans licence)
Fonctionnement optimal : en LOS
Modulation possible : BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Duplexing : FDD et TDD
Nombre de terminaux raccordés simultanément : 1 000

Tableau I.2 : Paramètres techniques d'IEEE 802.16d.

I.4.2 WIMAX mobile

En anglais Wimaxtable, c'est le standard IEEE 802.16e. Il prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau internet. On peut ainsi imaginer à terme la possibilité pour les téléphones mobiles de se connecter à ce réseau haut débit. Le débit théorique est plus faible que le Wimax fixe mais permettra néanmoins d'atteindre 30 Mbits par seconde sur une distance de plus de 3 km [6].

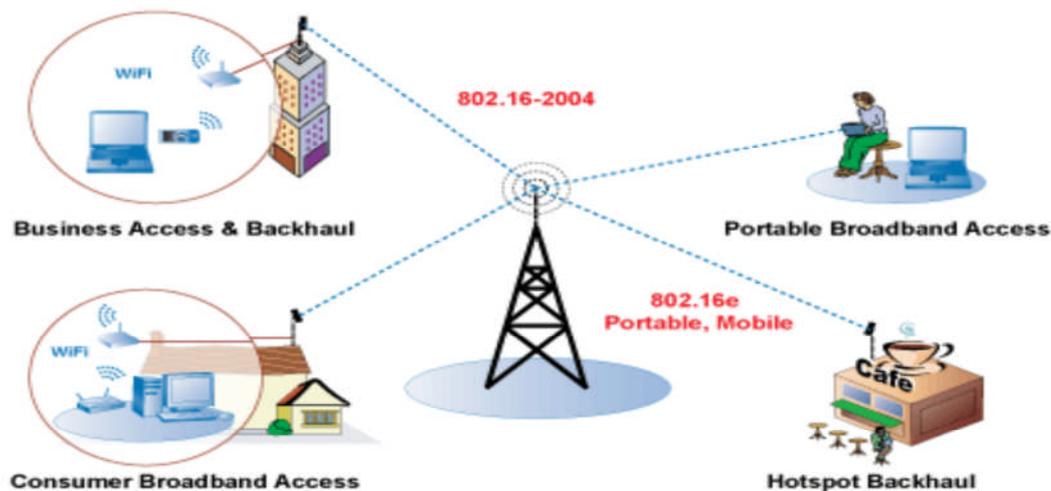


Figure 1.5 : Exemple d'un réseau WiMAX avec les deux variantes fixe et mobile

La figure I.5 illustre un exemple d'un réseau WiMAX avec ses deux variantes, à savoir fixe et mobile. Tel que le montre la figure, ce réseau se compose principalement d'une station de base, qui joue le rôle d'un noeud émetteur, et des stations réceptrices qui jouent le rôle de clients WiMAX. Nous allons ultérieurement présenter le principe de fonctionnement d'un tel type de réseau.

I.5 Les applications du WIMAX

Côté application, la couverture et les débits rendus possibles, le caractère à terme de mobilité, et des coûts de production et de déploiements qu'on espère réduits ouvrent la voie à de nombreuses applications. Citons-en quelques-unes :

- ❖ Couvertures classiques de *hotzones* : zones d'activité économique, parcs touristiques... ;
- ❖ Déploiements temporaires : chantiers, festivals, infrastructure de secours sur une catastrophe naturelle ;
- ❖ Offres triple *play* : données, voix, vidéo à la demande ;
- ❖ Gestion des transports intelligents ;
- ❖ Systèmes d'information géographique déportés ;
- ❖ Notion d'hôpital étendu ;
- ❖ Sécurité maritime et sécurité civile

I.6 La desserte avec WiMAX

La desserte a pour objectif de relier le client final à un réseau métropolitain afin qu'il puisse accéder à Internet. Ce service est habituellement effectué par les DSLAM ou les *hot spots Wiski*. Pour cela, le client doit posséder un récepteur WiMAX (une puce intégrée ou une borne) et se trouver dans le champ d'action (jusqu'à 5 km) d'un émetteur. 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. C'est à ce niveau (la desserte) que se joue l'avenir du WiMAX mobile [7].

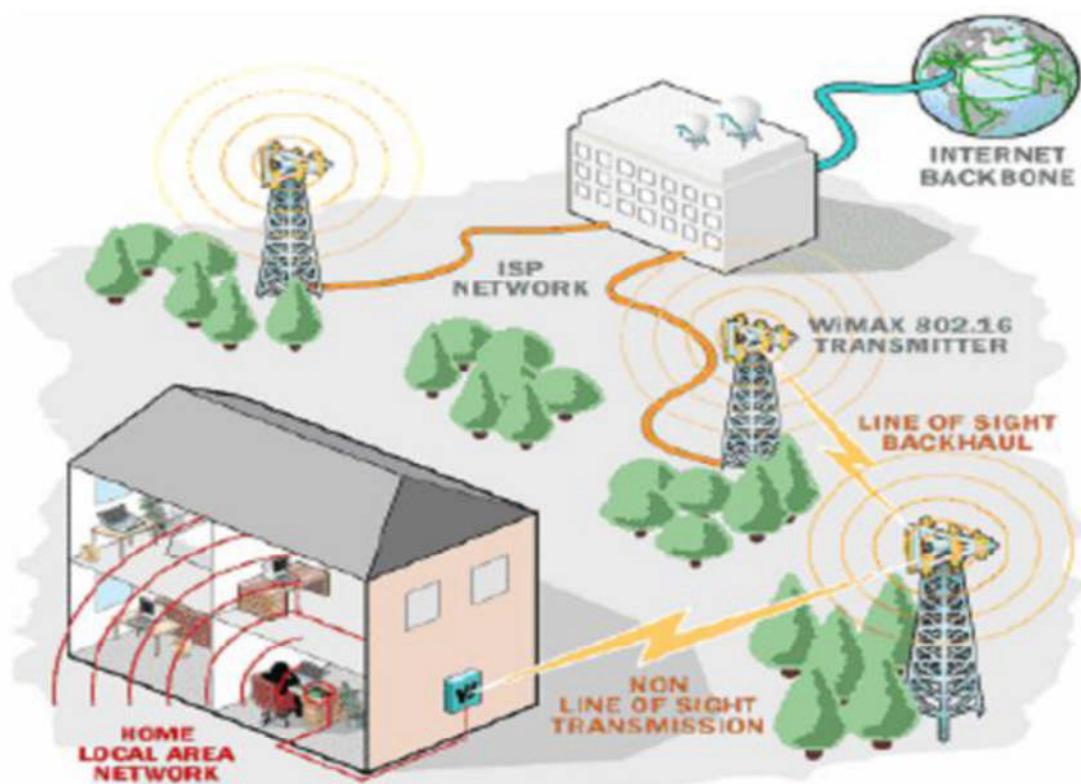


Figure I.6 : La desserte avec WiMAX .

Le standard WiMax permet une connexion sans fil entre une station de base et des milliers d'abonnés sans nécessiter une ligne visuelle directe (LOS, *Line Of Sight* ou *NLOS* pour *Non Line Of Sight*). Dans un réseau, la collecte consiste à relier les points d'accès au backbone de l'opérateur (dorsale) assurant ainsi la connexion avec Internet. On appelle ce mécanisme le « *backhauling* » de hotspots. La transmission se fait en "ligne de vue" (LOS), grâce à des émetteurs WiMax placés suffisamment haut (sur des antennes).

I.7 WiMAX face à WiFi

Le WIMAX pourrait venir en complément du WIFI pour couvrir des zones plus larges, rendant ainsi possible la concentration des hotspots WIFI et donc la création de hot-zones. L'utilisateur se connecterait toujours en WIFI (identification et facturation) et le WIMAX viendrait renforcer la connexion en termes de capacité de débit et de couverture. Un point sur le WIMAX par rapport à WIFI.

D'après Intel, WiMAX forme la continuation du Wi-Fi dans la chaîne de connexion vers l'Internet.

	802.11	802.16	Différence
Portée	Environ 300 mètres maximum	Jusqu'à 45 Km – cellules de 5 à 10 Km	La couche physique de 802.16 tolère les délais d'expiration (réflexions) grâce à l'implémentation de 256 FFT (Fast Fourier Transform) contre 64 pour 802.11.
Couverture	Courte portée optimisée pour l'intérieur	Longue portée optimisée pour l'extérieur (Near LOS)	802.16 a une meilleure pénétration à travers les obstacles de plus longues distances
Adaptabilité	Prévu pour des réseaux locaux LAN Fait pour une dizaine d'utilisateurs Tailles des bandes de fréquences fixes (20 MHz)	Prévu pour supporter jusqu'à 100 utilisateurs Taille des bandes de fréquences variables de 1.5 à 20 MHz	Le protocole MAC 802.11 utilise un protocole CSMA/CA alors que 802.16 utilise TDMA. 802.16 peut utiliser toutes les fréquences disponibles alors que 802.11 est limité
Bit rate	2.7 bps/Hz soit jusqu'à 54 Mbps sur 20 MHz	5 bps/Hz soit jusqu'à 100 Mbps sur 20MHz	Plus haute fréquence couplée avec une correction d'erreur donnant un meilleur usage du spectre
Qualité de service (QoS)	Pas de support de qualité de service.	Intégrée dans MAC différents niveaux.	802.11 : évite les collisions des messages via CSMA/CA 802.16 : même fréquence mais répartie dans le temps (TDMA)

Tableau I.3 : Comparaison entre WiMAX et WiFi [8]

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le WiMAX qui est un standard émergent d'IEEE et promet des performances et des possibilités de services impressionnantes en mesure de répondre à des besoins actuels.

En effet, l'accroissement de la demande concernant l'accès à Internet s'est accru considérablement dans ces dernières années. L'émergence de standard tel que le 802.16 devrait encourager cette tendance et développer considérablement les accès sans fil au détriment des infrastructures filaires en apportant la mobilité et la flexibilité pour les usagers. Du fait de sa couverture, son très haut débit, ses coûts réduits, et sa variété d'utilisation, WiMAX promet donc une évolution surprenante pour les utilisateurs particuliers, les entreprises, les universités et naturellement pour les opérateurs de télécommunication. Le second chapitre sera consacré à l'étude technique du WiMAX.

II.1 Introduction

Le standard WiMax permet une connexion Internet à haut débit entre une station de base et des milliers d'abonnés sans nécessiter une ligne visuelle directe (LOS, *Line Of Sight* ou *NLOS* pour *Non Line Of Sight*). Donc ce standard a été développé en suivant une architecture en couches.

Ce chapitre présente une vue détaillée sur cette architecture ainsi que les techniques de Multiplexage et de modulation utilisées dans ce réseau.

II.2 Etude technique de WiMAX

La figure II.1 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 (Media Access Control).

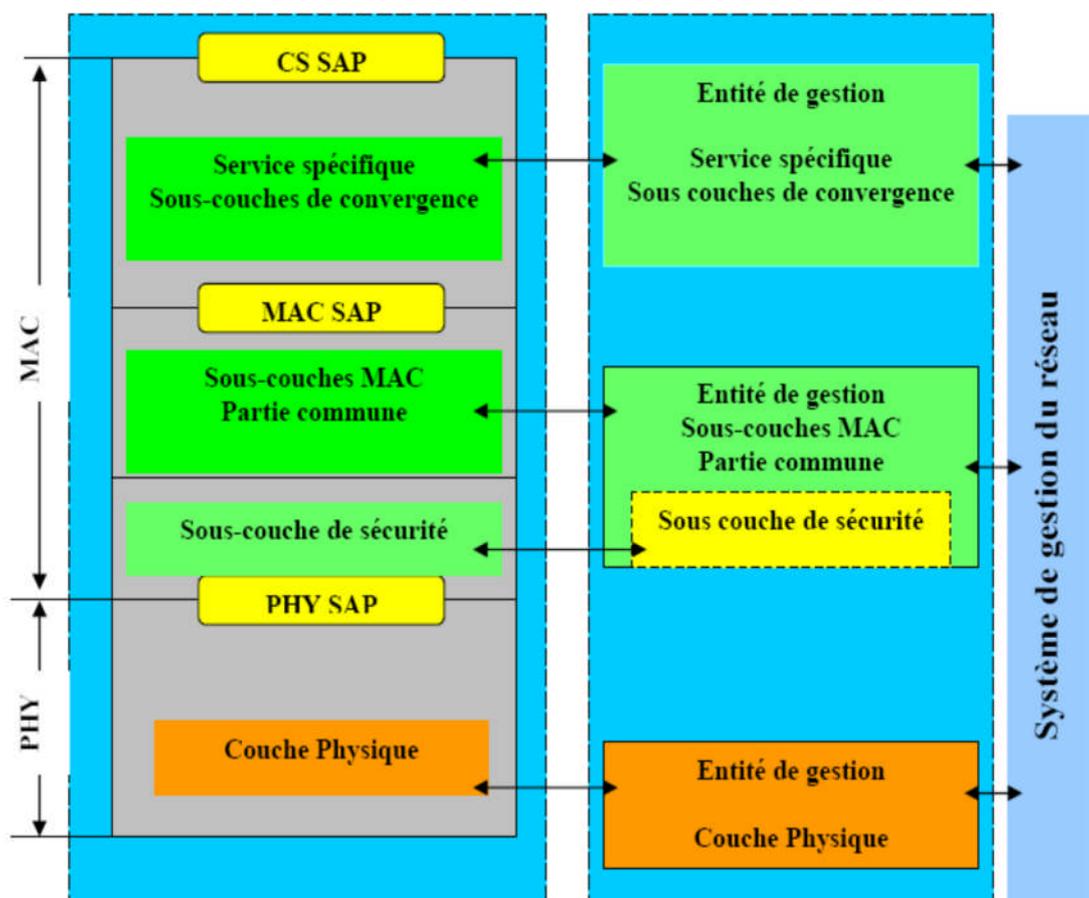


Figure II.1 : Couches protocolaires d'IEEE 802.16 [9]

II.2.1 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 :

- La sous-couche de convergence spécifique (Service Specific Convergence Sublayer : SSCS),
- La sous-couche commune (MAC Common Part Sublayer: CPS),
- La sous-couche sécurité (Privacy Sublayer : PS).

□ La sous-couche SSCS

La SSCS fournit toute transformation de toutes les données externes du réseau, reçues par la CPS. Pour le raccordement de réseaux externes, la SSCS fournit 2 sous couches de convergence (CS : convergence sublayer) :

- Pour les réseaux ATM : il s'agit d'une interface qui associe les différents services ATM avec la couche MAC CPS.
- Pour les réseaux à base de paquet : il est utilisé pour le mappage de tout protocole à base de paquet, tels que Ethernet, et les protocoles Internet tels que IPv4, IPv6...

En plus de ces fonctions basiques, les sous couches de convergence peuvent aussi mettre en œuvre des fonctions plus sophistiquées, telles que l'administration de la charge utile via la suppression des entêtes, puis leurs reconstructions pour améliorer l'efficacité du lien hertzien.

□ La sous-couche CPS

Cette sous-couche forme le noyau de la couche MAC, étant donné qu'elle contient les fonctions clés relatives au contrôle du lien radio. La CPS fournit les règles et les mécanismes d'accès, l'allocation de la bande passante, l'établissement et la maintenance des connexions. Elle reçoit les données des sous couches de convergence. En outre, c'est la sous couche CPS qui gère les mécanismes de qualité de service (QoS).

□ La sous-couche PS

La PS est le lien qui réunit la couche MAC à la couche physique (PHY). Elle fournit la sécurité à travers le réseau sans fil à large bande en cryptant la connexion entre la station de base et l'abonné au service. De plus, la couche PS est utilisée pour l'authentification et l'échange de clefs de sécurité.

II.2.2 La couche physique

La couche physique pour la spécification 11-66 GHz se base sur une propagation « en ligne de vue » (LOS) c'est-à-dire les stations qui communiquent ensemble sont visible l'une de l'autre directement sans obstacles. Pour la spécification 2-11 GHz, la couche physique a été implémentée pour répondre au cas où les stations communiquent « en non ligne de vue » (NLOS), dans le cas des environnements urbains avec la présence d'obstacles entre deux stations. Pour répondre à ces spécifications, trois types d'interfaces de transmission ont été définies :

- **SC (Single Carrier)**: elle définit une transmission sur un seul canal de fréquence.
- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** : cette interface utilise plusieurs bandes de fréquence qu'elle divise en plusieurs porteuses pour la transmission d'un signal. Chaque bande est utilisée à des fins différentes.
- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** : similaire à l'OFDM, cette interface offre un plus grand nombre de porteuses du fait du multiplexage effectué sur la fréquence. Dans ce qui suit, nous allons aborder les différentes techniques de multiplexage et duplexage qui peuvent être mises en oeuvre au niveau de la couche physique de la norme 802.16.

II.3 Les techniques de multiplexage

II.3.1 Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence

La norme 802.16-2004 utilise le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (Orthogonal Frequency Division Multiplexing ou OFDM). C'est une technique de modulation multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide. Autrement dit, cette modulation emploie beaucoup de sous porteuses orthogonales et chacune de ces sous porteuses sera modulée avec une partie des données.

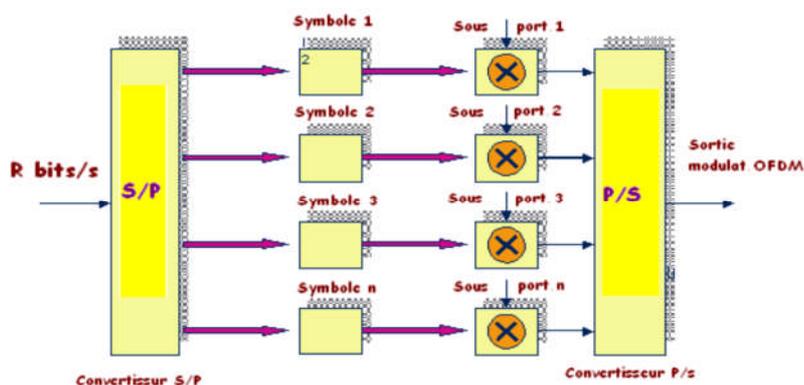


Figure II.2: Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence.

D'un point de vue implémentation numérique (figure II.2), les systèmes OFDM transmettent les données par blocs. Le flux originel de données de débit R est multiplexé en N flux parallèles de débit R/N . Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises

N canaux différents. Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuses (Single Carrier), la technique OFDM consiste à transmettre les données par bloc, où un vecteur de N symboles de données est transporté par un seul symbole OFDM [10].

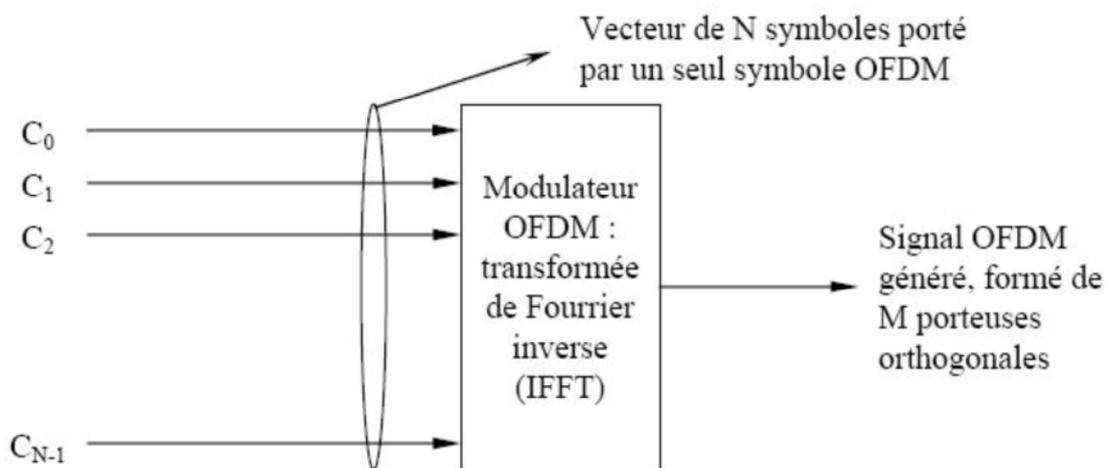


Figure II.3 : Transmission des données par bloc dans l'OFDM.

Grâce à la séparation orthogonale des porteuses, il est plus facile à la réception de faire l'égalisation des sous-porteuses chacune à part, au lieu de faire l'égalisation d'un signal à une porteuse unique.

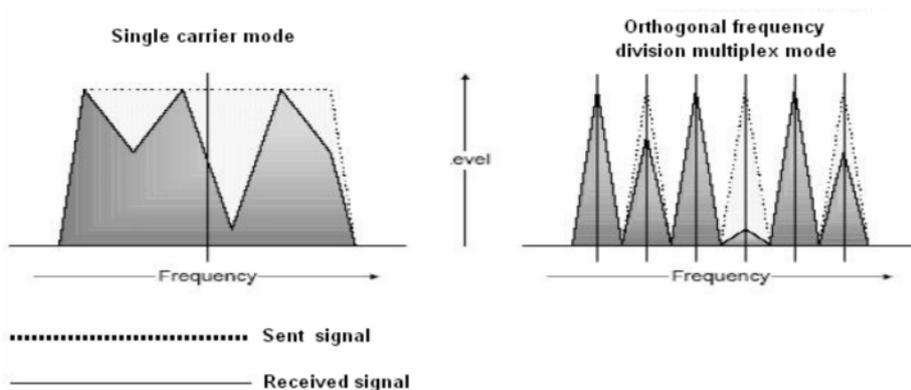


Figure II.4 : Différence entre les signaux SC et OFDM reçus [11].

Le WMAN-OFDM utilise l'OFDM à 256 porteuses. Les symboles sortant de la constellation attaquent l'IFFT (Transformée de Fourier Inverse) et le premier symbole qui sort de la modulation numérique doit être porté par la sous porteuse de données ayant le plus petit indice d'offset.

Chaque sous porteuse est référenciée par un indice d'offset indiquant sa position dans le symbole (entre -128 et +127). Nous distinguons 3 types de sous porteuses :

- Sous porteuses de données (192 sous porteuses)
- Sous porteuses pilotes: pour des buts d'estimation (8 sous porteuses).
- Sous porteuses nulles: (56 sous porteuses) pas de transmission, pour les bandes de garde (55 sous porteuses), et la sous porteuse DC.

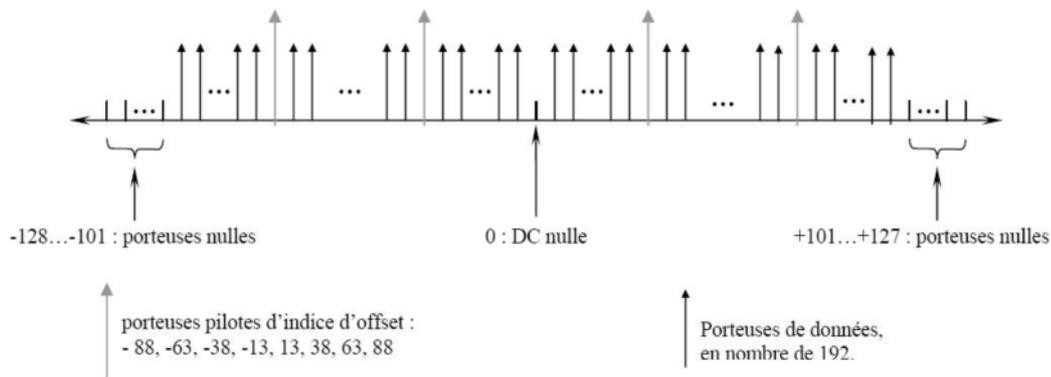


Figure II. 5 : Composants fréquentiels (ou sous porteuses) du symbole OFDM-256 [12].

Alors il y en a, en tout, 256 sous porteuses. Le DC est la fréquence du signal portant le symbole OFDM, d'indice d'offset égale à 0. Les sous porteuses de la bande de garde sont des porteuses nulles insérées aux 2 cotés du symbole OFDM, pour lutter contre le phénomène CCI (Carrier to Carrier Interference).

II.3.2 Les avantages de l'OFDM

Les avantages de la technique OFDM sont nombreux :

1. Efficacité de l'utilisation du spectre et de puissance (utilisation de N porteuses orthogonales très proche l'une de l'autre).
2. Grande immunité contre la propagation multi trajets, où certains symboles d'une précédente transmission peuvent arriver en retard.
3. Immunité contre l'interférence entre les canaux (insertion des porteuses nulles à chaque extrémité du symbole) ;

4. Facilité de synchronisation, et d'estimation du canal grâce aux sous porteuses pilotes.

La différence que présente la couche physique de la norme 802.16e par rapport au 802.16-2004, réside dans l'utilisation de l'OFDMA comme technique de multiplexage.

II.3.3 Les inconvénients de l'OFDM

Les principaux inconvénients de l'OFDM sont :

- Très sensible à la désynchronisation
- Facteur de crête
- Gestion de la diversité

II.3.4 L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

Cette technique de modulation -comme l'OFDM- utilise l'IFFT (Transformée de Fourier Inverse) pour générer un symbole OFDMA contenant : des porteuses de données, des porteuses pilotes, et des porteuses nulles pour la bande de garde et la fréquence DC.

Dans la technique OFDMA, les sous porteuses actives sont divisés en des sous ensembles de sous porteuses (subcanaux). 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 subcanaux, et plusieurs émetteurs peuvent transmettre simultanément.

Les sous porteuses formant un seul subchannel, mais n'ont pas besoin d'être adjacents. Le concept est illustré dans la Figure II.5.

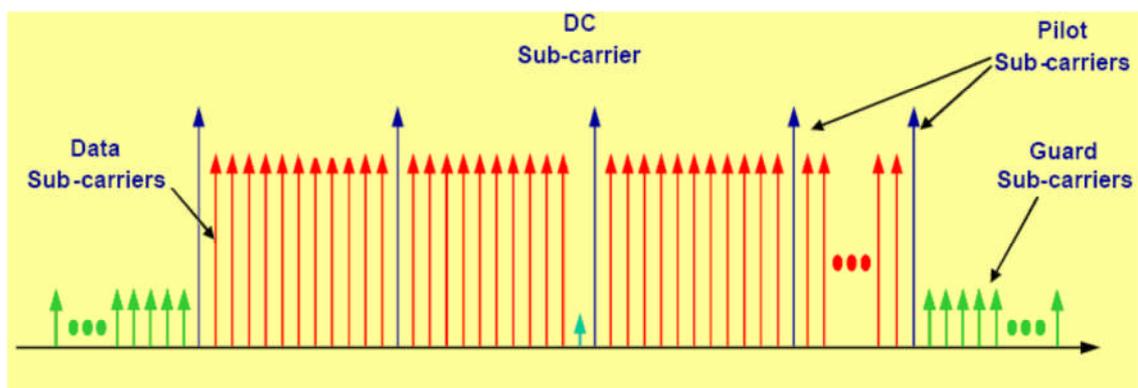


Figure II.6: Description fréquentielle de l'OFDMA [13].

Le symbole OFDMA est divisé en des sous canaux (*subchannels*) logiques afin d'attribuer les ressources radio aux utilisateurs d'une manière dynamique, 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*)** : tous les *subchannels* sont attribués à l'émetteur, dans ce mode on attribue d'abord les porteuses nulles de la bande de garde et les pilotes, ensuite on fait la partition des porteuses restantes en des *subchannels* (La partition des porteuses en des *subchannels* est nommée permutation), cela signifie qu'on a un seul ensemble des pilotes commun à toutes les porteuses du symbole.

➤ **PUSC (*Partial Usage of Subchannels*)** : quelques *subchannels* sont attribués à l'émetteur. Dans ce mode la partition se fait de la façon suivante : d'abord on fait attribuer les porteuses nulles de la bande de garde, ensuite on fait la partition des sous porteuses restantes en des *subchannels* (permutation), et dans chaque *subchannel* on fait l'attribution des pilotes et des porteuses des données, cela signifie que chaque *subchannel* a son propre ensemble de porteuses pilotes.

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) qui consiste à utiliser les sous porteuses adjacentes pour former les *subchannels* (peut être utilisé en *uplink* et en *downlink*) et le TUSC (Tile Usage of Subchannels) qui ne peut être utilisée qu'en *downlink*.

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.

Un exemple des slots physiques est illustré dans la figure II.6, cette figure montre 2 types de slots utilisés dans le *downlink*. Le changement du type du slot correspond au changement du mode d'utilisation du canal (de PUSC à FUSC).

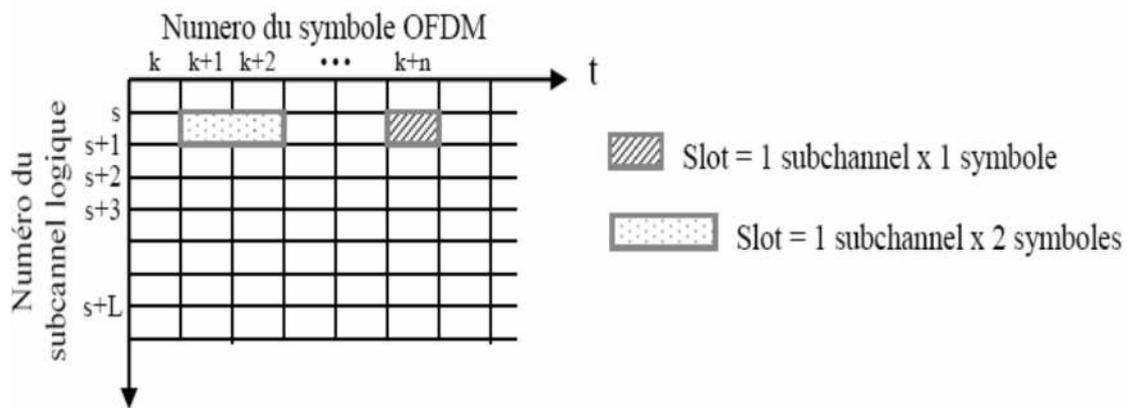


Figure II.7 : Exemple de slot dans l'OFDMA [14].

Plusieurs slots sont attribués à un même utilisateur pour faire sa transmission des données, et les modes d'utilisation des subcanaux peuvent varier au sein d'une même trame OFDMA.

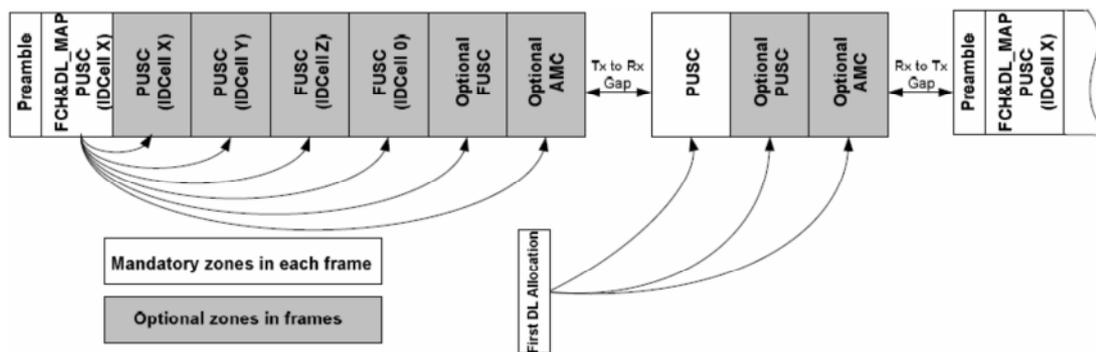


Figure II.8: Trame OFDMA avec différentes zones de permutations.

II.3.5 MIMO : Multiple Input Multiple Output

MIMO est un type de multiplexage spatial, c'est une technique très puissante pour les systèmes multiple-antenna. En principe, MIMO augmente le débit des données dans la proportion du nombre d'antennes de transmission du faite que chaque antenne porte un flux unique des symboles de données. Par conséquent, 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 $M \cdot R$.

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.

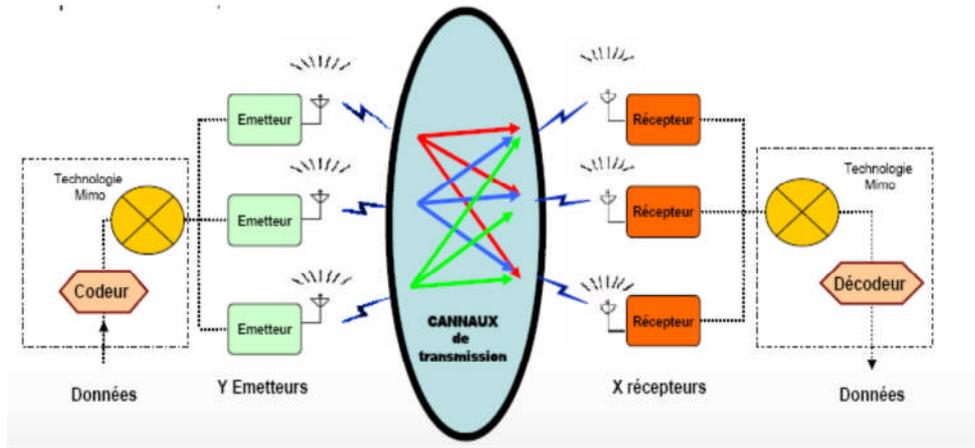


Figure II.9 : Schéma simplifié d'un système MIMO [15]

En voici quelques avantages de l'utilisation de la technologie MIMO dans les systèmes de transmission :

- Array Gain : c'est le gain obtenu en utilisant des antennes multiples, alors le signal s'additionne d'une façon cohérente.
- Diversity Gain : c'est le gain obtenu en utilisant des trajets multiples, alors s'il y en a un trajet bruité, cela ne va pas limiter la performance du système.

II.3.6 Modulation adaptative

La modulation adaptative est adoptée dans le standard 802.16. Il s'agit d'ajuster la modulation du signal par rapport au SNR (rapport signal sur bruit) du signal radio. Quand le lien radio est de très bonne qualité, le plus haut plan de modulation est utilisé. Ce qui augmentera la capacité du système. Si non, on dégrade la qualité de la modulation pour garder la même qualité de connexion et la stabilité de lien.

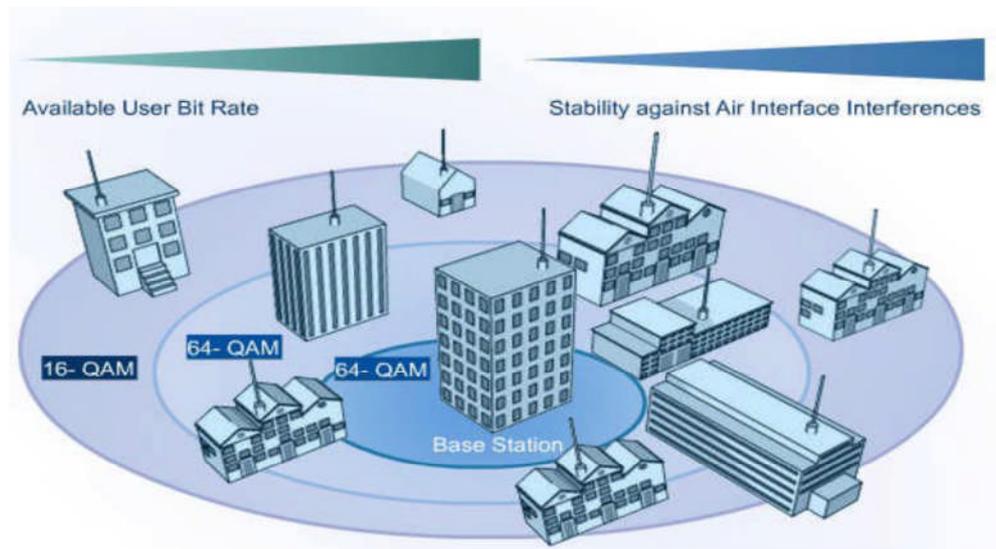


Figure II.10 : *Couche physique adaptative*

II.4 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 [16]:

1- TDD (Time Division Duplexing) : les transmissions downlink et uplink se font sur le même canal (même fréquence porteuse), mais à des périodes temporelles différentes. La trame utilisée pour l'échange des données est d'une durée fixe et contient 2 sous trames, l'une est utilisée pour le downlink, et l'autre pour l'uplink. Elle est formée d'un nombre entier de PSs (Physical Slot : unité de temps, dépendant de la spécification PHY, utilisée pour l'allocation du canal), ce qui facilite la partition du canal. Un système TDD peut diviser le canal entre les 2 sens downlink et uplink d'une façon adaptative, selon la quantité du trafic échangé. Ce transfert asymétrique est approprié au trafic Internet où de grandes quantités de données peuvent être tirées à travers le downlink. La Figure II.8 résume le principe de TDD.

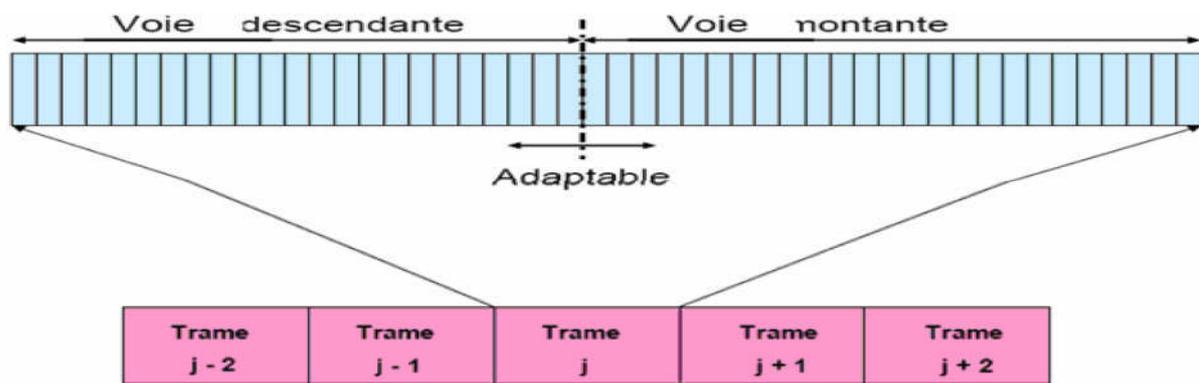


Figure II.11: Duplexage TDD, (figure extraite de la norme) [17]

2- FDD (Frequency Division Duplexing) : dans FDD les canaux uplink et downlink sont localisés dans 2 bandes de fréquence différentes. Une durée fixe de trame est utilisée pour le downlink et l’uplink, ce qui facilite l’utilisation des différents types de modulation, et simplifie l’algorithme d’allocation des canaux. Deux types de duplexage FDD sont prévus dans 802.16-2004 [17] :

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’une full-duplex SS, mais elle n’a pas la même efficacité qu’une full-duplex SS.

La Figure II.11 représente le duplexage FDD dans ses 2 variantes.

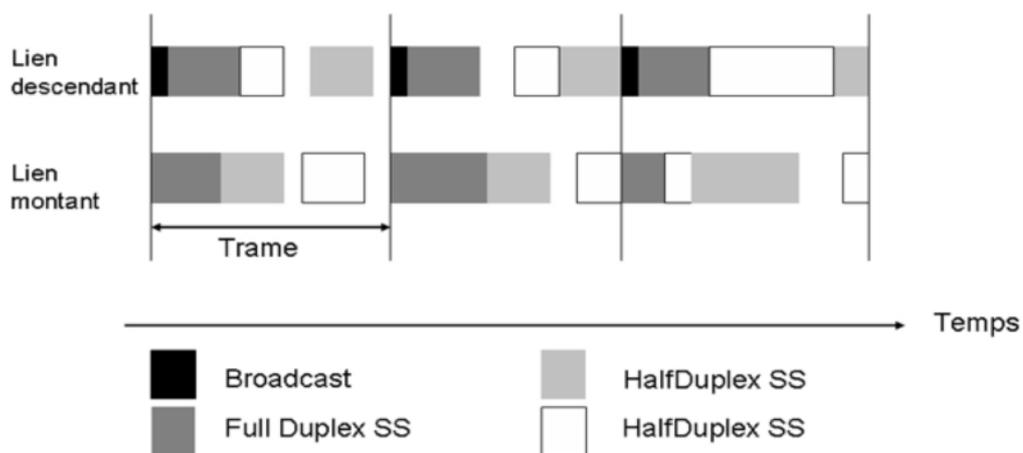


Figure II.12 : duplexage FDD, extraite de la norme [18]

II.5 Architecture en couche de la norme 802.16e ou WiMAX mobile

Le 802.16e est une version améliorée du standard 802.16-2004, et est considérée comme la version mobile du standard. De plus cette version porte des nouvelles améliorations pour les couches Physique et MAC du standard 802.16.

L'enjeu du WiMAX mobile consiste à introduire la gestion de la mobilité entre des stations de base WiMAX et des terminaux nomades équipés d'un client radio ad hoc. Ainsi des nouvelles applications peuvent être envisagées, allant jusqu'à la possibilité d'exploiter ce réseau pour de la téléphonie sur IP . Le débit maximum théorique est de 30 Mbit/s pour une portée de 2 à 4 kilomètres sans obstacles.

II.5.1 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 WirelessMAN-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). Il définit aussi des nouvelles méthodes pour l'attribution des sous porteuses dans les subchannels [19].

II.5.1 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.

II.5.1.1 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 inscrit au niveau d'une station de base spécifique.

II.5.1.2 «Hand Over »

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.

Quand il s'agit d'un FBSS, la station mobile (MS) et la station de base (BS) maintiennent une liste des BSs impliquées dans le FBSS avec le MS. Cet ensemble est appelé un Ensemble Actif (ou Active Set). Le MS suit de près les stations de bases incluses dans le « Active Set ». Le BS avec lequel le MS s'échange les données (en UL et DL) s'appelle un BS relais, ainsi le MS communique seulement avec le BS relais de l'Active Set.

La transition d'un BS relais à un autre se fait sans aucune invocation de messages de signalisation d'un HO explicite. Un FBSS est déclenché par une décision d'un MS d'échanger du trafic avec un BS relais qui peut changer au sein du Active Set. Le MS commence d'abord par balayer les BS voisines et choisit celles qui sont susceptibles d'être incluses dans le Active Set, puis signale les BSs sélectionnées, et la procédure de mise à jour du Active Set est exécutée par le MS et les BSs. Une exigence importante du FBSS c'est que les données sont transmises simultanément à tous les membres d'un Active Set qui sont capables de servir le MS. Lorsqu'il s'agit d'un MDHO, le BS maintient un Active Set contenant les BSs Impliquées avec le MS. Parmi les BS de l'Active Set, une station de base est choisie comme un BS relais. Lorsqu'il s'agit d'un MDHO, le MS communique avec toutes les stations de bases dans l'Active Set. Un MDHO est déclenché quand un MS décide de transmettre ou

recevoir des messages de trafic et de la part de plusieurs stations de bases dans le même intervalle de temps.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le standard 802.16 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.

Le chapitre suivant sera consacré au dimensionnement de ce standard.

III.1 Introduction

Le dimensionnement d'une zone quelconque nécessite en premier lieu l'analyse du bilan de liaison afin d'estimer l'affaiblissement maximal du parcours entre abonné et station de base. Ce chapitre décrit les fondements du dimensionnement des réseaux large bande WiMAX. En effet, il détermine la portée maximale en utilisant les modèles de canaux (modèles de propagation) conformément au type de terrain d'étude pour prédire la couverture d'une station de base, le bilan de liaison est aussi examiné. Enfin, le chapitre se termine par le dimensionnement par rapport à la capacité.

III.2 Dimensionnement d'un réseau WiMAX

III.2.1 Processus de dimensionnement du réseau WiMAX

Le but de dimensionnement d'un réseau sans fil est, étant donné une répartition d'abonnés, une situation géographique et des données de propagation, d'assurer la minimisation du coût de la liaison radio et de l'infrastructure du réseau, en tenant compte de la couverture radio, de la taille des cellules et de la topologie du réseau sous réserve de contraintes de la QoS.

L'étape de dimensionnement constitue une étape primordiale dans la conception d'un tel réseau cellulaire. Cette phase permet aux concepteurs de trouver une disposition optimale des sites radio.

Etant donné les caractéristiques de l'environnement à couvrir, les caractéristiques des abonnés à desservir en termes de densité et de demande en trafic, les spécifications des équipements et la bande de fréquence, notre objectif c'est de dimensionner le réseau en essayant de concilier le coût et les contraintes de QoS.

L'opération de dimensionnements 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.

III.2.2 Choix de la bande de fréquence

La sélection de la bande de fréquence à utiliser a une influence capitale sur le dimensionnement et la planification d'un tel 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 [20].

Les spécifications de la norme

	802.16	802.16 d	802.16 e
Spectre	10 - 66 GHz	< 11 GHz	< 6, 11 GHz
Conditions canal	Uniquement LOS	NLOS	NLOS
Débit	32 – 134 Mbps à 128 MHz	Jusqu'à 75 Mbps à 20 MHz	Jusqu'à 15 Mbps à 5 MHz
Modulation	QPSK, 16-QAM et 64-QAM	256-OFDM, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	256-OFDM, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Mobilité	Fixe	Fixe	Nomadisme
Bandes passantes	20, 25 et 28 MHz	Au choix entre 1.25 et 20 MHz	Comme 802.16a avec sous canaux montants
Rayon de cellule typique	2 - 5 Kms	5 - 8 Kms, max pour 50 Kms	1 - 5 Kms

Tableau III.1 : Spécificités techniques des différentes normes IEEE 802.16x [20]

III.2.3 Choix du type de Dimensionnement

Le déploiement du réseau peut être limité par la capacité, ou par la portée. Pour les services fixes, dû aux attributions licenciées avec un spectre limité, la plupart des déploiements seront limités par la capacité plus que la portée, à l'exception des zones rurales où on a une faible densité, et surtout les zones où on a une grande perte de propagation. Cependant, généralement les opérateurs à la première phase du réseau essaient d'assurer la couverture la plus complète possible vue le nombre faible d'abonnés et le non pertinence des prédictions faites. Une fois, la demande en trafic augmente, l'opérateur passe à l'étape de densification et ce en ajoutant des canaux (si le spectre le permet) ou des stations de bases supplémentaires.

III.3 Modèles de propagation

III.3.1 Rôle des modèles de propagation

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) [21].

III.3.2 Types de modèles de propagation

Dans ce paragraphe, nous commençons par rappeler plusieurs modèles de propagation applicables à l'architecture multi cellules.

Typiquement, le scénario est le suivant :

- Les cellules < 10 Km de rayon, différents types de terrains et de densité des arbres.
- Des antennes directionnelles ou omnidirectionnelles sont installées, au dessous des toits (2-10 m), au récepteur.
- 15 – 40 m antennes de BS.
- Condition d'une grande couverture de cellule (80-90%)

Le canal sans fil est caractérisé par :

- Perte due au chemin (effet de masque inclus).
- Caractéristiques d'évanouissement.
- Interférence Co-canal et entre les canaux adjacents.

À noter que ces paramètres sont arbitraires, et seulement une caractérisation statistique est possible. Typiquement, la moyenne et la variance des paramètres sont spécifiées.

Les paramètres des modèles de propagation ci-dessus dépendent de : terrain, densité des arbres, hauteurs d'antennes et largeur du faisceau, vitesse du vent, et saison (été ou hiver).

Les modèles de propagation varient selon que l'émetteur et le récepteur seraient ou non en ligne de vue ou en d'autres termes en environnement LOS ou NLOS.

III.3.2.1 Le modèle de propagation (Espace libre)

Le modèle de l'affaiblissement du parcours espace libre est habituellement le point de référence duquel tout les modèles de propagation prennent origine, 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 beaucoup et elle est calculée comme étant la carré de la distance séparent émetteur et récepteur (20dB/decade).

En environnement LOS ; le modèle Free Space ou modèle de Friis est spécifié.

L'équation suivante montre le path loss en fonction de la distance :

$$PL(d) = 20\text{Log}_{10} (4\pi d/\lambda) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

d : distance entre deux antennes dans l'espace libre (m)

λ : Longueur d'onde (m)

$$\text{Ou encore [22]} : PL(d) = 32.4 + 20\text{Log}(d) + 20\text{Log}(fc) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

d : distance en Km

fc : fréquence en MHz

III.3.2.2 Modèle COST 231 Hata

Ce modèle est utilisé pour les macros cellules. Il est essentiellement fait pour les fréquences inférieures à 2 GHz. Dans le but de l'utiliser pour des fréquences supérieures (jusqu'à 6GHz), on lui a introduit des corrections.

Le résultat est donné par l'équation suivante [23] :

$$Lh(\text{db}) = 46.3 + 33.9 \text{Log}(fc) - 13.2\text{Log}(hbs) - A(hss) + (44.9 - 6.55\text{Log}(hbs))\text{Log}(d) + C_m \quad (\text{III.3})$$

Avec:

fc: fréquence porteuse du signal en MHz

hbs : hauteur de la BS en mètres

hss : hauteur de la SS en mètres

d : distance entre la BS et SS en Km

C : terme constant (C=0 dB pour les zones sous urbaines, C=3 dB pour les zones urbaines)

A(hss) : est un terme correctif dépendant de la hauteur de l'antenne de SS.

- Pour les villes de taille moyenne ou petite :

$$A(hss) = (1.1 * \log(fc) - 0.7) * hss - (1.56 * \log(fc) - 0.8) \text{dB}$$

- Pour les villes de grande taille :

$$A(hss) = 3.2 * \log(11.75 * hss) - 4.97 \text{ dB}$$

III.3.2.3 Modèle d'Erceg

En environnement NLOS, le modèle adéquat pour prédire ce qu'advientra au signal lors de sa transmission vers le récepteur au niveau d'un réseau WiMAX fixe est le modèle d'Erceg connu sous le nom « SUI model ».

Le modèle d'Erceg est utilisé pour les zones urbaines, sous urbaines et rurales. Il représente une modification du modèle de Hata-Okumura. Ce dernier est le modèle de perte de chemin le plus utilisé pour la prédiction de l'intensité du signal et la simulation dans des environnements macros cellulaires.

Le modèle de Hata-Okumura est valide pour les valeurs des paramètres du tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Fréquence	500-1500 MHz
Distance de l'antenne de BS	>1 Km
Hauteur de l'antenne de BS	>30 m

Tableau III.2 : Paramètres de validité du modèle Hata-Okumura.

La modification proposée au modèle de Hata-Okumura donne un nouveau modèle, souvent avec des corrections concernant le type de terrain. Trois catégories de terrain sont définies :

- ❖ Catégorie A : perte de chemin maximal, terrain avec collines, et une densité d'arbres variable (modérée à grande densité).
- ❖ Catégorie B : perte de chemin intermédiaire entre A et C.
- ❖ Catégorie C : perte de chemin minimal, terrain plat, avec une faible densité d'arbres.

Pour une distance proche de d_0 , la perte du chemin est donné par (fréquence=1.9 GHz) :

$$L = A + 10 \cdot \gamma \cdot \log(d/d_0) + s \quad (\text{III.4})$$

pour $d > d_0$, $d_0 = 100$ m

$$A = 20 \log(4\pi d_0/\lambda) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

λ est la longueur d'onde en m

γ est l'exposant de perte de chemin.

$$\gamma = (a - b \cdot h_b + c/h_b) \quad (\text{III.6})$$

Avec h_b est la hauteur de la BS entre 10 et 80 m, a , b et c sont des constants dépendant de la catégorie du terrain, dont les valeurs sont données dans le tableau 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.3: Valeurs des paramètres en fonction du type de terrain.

L'effet de masque est donné par le paramètre s , qui suit une distribution log normale. La valeur typique de l'écart type de s est entre 8.2 et 10.6, dépendant du type de terrain et densité d'arbres.

❖ Termes de correction de fréquence et de la hauteur d'antenne réceptrice

Le modèle ci-dessus est valable pour des fréquences proches de 2GHz, et pour des hauteurs d'antennes réceptrices proche de 2 m. dans le but d'utiliser ce modèle pour autres fréquences plus élevées et pour des hauteurs d'antennes 2 et 10 m, on ajoute au modèle ci-dessus des corrections concernant la fréquence et la hauteur de l'antenne réceptrice.

Le modèle de propagation (en dB), avec les termes de correction, sera :

$$L_p = L + \Delta L_f + \Delta L_h \quad (\text{III.7})$$

L : est la perte de chemin précédemment donné.

ΔL_f : est le terme de correction fréquentielle (en dB) donné par :

$\Delta L_f = 6 \cdot \log(f/2000)$ ou f est la fréquence en MHz,

$\Delta L_h = -10.8 \log(h/2)$ pour les catégories A et B,

$\Delta L_h = -20 \log(h/2)$ pour la catégorie C.

Avec : h est la hauteur de l'antenne entre 2 m et 10 m.

III.4 Bilan de Liaison [24]

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, comme il est illustré dans la figure suivant :

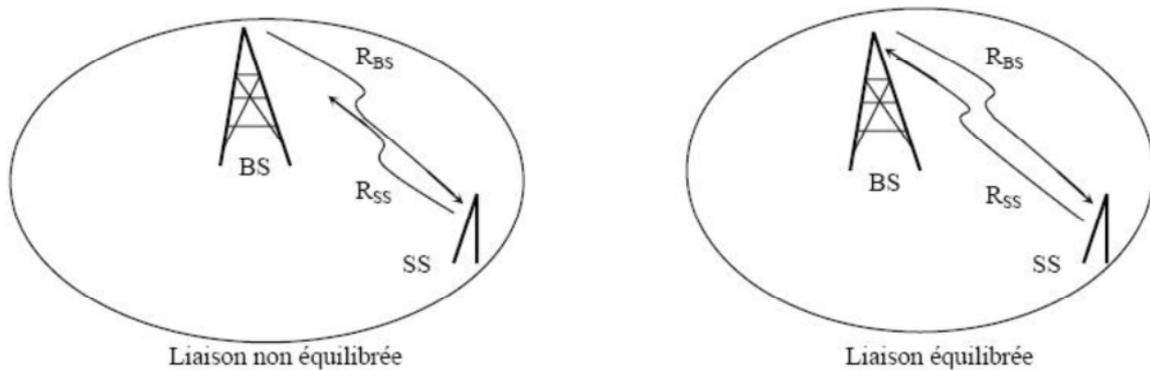


Figure III.1: Equilibrage des liens montants et descendants.

Le but de bilan de liaison est de calculer l'atténuation de parcours maximale permise entre la station de base et le récepteur pour un service donné. L'atténuation de parcours maximale est alors employée pour choisir des antennes et des configurations pour les stations de base, et pour la planification de la puissance de sortie sur les différents canaux des stations de base. L'atténuation de parcours maximale détermine la portée de chaque BS et ainsi sa couverture et le nombre requis de station de base pour couvrir une zone donnée.

III.4.1 Puissance émise

L'élément de base qui doit être calculé pour le bilan de liaison du côté de l'émetteur est la Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente ou (PIRE), elle dépend de la chaîne appareil-câble-antenne.

Donc, l'appareil émetteur émet le signal avec une certaine puissance notée P_e , le câble reliant l'appareil à l'antenne en perd une partie notée L , et l'antenne fournit elle aussi une puissance supplémentaire notée G_e .

En exprimant ces puissances en dB, la PIRE s'obtient par simple addition :

PIRE= Puissance d'émission - Perte de câble + Gain d'antenne émettrice

Soit :

$$\text{PIRE} = P_e - L + G_e \quad (\text{III.8})$$

Dans des systèmes de radiocommunication, le PIRE est la qualité de puissance qui devrait être émise par une antenne isotrope (qui distribue de façon égale la puissance dans toutes les directions) pour produire la densité de puissance maximale observée dans la direction du gain maximum d'antenne.

Pour le décibel c'est une unité exprimant un rapport, autrement dit un gain. Pour des puissances, le calcul est le suivant :

$$\text{dB} = 20 \log_{10}(P1/P2) \quad (\text{III.9})$$

Pour l'appareil émetteur, il s'agit de décibel par rapport au milliwatt (dBm) : dans la formule précédente, $P_2 = 1 \text{ mW}$ et P est la puissance d'émission doit être aussi transformée en mW de l'appareil.

Pour l'antenne, il s'agit de décibel par rapport à un isotrope (dBi). L'isotrope est une antenne théorique parfaite qui émet de façon homogène dans toutes les directions. Le dBi est donc le gain de l'antenne par rapport à un isotrope qui émet la même quantité d'énergie. Les pertes câbles sont exprimées en décibel par mètre (dB/m), donc les pertes totales dues au câble sont calculées ainsi :

$$\text{Pertes câble} = \text{longueur câble} * \text{perte par mètre.}$$

III.4.2 Sensibilité de réception

Pour que le signal reçu soit intelligible par le récepteur, il faut que celui-ci ait une sensibilité suffisante. Là encore, c'est l'ensemble appareil-câble-antenne qu'il faut prendre en compte.

La sensibilité effective R_x est une addition de la sensibilité de l'appareil S_x (une autre caractéristique avec la puissance) et du gain de l'antenne G_s , auxquels on retranche les pertes de câble L .

Le gain de l'antenne et les pertes de câble sont ceux utilisés dans les calculs de puissance précédents.

La puissance effective du signal reçue doit être supérieure à la sensibilité de l'ensemble, faute de quoi le signal ne pourra pas être utilisé.

Donc, l'élément de base qui doit être calculé pour le bilan de liaison du côté du récepteur est la puissance ou la sensibilité minimum reçue de récepteur. La sensibilité du récepteur est

définie comme la quantité de puissance en dBm qu'un détecteur doit recevoir pour réaliser une performance spécifique en bande de base, comme un taux d'erreurs sur les bits spécifié ou un ratio du signal sur bruit.

Cette sensibilité de récepteur (en dBm) sera calculée en utilisant la formule suivante:

$$\text{Avec: } R_x = (E_b / N_0) - 10 \log (W/R_b) + N_w + N_f \quad (\text{III.10})$$

R_x : La sensibilité du récepteur.

E_b/N_0 : Ratio du signal sur bruit (en dB)

W : Bande passante du système (MHz)

R_b : débit symbole (bps)

N_w : Puissance de bruit thermique ; et N_f : Bruit au niveau du récepteur.

III.4.3 Affaiblissement maximum tolérable

La différence entre la puissance de l'émetteur et la sensibilité du récepteur donne l'affaiblissement maximum qu'on peut tolérer. 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.

On prend en considération le marge de liaison M_{Glink} , le marge de fading M_{Gfade} , l'affaiblissement dû au shadowing LSH , et l'affaiblissement dû aux caractéristiques de l'environnement L_{env} , qu'on retranche à l'affaiblissement maximum tolérable, et on obtient l'affaiblissement en ligne déterminant PL, pour "Pertes en Ligne".

$$PL = PIRE - R_x + GSS - LSH - L_{env} - L_r - M_{Glink} - M_{Gfade} \quad (\text{III.11})$$

III.5 Dimensionnement suivant la portée ou la couverture

III.5.1 Détermination de la portée d'une cellule

Pour couvrir une surface, on doit déterminer le nombre de stations de base requises, pour cela le rayon de couverture ou la portée d'une station de base doit être calculé. Il s'agit en premier temps d'estimer l'affaiblissement de parcours maximum en utilisant le bilan de liaison. Ensuite, Il est question de calculer la portée maximale ou le rayon de couverture maximale en utilisant les modèles de propagation conformément au type de terrain d'étude. L'étape suivante consiste à déterminer le nombre de stations de base donne par la formule suivante :

$$\text{Où : } N_{BS} = C_{total}/C_{BS} \quad (\text{III.12})$$

N_{BS} : est le nombre de stations de base requise pour la couverture

C_{total} : est la surface totale à couvrir

C_{BS} : est la couverture d'une station de base basée sur la puissance maximale telle que :

$$C_{BS} = (3 \cdot 3^{1/2} \cdot R_2)/2 \quad (\text{III.13})$$

Ou encore

$$C_{BS} = 2.6R_2 \quad (\text{III.14})$$

Remarque

Au final le nombre de stations de base serait le maximum du nombre issu de la méthode orientée capacité et de celle orientée portée ou bien orientée couverture.

III.5.2 Dimensionnement suivant la capacité

Pour un déploiement limité par la capacité, il est nécessaire de déployer les BS avec un espacement entre les BS suffisant de servir tous les utilisateurs dans le système. Les services supposés à être offerts sont [25] :

Type d'utilisateur	Description du service
Résidentiel	128 Kbps
Résidentiel VOIP	256 Kbps
PME (Petites et Moyennes Entreprises)	0.5 Mbps
Grandes entreprises et Professionnels	1 Mbps

III.5.2.1 Détermination du Trafic par abonné

Généralement, les problèmes de capacité sont inhérents à la liaison descendante (DL), vue l'asymétrie qui domine la plupart des services paquet hauts débits, c'est pour cela que nous nous intéressons au lien descendant lors de l'évaluation des besoins en trafic. Pour une classe donnée l'estimation de la bande requise par abonné est donnée par :

$$\text{TDL/abonné} = \sum_{i=1}^{N_s} D_s - DL * TC/\text{service} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

TDL/abonné : Trafic moyen par abonné pour le lien descendant (Kb/s).

DS-DL : Débit moyen par service.

TC/service : Taux de contention du service.

Ns : Nombre de services dans la classe.

Remarque

La notion de taux de contention pour un service donné est introduite afin de tenir compte du fait que certains types de service présentent un trafic en rafale ce qui est le cas de l'internet. Ce taux dépend des applications et des services demandés par les clients.

Si ces services se limitent à la consultation des emails et à la navigation web, un taux de contention élevé peut être pris et ce à l'encontre des applications gourmandes en bande passante comme la vidéoconférence. Par exemple, si un service est défini avec TC = 1/10, alors la bande passante offerte est partagée entre 10 utilisateurs.

III.5.2.2 Détermination du Trafic agrégé pour une zone donnée

Soit τ_p le taux de pénétration de la technologie WiMAX pour l'opérateur X dans la zone d'étude, Il représente le ratio entre le nombre d'abonnés potentiels et le nombre total d'habitants dans la zone. Soit i le pourcentage d'abonnés de chaque classe d'utilisateurs dans l'ensemble N d'abonnés dans la zone. Nous pouvons alors déterminer le trafic total sur le lien descendant (DL) comme suit:

$$\text{Avec : } D_{DL} = \tau_p * N * \sum_{i=1}^{N_c} \tau_i (TDL/ab)_i \quad (III.16)$$

D_{DL} : Débit total requis sur le DL

TDL/ab : Débit total requis par abonné appartenant à la classe de service i .

III.5.2.3 Détermination de la capacité moyenne par secteur

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

$$N_{\text{secteur}} = \frac{N_{\text{usagers-tot}}}{N_{\text{max-usagers/secteur}}}$$

abonnés sont distribués uniformément dans la zone objet d'étude et qu'ils utilisent tous le même type d'équipement indoor ou outdoor. Si on suppose que :

Le nombre maximum d'utilisateurs pouvant se connecter à un secteur serait calculé de la manière suivante :

$$N_{\max_usages/secteur} = \frac{DR_{moy}/sect}{DDL} \quad (III.17)$$

$N_{\max_usages/secteur}$: Nombre maximum d'utilisateurs supporté par secteur

$DR_{moy}/sect$: Capacité moyenne par secteur

DDL : Besoin en trafic sur le DL

Nous pouvons à partir de cette équation déduire le nombre total de secteurs nécessaires grâce à la formule suivante:

$$N_{secteur} = \frac{N_{usagers-tot}}{N_{\max-usagers/secteur}} \quad (III.18)$$

Avec :

$N_{secteur}$: nombre total de secteurs requis

$N_{usagers - tot}$: Nombre total d'abonnés dans la zone de service

$N_{usagers - tot}$: nombre maximum d'utilisateurs par secteur

A partir du nombre total de secteurs requis et de la configuration de la BS nous pouvons déduire le nombre nécessaire de stations de base :

$$N_{BS} = \frac{N_{secteur}}{N_{secteur/BS}} \quad (III.19)$$

III.6 Débit - Portée

Dans cette section on va utiliser les équations définies précédemment à savoir le path loss et quelques équations du bilan de liaison pour déterminer une relation reliant le débit et la portée.

L'équation correspondante pour $d > d_0$ est :

$$PL = [A + 10\gamma \text{Log}_{10}(d/d_0)] + X_f + X_h + s \quad (III.20)$$

Les paramètres numériques choisis sont consignés dans le tableau ci-après;

Et ainsi, le *path loss* en fonction de la distance se présente de la manière suivante :

Pour un terrain du type A ;

$$PL_A(d) = 47.95 \text{Log}_{10}(0.01d) + 94.76 \text{ (dB)}$$

Pour un terrain type B ;

$$PL_B(d) = 43.75 \text{Log}_{10}(0.01d) + 94.76 \text{ (dB)}$$

Pour un terrain du type C ;

$$PL_c(d) = 41.16 \text{Log}_{10}(0.01d) + 94.76 \text{ (dB)}$$

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les principes du dimensionnement (modèles de propagation, bilan de liaison...), présenté les concepts de base d'un trafic d'une zone donnée, d'où nous déduisons que la prédiction de la couverture et le dimensionnement du trafic sont deux étapes essentielles et complémentaires pour la détermination du nombre des équipements nécessaires pour le déploiement d'un réseau WiMAX.

IV.1 Introduction

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 précédant, 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, ainsi que l'environnement utilisé pour l'élaboration de notre outil de dimensionnement.

Ensuite, nous présenterons nos résultats de simulation avec le simulateur Matlab et analysé en termes de couverture et capacité.

IV.2 Outil de dimensionnement

Nous avons utilisé comme outil de dimensionnement le simulateur Matlab, il permet de réaliser des interfaces graphiques (GUI : Graphical User Interface) en disposant à l'aide de la souris des éléments graphiques (boutons, images, champs de texte, menu déroulants,...). En effet, il aide l'opérateur à calculer et vérifier les paramètres du dimensionnement de réseau WiMAX et par conséquent de garantir une meilleur qualité de services aux clients.

IV.3 Dimensionnement orienté couverture ou portée

IV.3.1 calcul de pertes du chemin

La figure IV.1 représente l'interface calculatrice des pertes de chemin, en calculant ces pertes par un simple clique sur le bouton calculer.

En utilisant les équations (III.1), (III.3) et (III.4) du chapitre III pour le calculer les pertes du chemin pour les différents modèles de propagation.

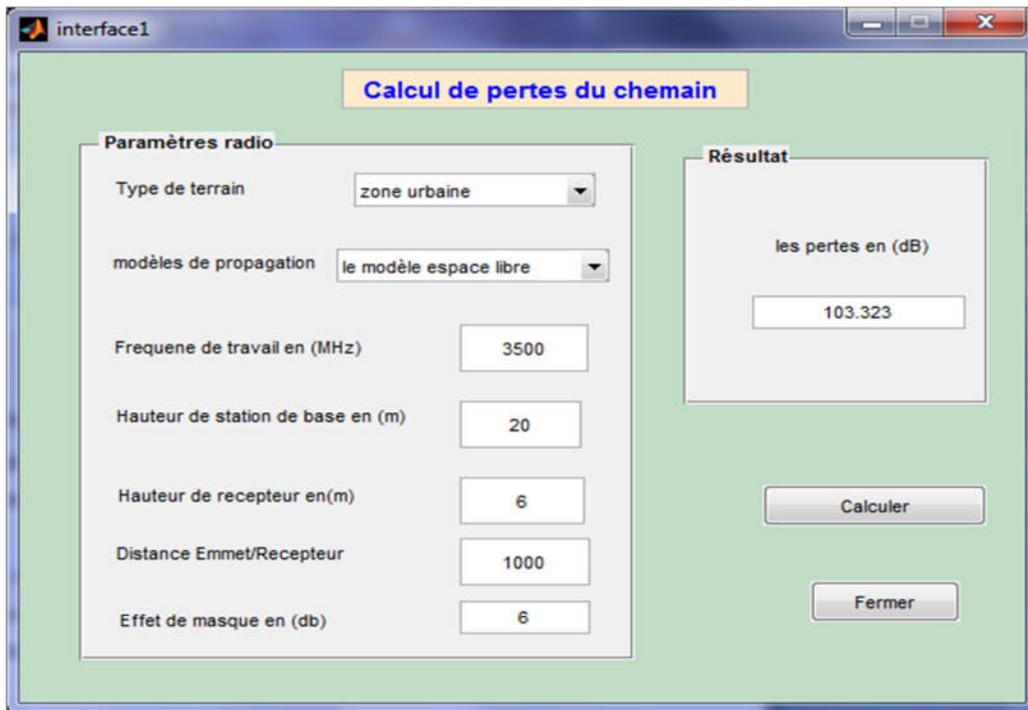


Figure IV.1: Interface calculatrice des pertes du chemin

Les tableaux IV.1 et IV.2 résument les valeurs de ces pertes pour les fréquences 1.9 GHz et 3.5 GHz respectivement.

Les valeurs qu’avec lesquelles on a fait les calculs sont :

- ❖ Hauteur d’antenne d’émission : 20 m,
- ❖ Distance Emetteur/Récepteur : 2000 m, 3000 m et 4000 m,
- ❖ Effet de masque : 6.

Pertes du chemin en (dB)					
Distance Emetteur /Récepteur	Modèle Espace libre	Modèle COST231	Zone Urbaine	Zone S-Urbaine	Zone Rurale
2000	104.037	226.572	144.109	139.491	136.563
3000	107.559	232.978	153.055	147.811	144.487
4000	110.058	237.523	159.401	153.714	150.11

Tableau IV.1 : Pertes du chemin pour une fréquence de 1,9 GHz, l’ hauteur de l’antenne réceptrice est de 2 m.

Distance Emetteur /Récepteur	Pertes du chemin en (dB)				
	Modèle Espace libre	Modèle COST231	Zone Urbaine	Zone S-Urbaine	Zone Rurale
2000	109.344	225.046	174.045	169.427	162.11
3000	112.866	231.452	182.991	177.747	170.034
4000	115.364	235.997	189.338	183.65	175.656

Tableau IV.2 : *Pertes du chemin pour une fréquence de 3,5 GHz,
l' hauteur de l'antenne réceptrice est de 6 m.*

- Pour le modèle **Espace libre** : On remarque que les pertes du parcours sont faibles, ce qui prouve une situation de (LOS) sans obstruction basée sur l'équation de Friis qui montre que la puissance reçue chute beaucoup.
- Pour le modèle **SUI (Erceg)** : On remarque que pour tous les types de terrains les pertes du chemin augmentent par rapport au modèle précédent, ce qui confirme une situation (NLOS) à cause des effets d'obstruction.
- Pour le modèle **Cost 231-Hata** : On remarque une augmentation des pertes du trajet, alors que l'émetteur et le récepteur seraient en environnement (NLOS).

D'après l'analyse des résultats, on constate que pour un environnement (LOS) le modèle Espace libre est spécifié, alors que pour un environnement (NLOS) les modèles SUI (Erceg) et Cost 231-Hata sont adéquats pour prédire ce qu'advientra au signal lors de sa transmission vers le récepteur au niveau d'un réseau WIMAX.

La figure IV.2 illustre la variation des pertes de chemin (path loss) en fonction de la portée et ceci pour les modèles d'Erceg et de propagation en espace libre.

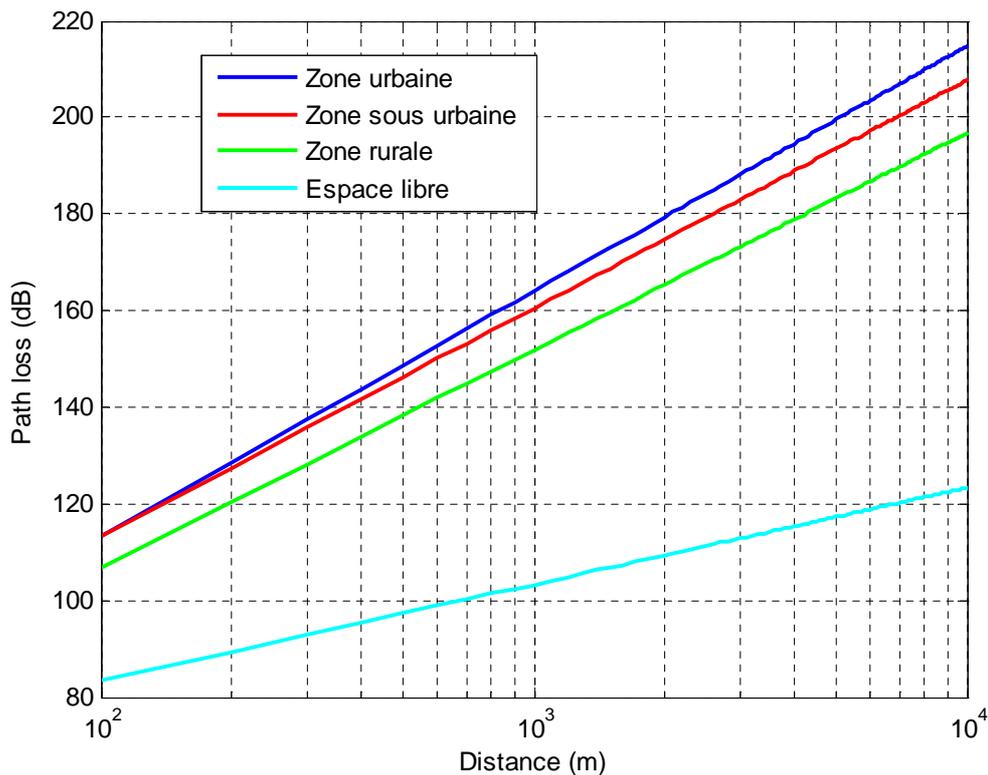


Figure IV.2 : Variation du path loss en fonction de la portée.

L'allure des courbes de la figure IV.2 est croissante. En effet, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente l'affaiblissement du parcours augmente pour les différents modèles de propagation. Ceci est dû aux différents phénomènes physiques radio, tels que le shadowing, la diffraction, la réflexion l'absorption aux quels le signal est sujet lors de sa propagation entre l'émetteur et le récepteur.

IV.3.2 Calcul de la portée de la station de base

❖ Bilan de liaison

Pour un utilisateur désirant commencer par un dimensionnement radio d'une zone bien précise, il est invité à commencer par une étape primordiale qui est l'évaluation du bilan de liaison. Ceci a pour but de déterminer les affaiblissements maximaux tolérés entre la station de base et le récepteur pour un service donné, selon les caractéristiques des équipements qu'il compte utiliser et les marges d'affaiblissement estimées.

On est amené alors à saisir les paramètres du bilan de liaison à savoir :

- Au niveau de l'émetteur : la puissance d'émission, le gain de l'antenne émettrice, et les pertes dues aux câbles.
- Au niveau du récepteur : sa sensibilité, le gain de l'antenne réceptrice, les pertes dues aux câbles et le facteur de bruit.
- Les marges : la marge d'interférence, la marge de Fading et les pertes dues aux pénétrations.

On a introduit les données suivantes afin de calculer le bilan de liaison,

- La puissance d'émission = 3.2 W
- Le gain de l'antenne réceptrice = 13dB
- Les pertes dues aux câbles = 0.5 dB
- Le gain de l'antenne émettrice = 18 dB ainsi que les paramètres de l'OFDM.

The screenshot shows a software window titled "bilandeliaison" with a green background. At the top center, there is a blue button labeled "Calcul du bilan de liaison". Below this, the interface is organized into several sections:

- Paramètres de l'émetteur:** Includes input fields for "Puissance d'émission en(watt)" (3.2), "Gain de l'antenne en (db)" (13), "Perte de câble d'alimentation en (db)" (0.5), and "Perte de coupleure en (db)" (1.6).
- Paramètres radio propagation channel:** Includes input fields for "Nombre total de sous-porteuses" (256), "Nombre utile de sous-porteuses" (192), "Fréquence d'échantillonnage en (MHZ)" (4), "Marge de fading en (db)" (10), and "Marge de liaison en (db)" (6).
- Paramètres du récepteur:** Includes input fields for "Gain de l'antenne en (db)" (18) and "perte de câble d'alimentation en (db)" (0.5).
- Types de modulation:** A dropdown menu currently set to "QPSK-3/4".
- Résultats:** A section at the bottom with three output fields: "Puissance rayonnée isotrope d'émission en (dbm)" (47.5515), "La sensibilité de récepteur en (dbm)" (-86.0288), and "La valeur de perte max de trajet en (dB)" (113.58).

Buttons for "Calculer", "Suivant", and "Annuler" are also visible.

Figure IV. 3: Exemple de bilan de liaison.

Dans l'interface graphique du bilan de liaison de figure IV.3, on a calculé l'affaiblissement maximum tolérable et la sensibilité pour chaque modulation selon le type de codage. Les résultats de simulation sont illustrés dans le tableau IV.3.

Modulation	Rapport signal/bruit (dB)	Sensibilité (dBm)	La valeur du perte de chemin maximale (dB)
BPSK-1/2	6.4	-74.5288	102.08
QPSK-1/2	9.4	-87.8288	115.38
QPSK-3/4	11.2	-86.0288	113.58
QAM-16-1/2	16.4	-80.8288	108.38
QAM-16-3/4	18.2	-79.0288	106.58
QAM-64-2/3	22.7	-74.5288	102.08
QAM-64-3/4	24.4	-72.8288	100.38

Tableau IV.3 : Les valeurs de la sensibilité et l'affaiblissement selon la modulation.

La portée d'une cellule diffère pour chaque modèle de propagation utilisé. Elle dépend fortement de l'environnement de transmission, par exemple pour un environnement rural, où il n'y a pas beaucoup d'obstacles entre la BS et les SS, le modèle de propagation se rapproche de la propagation LOS où on n'a pas que la perte du chemin en espace libre (et celui de pluie s'il existe). Ainsi, on note l'affaiblissement maximum tolérable détermine la portée de chaque station de base et donc la couverture et le nombre requis de station de base pour couvrir une zone donnée.

La figure IV.4 montre l'impact de la hauteur de station de base sur l'affaiblissement et la portée pour trois hauteurs de station de base (5 m, 10 m et 30 m).

On constate une nette augmentation de l'affaiblissement en augmentant la portée, on remarque aussi cet affaiblissement diminue lorsqu'on augmente la hauteur de la station de base, ce qui montre l'effet de la hauteur de la station de base sur l'affaiblissement subi par le signal. En fait, la structure super-cellules, généralement utilisée dans les zones rurales à faible densité d'abonnées, se base sur un nombre limité de sites qui sont hauts, le principal objectif étant d'assurer la plus grande couverture possible. Pour les zones urbaines denses, les supports sont généralement les plus courts afin de limiter l'effet d'interférence.

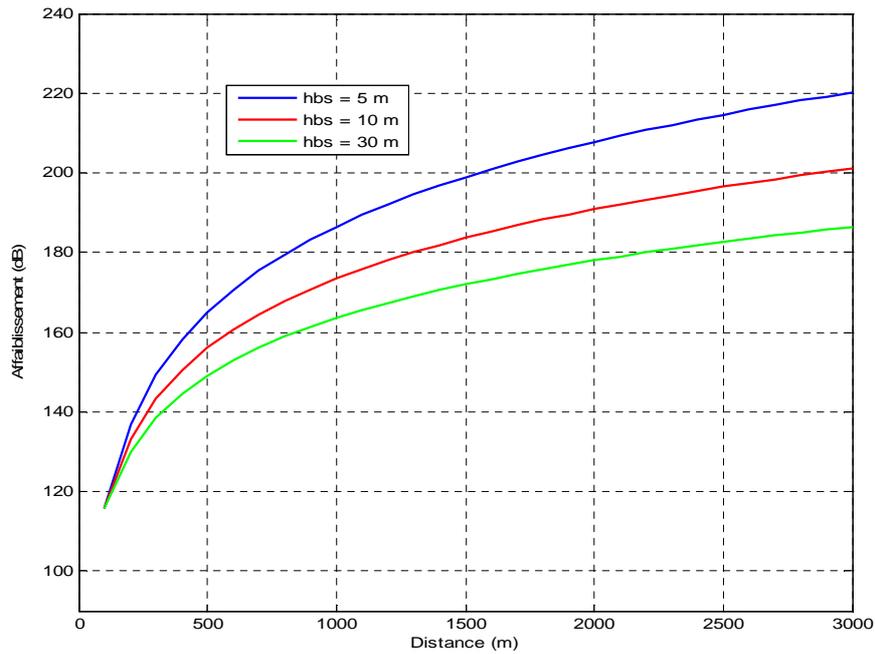


Figure IV.4 : Variation de l’affaiblissement en fonction de la portée.

La figure IV.5 représente la variation de l’affaiblissement en fonction de hauteur de l’antenne réceptrice pour le modèle de propagation d’Erceg, la hauteur de station de base est fixée à 20 m :

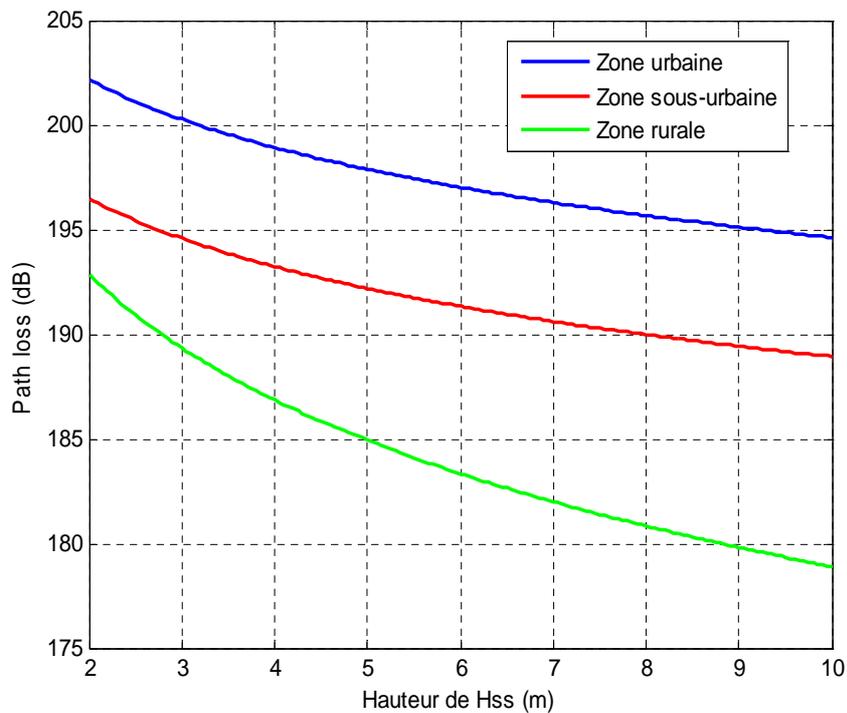


Figure IV.5 : Variation du path loss en fonction de la hauteur d’antenne réceptrice

La figure IV.6 montre la variation de l'affaiblissement en fonction l'hauteur de l'antenne réceptrice pour trois valeurs de la portée (2000 m, 3000 m et 4000 m).

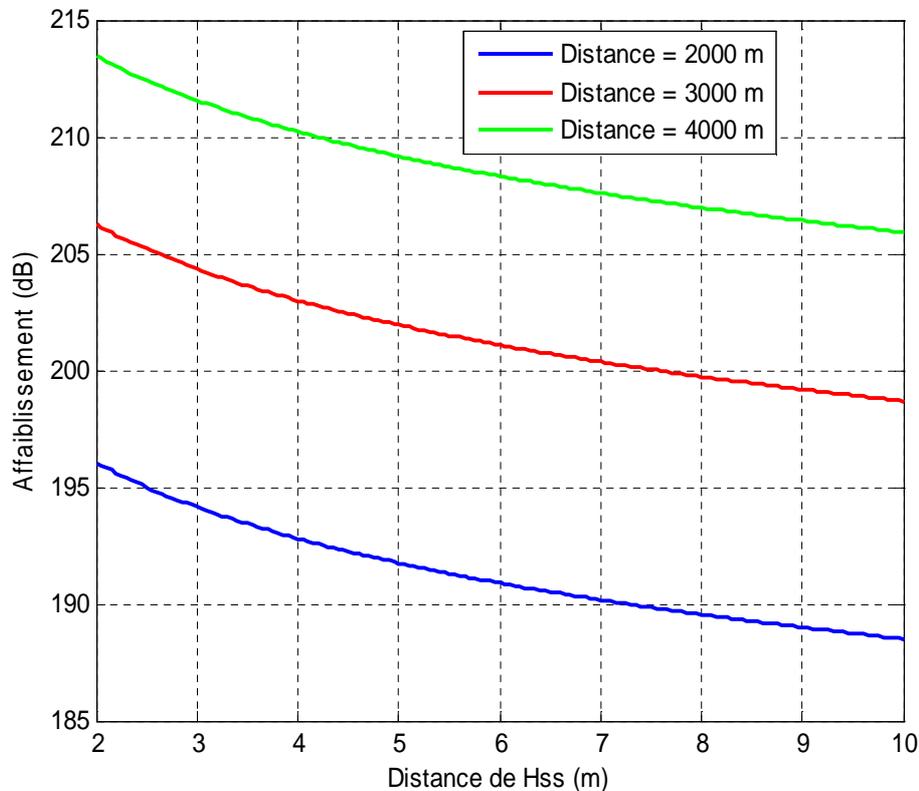


Figure IV.6 : Variation de l'affaiblissement en fonction de l'hauteur de l'antenne réceptrice, pour différentes portées (2000, 3000 et 4000 m).

On constate que l'affaiblissement diminue avec l'augmentation de la hauteur de l'antenne réceptrice et ceci pour les trois types de terrains (figure IV.5). Pour la figure IV.6, là encore on remarque que l'affaiblissement diminue avec l'augmentation de la hauteur de l'antenne réceptrice pour les trois valeurs de la portée (2000, 3000 et 4000 m), en effet, dès qu'on s'éloigne de la station de base la distance augmente, la puissance du signal augmente et l'affaiblissement de parcours diminue. Ainsi, lorsque la distance par rapport à la station de base augmente, les performances de la BS diminuent (en général).

Nous présentons dans la figure IV.7 l'évolution du débit en fonction de la portée pour les trois types de terrains (zone urbaine, zone s-urbaine et zone rurale).

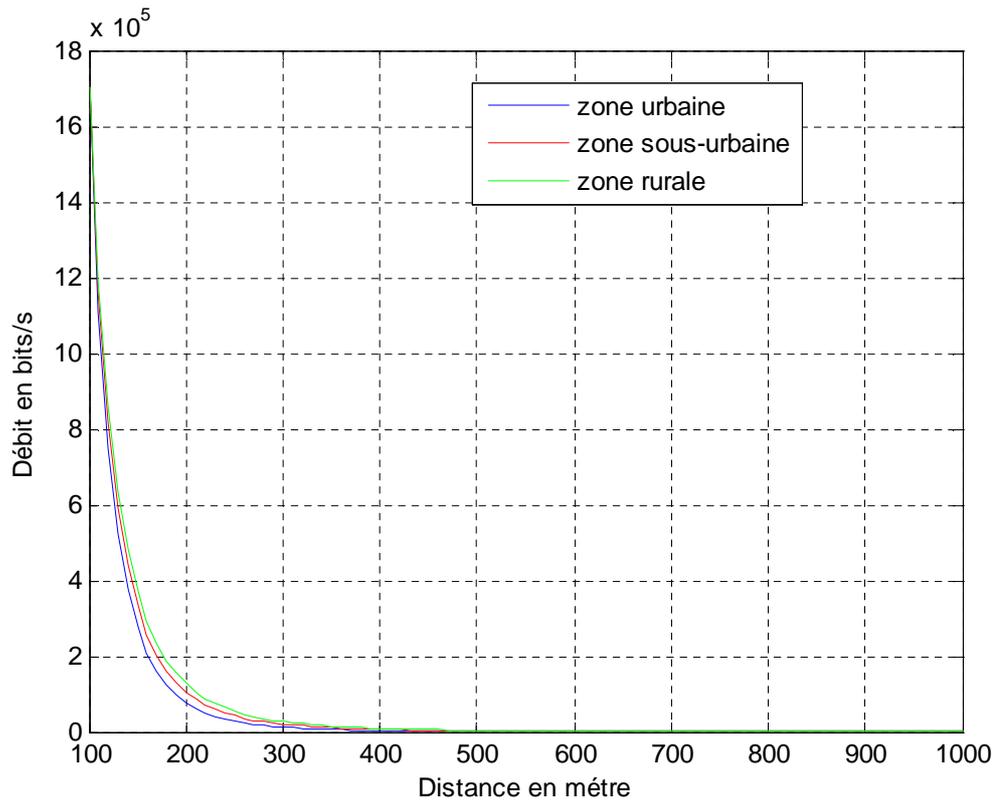


Figure IV.7 : Evolution du débit en fonction de la portée.

L'allure des courbes de la figure IV.7 est décroissante. En effet, des qu'on s'éloigne de la station de base la distance augmente, la puissance du signal diminue et par conséquent l'affaiblissement de parcours augmente. On remarque aussi que le terrain de type (A) présente un débit faible puisqu'on lui associe l'affaiblissement le plus important et la portée augmente pour (B) et (C) qui possèdent des affaiblissements moins importants. Ceci est dû aux différents phénomènes physiques radio tels que le *shadowing*, la diffraction, la réflexion, l'absorption...auxquels le signal est sujet lors de sa propagation entre l'émetteur et le récepteur.

❖ Nombre de station de base à déployé

Nous représentons dans la figure IV.8 l'interface graphique pour extraire le nombre de station de base nécessaire afin d'assurer la couverture d'une zone donnée.

Détermination du nombre de station de base à déployer	
Paramètres	
La surface de la zone a couvrir (m ²)	98
Le rayon de couverture d'une station de base (m)	1.686
Calculer	
Résultats	
Surface de couverture d'une BS (m ²)	7.39075
Nombre de station de base	13.2598

Figure IV.8 : Interface calculatrice du nombre de station de base

L'outil prévoit qu'il nous faut 14 stations de base afin de satisfaire la couverture totale. En fait, il est très important de déterminer le nombre des stations de base pour bien optimiser le réseau et diminuer le coût de l'équipement.

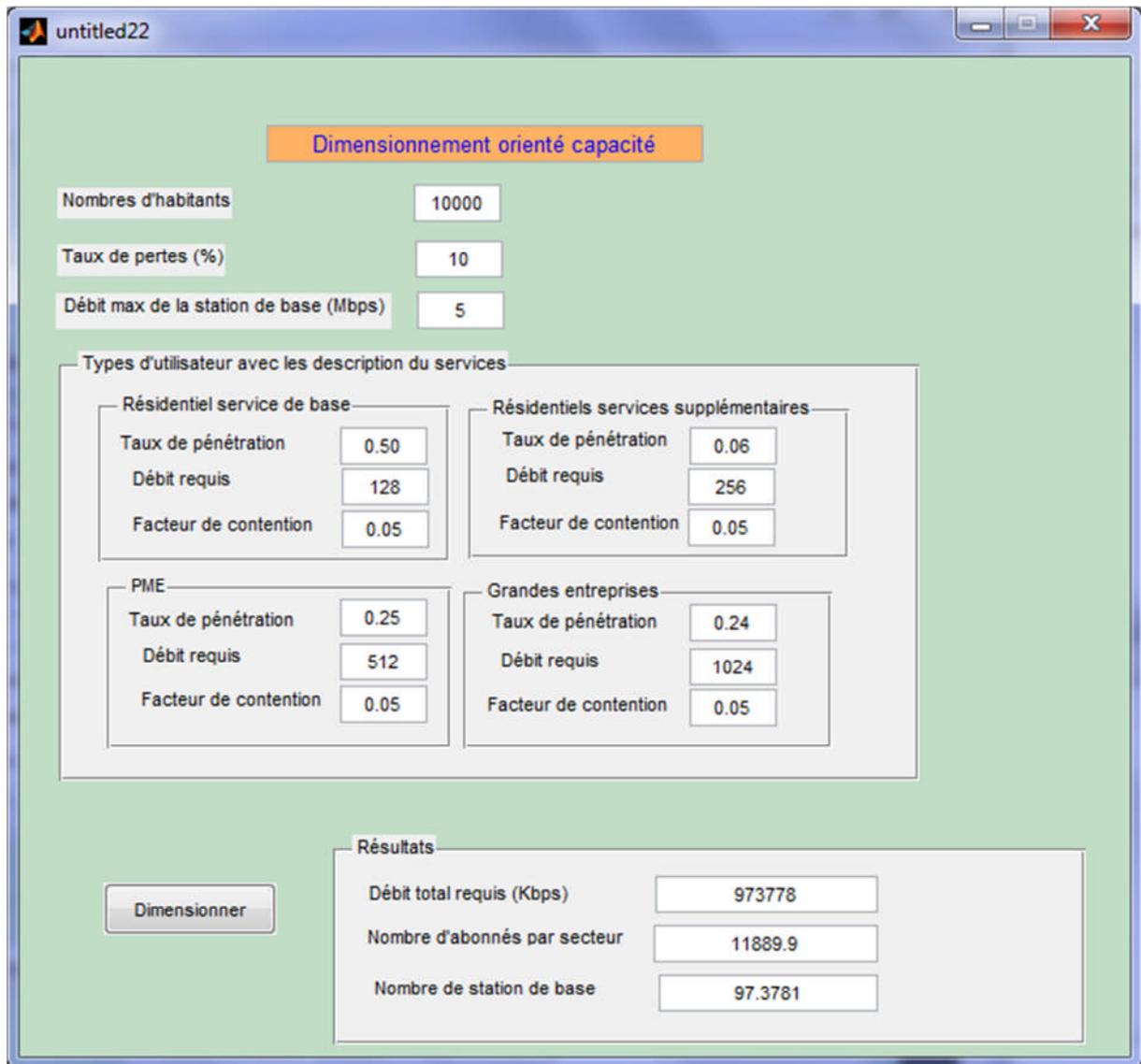
Aussi, l'augmentation du rayon est importante pour la minimisation du nombre de cellules de la zone à couvrir.

IV.4 Dimensionnement orienté capacité

Une fois qu'on a fini avec le dimensionnement suivant couverture ou portée, on passe à la deuxième étape; ce qui est le dimensionnement suivant la capacité.

L'utilisateur est invité à fixer les spécifications des abonnés en saisissant les taux de contention de chaque service.

L'outil va calculer le débit requis par chaque service, puis le débit total requis. Enfin, par simple division de ce débit total par le débit maximal qu'elle peut offrir une BS, la modulation adoptée est BPSK et le débit maximal qu'elle peut offrir une BS est de 5 Mbit/s) on peut déterminer le nombre de stations de base nécessaire noté (NBS) capacité. Ce calcul a été fait avec un taux de perte égal à 10%.



Dimensionnement orienté capacité

Nombres d'habitants: 10000

Taux de pertes (%): 10

Débit max de la station de base (Mbps): 5

Types d'utilisateur avec les description du services

Type d'utilisateur	Taux de pénétration	Débit requis	Facteur de contention
Résidentiel service de base	0.50	128	0.05
Résidentiels services supplémentaires	0.06	256	0.05
PME	0.25	512	0.05
Grandes entreprises	0.24	1024	0.05

Dimensionner

Résultats

Débit total requis (Kbps)	973778
Nombre d'abonnés par secteur	11889.9
Nombre de station de base	97.3781

Figure IV.9 : Interface calculatrice du nombre de la capacité.

Finalement on va comparer les deux valeurs du nombre de stations de bases obtenues lors de la considération du dimensionnement suivant la capacité et suivant la couverture; celle qui nous intéresse, c'est la valeur la plus grande.

Remarque : Le dimensionnement d'un réseau sans fil est un processus durable, donc le nombre final des sites ne considère pas, seulement, la couverture et la capacité. Mais, aussi, il considère le développement durable de déploiement de l'infrastructure du réseau.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné le réseau WiMAX en termes couverture et capacité. Autrement dit, nous avons calculé le nombre de station de base en utilisant deux approches : dimensionnement orienté couverture et capacité. Nous avons aussi étudié l'impact certains paramètres radio tels que la distance émetteur/récepteur, la hauteur de station de base et la hauteur de l'antenne réceptrice sur les pertes de chemin. Le bilan de liaison et l'évolution du débit en fonction de la portée ont été traités. À l'aide du l'outil Matlab on a pu déterminer les performances qu'on peut avoir en installant un réseau WiMAX fixe.

Conclusion générale

Ces dernières années ont connu un essor sans précédent dans les nouvelles technologies de communications et ceci notamment grâce au développement de l'internet.

Face à l'explosion de la demande d'accès au haut débit et notamment dans les situations de mobilité, plusieurs réseaux radio en développement actuellement permettent d'offrir des capacités haut débit pour l'offre des services.

L'objectif principal de notre travail est de dimensionner un réseau WiMAX fixe. Pour cela, nous avons commencé par présenter le réseau d'accès à large bande WiMax, son émergence et ses spécificités ainsi que l'évolution de sa norme 802.16x.

C'est de ce fait là qu'on a entamé le second chapitre et qui concerne la présentation des différentes couches protocolaires, les techniques de multiplexage et de modulation.

En troisième chapitre, nous avons étudié, les différentes étapes de dimensionnement proprement dite qu'il suit un operateur pour déployer son réseau. On a commencé par citer les différents modèles de propagation en déterminant les pertes de chemin pour chaque type de modèle, puis nous avons cerné aussi les différents paramètres du bilan de liaison et les paramètres de services pour aboutir à un calcul du nombre nécessaire de stations de base.

En quatrième chapitre, nous avons mis en place un outil de dimensionnement d'un réseau WiMAX , a comme entrée un environnement radio, modèle de trafic, densité d'abonnés et comme sortie, une architecture et dimensionnement du réseau. Ainsi, nous avons étudié l'effet de certains paramètres radio tels que la distance émetteur/récepteur, la hauteur de station de base et la hauteur de l'antenne réceptrice sur les pertes de chemin

Ce projet nous a permis de montrer le processus de dimensionnement du réseau WiMAX en termes couverture et capacité.

Glossaire

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line
ASN: Access Service Network
ASP: Application Service Provider
BLR Boucle Locale Radio
BS Base Station (station de base)
CP: Cyclic Prefix
CPE Customer Premise Equipment (équipement d'accès client)
CSN: Connectivity Service Network
DL: Downlink
DSL: Digital Subscriber Line
ETSI: European Telecommunications Standards Institute
FDD: Frequency Division Duplex
FFT : Fast Fourier Transform
FTP: File Transfer Protocol
HiperMAN :High Performance Metropolitan Area Network
LAN Local Area Network
LOS: Line of Sight
MAC: Media Access Control
MAN: Metropolitan Area Network
MAP: Media Access Protocol
MIMO: Multiple Input Multiple Output
MS: Mobile Station
NLOS: Non Line-of-Sight
NSP: Network Service Provide
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PIRE : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QoS : Qualiti of Service
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying
SC: Signal Carrier

SOFDMA: Scalable OFDMA

SNR: Signal to Noise Ratio

TDD: Time Division Duplex

TDMA : Time Division Multiple Access

UL: Uplink

WiFi: Wireless Fidelity

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN : Wireless Local Area Network

WMAN : Wireless Metropolitan Area Network

Bibliographie

- [1] <http://fr.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
- [2] BENHAMZA AISSA, Institut National des Télécommunicationset des Technologies de l'Information et de la Communication,Projet de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôméd'ingénieur d'état 'Planification d'un réseau WIMAX mobile'2009.
- [3] OULD BAMBA MOHAMED,ABDEL FETTAH,'Développement d'un Outil de planification
- [4] “WiMax Network Planning”, Master Thesis COM Research Center Technical, University of Denmark August 31, 2005.
- [5] PFE Maatalla Moez Sup'Com juin 2006
- [6] [http://molecular voices.molecular.com /2007/Wimaax-redefing-commectivity](http://molecularvoices.molecular.com/2007/Wimaax-redefing-commectivity)
- [7] PFE Maatalla Moez Sup'Com juin 2006
- [8] <www.wimaxforum.org/join/Governing_Documents>
- [9] www.ieee802.org/16
- [10] <http://www.futura-sciences.com/>
- [11] WiMAX Forum White Paper : “WiMAX’s technology for LOS and NLOS environments”, August2004.
<http://www.wimaxforum.org/news/downloads/WiMAXNLOSgeneralversionaug04.pdf>
- [12] David A Castelow, “Sample Rates in OFDM PHY”, IEEE, Novembre 2003.
- [13] WiMAX Forum White Paper: “Mobile WiMAX-Part I: A technical Overview and Performance Evaluation”, Fevrier 2006
- [14] WiMAX Forum White Paper: “Mobile WiMAX-Part I: A technical Overview and Performance Evaluation”, Fevrier 2006

- [15] PFE Bouhli Khaoula Sup'Som juin 2006 Evaluation des mécanismes de QoS du réseau WiMAX
- [16] HWAS MOHAMED WAJIH, ''Etude et dimensionnement d'un réseau WiMAX dans un concept IMS'', Rapport de projet de fin d'étude, école supérieur des télécommunication de tunis, 2007.
- [17] www.lirmm.fr/~laffargue/teaching/PPD/réformes_fiscales
- [18] HWAS MOHAMED WAJIH, ''Etude et dimensionnement d'un réseau WiMAX dans un concept IMS'', Rapport de projet de fin d'étude, école supérieur des télécommunication de tunis, 2007.
- [19] www.ieee802.org/16
- [20] Harry R. Anderson, Fixed Broadband Wireless System Design, 2005
- [21] <http://www.01net.com/>
- [22] SIEMENS, document technique, 06/2007
- [23] NOUN Ziad, ''Analyse et conséquences de la gestion des ressources radio dans la technologie WiMAX/IEEE 802.16'', DEA RES05, 2005
- [24] OULD BAMBA MOHAMED, ABDEL FETTAH, ''Développement d'un Outil de planification
- [25] Frank Ohrtman, ''Building 802.16 Wireless Networks'', 2006

Résumé

Le WIMAX (pour Worldwide Interoperability for Microwave Access) est une famille des normes, dont la norme 802.16 fait partie, définissant les connexions à haut-débit par voie hertzienne. C'est une nouvelle technologie sans fil métropolitaine. Elle offre, théoriquement, un débit maximal de 70Mbps et une portée maximale de 50 Km. Elle dispose d'un ensemble de techniques hertziennes permettant de connecter un utilisateur distant au réseau IP par l'intermédiaire d'un lien radio.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le dimensionnement de réseau WiMAX fixe. Dans ce cadre, un outil de dimensionnement en termes couverture et capacité a été implémenté sous Matlab. Cet outil a été exploité pour examiner l'influence de certains paramètres radio qui impactent les performances de réseau WiMAX tels que la distance entre l'émetteur et le récepteur, la hauteur de station de base et de l'antenne réceptrice.

Mots clés : WiMAX, IEEE 802.16x, Dimensionnement, Capacité, Couverture.