

## TABLE DES MATIERES

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>                                                                   | <b>i</b>  |
| <b>NOTATIONS ET ABREVIATIONS.....</b>                                                       | <b>v</b>  |
| <b>GLOSSAIRES .....</b>                                                                     | <b>x</b>  |
| <b>INTRODUCTION.....</b>                                                                    | <b>1</b>  |
| <b>CHAPITRE 1 GENERALITE SUR LA TECHNOLOGIE WIMAX ET LA NORME IEEE 802.16.....</b>          | <b>2</b>  |
| <b>1.1 Introduction.....</b>                                                                | <b>2</b>  |
| <b>1.2 Présentation de la technologie WIMAX.....</b>                                        | <b>2</b>  |
| <i>1.2.1 Historique et évolution.....</i>                                                   | <i>2</i>  |
| <i>1.2.2 WiMAX et les réseaux sans fils.....</i>                                            | <i>3</i>  |
| <i>1.2.3 Le réseau d'accès BLR en WIMAX.....</i>                                            | <i>7</i>  |
| <b>1.3 WIMAX et la norme IEEE 802.16.....</b>                                               | <b>8</b>  |
| <i>1.3.1 Les différents standards de 802. 16.....</i>                                       | <i>8</i>  |
| <i>1.3.2 Architecture générale des réseaux WIMAX suivant les couches de 802.16.....</i>     | <i>9</i>  |
| <i>1.3.3 Domaines d'applications WiMAX.....</i>                                             | <i>19</i> |
| <b>1.4 Conclusion.....</b>                                                                  | <b>20</b> |
| <b>CHAPITRE 2 METHODOLOGIE ET MODELISATION DANS LA PLANIFICATION D'UN SYTEME WIMAX.....</b> | <b>21</b> |
| <b>2.1 Introduction.....</b>                                                                | <b>21</b> |
| <b>2.2 Description d'une méthodologie de planification.....</b>                             | <b>21</b> |
| <b>2.3 Concepts basiques et caractérisation du canal radio.....</b>                         | <b>22</b> |
| <i>2.3.1 Phénomène de propagation à grande échelle.....</i>                                 | <i>22</i> |
| <i>2.3.2 Phénomène de propagation à petite échelle.....</i>                                 | <i>23</i> |
| <i>2.3.3 Perte de multi-trajet.....</i>                                                     | <i>23</i> |
| <i>2.3.4 Effet Doppler.....</i>                                                             | <i>24</i> |
| <b>2.4 Outils dans un modèle de planification de système WiMAX.....</b>                     | <b>24</b> |
| <i>2.4.1 Modélisation de la couche PHY.....</i>                                             | <i>24</i> |
| <i>2.4.2 Modélisation de la couche MAC.....</i>                                             | <i>34</i> |

|                                                                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.3 Conclusion.....                                                                                                                   | 43        |
| <b>CHAPITRE 3 EVALUATION DE PERFORMANCE D'UN RESEAU WIMAX .....</b>                                                                     | <b>44</b> |
| 3.1 QoS dans le réseau.....                                                                                                             | 44        |
| 3.1.1 Réalité sur le réseau.....                                                                                                        | 44        |
| 3.1.2 Les principales métriques liées à la QoS .....                                                                                    | 45        |
| 3.1.3 Gestion de QoS dans WIMAX .....                                                                                                   | 46        |
| 3.2 Principe d'études des performances .....                                                                                            | 47        |
| 3.2.1 Indicateurs de performance.....                                                                                                   | 48        |
| 3.2.2 Caractérisation de la performance en WIMAX .....                                                                                  | 54        |
| 3.3 Analyse des performances du réseau .....                                                                                            | 56        |
| 3.3.1 Niveau de couverture selon le choix de la réutilisation de fréquence.....                                                         | 56        |
| 3.3.2 Niveau de trafic .....                                                                                                            | 61        |
| 3.4 Conclusion.....                                                                                                                     | 62        |
| <b>CHAPITRE 4 AMELIORATION DU TRAFIC AU MIEUX PAR LES TECHNIQUES<br/>D'AJUSTAGES AVANCEES ET D'ORDONNANCEMENT DE RESSOURCES RADIO .</b> | <b>63</b> |
| 4.1 Généralité.....                                                                                                                     | 63        |
| 4.2 Amélioration des performances en Reuse 1 avec beamforming adaptatif .....                                                           | 63        |
| 4.2.1 Introduction .....                                                                                                                | 63        |
| 4.2.2 Principe et condition.....                                                                                                        | 64        |
| 4.2.3 Application des permutations de sous porteuses sur le beamforming.....                                                            | 66        |
| 4.2.4 Simulation.....                                                                                                                   | 67        |
| 4.2.5 Conclusion partielle.....                                                                                                         | 70        |
| 4.3 Amélioration des performances par les modèles de trafic au mieux (BE) pour les réseaux<br>WiMAX .....                               | 70        |
| 4.3.1 Modélisation en mono profile.....                                                                                                 | 71        |
| 4.3.2 Modélisation en multi profile .....                                                                                               | 72        |
| 4.3.3 Principe.....                                                                                                                     | 74        |
| 4.3.4 Modèle analytique de Markov .....                                                                                                 | 75        |
| 4.3.5 Politique d'ordonnancement conventionnel.....                                                                                     | 76        |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 4.3.6 Politique d'étranglement.....   | 78 |
| 4.3.7 Paramètres de performances..... | 79 |
| 4.3.8 Simulation.....                 | 83 |
| 4.3.9 Conclusion partielle.....       | 88 |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....      | 89 |
| ANNEXE 1.....                         | 90 |
| ANNEXE 2 .....                        | 92 |
| BIBLIOGRAPHIE.....                    | 94 |
| FICHE DE RENSEIGNEMENTS .....         | 98 |
| RESUME.....                           | 99 |
| ABSTRACT .....                        | 99 |

## NOTATIONS ET ABBREVIATIONS

### 1. Minuscules latines

|              |                                                                                              |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $h_b$        | Hauteur de la station de base.                                                               |
| $f$          | Fréquence.                                                                                   |
| $h_m$        | Hauteur de la station mobile.                                                                |
| $r(t)$       | Signal de réception.                                                                         |
| $a_{n,Sh}^0$ | Facteur de masque (log-normal) sur le signal reçu de la BS serveuse.                         |
| $a_{n,FF}^0$ | Facteur d'évanouissement rapide (Rician/Rayleigh) sur le signal reçu de la BS serveuse.      |
| $d^0$        | Distance entre SS ou MS et la BS serveuse.                                                   |
| $p_k$        | Probabilité de bits par slot pour chaque modulation MCS de type k.                           |
| $m_k$        | Quantité de bits par slot pour chaque modulation MCS de type k.                              |
| $n_t$        | Nombre d'antenne de transmission d'une station de base.                                      |
| $x^{ron}$    | Volume moyen de données à télécharger par un usager de classe r.                             |
| $t^{roff}$   | Temps de lecture d'un usager de classe r.                                                    |
| $\bar{m}(n)$ | Nombre moyen de bits par slot quand il y a n stations mobiles actives pendant une trame TDD. |
| $n$          | Nombre de MS actifs dans une trame TDD.                                                      |

### 2. Majuscules latines

|           |                                                                             |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $L_{uM}$  | Affaiblissement en milieu urbain du modèle de propagation macro cellulaire. |
| $L_p$     | Affaiblissement de propagation.                                             |
| $E_b/N_0$ | Rapport entre l'énergie binaire du signal et l'énergie du bruit.            |
| $N_c$     | Nombre de cellules dans un cluster réseau.                                  |

|              |                                                                    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------|
| $N_t$        | Nombre de secteurs dans une cellule.                               |
| $N_f$        | Réutilisation fréquentielle intra cellulaire.                      |
| $P_{n,Tx}$   | Puissance rms transmise par sous porteuse dans une cellule.        |
| $W_{sc}$     | Bande passante d'une sous-porteuse.                                |
| $SINR_{eff}$ | Taux effectif de signal sur bruit avec interférences.              |
| $C_n$        | Capacité de la n-ième sous porteuse.                               |
| $T_F$        | Durée d'une trame.                                                 |
| $N_{sc}$     | Nombre total de sous porteuse utilisée avec BWT (données+pilotes). |
| $N_{sch}$    | Nombre total de sous canaux correspondant à BWT.                   |
| $\bar{U}$    | Utilisation moyenne des ressources.                                |
| $\bar{Q}$    | Nombre moyen d' usagers actifs supportés par le système.           |
| $\bar{X}$    | Débit moyen offert par le système.                                 |
| $N_s^{(k)}$  | Nombre de slots alloués aux MS utilisant $MCS_k$ .                 |
| $N_s$        | Nombre total de slots pour chaque usager.                          |
| $\vec{N}$    | Population vecteur de MS en trafic multi profile.                  |

### 3. Minuscules grecques

|                |                                                     |
|----------------|-----------------------------------------------------|
| $\alpha$       | Constantes du modèle d'affaiblissement de parcours. |
| $\sigma_{sh}$  | Déviation standard en masquage log normal.          |
| $\mu(n)$       | Taux de départ.                                     |
| $\pi(\vec{n})$ | Probabilité d'état stable.                          |

### 4. Abreviations

|     |                                              |
|-----|----------------------------------------------|
| AAA | Authentification, Authorization, Accounting. |
|-----|----------------------------------------------|

|            |                                                  |
|------------|--------------------------------------------------|
| AAD        | Advanced Antenna Diversity.                      |
| AAS        | Adaptive Antenna System.                         |
| ADSL       | Asymmetric Digital Subscriber Line.              |
| AMC        | Adaptive Modulation and Coding.                  |
| ARQ        | Automatic Repeat Request.                        |
| ASN        | Access Service Network.                          |
| ASN-GW     | Access Service Network Gateway.                  |
| BE         | Best Effort.                                     |
| BER        | Bit Error Rate                                   |
| BLR        | Boucle Locale Radio.                             |
| BPSK       | Binary Phase Shift Key.                          |
| BS         | Base Station.                                    |
| BWA        | Broadband Wireless Access.                       |
| CC         | Convolutional Code.                              |
| CDMA       | Coding Division Multiplexing Access.             |
| CID        | Connection Identifier.                           |
| CQICH      | Channel Quality Indicator Channel.               |
| CSN        | Core Service Network.                            |
| CTMC       | Continuous Time Markov Chain                     |
| DAB        | Digital Audio Broadcasting                       |
| DAB-S      | Satellite Digital Audio Broadcasting             |
| DAB-T      | Terrestrial Digital Video Broadcasting           |
| <i>DBR</i> | Delivered Bit Rate.                              |
| DVB        | Digital Video Broadcasting.                      |
| DL-MAP     | Downlink MAP.                                    |
| DVB-H      | Handheld Digital Video Broadcasting.             |
| DVB-T      | Terrestrial Digital Video Broadcasting.          |
| ertPS      | Extended Real Time of Polling Service.           |
| ETSI       | European Telecommunications Standards Institute. |
| FDD        | Frequency Division Duplex.                       |
| FDMA       | Frequency Division Multiplexing Access.          |

|       |                                                    |
|-------|----------------------------------------------------|
| FEC   | Forward Error Correction                           |
| FFT   | Fast Fourier Transform.                            |
| FUSC  | Full Usage of Sub Channel.                         |
| GPRS  | General Packet Radio Service.                      |
| HARQ  | Hybrid Automatic Repeat Request.                   |
| HUMAN | Highspeed Unlicensed Metropolitan Area Network.    |
| HSDPA | High Speed Downlink Packet Access                  |
| IEEE  | Institute of Electrical and Electronics Engineers. |
| KPI   | Key Performance Indicator.                         |
| LOS   | Line Of Sight.                                     |
| LTE   | Long Term Evolution.                               |
| MAC   | Medium Access Controller.                          |
| MAP   | Media Access Protocol.                             |
| MBS   | Multicast and Broadcast Service.                   |
| MCS   | Modulation and Coding Scheme.                      |
| MIC   | Mean Instantaneous Capacity                        |
| MIMO  | Multi In Multi Out                                 |
| MS    | Mobile Station.                                    |
| MSTR  | Maximum Sustained Traffic Rate                     |
| NLOS  | Non Line Of Sight.                                 |
| nrtPS | Non Real Time of Polling Service.                  |
| OFDM  | Orthogonal Frequency Division Multiplexing.        |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access. |
| OSI   | Open Systems Interconnection.                      |
| PDU   | Protocol Data Unit.                                |
| PL    | PathLoss.                                          |
| PSK   | Phase Shift Keying.                                |
| PUSC  | Partial Usage of Sub Channel.                      |
| QAM   | Quadrature Amplitude Modulation.                   |
| QoS   | Quality Of Service.                                |
| QPSK  | Quadrature Phase Shift Key.                        |
| RS    | Reed Solomon Code.                                 |

|       |                                                  |
|-------|--------------------------------------------------|
| rtPS  | Real Time of Polling Service.                    |
| SS    | Subscriber Station.                              |
| TDD   | Time Division Duplex.                            |
| TDMA  | Time Division Multiplexing Access.               |
| TFD   | Transformée de Fourier Directe                   |
| UE    | User Equipment.                                  |
| UGS   | Unsolicited Grant Service.                       |
| UHF   | Ultra High Frequency.                            |
| UMTS  | Universal Mobile Telecommunication system.       |
| VoIP  | Voice over IP.                                   |
| WiFi  | Wireless Fidelity.                               |
| WiMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access. |
| WLAN  | Wireless Local Area Network.                     |
| WMAN  | Wireless Metropolitan Area Network.              |
| WPAN  | Wireless Personal Network.                       |
| WRAN  | Wireless Regional Area Network.                  |
| WWAN  | Wireless Wide Area Network.                      |



## GLOSSAIRES

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 802.11                   | Dénomination du standard imposé pour le WiFI.                                                                                                                                                                                                                                         |
| 802.16                   | Dénomination du standard imposé pour le WiMAX.                                                                                                                                                                                                                                        |
| 802.16a                  | Dénomination du standard imposé pour le WiMAX fixe.                                                                                                                                                                                                                                   |
| 802.16d                  | Dénomination du standard imposé pour le WiMAX à antenne interne.                                                                                                                                                                                                                      |
| 802.16e                  | Dénomination du standard imposé pour le WiMAX mobile.                                                                                                                                                                                                                                 |
| ARQ                      | Mécanisme permettant à associer le mécanisme de correction d'erreur à la modulation et au codage.                                                                                                                                                                                     |
| Beamforming              | Méthode où les signaux ne sont pas émis de façon omnidirectionnelle mais avec des rayons (Beam) individuels formés par un réseau d'antennes pour chaque station mobile                                                                                                                |
| Best Effort              | Classe de service dédiée au trafic internet ; elle ne propose aucune garantie de bande passante ou de temps réel.                                                                                                                                                                     |
| Contention-based polling | Mécanisme d'allocation où une certaine quantité de chaque sous trame UL (appelée contention part) est allouée pour envoyer des requêtes basées contention s'il n'y a pas de bande passante suffisante pour scruter les SS individuellement et que si quelques SS ou MS sont inactifs. |
| Downlink                 | Voie descendante d'un signal.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Handover                 | Procédure où lorsque le mobile est en communication avec une station de base sur un lien dédié, qu'il se déplace et qu'une autre station de base prend le relais sur un autre lien dédié.                                                                                             |
| Hotspots                 | Liaison Wi-Fi à Internet non pas par des dorsales filaires (ADSL notamment), mais par une dorsale hertzienne.                                                                                                                                                                         |
| Idle Mode                | Modes d'opérations de gestion de puissance fournissant aux SS un mécanisme périodique de trafic broadcast de messages valables qu'en DL et sans registration de la BS spécifique.                                                                                                     |

|                         |                                                                                                                                                                          |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KPI                     | Indicateurs que l'on mesure ou que l'on prend pour obtenir une valeur afin d'analyser la performance du réseau et de connaître son état.                                 |
| Last mile               | Partie terminale du réseau d'accès de l'opérateur.                                                                                                                       |
| Monoprofile             | Type de trafic qui n'englobe qu'une seule classe de trafic d'utilisateurs Best Effort                                                                                    |
| Multiprofile            | Type de trafic qui englobe différentes classes d'utilisateurs Best Effort dont chaque classe est spécifique d'un certain profil de trafic                                |
| Outage                  | Rapport entre le nombre d'utilisateurs qui n'atteignent pas leur débit minimal et le nombre total d'utilisateurs.                                                        |
| Piggyback               | Envoi d'une demande de bande passante dans un paquet autonome de la trame de donnée.                                                                                     |
| Politique d'ordonnement | Ensemble de méthodes et de règles régissant l'allocation de ressources                                                                                                   |
| Profile Burst           | Envoi rapide d'un flot de trame.                                                                                                                                         |
| Reuse 1                 | Mode de réutilisation de fréquence dont une cellule régit une seule fréquence                                                                                            |
| Reuse 3                 | Mode de réutilisation de fréquence dont une station de base régit trois fréquences différentes respectivement dans trois secteurs différents dans une cellule.           |
| SINR effectif           | Taux de distribution spatiale exprimée par le rapport du signal utile sur les bruits et interférences.                                                                   |
| Sleep Mode              | Modes d'opérations de gestion de puissance sur qui les SS conduisent de façon autonome sur des périodes d'absence pré-négociées depuis l'interface Air de la BS serveuse |
| Slot                    | Quantum de ressources temps/fréquence qu'on peut allouer à une station.                                                                                                  |

|                               |                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Triple Play                   | Services fournis par WiMAX offrant à la fois, la transmission vidéo, voix et données.                                                                                                       |
| Unicast polling               | Méthode d'allocation valable pour les classes moins prioritaired mais nécessitant une transmission rapide de données avec synchronisation comme le rtPS, ertPS, et nrtPS.                   |
| Unsolicited bandwidth grants. | Méthode d'allocation où un SS ou MS envoie une requête en une seule fois seulement, et la BS commencera à envoyer des requêtes appelées grants pour l'allocation périodique des ressources. |
| Waterfilling                  | Technique qui de maximiser le débit d'un utilisateur avec un budget de puissance fixé.                                                                                                      |

## INTRODUCTION

Dans les dernières années, de nombreuses technologies sans fil ont fait leur apparition pour permettre aux utilisateurs de l'Internet de rester connectés quel que soit l'endroit où ils se situent. Leur succès croissant vient essentiellement du peu d'infrastructure qu'elles nécessitent ainsi que de leurs caractéristiques, très variées, qui permettent de s'adapter à un grand nombre de situations. Ainsi, à part les réseaux sans fil personnels, tels que Bluetooth ou ZigBee, et les réseaux locaux sans fil tels que Wifi, la technologie considérée comme de nouvelle génération et qui connaît de nos jours un grand essor est le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Utilisé au départ comme réseau métropolitain basé sur la boucle locale radio, le WiMAX, désormais rivalise avec les technologies cellulaires telles que l'UMTS (Universal Mobile Télécommunication system), l'HSPA ou même LTE en offrant à la fois de larges variétés de services Internet mais aussi de téléphonies, tout cela à faible coût et avec une grande interopérabilité entre les différentes technologies existantes.

Cependant, en tant que réseau sans fil, WiMAX est soumis aux phénomènes liés à l'environnement radio comme le problème d'interférence, de couverture ou de partage de ressources ainsi qu'au problème lié au trafic comme la chute de débit ou surcharge d'une cellule. En plus de devoir gérer ces circonstances, une des nouveautés de l'Internet est qu'il doit maintenant transmettre des données interactives ayant de fortes contraintes temporelles au niveau du délai ou de la bande passante. Ceci a donc amené la communauté scientifique à définir la notion de qualité de service mais Internet n'a été conçu ni dans le but de mettre en place différentes classes de service, ni dans celui de gérer des nœuds mobiles.

C'est dans ce contexte que nos travaux de mémoire apportent des éléments pour mettre en place des architectures permettant à un utilisateur mobile d'accéder facilement à internet et à conserver ainsi ses communications durant sa période de connexion.

Ceci étant, nous allons entrer directement dans le vif du sujet qui se divise en quatre chapitres. Nous aborderons tout d'abord en premier chapitre la généralité sur la technologie WiMAX et la norme IEEE 802.16. Ensuite, nous étudierons la méthodologie et modélisation de la planification d'un système WiMAX. Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des performances du réseau en vue de l'optimisation des paramètres en jeu. Finalement, nous offrons des solutions aux problèmes liés à l'environnement radio et au trafic dans l'internet par les techniques d'ajustages avancées et d'ordonnement de ressources radios.

## CHAPITRE 1

### GENERALITE SUR LA TECHNOLOGIE WIMAX ET LA NORME IEEE 802.16

#### 1.1 Introduction

De nos jours on commence à parler de plus en plus de la connexion Internet permanente à haut débit, or la future génération de réseaux sans fil dite de quatrième génération (4G) apporte de nouvelles possibilités en ce qui concerne l'amélioration des qualités de services des réseaux existants tout en permettant leur interopérabilité. La technologie la plus récente qui connaît aujourd'hui un grand essor dans le domaine de la transmission sans fil est sans aucun doute le WiMAX basé sur la norme 802.16. C'est une technologie sans fil de transmission dont le but est d'avoir un haut débit (70Mbps) à large portée (50km). Il utilise des technologies hertziennes destinées principalement à des architectures point à multipoint : à partir d'une antenne centrale, et on cherche à toucher de multiples terminaux. Le WiMAX ressemble au WiFi mais avec des performances nettement supérieures en de nombreux points. Mais 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 20Mbps.

#### 1.2 Présentation de la technologie WIMAX

##### 1.2.1 Historique et évolution

Apparu en juin 2001, WiMAX ou le retour de la BLR, la boucle locale radio (dont nous avons tant parlé voici quelques temps, est retombée dans l'oubli pour la majorité d'entre nous) est un standard de réseau sans fil métropolitain créé par les sociétés Intel et Alvarion en 2002 et ratifié par l'IEEE sous le nom de IEEE-802.16.

Cette technologie censée aller là où l'ADSL ne va pas est basée sur l'émission radiophonique de porteuse à haut débit.

Premier standard du genre, il constitue une évolution importante qui modifie le paysage technologique pour les fournisseurs et les clients des réseaux à haut débit [28].

Alors que l'ART proposait l'ouverture d'un créneau compris entre 26 et 28 GHz, voici que l'*Institute of Electrical and Electronic Engineers Standards Association* vient de valider le standard IEEE 802.16. La normalisation était prévue normalement pour 2005.

Le 802.16 se déclinera en plusieurs versions à l'image du 802.11 [28]:

- 802.16a : pour le sans-fil fixe pour raccorder des réseaux radio public (hotspots), des entreprises (liaisons louées) et des particuliers (DSL) (2004-2005).
- 802.16d : utilisation d'antennes intérieures permettant le développement de réseau au sein d'une entreprise (2005).
- 802.16e : Apparition de la mobilité avec intégration des composants dans les PC portable. Déplacements réduits, vitesse de déplacement max : 100 km/h (2006).

Ainsi, le développement rapide des communications sans fil et l'émergence des nouveaux standards du WiMAX sollicite la convergence vers la quatrième génération de communications mobiles, initialement prévue pour les années 2010, et semblerait présenter ses toutes premières réalisations commerciales légèrement plus tôt.

### **1.2.2 WiMAX et les réseaux sans fils**

Les réseaux sans fils sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques (radio et infrarouges) en lieu et place des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions dont on en distingue le WiMAX.

Les réseaux sans fils, contrairement aux réseaux câblés permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes comme c'est le cas avec les réseaux filaires.

En contrepartie se pose le problème de la réglementation relative aux transmissions radioélectriques du fait de la rareté des ressources radio. Ensuite les ondes hertziennes sont difficiles à confiner dans une surface géographique restreinte, il est donc facile pour un pirate d'écouter le réseau si les informations circulent en clair. Il est donc nécessaire de mettre en place les dispositions nécessaires de telle manière à assurer une confidentialité des données circulant sur les réseaux sans fils [37].

En résumé, la transmission sans fil dépasse de loin la limitation des câbles dans le domaine de l'infrastructure, mais limité par ses ressources et la sécurité de ses informations.

### 1.2.2.1 Classification des réseaux sans fil

Le choix de la technologie des réseaux sans fil s'effectue selon l'étendu de la couverture réseau et en fonction de ses caractéristiques comme la vitesse de transmission, le débit, le cout de l'infrastructure, la sécurité, la souplesse d'installation et d'usage, la consommation électrique et l'autonomie... Les deux figures 1.01 et 1.02 décrivent respectivement les différentes catégories de réseaux sans fil suivant leur étendu et les principales normes en fonction des débits portées [28] [35].



Figure 1.01 : Classification par étendu des réseaux sans fil

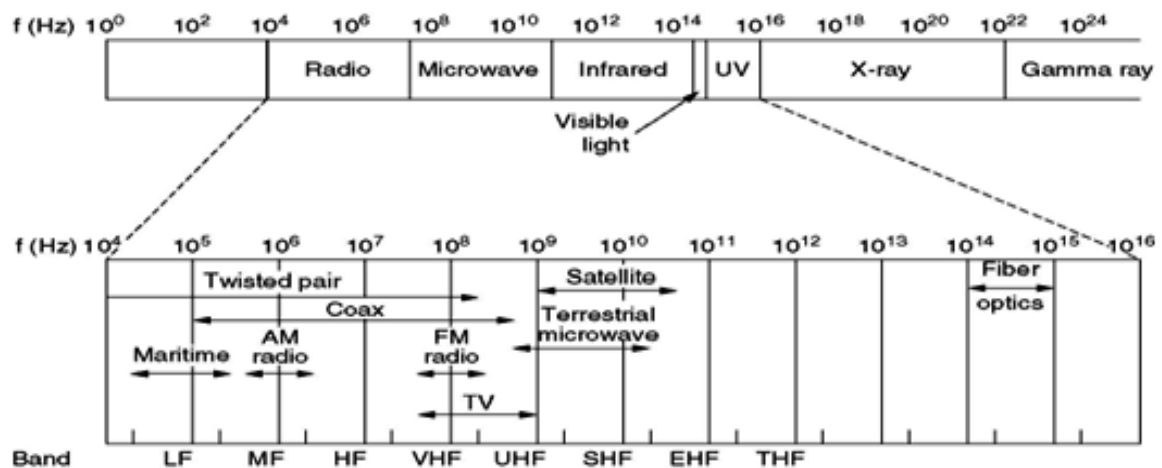


Figure 1.02 : Classification par spectre électromagnétique.

Pour le cas de WiMAX, on peut utiliser les bandes de fréquences entre 2.5 à 11Ghz selon le standard IEEE 802.16-2004.

Notre choix se limite seulement à la présentation des normes sans fil de l'IEEE car c'est celle qui nous intéresse en plus d'être dominante sur le marché de l'informatique [35].

#### *b)WPAN*

Issus de la norme 802.15, ils sont de l'ordre d'une dizaine de mètres et sont prévus pour l'interconnexion des différents périphériques autonomes entre eux tel que téléphone, PDA, portable, appareil photo... Leur fréquence se répartit sur la bande de 2400 à 2483.5Mhz et ne demande pas de licence d'exploitation.

#### *c)WLAN*

D'une portée d'une centaine de mètres, elle est issue de la norme 802.11 (wi-fi) et ses dérivées. Les plus connues sont :

- La norme 802.11a qui offre un débit de 54Mbps dans la bande des 5.3Ghz,
- La norme 802.11b qui offre un débit de 11Mbps dans la bande des 2.4Ghz,
- La norme 802.11g qui est un compromis avec les deux normes précédentes en offrant un débit de 54Mbps dans la bande des 2.4Ghz

#### *d)WMAN*

C'est bien le type de réseaux dont nous nous intéressons le plus puisque c'est de là que le WiMAX tire son origine, qui lui même une technologie de nos jours. De portée de 2 à 50km c'est-à-dire équivalent à l'étendu d'une ville, il est issu de la norme 802.16 et ses dérivées (802.16a, 802.16c/b, 802.16e et 802.16f) et est destiné principalement pour les opérateurs de télécommunication. Aussi appelé BWA ou Boucle Locale Radio, la norme IEEE 802.16 offre une alternative aux réseaux câblés entre différents bâtiments ou un remplacement des lignes xDSL.

#### *e)WWAN*

Issu de la norme 802.20 et aussi appelé MBWA, ce type de réseau est en cours de développement où le marché est encore dominé par l'UMTS et ses successeurs. Mais, est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile, cette norme doit permettre de créer des réseaux métropolitains mobiles qui ont pour but de déployer à l'échelle mondial des réseaux sans fil haut débit.



Elle utilise des bandes de fréquences avec licence en dessous des 3.5Ghz et peut offrir des débits maximum par utilisateur de 1 Mbps en flux descendant et 300Kbps en flux montant avec des cellules de 15km maximum autorisant un déplacement des terminaux à plus de 250km/h (par exemple dans les Trains à Grandes Vitesses). Les principales technologies même concurrentes sont les suivantes :

- **GSM** (*Global System for Mobile Communication* ou Groupe Spécial Mobile)
- **GPRS** (*General Packet Radio Service*)
- **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunication System*)
- **WIMAX mobile** ou 802.16e mais son évolution tend d'avantage à la norme 802.20 (standard de réseau sans fils poussé par Intel avec Nokia, Fujitsu et Prowim), d'ici 2010, le WIMAX mobile sera plus utilisé pour les réseaux cellulaires haut débit que pour les réseaux métropolitains. Basé sur une bande de fréquence de 2 à 11 GHz, offrant un débit maximum de 70 Mbits/s sur 50km de portée, certains le placent en concurrent direct de l'UMTS et de la LTE, même si ce dernier est davantage destiné aux utilisateurs itinérants.

A noter que cette norme 802.20 par rapport à l'UMTS qui fonctionnant sur des terminaux centrés voix est prévu pour des terminaux centrés données mais pouvant transférer voix et données.

#### *f)WRAN*

Issu de la norme IEEE 802.22 ce sont des réseaux sans fil couvrant une large zone géographique. Cette norme vise à créer des réseaux sans fil dont la zone de couverture est comprise entre 40 et 100km, en utilisant la bande de fréquence VHF/UHF entre 54 et 862Mhz (fréquence de télévision).

Afin d'éviter les interférences avec les canaux utilisés par les télévisions, il utilise seulement les fréquences qui ne sont pas attribuées aux chaînes de télévision.

Elle utilise un canal de 6.7 ou 8Mhz et peut avoir un débit de 18Mbps pour un canal de 6Mhz. Cette norme peut donc offrir un accès sans fil haut débit aux régions peu peuplées.

### 1.2.2.2 Types d'interconnexion et d'architectures des réseaux sans fil

#### a) Types d'interconnexion

- Liaison point à point

Etant un cas particulier du mode infrastructure, il permet de connecter deux points du réseau grâce à deux antennes généralement bidirectionnelles.

- Liaison point à multipoint

Ayant un système central et des systèmes périphériques, seul le système central peut communiquer avec l'ensemble des terminaux. La gestion de l'ensemble peut s'effectuer par le centre.

#### b) Types d'architectures

- Réseau sans fil sans infrastructure

Les réseaux sans fil ou Ad-Hoc sont des réseaux distribués et spontanés qui sont composés uniquement de terminaux mobiles et utilisent en générale la liaison multipoint à multipoint. De ce fait, chaque nœud joue à la fois le rôle de routeur pour relayer les messages adjacents vers un nœud qui n'est pas situé dans un voisinage immédiat.

- Réseau sans fil avec infrastructure

Contrairement aux réseaux ad-hoc, les réseaux sans fil avec infrastructure sont composés de stations de base ou point d'accès et de terminaux mobiles ou nœuds mobiles, dont l'ensemble forme ce qu'on appelle réseaux cellulaires.

### 1.2.3 Le réseau d'accès BLR en WIMAX

En télécommunications, la boucle locale est le lien qui fait la liaison entre l'opérateur et l'abonné. C'est donc un moyen de relier l'abonné à un opérateur de télécommunication sans utiliser les traditionnels fils de cuivre mais en employant un faisceau hertzien.

La BLR est une technologie de connexion sans fil bidirectionnelle (la liaison se fait dans les deux sens simultanément) utilisant les ondes radio comme mode de transmission : C'est la partie terminale du réseau d'accès de l'opérateur que l'on désigne parfois par « **last mile** ». Le récepteur devant être fixe, la BLR ne pourra donc pas être utilisée pour les mobiles comme l'actuelle norme GSM.

Ici, on parle de boucle car, historiquement, le réseau commuté fonctionnait grâce à une boucle de courant qui alimentait les postes téléphoniques des usagers.

Voici un exemple d'architecture d'un réseau d'accès BLR représenté par la figure 1.03 :



**Figure 1.03 :** Schéma du principe de Boucle Locale Radio en présence de LOS et NLOS.

Selon le groupe de travail de l'IEEE à l'origine du standard, la norme 802.16 a été étudiée pour optimiser l'utilisation de la bande passante, supporter les applications voix, vidéo et données et permettre avec un minimum d'infrastructure terrestre la liaison entre un opérateur et ses clients, ce qui constitue un grand avantage contrairement aux réseaux cellulaires qui sont très lourds à déployer.

### **1.3 WIMAX et la norme IEEE 802.16**

Le terme WiMAX désigne le label commercial délivré par le WiMAX Forum composé par Intel, Nokia, Fujitsu Microelectronics et China Motion Telecom et ratifié par l'IEEE sous le nom d'IEEE 802.16, afin de garantir une interopérabilité entre les équipements conforme à la norme de différents constructeurs au niveau technicité (débits, bande passante, couverture, mobilité...).

#### **1.3.1 Les différents standards de 802.16**

En télécommunication et en informatique, une norme est censée fournir un standard commun sur les techniques de communication afin de couvrir en haut débit une zone étendue.

Afin de couvrir en haut débit une zone étendue, WiMAX alloue une bande passante à chaque utilisateur en fonction de ses besoins.

Ainsi, depuis 2001, l'établissement de la norme 802.16 a subi de nombreuses évolutions que l'on peut résumer par le tableau 1.01 ci-après [28] [37]:

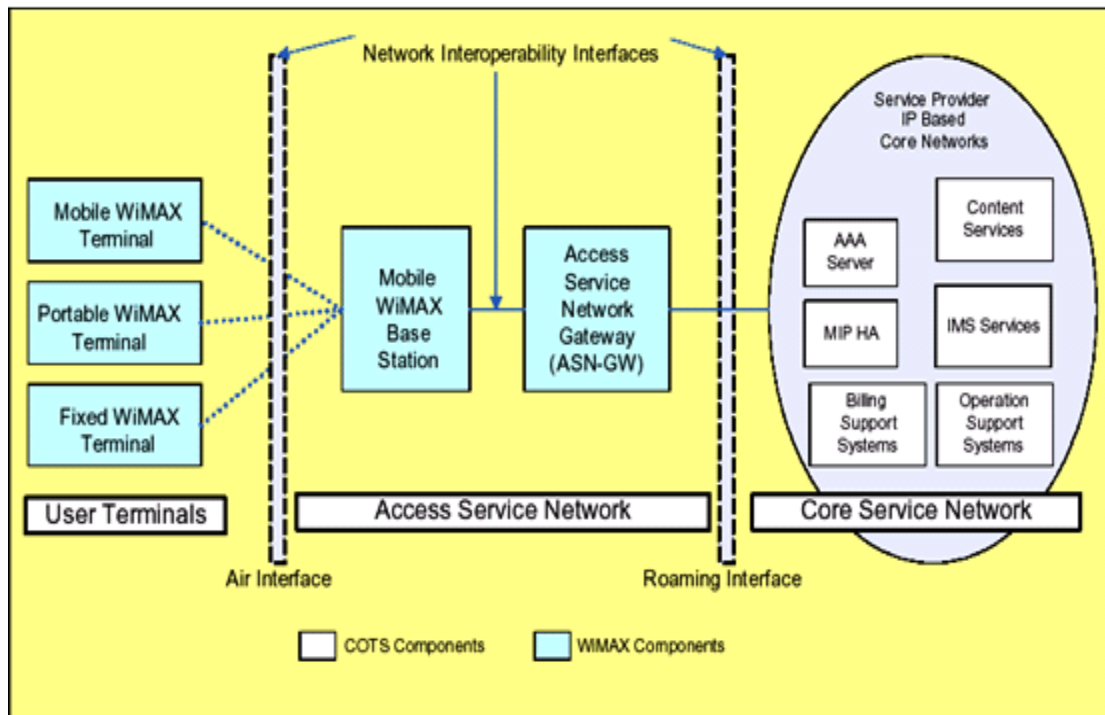
| Standard                                                              | Description                                                                                                              | Publication |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| IEEE std 802.16-2001                                                  | Définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10Ghz                                 | 08-04-02    |
| IEEE std 802.16a-2003                                                 | Définit des réseaux métropolitains sans fil sur des bandes de fréquences de 2 à 11Ghz                                    | 01-04-03    |
| IEEE 802.16b                                                          | Définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences comprises entre 10 et 60Ghz plus qualité de service |             |
| IEEE std 802.16c-2003                                                 | Définit des options (profil) pour les réseaux métropolitains sans fil dans les bandes de fréquences libres               | 15-01-03    |
| IEEE std 802.16-2004 ou IEEE 802.16d                                  | Révision des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c englobés par WIMAX fixe                                        | 01-10-04    |
| IEEE std 802.16e-2005 ou IEEE 802.16e                                 | WIMAX mobile offrant une mobilité jusqu'à 60kmph                                                                         | 07-12-05    |
| IEEE 802.16f                                                          | Définit la possibilité d'utilisation de réseaux sans fil maillés ( <i>mesh network</i> )                                 | 22-01-06    |
| IEEE 802.16g, 802.16h, 802.16i, 802.16j, 802.16k, 802.16Rev2, 802.16m | Encore en cours de développement                                                                                         |             |

**Tableau 1.01:** Les standards IEEE 802.16

### 1.3.2 Architecture générale des réseaux WIMAX suivant les couches de 802.16

A la différence de l'UMTS qui évolue selon la norme GSM, le WIMAX quant à lui emprunte une architecture existante pour le moins, des réseaux informatiques et télécom de nouvelles générations mais plus spécifique par son réseau d'accès permettant une grande interopérabilité entre services et technologies.

### 1.3.2.1 Description de l'architecture cellulaire d'un réseau WIMAX [1]



**Figure 1.04 :** Architecture cellulaire d'un réseau WIMAX

#### *b) Domaine de l'équipement usager ou terminaux*

Le domaine de l'équipement usager (UE) comprend tous les équipements terminaux aussi variés soient-ils [1]. Les terminaux sont des équipements (mobile ou fixe) à la fois émetteur et récepteur disposant d'un système d'exploitation pour supporter les cartes WaveMan pour le WiMAX mobile basé sur le 802.16e. L'UE constitue le vecteur qui permet à l'abonné d'accéder à l'infrastructure et donc à ses services par le biais d'une interface radio compatible WiMAX.

#### *c) Domaine de l'infrastructure*

Ce domaine comprend lui-même deux domaines : celui du réseau d'accès ASN (Access Service Network) et du réseau de connectivité IP CSN ou réseau cœur (Core Service Network) [1] [32]. Ce partage des tâches distingue les fonctions propres à l'accès, c'est-à-dire les fonctions permettant d'acheminer les informations (trafic de données et trafic de signalisation) depuis l'utilisateur jusqu'au CSN, et celles qui concernent, par exemple, la gestion des requêtes, le contrôle d'admission, la gestion des services qu'il a souscrit, etc.

- ASN (Access Service Network)

C'est le réseau d'accès du WiMAX regroupant 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* ou appel en diffusion sur toutes les cellules pour localiser le mobile, la gestion des ressources radio (RRM) et la mobilité entre les BS (pour la norme 802.16e). Les passerelles ASN-GW assurent l'interconnexion avec le CSN.

- BS (Base Station)

Ressemblant aux stations cellulaires classiques, c'est le cœur de la technologie WIMAX, la BS fournit à l'UE les ressources radio et les mécanismes nécessaires pour accéder au réseau WiMAX. Elle comporte un ou plusieurs secteurs et intègre des fonctionnalités variant d'un équipement à un autre (bande de fréquence, gain, support du NLOS...) et qui font la différence en terme de performances et de coût. Enfin, tous les BS sont reliés entre eux par un réseau filaire ou backbone (fibre optique, faisceau hertzien) chargeant de l'opération de routage.

- ASN-GW (Access Service Network-Gateway)

Ce sont des routeurs classiques permettant la collecte du trafic des BS et le routage des paquets dans le réseau. Ils permettent d'interconnecter plusieurs BS à la fois [32].

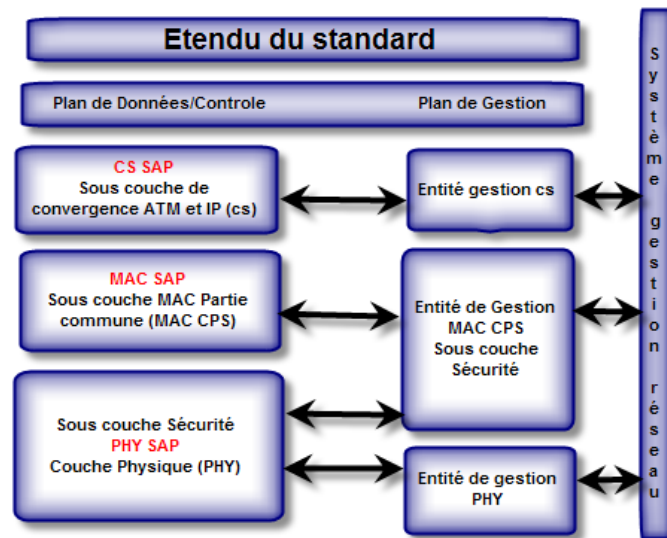
- CSN (Core Service Network)

Regroupant des passerelles pour l'accès Internet, des routeurs, des serveurs ainsi que des bases de données ; il forme un ensemble de fonctionnalités assurant la connectivité IP aux UE WIMAX. Il permet également le contrôle d'admission et gère la mobilité inter-ASN (pour le WIMAX mobile).

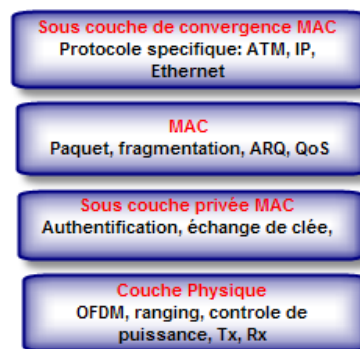
#### 1.3.2.2 Description de l'architecture en couche d'un réseau WIMAX

Le but d'un système en couches est de séparer le problème en différentes parties (les couches) selon leur niveau d'abstraction. Or pour la norme 802.16, ses spécificités suivant le modèle OSI se situent surtout sur la couche physique et MAC de la liaison de données.

C'est pourquoi la figure 1.05 et 1.06 représentent la structure en couche détaillée de la norme 802.16 [28] [32].



**Figure 1.05 :** Structure en couche détaillée de la norme 802.16.



**Figure 1.06 :** Rôle de chaque module dans une architecture en couche d'un réseau WiMAX

#### *b)Couche Physique*

- Interfaces radio

Depuis 2004, la norme 802.16 spécifie 5 interfaces radio différentes selon la bande fréquence à laquelle elles sont allouées. En effet, une pour la bande 10-66Ghz où la transmission ne supporte que le type LOS, et 4 interfaces pour la bande de 2-11Ghz qui peut supporter une transmission en NLOS.

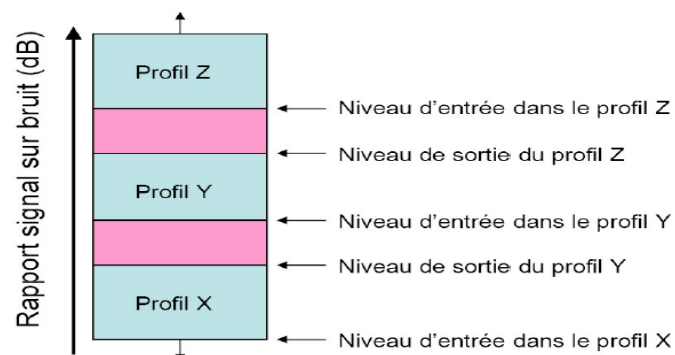
Cependant, pour la transmission de type LOS, effectivement pour les applications résidentielles où les antennes de réception devant être extérieures, la première interface doit prévenir la propagation par multi-trajets à cause de l'obstruction des arbres puisque les ondes à ces fréquences traversent mal les obstacles [28] [33].

| Désignation       | Bande de fréquence | Type d'accès | Options             | Duplexage |
|-------------------|--------------------|--------------|---------------------|-----------|
| WirelessMANSC     | 10-66Ghz           | LOS          |                     | TDD, FDD  |
| WirelessMANSc     | 2.5-11Ghz          | NLOS         | AAS, ARQ, STC       | TDD, FDD  |
| WirelessMAN-OFDM  | 2.5-11Ghz          | NLOS         | AAS, ARQ, STC, Mesh | TDD, FDD  |
| WirelessMAN-OFDMA | 2.5-11Ghz          | NLOS         | AAS, ARQ, STC       | TDD, FDD  |
| WirelessHUMAN     | 2.5-11Ghz          | NLOS         | AAS, ARQ, STC, Mesh | TDD       |

**Tableau 1.02:** Comparaison des différentes interfaces radio des standards 802.16.

- Adaptation à l'environnement de transmission

Quand on parle d'adaptation à l'environnement de transmission, on se réfère le plus souvent au codage et modulation. C'est là que vient la notion de profile ou profile de burst (envoi rapide d'un flot de trame). En effet, selon la qualité du signal reçu par le récepteur, le couple «codage/modulation» permet de passer à un profil plus ou moins robuste ou plus efficace en terme de débit [28].



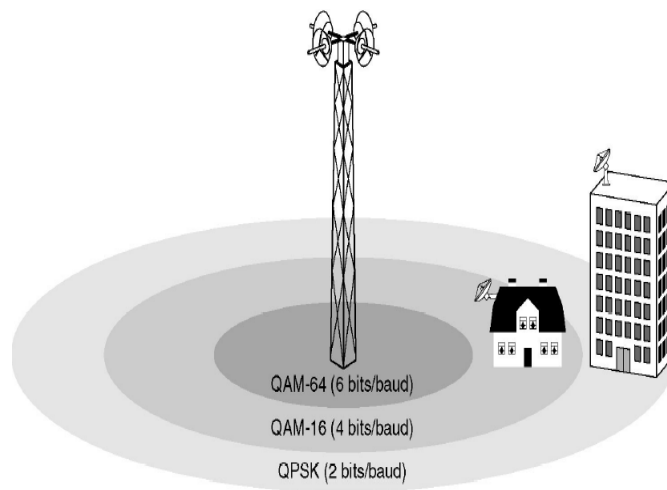
**Figure 1.07 :** Principes de changement de profiles



Ce profil peut être ajusté pour chaque utilisateur pour permettre l'adaptation à l'environnement de transmission.

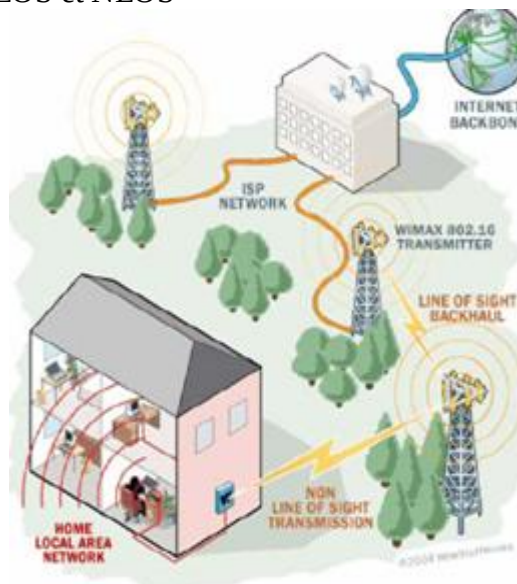
- Adaptation des liens

Rappelons que la puissance du signal diminue au fur et mesure que l'on s'éloigne de la station de base. Et selon les besoins de l'utilisateur, la norme 802.16 utilise trois techniques différentes de modulation ; allant de la plus robuste à la plus efficace en termes de débit, en fonction de la distance entre la station de base et l'utilisateur.



**Figure 1.08 :** *Technique d'adaptation des liens.*

- Accès par systèmes LOS et NLOS



**Figure 1.09 :** *Types d'accès en WIMAX*

La portée, les débits, et surtout la nécessité ou non d'être en ligne de vue (LOS) de l'antenne émettrice, dépendent de la bande de fréquence utilisée.

Dans la bande 10-66GHz, les connexions se font en ligne de vue (LOS : Line Of Sight), alors que sur la partie 2-11GHz, le NLOS (Non Line Of Sight) est possible notamment grâce à l'utilisation de la modulation OFDM.

### *c)Couche Liaison de données et couche MAC*

- Description

L'établissement des circuits et l'allocation de la bande passante sont gérés par les stations de base au niveau de la couche protocolaire appelée « MAC ».

La sous-couche MAC est selon les standards de réseaux informatiques IEEE 802.x, la partie inférieure de la couche de liaison de données dans le modèle OSI. Elle sert d'interface entre la partie logicielle contrôlant la liaison d'un nœud (LLC) et la couche physique (matérielle). Par conséquent, elle est différente selon le type de média physique utilisé (Ethernet, Token ring, WLAN...). Et une adresse MAC est une suite de 6 octets (souvent représentée sous la forme hexadécimale 01 :23 :45 :67 :89 :ab) qui caractérise ainsi chaque interface réseau.

En Wi-Fi, la couche MAC (Media Access Control) est basée sur la méthode d'accès CSMA/CA, qui a l'inconvénient de ne pas pouvoir garantir de QoS. En effet, le trafic de chaque station peut être perturbé par les autres stations, qui peuvent prendre la main sur la voie radio de façon aléatoire. Cela pose problème pour les applications temps-réel comme la Voix sur IP (VoIP). La couche MAC du WiMAX résout ce problème par un algorithme d'ordonnancement qui alloue des ressources d'accès à chaque station. Ainsi, le réseau peut contrôler les paramètres de QoS en répartissant dynamiquement l'allocation des ressources radio entre les stations [1] [32], en fonction des besoins des applications. La bande passante offerte à chaque station peut être réduite ou augmentée, mais elle reste attribuée à la station. Cela permet à la fois de garantir la stabilité de l'accès en cas de surcharge, et d'optimiser la bande passante disponible.

La couche MAC est séparée en trois sous-couches :

La couche MAC inclut un service spécifique de convergence (Service-Specific Convergence) des couches supérieures du modèle OSI avec les sous-couches MAC ;

En dessous se trouve une sous-couche formant le noyau de la couche MAC, nommée « couche commune », qui contient les fonctions clés de la couche MAC ;

Enfin, il existe une sous-couche nommée sous-couche de protection (privacy sublayer).

- Fonction

La sous-couche MAC s'occupe principalement de [28]:

- Reconnaître le début et la fin des trames dans le flux binaire reçu de la couche physique ;
- Délimiter les trames envoyées en insérant des informations (comme des bits supplémentaires) dans ou entre celles-ci, afin que leur destinataire puisse en déterminer le début et la fin ;
- Détecter les erreurs de transmission, par exemple à l'aide d'une somme de contrôle (checksum) insérée par l'émetteur et vérifiée par le récepteur ;
- Contrôler l'accès au média physique lorsque celui-ci est partagé.

Pour la norme IEEE 802.16, cette couche est responsable de l'établissement et du maintien de la connexion. Ainsi, elle est orientée connexion.

Les connexions sont référencées par un identifiant de connexion sur 16bits (CID) et peuvent demander la bande passante accordée continuellement (granted bandwidth), ou la bande passante sur demande. Les deux méthodes sont possibles.

Chaque SS a une adresse MAC standard sur 48bits, mais ceci sert principalement d'identifiant d'équipement, puisque les adresses primaires utilisées lors du fonctionnement sont les CID.

- Sous-couches constitutives

- CS ou la sous-couche de convergence des services (Service Specific Convergence Sublayer) : Joue le rôle d'interface avec les couches supérieures ou bien les systèmes externes. Elle prend en charge le classement des paquets selon leur provenance et leur destination afin de les répartir sur la bonne connexion MAC.
- MAC CPS ou sous-couche commune (MAC Common Part Sublayer) est le cœur de la couche MAC qui s'occupe de l'allocation de bande, l'établissement et le maintien des connexions. Elle reçoit des paquets provenant de la CS que cette dernière aura classifié en connexion différentes qualités de service.
- SS ou sous-couche de sécurité (Security Sublayer) ; Elle permet l'authentification d'accès et l'établissement de la connexion.  
Elle est également la couche de sécurité s'occupant du cryptage des données, de l'échange des clés.

- Notion de MAP

C'est un protocole qui permet de gérer la répartition des ressources radio entre les utilisateurs dans une cellule WIMAX.

Le MAP est un bloc d'informations par utilisateur pour lui indiquer quels sont les ressources radio (canaux, codages) à utiliser pour lire ou émettre des données.

*d) Interconnexion entre couche MAC et Physique*

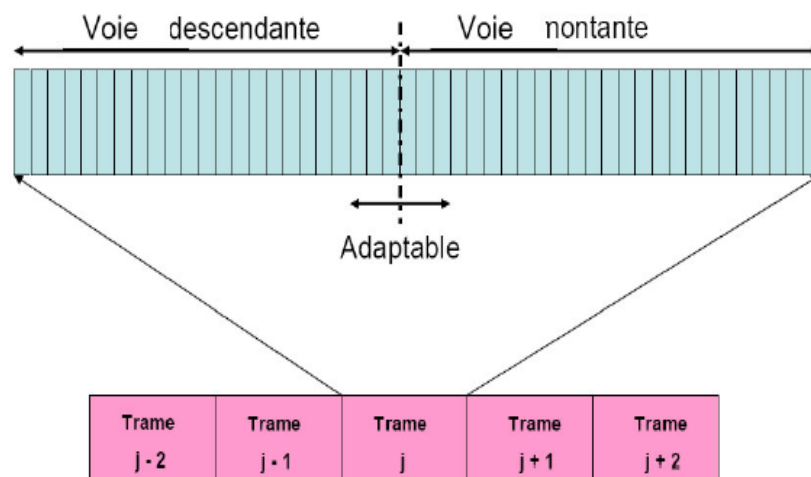
On utilise la technique de duplexage pour relier la couche MAC avec la couche physique. Le duplexage est le processus utilisé pour créer des canaux bidirectionnels pour la transmission des données en uplink et downlink, sachant que le multiplexage utilisé est de type TDM. En fait, cette technique de duplexage est caractérisée par ce qu'on appelle mode de tramage que nous voyons ci-après :

- Tramage en TDD

Le TDD, ou « Time Division Duplex », est une technologie de multiplexage plus récente que le FDD. Le principe de fonctionnement est l'utilisation de la même bande de fréquence pour l'envoi et la réception mais à des intervalles de temps différents.

Contrairement au FDD qui nécessite deux bandes distantes, le TDD se contente donc d'une unique bande contiguë. Il en résulte une meilleure utilisation du spectre, avec un unique canal pour l'envoi et la réception. L'intérêt d'utiliser un seul canal permet également des économies sur le matériel, qui se révèle plus économique que celui utilisant la technologie FDD.

La figure 1.10 décrit le format des trames WIMAX en TDD [28] [29]:



**Figure 1.10 :** *Format d'une trame WiMAX en mode TDD.*

- Tramage en FDD

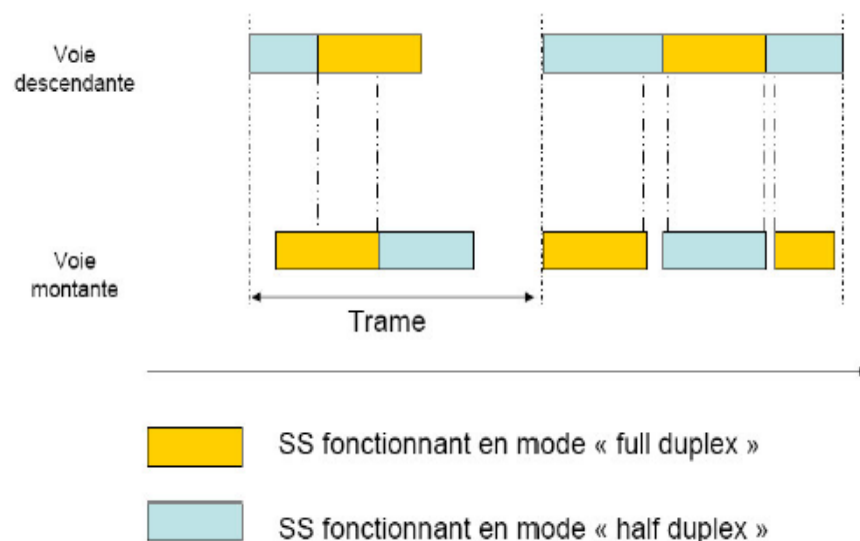
Dans le cas d'une transmission en FDD, les voies montantes et descendantes sont émises sur des fréquences différentes.

Deux types de duplexage FDD sont prévus dans la norme 802.16 (voir figure 2.0) [28]:

- FDD full-duplex : un full-duplex SS est capable d'écouter continuellement le canal downlink, ce qui lui permet de transmettre et de recevoir simultanément.
- 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.

Dans ce mode, une forte synchronisation temporelle est nécessaire afin de faire coïncider les parties montantes et descendantes et une partie de la bande est parfois perdue. C'est la principale raison de déploiement du TDD.

La figure 1.11 présente le format de trame en FDD [28] [29].



**Figure 1.11 :** *Format d'une trame WiMAX en mode FDD.*

### 1.3.2.3 Couche IP ou Réseau du WIMAX

La couche réseau du WIMAX est commun à tout type de réseau informatique basé sur l' IEEE 802.x, c'est-à-dire, chargée d'adresser les messages et de convertir les adresses et noms logiques en adresses physiques (MAC). Elle détermine aussi l'itinéraire à emprunter de l'UE source à l'UE de destination. Elle choisi le chemin que doivent suivre les données en fonction des conditions du réseau, de la priorité du service et d'un certain nombre de facteurs.

Elle gère aussi les problèmes de trafic comme la communication, l'acheminement et l'encombrement des paquets de données sur le réseau.

- Responsable de l'adressage, de la traduction des adresses en nom logique.
- Définie le routage des paquets.
- Gère les problèmes de trafique, commutation de paquets, encombrement.

La couche réseau gère les connexions entre les nœuds (que ce soit stations de base ou routeurs) du réseau. Un service supplémentaire, fourni par la couche réseau, concerne la façon de router les paquets entre les nœuds d'un réseau.

La couche réseau sert à éliminer les congestions et à réguler le flot des données ; Cette couche permet aussi à deux réseaux différents d'être interconnectés en implémentant un mécanisme d'adressage uniforme. WiFi et Ethernet possèdent, par exemple, différents types d'adresses. Pour interconnecter ces réseaux, vous avez besoin d'un mécanisme d'adressage compréhensible par les deux réseaux. Pour les réseaux TCP/IP, la couche réseau est implémentée en utilisant le protocole IP.

### ***1.3.3 Domaines d'applications WiMAX***

WiMAX est envisagé à la fois pour les réseaux de transport et de collecte, et pour les réseaux de desserte. Dans le cas de la collecte, il s'agit du backhauling de hotspots, c'est-à-dire la liaison des hotspots Wi-Fi à Internet non pas par des dorsales filaires (ADSL notamment), mais par une dorsale hertzienne.

Dans le cas de la desserte, c'est l'idée, et notamment pour les aspects mobilité de WiMAX, que des hotspots soient déployées sous la technologie WiMAX.

Dans le premier cas (collecte), seuls les équipements de réseau sont WiMAX, et le marché est orienté vers les opérateurs. Dans le deuxième cas, on doit imaginer des terminaux (ordinateurs, PDA, téléphones) WiMAX, et en particulier des puces à la fois Wi-Fi et WiMAX (Fin 2004, des annonces ont déjà été faites en ce sens...).

Coté usagers, la couverture et les débits rendus possibles, le caractère à terme de mobilité, et des couts de production et de déploiements qu'on espère réduits ouvrent la voie à de nombreuses applications.

Citons-en quelques-unes [35]:

- Couvertures classiques de hotspots : zones d'activités économiques, 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 ;

#### **1.4 Conclusion**

Ainsi, la future génération de réseaux sans fil dite de quatrième génération comme le WiMAX qui est de type WMAN apporte un véritable tournant dans le foisonnement et la disparité des solutions existantes. L'objectif cette fois sera d'augmenter les débits et les applications prises en charge par ces réseaux mais encore de construire un cadre permettant leur interopérabilité à l'aide de techniques régies par des architectures à l'image des normes imposées par l'IEEE dans le standard 802.16.

## **CHAPITRE 2**

### **METHODOLOGIE ET MODELISATION DANS LA PLANIFICATION D'UN SYTEME WIMAX**

#### **2.1 Introduction**

Depuis l'exploitation officielle des techniques de transmission multi porteuses OFDM, les systèmes tels que l'OFDMA et WiMAX promettent des performances accrues par rapport à ses prédécesseurs qui utilisaient une seule porteuse. Il est impératif d'évaluer les performances de ces systèmes avant le déploiement massif de ces réseaux. Quelques réseaux WiMAX sont déjà déployés, mais la plupart des opérateurs sont en phase d'essai. Dans ce chapitre, nous développons une méthodologie de modèles de dimensionnement pour les systèmes OFDMA. Le processus de dimensionnement permet de déterminer le nombre de BS à installer dans une certaine région par exemple en s'assurant de certains paramètres de qualité de service ou, en anglais, Quality of Service (QoS).

#### **2.2 Description d'une méthodologie de planification**

Un processus de dimensionnement est généralement subdivisé en trois modules à l'image de l'architecture en couche du 802.16 [1] [12] [19]:

Modélisation de la couche PHY : le modèle de canal, techniques de transmission, méthodes d'accès, etc.

Modélisation de la couche MAC : le modèle de réseau et la configuration réseau.

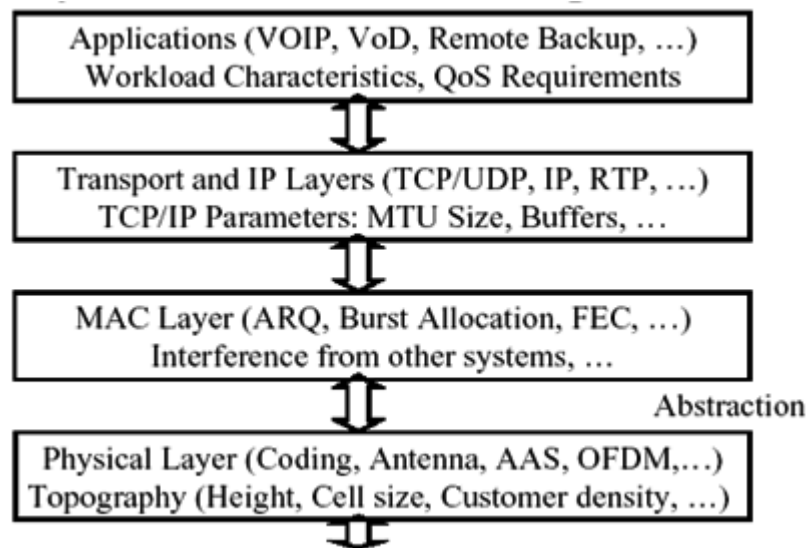
Modélisation de la couche réseau (modèle trafic) que nous ne développerons pas dans ce chapitre.

Le premier inclut l'affaiblissement de parcours, l'effet de masque et les évanouissements rapides.

Le choix des paramètres des modèles de l'affaiblissement de parcours dépend de l'environnement radio (par exemple, urbain/suburbain, LOS/NLOS). L'autre entrée est le modèle de réseau qui se compose de tous les paramètres liés au déploiement de réseau tels que la puissance de transmission des stations de base, le schéma de réutilisation fréquentielle, le rayon de la cellule, le gain d'antenne, le modèle de beamforming, etc, ajoutée à la configuration réseau qui est spécifique à la technologie déployée (par exemple, WiMAX / LTE). Des exemples de paramètres liés à une configuration du réseau sont les types de Modulation and Coding Scheme ou adaptation des liens (MCS ou AMC) disponibles, les seuils de SINR effectif, le nombre de ressources radio disponibles par trame, etc.



Pour résumer, la figure 2.01 ci-dessous explique l'abstraction entre chaque module de la méthodologie [12] [19].



**Figure 2.01 :** Modules dans un processus de planification.

## 2.3 Concepts basiques et caractérisation du canal radio

Un canal radio est un canal aléatoire, à la fois dispersif en temps et en fréquence. Cette diversité en temps est due à la présence des trajets multiples, c'est-à-dire que le signal transmis est réfléchi par de multiples obstacles avant d'arriver au niveau du récepteur. Quant à la dispersion en fréquence, elle provient du déplacement du récepteur par rapport à l'émetteur. De ce fait, le canal de propagation est la bête noire de tout système de radiocommunication, parce qu'il engendre des dégradations sur le signal transmis. Les propriétés de ce canal sont donc déterminantes pour le dimensionnement du système cellulaire ou non, notamment au moment de la constitution du bilan de liaison [22].

### 2.3.1 Phénomène de propagation à grande échelle

Cette classe comprend deux effets : l'atténuation en distance et les effets de masquage. La première cause de perte de puissance est due à la propagation en espace libre de l'onde électromagnétique, qui s'explique par la dispersion isotrope de l'énergie transmise selon les trois dimensions spatiales. Les pertes en espace libre augmentent avec la fréquence et avec la distance. L'effet de masquage est dû à la présence d'obstacles (bâtiments, forêts...) entre le récepteur et l'émetteur.

Aux fréquences auxquelles opèrent les systèmes de télécommunication, l'onde électromagnétique traverse ces obstacles, mais subit une atténuation de puissance fonction de la nature du matériau traversé.

### **2.3.2 Phénomène de propagation à petite échelle**

#### **2.3.2.1 Réflexion**

Elle se produit quand une onde rencontre un obstacle généralement plane de grandes dimensions comparées à la longueur d'onde du signal. Les réflexions peuvent interférer avec le signal original d'une façon constructive ou destructive. Toutefois, à cause de la fréquence utilisée dans la communication sans fil, les obstacles auront d'avantage tendance à absorber les ondes qu'à les réfléchir [35].

#### **2.3.2.2 Diffraction**

Elle se produit lorsque l'onde incidente rencontre un obstacle impénétrable sur des coins irréguliers, la diffraction donne naissance à des rayons qui peuvent atteindre des récepteurs dans des situations très cachées « obstructed ».

#### **2.3.2.3 Diffusion**

La présence d'objets de dimensions comparables à la longueur d'onde du signal (surfaces irrégulières) donne naissance au phénomène de diffusion. Pour cela, l'énergie incidente est rayonnée dans toutes les directions.

### **2.3.3 Perte de multi-trajet**

Lors des transmissions en environnement urbain, l'émetteur et le récepteur ne sont presque jamais en vue directe et le signal reçu par le récepteur va être modélisé comme une somme discrète de trajets réfléchis ou aussi une dispersion temporelle dans le canal. Nous qualifions de « multi trajet », ce mode de propagation car on peut dire qu'il y a dispersion ou propagation physique de l'onde lors de l'émission ou même d'une réception.

La fonction de transfert d'un canal radio résultant d'une propagation à trajets multiples présente une réponse fréquentielle qui n'est pas plate, mais comporte des creux et des bosses dus aux échos et réflexions entre l'émetteur et le récepteur. Or, un très grand débit impose une grande bande passante, et si cette bande couvre une partie du spectre comportant des creux, il y a donc perte totale de l'information pour la fréquence correspondante.

#### **2.3.4 Effet Doppler**

C'est l'effet de la variation du canal de transmission en fonction du temps. Ce cas se présente couramment pour un récepteur mobile : la fréquence de la porteuse est décalée d'une valeur dépendant de la vitesse du mobile et de l'angle de réception.

### **2.4 Outils dans un modèle de planification de système WiMAX**

#### **2.4.1 Modélisation de la couche PHY**

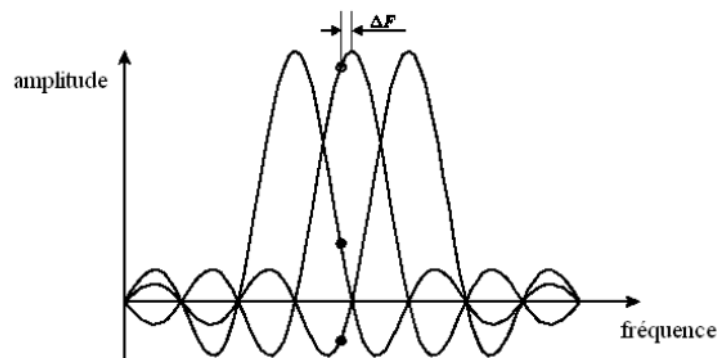
##### **2.4.1.1 Techniques de transmission OFDM et méthodes d'accès OFDMA**

###### *a) Généralités*

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), comme son nom l'indique, consiste à utiliser plusieurs sous-porteuses modulées transmises en parallèle. C'est une modulation multi porteuse très utilisée, on peut citer les standards DAB (*Digital Audio Broadcasting*), DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*) et les versions *a* puis *g* de IEEE 802.11. L'OFDM autorise un fort recouvrement spectral entre sous porteuses.

Pour obtenir une bonne efficacité spectrale, les spectres de celles-ci se recouvrent partiellement. Le principal avantage de l'OFDM réside dans le fait qu'il résiste bien aux canaux sélectifs en fréquence. En effet, d'un point de vue fréquentiel, cette technique divise un canal large bande sélectif en fréquence ou répartit un train binaire haut débit en plusieurs sous-canaux (64, 128, 256...) non sélectifs modulés à bas débit [26]. Afin d'éviter l'interférence qui résulte naturellement de ces recouvrements spectraux, les sous-porteuses répondent à un critère d'orthogonalité c'est-à-dire, chacun des sous-canaux est modulé par une fréquence différente séparée par une base orthogonale constante. De plus, l'introduction d'un préfixe cyclique permet de supprimer complètement l'interférence entre symboles. Enfin, la complexité de l'implémentation est très faible, la modulation est réalisée par une transformée de Fourier inverse et la démodulation via une simple transformée directe.

Ainsi, pour un train de symboles initiaux de période  $T_{si}$ , les symboles seront répartis en N trains plus lents et auront alors une durée  $T_s = N \cdot T_{si}$  [17] [26].

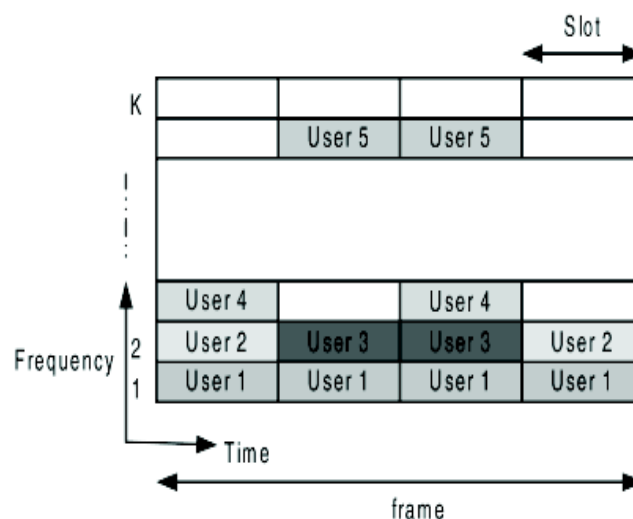


**Figure 2.02 :** *Spectre des différentes sous porteuses*

Pour les techniques d'accès multiple, lorsque l'on considère des systèmes multi porteuses, les principales techniques à accès multiple sont l'OFDM-TDMA, l'OFDMA et le MC-CDMA.

L'OFDM-TDMA est une technique hybride entre l'OFDM et le TDMA (*Time Division Multiple Access*). Les utilisateurs transmettent tour à tour, la modulation OFDM est appliquée sur toutes les sous porteuses.

L'OFDMA est une technique hybride entre l'OFDM, le TDMA et le FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Dans un même symbole OFDM, plusieurs utilisateurs reçoivent des parties distinctes de la bande fréquentielle.



**Figure 2.03 :** *Trame OFDMA*

Le MC-CDMA signifie *Multi Carrier Code Division Multiple Access*. Les bits sont étalés grâce à un code (propre à chaque utilisateur) pour obtenir des chips. Les chips sont envoyées grâce à la modulation OFDM appliquée sur toutes les sous porteuses.

Les techniques OFDM-TDMA et OFDMA sont plus adaptées lorsque le canal est connu à l'émetteur tandis que le MC-CDMA est plus adapté lorsque le canal est inconnu à l'émetteur. Dans notre étude, le MC-CDMA ne sera pas traité ; nous nous intéressons au cas où le canal est connu à l'émetteur.

La technique SOFDMA adapte la taille de la TFD en fonction de la largeur de la bande de transmission. La norme définit les tailles de TFD suivantes : 2048, 1024, 512, 128. L'IEEE 802.16e-2005 est basé sur ce concept SOFDMA dans le but d'accommoder avec les différentes largeurs du canal possibles.

#### *b)Avantages*

Les avantages des techniques basées sur l'OFDMA par rapport au TDMA et au FDMA sont la diversité fréquentielle et la robustesse aux multi trajets.

Dans ces techniques, on peut faire de l'adaptation de lien (ou modulation adaptative) : on adapte le MCS (*Modulation and Coding Scheme*) en fonction du gain du canal. Le *bit loading* est un algorithme qui détermine la QAM pour minimiser la puissance transmise sur une sous porteuse. Le débit utile est élevé sur les bons canaux et le codage correcteur d'erreurs est robuste sur les mauvais canaux.

Le *waterfilling* permet de maximiser le débit d'un utilisateur avec un budget de puissance fixé. En OFDM-TDMA, grâce au *waterfilling*, un utilisateur peut ignorer les sous porteuses qui ont un gain de canal très faible. Durant le *slot* d'allocation, ces sous porteuses ne sont pas utilisées du tout. Cette situation apparaît moins en OFDMA.

Pour une sous porteuse fixée, plus le nombre d'utilisateurs est élevé, plus il y a de chances de trouver un utilisateur qui réalise un gain élevé. C'est la diversité multiutilisateur.

En OFDMA, profiter pleinement de cette diversité permet d'utiliser efficacement toutes les fréquences de la bande.

#### 2.4.1.2 Modèles empiriques du canal de transmission

##### a) Modèle COST 231-Hata :

Le modèle COST 231-Hata s'applique aux fréquences comprises entre 1 500 et 2 000 MHz. En milieu urbain, l'affaiblissement  $L_{uM}$  exprimé en dB est donné par [13] :

$$L_{uM} = 46.33 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log(h_b)] \log(d) \quad (2.01) \\ + C_m$$

Le paramètre  $a(h_m)$  prend les mêmes valeurs ci-dessus et  $C_m$  prend les valeurs suivantes :

- $C_m = 0 \text{ dB}$  pour les villes de taille moyenne et les banlieues,
- $C_m = 3 \text{ dB}$  pour les grands centres métropolitains.

Le modèle de Hata est un modèle très optimiste. En effet, il ne tient pas compte des topologies de terrains et des phénomènes de propagation tels que la réflexion et la diffraction causés par les obstacles (arbres, immeubles, etc.).

Ce modèle reste toujours adapté uniquement à des études théoriques. Pour cela, nous nous proposons d'étudier un modèle plus réaliste et plus pratique : c'est le modèle standard de propagation (SPM : Standard Propagation Model).

Ce modèle est très utilisé par les opérateurs vu sa simplicité d'implémentation et de mise en œuvre. Par ailleurs, ce modèle est implémenté sur plusieurs logiciels de planification de réseaux tels qu'Atoll, ICS telecom, Papadou, etc.

##### b) Modèle SUI (Stanford University Interim):

Il a été développé aux Etats-Unis à l'université de Stanford, il permet le calcul de l'affaiblissement d'un signal entre les fréquences 2 500 et 2 700 MHz. Trois types de terrains sont considérés dans ce modèle :

- Dans le type A, les pertes de propagation sont associées à un relief accidenté avec un environnement à feuillage dense qui se traduira par la perte de passage maximale.
- Dans le type de B, il estime que le terrain soit essentiellement plat à fortes densités d'arbres ou terrain accidenté avec des densités d'arbres élevées.
- Dans le type C, la perte de trajet qui doit être minimale est associée avec un relief plat et des densités d'arbres élevées.

L'affaiblissement de propagation suit l'équation suivante [13]:

$$L_P = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \quad \text{pour } d > d_0 \quad (2.02)$$

Où :

- $d$  : est la distance entre la station de base et le mobile (m) ;
- $d_0$  : est la distance référence ( $d_0=100\text{m}$ ) ;
- $\gamma$  : est l'exposant de la propagation
- $s$  : est la marge de *log normal* due à l'effet de masque d'ombrage des arbres, il a une valeur comprise entre 8.2 et 10.6 dB. Et

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2.03)$$

$$\gamma = a - b h_b + c / h_b \quad (2.04)$$

Les constantes a, b et c sont données par le tableau 2.01 :

| Paramètres     | Terrain type A | Terrain type B | Terrain type C |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| a              | 4.6            | 4.0            | 3.6            |
| b ( $m^{-1}$ ) | 0.0075         | 0.0065         | 0.005          |
| c (m)          | 12.6           | 17.1           | 20             |

**Tableau 2.01:** Valeurs numériques pour les paramètres du modèle SUI

Avec  $h_b$  la hauteur de l'antenne de la station de base au dessus du sol comprise entre 10 m à 80 m. Le facteur de correction  $X_f$  pour la fréquence et  $X_h$  pour la hauteur de l'antenne la station mobile a la forme suivante [13]:

$$X_f = 6.0 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right) \quad (2.05)$$

$$X_h = \begin{cases} -10.8 \log_{10}(h_m/200) & \text{pour les terrains de type A et B} \\ -20 \log_{10}(h_m/200) & \text{pour le terrain de type C} \end{cases} \quad (2.06)$$

Où :

- $h_m$  : est la hauteur de l'antenne du mobile au dessus du sol ;
- $f$  : est la fréquence (en MHz).

#### 2.4.1.3 Flexibilité de la bande de fréquence:

La bande de fréquence du canal peut être un multiple de 1.25 MHz, 1.5 MHz, 1.75 MHz, 2MHz et 2.75 MHz avec un maximum de 20 MHz. Mais WiMAX forum a initialement approuvé un large choix de possibilité pour assurer l'interopérabilité entre les différents constructeurs.

#### 2.4.1.4 Mécanisme de contrôle d'erreur et de robustesse (FEC)

Le mécanisme Forward Error Correction (FEC) se fait en deux phases à partir des codes ReedSolomon (RS) et du code inner Convolution (CC). Le codeur RS corrige les erreurs de profile au sein de la sélection des bits. Il est particulièrement utile pour les liens OFDM en présence de propagation multi trajets. Le CC corrige les erreurs de bits indépendants. La fonction point par point du CC régit le taux des codes concaténés compatibles comme par spécification. Le support du codage Turbo est un outil optionnel pour accroître la couverture et/ou la capacité avec l'expansion de la latence et de la complexité du décodage [25] [33].

#### 2.4.1.5 Adaptive Modulation and Coding (AMC) ou adaptation rapide des liens (MCS)

Dans les réseaux mobiles, la qualité d'un signal reçu par un terminal dépend de plusieurs facteurs, comme la distance entre la station de base ou la perte de propagation due aux obstacles ou aux trajets multiples. Dans le but d'améliorer la performance d'un système, en termes de débit de données et de fiabilité de la couverture radio, le signal transmis vers et par un utilisateur particulier est modifié de façon à prendre en compte les variations de la qualité du signal à travers un processus connu sous le nom d' «adaptation au lien radio» ou «politique de modulation et de codage » (*link adaptation*), connu également sous le nom de «AMC» (*Adaptive Modulation and Coding*) ou MCS (*Modulation and Coding Scheme*) [17] [25] [29].

Cette politique de modulation spécifiée en downlink (DL) et uplink (UL) sont souvent les binary phase shift keying (BPSK), quaternary PSK (QPSK), 16 quadratures amplitude modulation (QAM) and 64QAM afin d'adapter les bits porteurs d'informations à de complexes constellations de points [33].

Les options de FEC sont associées aux politiques de modulation pour former les profiles burst. La couche PHY spécifie sept combinaisons de modulation et de codage, qui peuvent être alloués sélectivement pour chaque usager, que ce soit en UL ou DL [22].



Cependant, les conditions de propagation influent entre les taux de données et la robustesse des modulations et codage. Le tableau 2.02 montre les sept combinaisons de modulation et de codage [17] [22].

| Modulation | Taille des blocs non codés | Taille des blocs codés | Taux de codage | RS code      | CC code rate |
|------------|----------------------------|------------------------|----------------|--------------|--------------|
| BPSK       | 12                         | 24                     | 1/2            | (12, 12,0)   | 1/2          |
| QPSK       | 24                         | 48                     | 1/2            | (32, 24,4)   | 2/3          |
| QPSK       | 36                         | 48                     | 3/4            | (40, 36,2)   | 5/6          |
| 16QAM      | 48                         | 96                     | 1/2            | (64, 48,8)   | 2/3          |
| 16QAM      | 72                         | 96                     | 3/4            | (80, 72,4)   | 5/6          |
| 64QAM      | 96                         | 144                    | 2/3            | (108, 96,6)  | 3/4          |
| 64QAM      | 108                        | 144                    | 3/4            | (120, 108,6) | 5/6          |

**Tableau 2.02:** Combinaison de techniques de modulation et de codage (AMC ou MCS)

#### 2.4.1.6 Systèmes d'antennes avancées (MIMO)

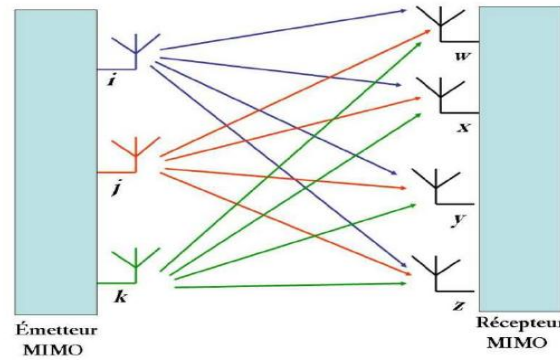
Deux des difficultés principales des communications sans fil sont l'évanouissement causé par des additions destructives de signaux résultant de trajets multiples et l'interférence avec les autres utilisateurs ou aussi d'autres BS. Les techniques de diversité visent à fournir au récepteur différentes répliques (idéalement indépendantes) du signal transmis et constituent par conséquent un moyen puissant pour combattre l'évanouissement et l'interférence. Les différentes formes de diversité sont la diversité temporelle (due à la sélectivité spatiale et à l'effet Doppler) et la diversité fréquentielle (due à des délais de propagation différents). Ces dernières années, la diversité spatiale a été introduite et connaît un succès croissant [22].

Cette forme de diversité est particulièrement attractive car elle peut être obtenue sans perte d'efficacité spectrale. Elle consiste en l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception (système MIMO : multi-input multi-output).

En effet, la diversité introduite provient du fait de la présence de « copie » d'un même message sur les différentes antennes de l'émetteur ou du récepteur [22].

En outre, elles permettent de développer une couche physique se substituant à la couche originale du standard choisi et ce, de manière quasi transparente pour la couche MAC (MAC, Medium Access Control). Ces techniques exploitent de façon conjointe la dimension temporelle ou fréquentielle des signaux et la dimension spatiale apportée par l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Les méthodes de traitement des signaux utilisées exploitent ces différentes dimensions ce qui permet d'atteindre des efficacités spectrales beaucoup plus importantes qu'avec des systèmes traditionnels SISO (SISO, Single Input Single Output).

Un système MIMO est représenté schématiquement sur la figure 2.04 [27]:



**Figure 2.04 :** Représentation schématique d'un système MIMO

Avec MIMO, M antennes d'émission servent N antennes de réception (fig. 2). En général, le canal de transmission dans un système MIMO est décrit par la matrice canal  $N_r \times N_t$  [27]:

$$H(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau, t) & \cdots & h_{1N_t}(\tau, t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1}(\tau, t) & \cdots & h_{N_r N_t}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (2.07)$$

Les éléments de la diagonale principale  $h_{i,i}$  décrivent alors les trajets directs de transmission entre les antennes ; les autres éléments décrivent ceux des produits de mélange. Il en résulte le signal de réception  $\mathbf{r}(t)$  :

$$\mathbf{r}(t) = H(\tau, t) \times s(t) + n(t) \quad (2.08)$$

Avec  $H(\tau, t)$  matrice du canal

$s(t)$  signal transmis

$\mathbf{n}(t)$  bruit additif

Pour MIMO, un débit de données plus élevé ou une transmission plus robuste peuvent être obtenus selon les procédés. Les bonnes conditions de transmission sont logiquement mises à profit pour augmenter le débit et choisir le procédé correspondant. Si les conditions de transmission sont défavorables, ce procédé n'apportera pas le succès escompté. C'est la raison pour laquelle une méthode renforçant la sécurité de transmission prend ici toute son importance.

Une meilleure sécurité de transmission aura donc finalement des effets également positifs sur la capacité utile, compte tenu du fait qu'une capacité de canal moindre sera nécessaire pour la répétition de blocs défectueux [27].

Etant donné que les caractéristiques d'un canal de transmission peuvent varier très rapidement, le procédé de transmission doit être adapté en conséquence. Cela exige du récepteur la capacité de retourner aussi rapidement à l'émetteur cette information de qualité de canal et définit ainsi les exigences temporelles en matière de retour d'information

#### a) Diversité d'émission (Diversity mode) avec Space Time Block Coding

Le même flux de données est transmis à partir de diverses antennes avec un codage différent (STTD– Space Time Transmit Diversity ou Space Time Block Coding selon Alamouti). Le récepteur obtient ainsi (par propagation à trajets multiples) plusieurs copies du signal.

Il en résulte une amélioration du rapport signal/bruit (S/N ratio) et par conséquent, une liaison plus stable. L'amélioration est d'autant plus importante que la corrélation des canaux fading est moindre. En raison d'un effet de saturation, l'accroissement du nombre d'antennes ne peut toutefois pas augmenter à volonté le gain obtenu par la diversité d'émission.

#### b) Multiplexage par division spatiale

Avec ce procédé, les antennes d'émission transmettent en même temps plusieurs flux de données différents à un récepteur qui reçoit ainsi sur chacune de ses antennes des flux de données parallèles qu'il « suffit » alors de séparer. Cela ne réussit que si les canaux sont disponibles entre les antennes avec un fading différent (plus la corrélation est faible, meilleur est le résultat).

Ce procédé pour l'amélioration de la capacité utile n'a de sens que si les conditions de transmission sont favorables. Dans ce cas, le gain possible est également limité par la corrélation des voies de transmission.

c) Beamforming (antenne intelligente)

Dans cette méthode, les signaux ne sont pas émis de façon omnidirectionnelle mais avec des rayons (Beam) individuels formés par un réseau d'antennes pour chaque station mobile. Ainsi, la station de base suit (par l'alignement de son réseau d'antennes avec son lobe d'émission) les mouvements de la station mobile. Cela suppose toutefois la disponibilité d'un signal dont la fréquence ou le temps ne sont attribués qu'à une station mobile donnée. En d'autres termes : chaque station mobile nécessite son propre lobe [27].

Les tests de Beamforming pour les stations de base partent du principe que toutes les sorties d'antenne d'un émetteur dans le système de test sont combinées avec des longueurs électriques différentes.

La station de base doit compenser ces temps de propagation différents de telle sorte que tous les signaux arrivent avec la même phase à l'émulateur de station mobile (MSE) et qu'ils s'y additionnent. Dans le meilleur des cas, le MSE « reçoit » alors un multiple de la puissance conformément au nombre d'antennes. La preuve de la fonctionnalité de Beamforming est apportée par l'évaluation du gain de sensibilité [27].

#### 2.4.1.7 La gestion des interférences.

La cohabitation entre deux technologies TDD et FDD est particulièrement douloureuse, puisqu'elle impose aux opérateurs des bandes de gardes très importantes (jusqu'à 40% du spectre) en cas de chevauchement TDD/FDD sur une même zone géographique.

Plusieurs configurations se présentent, impliquant des besoins en bande de garde différents. La nécessité d'accord de « bon voisinage » entre opérateurs sans fil s'impose donc dans l'intérêt de tous.

Le tableau 2.03 ci-dessous résume la complexité de cohabitation entre deux opérateurs différents selon deux critères :

| Opérateur A | Opérateur B | Synchronisation | Bandes de garde |
|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| FDD         | FDD         | -               | Minimes         |
| FDD         | TDD         | -               | Importantes     |
| TDD         | TDD         | <i>Oui</i>      | Minimes         |
| TDD         | TDD         | <i>Non</i>      | Importantes     |

**Tableau 2.03:** Critères de cohabitation entre deux opérateurs

## 2.4.2 Modélisation de la couche MAC

En IEEE 802.16, les fonctions QoS (Quality Of Service) sont implémentés dans la sous couche commune MAC, d'où l'importance de la bonne configuration et modélisation de cette couche. Plusieurs classes de services sont définies pour satisfaire les différents besoins de QoS. Par exemple, une connexion VoIP est parfois associée avec « *unsolicited grant service* » (UGS) pour supporter le taux de bits constant (constant bit-rate CBR) comme flux avec allocation constante de bande passante.

De ce fait, quatre outils MAC sont nécessaires pour gérer la QoS : contrôle d'admission, ordonnancement, gestion de tampon, et politique d'accès. Cependant, il faut connaître d'avantage les modules qui constituent la couche MAC tel que les formats des PDU MAC pour en prendre avantage.

### 2.4.2.1 Formats des PDU MAC

Le standard 802.16 définit une connexion orientée MAC et de mécanisme de signalisation d'informations échangées entre *Station de Base* (BS) et *Station Mobile* (SS ou MS) [12] [19]. La couche MAC prend en charge les paquets (appelés *MAC Service Data Unit*, MSDU) depuis la plus haute couche pour les organiser et les arranger sur le protocole *MAC Protocol Data Unit* (MPDU) en vue de la transmission [34]. La *Connexion ID* (CID) est l'identifiant d'une connexion unidirectionnelle entre deux couches MAC sur l'interface Air. Un *Service Flow* (avec *Service Flow ID correspondante*, SFID) est un canal de transport de la couche MAC pour une transmission unidirectionnelle (uplink or downlink) des MPDU à l'intérieure d'une classe QoS dans une connexion [32] [34].

WiMAX utilise une longueur variable de MPDU (de longueur maximale de 2048 octets) formé par une entête générique MAC de 6-octet (*Generic MAC Header* ou GMH), un payload de longueur variable et un CRC optionnel. Plusieurs MPDU peuvent être concaténés sur un seul *burst (profile)* pour sauvegarder les frais généraux physiques (physical overhead). Similairement, plusieurs MSDU des mêmes services de la couche supérieure peuvent être empaquetés sur un seul MPDU pour sauvegarder les frais généraux de l'entête MAC. Un large MSDU peut être fragmenté sur le plus petit MPDU et envoyés sur plusieurs bursts ou profiles [32].

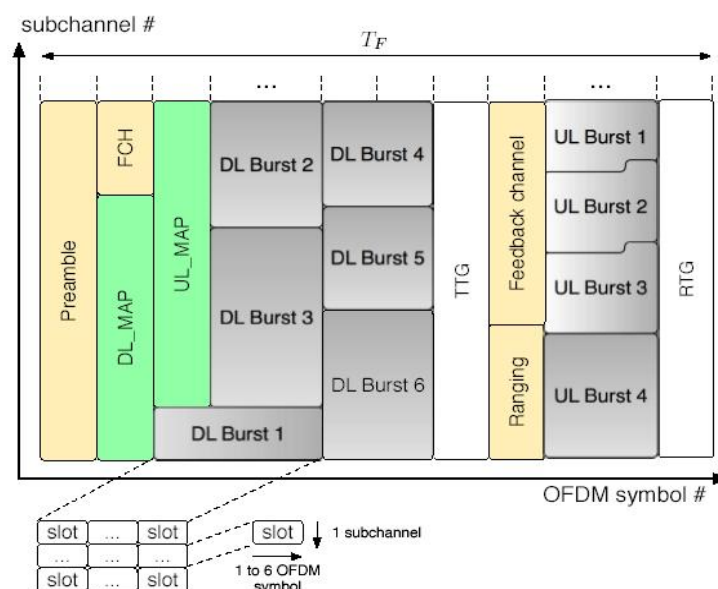
Dans le cas d'une trame TDD (*Time Division Duplexing*), le temps est divisé en sous trame downlink and uplink avec frontière mobile et entre autre un intervalle de temps.

Chaque trame est fixée à une durée de quelques millisecondes. La sous trame DL vient en premier et c'est après que survient le tour de la sous trame uplink. La première partie de DL contient un préambule plusieurs signalisations de broadcast pour synchroniser l'usage des ressources (ex. DL-MAP and UL-MAP messages contient l'allocation d'un profile burst décidé par la BS, respectivement en downlink et uplink). Deux parties initiales de la sous trame UL est utilisées sur les transmissions basées contention pour l'initialisation des MS nouvellement connectés et pour les requêtes d'allocation de la bande de fréquence en Best Effort associés aux MS. A noter qu'un symbole équivaut à un préambule de frais généraux de chaque profile en uplink.

#### 2.4.2.2 MAP en UL/DL

La figure 2.05 illustre la structure d'une trame WiMAX gérée par la couche MAC pour un duplexage temporel (TDD) utilisée par la technologie WiMAX, subdivisée en deux sous trames, une pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante, les deux séparées par un intervalle de garde. On peut trouver des symboles OFDM pour la signalisation et contrôle. Pour éviter les interférences inter antennes dans l'estimation du canal, des symboles pilotes sont placés sur différentes sous porteuses pour différentes antennes Tx [12] [14] [15] [19].

Pour la sous trame DL, les symboles à l'intérieur d'un profile burst sont établis sur les sous canaux, qui sont associés à des politiques de modulation et coding (MCS). En UL, le profile burst contient des carreaux, et chaque carreau occupe 3 symboles dans un domaine de temps et 4 sous porteuses dans le domaine des fréquences [19] [32] [34].



**Figure 2.05 :** Structure d'une trame TDD OFDMA pour la technologie WIMAX.

Les différents champs de la trame sont [1] [31]:

- Préambule : Ce champ est utilisé pour la synchronisation, et se situe au début de la sous trame de la liaison descendante (c'est le premier symbole OFDM).
- Frame Control Head (FCH) : Ce champ suit le préambule et a pour rôle d'assurer les informations de configuration de la trame (par exemple, la longueur du message MAP, les sous-canaux qu'on peut utiliser...)
- DL-MAP et UL-MAP : Ces champs assurent l'allocation des sous-canaux.
- UL Ranging : Ce champ est alloué aux MS pour leur permettre d'ajuster leurs fréquences, leurs puissances ainsi que leurs demandes en besoin de bande passante.
- UL CQICH : Ce champ est alloué aux MS pour leur permettre de renvoyer les informations concernant l'état du canal (UL Feedback).
- UL ACK : Pour acquitter une demande de DL-HARQ.

#### 2.4.2.3 Allocation des sous porteuses dans une trame OFDMA.

Dans un système de transmission, chaque communication consomme une ressource physique dont le volume dépend de la quantité d'information à envoyer.

Sur l'interface radio, la ressource est le canal physique. Le système commence par définir ce canal, puis il planifie la distribution des canaux sur les différentes cellules à l'aide des mécanismes d'allocation de ressources. L'ensemble des ressources disponibles forme la bande passante, qui est divisée en plusieurs ensembles de canaux radio non interférents. Ces canaux peuvent être utilisés simultanément et le multiplexage de plusieurs communications sur une bande passante se fait par les méthodes FDMA, TDMA, CDMA [34].

La principale caractéristique de l'interface radio est l'affaiblissement de la puissance en fonction de la distance séparant l'utilisateur de sa station de base. La puissance d'émission de chaque canal doit donc être optimisée pour assurer une bonne qualité de service de la communication sur le lien radio, et pour permettre de réutiliser un même canal dans une autre cellule. Cette réutilisation d'un canal s'appelle l'*allocation des ressources*.

De ce fait l'allocation de la bande passante est strictement dépendante des paramètres QoS demandés et des ressources disponibles dans le réseau. Bien que la demande est faite par connexion, la BS répond en allouant la bande passante non pas par connexion mais par SS.

La tâche revient à la SS de répartir cette bande passante entre ses différentes connexions. WiMAX définit trois principales procédures d'allocation de bande passante [23]:

- « unsolicited bandwidth grants » ou allocation de bande non réclamée,
- « polling » ou allocation de bande par système d'interrogation des SS,
- « contention procédures » ou allocation de bande selon un système de contention.

L'utilisation de ces procédures se fera en fonction des données devant être transmises, pour les applications temps réel par exemple, la station de base envoie un message de polling à chaque station et ces dernières répondent par les messages de requête de bande passante.

A chaque connexion, une station de base demande de la bande passante à travers un message MAC dit « Bandwidth Request message ». Cette demande peut être envoyée soit dans un paquet autonome ou dans un paquet de données (piggyback). La requête est basée sur le nombre d'octets nécessaires pour transporter les MAC PDU sans compter la surcharge de la couche physique.

La demande peut être soit incrémentale signifiant combien de bande passante additionnelle a-t-on besoin ou agrégée signifiant combien de bande passante totale a-t-on besoin. Tout d'abord, nous allons effectuer un bref rappel concernant les techniques d'allocation de sous porteuses décrites dans la norme WiMAX.

#### 2.4.2.4 Les techniques de distributions de sous porteuses

Tout d'abord, pour rappel, Il y a trois types de sous porteuses [29]:

1. Data : permettant la transmission de données
2. Pilot : permettant l'estimation de canal et la synchronisation de la trame
3. Null : permettant de réaliser des bandes de gardes au sein du signal OFDMA.

De multiples données peuvent être groupées en sous canaux qui forment un slot avec un ou plusieurs symboles OFDMA [1]. Un slot est un canal ainsi qu'un utilisateur ; celui-ci contient 48 sous porteuses de données. Il y a deux techniques d'allocation de sous porteuses : distribuée ou adjacente. Généralement, les allocations distribuées fonctionnent plutôt bien dans des applications mobiles; les techniques d'allocations dites adjacentes sont quant à eux plus performant dans des applications fixes, à faible mobilité.

Dans les modes d'allocations distribuées de sous porteuses(DSCA), les multiples sous porteuses de données sont groupés en sous canaux. Bien que les sous porteuses dans un sous canal ne sont pas nécessairement adjacentes les unes vis-à-vis des autres, elles peuvent l'être dans certains cas.



La probabilité de réalisation de ce type d'évènement est loin d'être minime d'après les études réalisées.

Pour le lien descendant, on utilise généralement deux types de solutions [29]:

- PUSC : utilisation partielle des sous canaux. C'est le mode par défaut d'allocation des sous canaux. Toutes les sous trames downlink débutent avec une zone PUSC. Les sous canaux sont groupés en 6 groupes principaux et sont assignés aux trois secteurs de la cellule. En associant 2 de ces 6 groupes à un secteur, il est alors possible de voir cela par un pseudo système de facteur 3. En mettant les 6 groupes sur chaque secteur, nous sommes alors en situation de facteur 1. Le PUSC est implémenté de manière à minimiser la probabilité d'utilisation de la même sous porteuse dans deux secteurs ou cellules adjacents.
- FUSC : utilisation complète des sous canaux. Ce mode permet d'utiliser toutes les sous canaux et ainsi de minimiser la dégradation des performances du système par des problèmes de fading. FUSC est implémenté de manière à minimiser la probabilité d'utiliser la même sous porteuse dans des cellules ou des secteurs adjacents.

Sur la partie downlink, le DL-PUSC avec tous les groupes de sous canaux a des performances similaires au FUSC, avec lequel il est possible de faire du facteur 3. Pour le lien montant, deux techniques sont implémentées : PUSC et OPUSC.

Cependant, OPUSC permet de transporter plus de données (ayant plus de data slot) ; cela est due à la petite taille de la plaque d'allocation selon le même nombre de sous porteuses.

#### 2.4.2.5 Allocation de sous porteuses adjacentes

Le Band AMC et le PUSC-ASCA (Adjacent subcarrier allocation) sont des techniques dites ASCA. Au moyen de ces méthodes, on profite ainsi sur chaque sous porteuses du gain fréquentiel ainsi que du gain des multi utilisateurs sur des canaux de fading non sélectifs.

Dans les permutations de sous porteuses adjacentes, les symboles de données dans un sous canal est assigné à une sous porteuse adjacente, et la sous porteuses pilote et de données sont assignées sur des positions fixes dans le domaine fréquentiel au sein d'un symbole OFDMA.

Cette permutation peut être similaire pour l'UL ainsi que le DL [29].

- Band AMC : Par définition, l'allocation Band AMC est un ensemble ou un bin de neuf sous porteuses contigües dans un symbole OFDMA ; c'est une unité basique d'allocation autant sur la partie UL et DL. Un groupe de quatre lignes de bins est appelé une bande physique. Un slot AMC consiste en un groupe de 6 bins contigües sur la même bande. Un seul type de slot a été défini, celui-ci est composé de deux bins de trois symboles.
- PUSC ASCA : C'est une méthode distribuée de clusters de sous porteuses selon le mode PUSC. La structure du symbole utilise les mêmes paramètres que ceux habituellement utilisés dans le PUSC, et la structure du cluster de sous porteuses est conservée ; seule l'allocation des sous porteuses par cluster est différente du mode PUSC par rapport au PUSC défini précédemment.

L'utilisation d'allocation de sous porteuses adjacentes est utilisée dans les zones où l'on utilise du beamforming ou plus généralement tout système AAS (Adaptive Antenna System).

#### 2.4.2.6 Mécanismes ARQ et H-ARQ

L'ARQ est un mécanisme permettant d'associer le FEC avec la politique de modulation. Cependant, pour accroître cette concordance entre le décodage et chaque unité de codage ou modulation, appelée burst ou profile en WiMAX, le mécanisme HARQ (hybrid automatic repeat request) est utilisé [12] [19] [31].

La détection d'erreurs des bits d'informations est ajoutée aux profiles de données encodés qui doivent être transmises.

Dans la partie réception, le CRC (cyclic redundancy check) est construit pour détecter les erreurs de décodage. Si les erreurs sont trouvées, une requête de retransmission est envoyée par le récepteur pour un nouveau profile depuis l'émetteur. Puis, une poursuite de combinaison est utilisée pour fusionner le taux maximal avec l'original et les profiles retransmis.

Cependant, HARQ n'est valide qu'en utilisant  $N$  canaux de protocole « Stop and Wait » qui fournissent des réponses rapides aux erreurs de paquets et qui améliorent la couverture d'une cellule.

HARQ combiné ensemble avec CQICH et l'AMC fournissent une adaptation des liens plus robuste en environnement mobile i.e. dans un véhicule roulant à 120 km/h [1] [31].

#### 2.4.2.7 Ordonnancement multi usagers

##### *a) Diversité de transmission*

- *Diversité en fréquence*

La diversité en fréquence implique la transmission ou la réception d'un signal sur différentes fréquences porteuses séparées par une valeur supérieure à la bande de cohérence du canal. Lorsque les sous canaux sont composés de sous porteuses distribuées sur la bande fréquentielle (exemple des sous canaux FUSC, PUSC en IEEE 802.16), ils ont une qualité moyenne grâce à la diversité fréquentielle. En effet, pour un utilisateur donné, un sous canal comporte à la fois des sous porteuses de bonne et de mauvaise qualité. Dans un contexte multicellulaire, cela permet de moyenner les interférences entre les cellules

- *Diversité en temps*

Afin de lutter contre les effets causés par un canal à évanouissements rapides (sélectif en temps), on peut songer à transmettre un même message à des intervalles de temps différents dont la durée est supérieure au temps de cohérence du canal. La diversité en temps est possible grâce au codage de canal, l'entrelacement ou encore la possibilité de retransmettre le signal.

Le codage canal peut être considéré comme une forme « d'étalement dans le temps ». Son but est d'atteindre une certaine probabilité d'erreur avec le rapport  $E_b/N_0$  minimum, ou à l'inverse, pour un  $E_b/N_0$  donné, de réduire la probabilité d'erreur. La plupart des techniques de codage canal sont conçues pour corriger des erreurs aléatoires. Cependant, dans la pratique, pendant un évanouissement, un grand nombre d'erreur en rafale peuvent apparaître et les codeurs canal perdent de leur efficacité. Le but de l'entrelacement est de distribuer les bits du message à transmettre de manière aléatoire, ce qui permet d'améliorer les performances du codage canal.

- *Diversité multi utilisateur*

Lorsqu'on profite de la diversité multiutilisateur, on affecte les sous porteuses aux différents utilisateurs de façon à maximiser le débit sur chacune d'entre elles : c'est une forme d'opportunisme. En théorie, on affecte les sous porteuses une par une. En pratique, on affecte plutôt des sous canaux composés de sous porteuses adjacentes (sous canaux AMC en IEEE 802.16).

Le *waterfilling* et l'adaptation de lien peuvent être utilisés pour déterminer la puissance et la modulation sur une sous porteuse (ou un sous canal). La connaissance de l'état du canal est alors critique.

- *Diversité spatiale*

On peut parler de diversité spatiale ou de diversité d'antennes, lorsque l'on utilise plus d'une antenne à l'émission ou à la réception. Cette technique permet de pallier les effets des évanouissements à court terme.

Si, à un instant donné, la puissance du signal transmis par une antenne peut devenir très faible, elle peut rester constante lorsque le même signal est transmis par d'autres antennes. La diversité spatiale consiste précisément dans le fait de mettre à profit ces disparités, à condition toutefois de décorréler les différentes antennes.

#### *b) Ordonnanceur MAC*

La station de base BS décide à propos de la transmission sur lien montant et lien descendant. En downlink, seulement les BS transmettent, mais en uplink tous les SS peuvent transmettre. L'allocation des ressources UL pour la transmission de paquets est améliorée par la BS à travers les signalisations vers les SS.

Chez les SS, l'ordonnanceur récupérera les paquets depuis la queue de la file d'attente et les transmet vers la BS sur des ressources appropriées et assignées, définies par l'UL-MAP qui est envoyé par la BS [12] [19].

Le rôle de l'ordonnanceur (que ce soit du côté BS ou SS) est de transférer les paquets depuis la queue des connexions aux profils burst, pour déterminer la quantité de paquets qui seront envoyés dans les profils et aussi des fragmentations nécessaires.

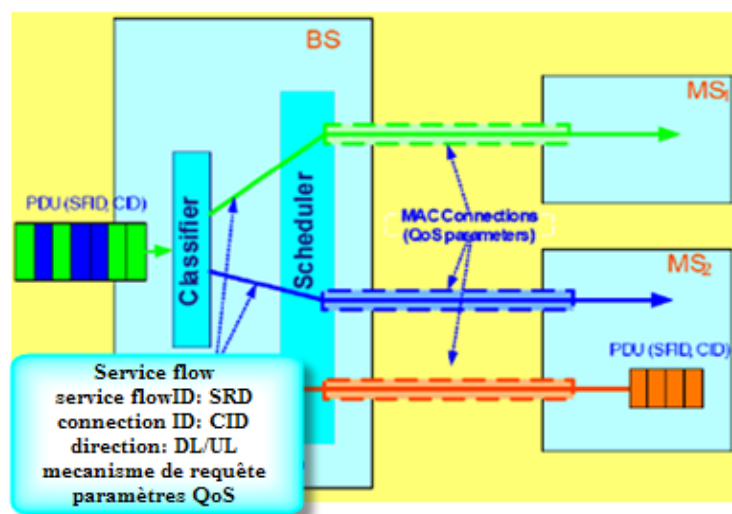
Tous les paquets de la couche Application sont classifiés sur la base du CID et SIF, et sont précédés de la queue (i.e., UGS, rtPS, ertPS, nrtPS, and BE).

L'allocation des ressources 802.16 vers les BS (lien montant) est basée sur un mécanisme RGM (request-grant mechanism).

Les requêtes d'allocation de bande passante se font toujours par connexion. Plusieurs types de mécanisme d'allocation peuvent être établis sur différentes classes de trafics tels que [23]:

- *Unsolicited bandwidth grants.* Un SS ou MS envoie une requête en une seule fois seulement, et la BS commencera à envoyer des requêtes grants pour l'allocation périodique des ressources. Ce type de mécanisme est convenable pour la classe UGS.
- *Unicast polling.* Cette technique d'allocation est utilisée quand une demande de bande passante n'est pas assez importante pour employer l'UBG (unsolicited bandwidth grants). Quand un SS est choisi, les ressources (communiqués via les messages UL-MAP) sont allouées en uplink pour permettre aux SS d'envoyer une requête d'allocation de bande passante. Si ce SS n'a nul besoin de faire une requête (décision de l'ordonnanceur de SS ou MS), il peut utiliser cette allocation de bande de fréquence pour envoyer des données. Et s'il n'a pas de données à transmettre il peut utiliser le CID de rembourrage pour indiquer qu'il n'y a pas de requête de bande passante envoyée. Cette méthode d'accès est valable pour les classes rtPS, ertPS, et nrtPS.
- *Contention-based polling.* S'il n'y a pas de bande passante suffisante pour scruter les SS individuellement et que si quelques SS ou MS sont inactifs, une certaine quantité de chaque sous trame UL (appelée contention part) est allouée pour envoyer des requêtes basées contention. Ce mécanisme d'accès est convenable pour la classe de trafic Best Effort. Les ressources Contention peuvent être utilisées par tous les SS (broadcast polling) ou un groupe de SS ou MS (multicast polling).

La figure 2.06 ci-dessous montre un ordonnanceur MAC SS [1] [12] [19]:



**Figure 2.06 :** Architecture d'un ordonnanceur MAC

#### 2.4.2.8 Gestion de puissances (mode sleep- mode IDLE)

Le WiMAX Mobile supporte deux modes d'opérations de gestion de puissances [1] [12] [19]:

- Sleep Mode.
- Idle Mode.

Le mode Sleep est un état sur qui les SS conduisent de façon autonome sur des périodes d'absence pré-négociées depuis l'interface Air de la BS serveuse. Ces périodes sont caractérisées par l'indisponibilité des SS, comme observées depuis la BS serveuse ou du trafic DL à UL. Ce mode est visé pour minimiser l'usage de la puissance du SS mais surtout pour minimiser l'usage des ressources radios de la BS serveuse. Il fournit aussi une grande flexibilité aux SS pour scanner d'autres BS et pour collecter des informations servant à assister le handoff pendant la période Sleep.

Le mode Idle quant à lui fournit aux SS un mécanisme périodique de trafic broadcast de messages valables qu'en DL et sans registration de la BS spécifique car généralement, un SS est toujours cerné par plusieurs BS. Ce mode profite aux SS en enlevant les besoins de handoff et d'autres opérations normaux mais aussi, profite au réseau et aux BS en éliminant l'interface Air et le trafic handoff depuis les SS inactifs tant qu'il existe encore une allocation simple et une méthode de paging pour alerter le SS en attendant le trafic DL.

### 2.4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini l'importance qu'impose la modélisation des deux couches spécifiques de la norme IEEE 802.16 notamment de la modélisation de PHY et de MAC dans un processus de planification d'un réseau WiMAX. Effectivement, tous dimensionnements de réseaux quelques soient leurs natures doivent passer au préalable par l'étude des protocoles et des sous couches constitutives pour déterminer les paramètres clés qui définissent la performance du système en question. On a vu tout au long de ce chapitre le déroulement d'un tel processus par la description du modèle de canal, techniques de transmission, méthodes d'accès, et des différents types de modulation et codage, pour finir par la modélisation de la couche MAC qui a la spécificité de gérer la QoS en passant par l'étude du modèle de réseau et de sa configuration.

## CHAPITRE 3

### EVALUATION DE PERFORMANCE D'UN RESEAU WIMAX

#### 3.1 QoS dans le réseau

La notion de qualité de service (QoS) a progressivement fait son apparition pour faire face aux différentes contraintes qu'exigeaient certains types d'applications, essentiellement dans le monde de l'interactif.

En effet, à l'origine, la majorité du trafic Internet était constituée de données textuelles n'ayant pas d'exigences spécifiques fortes mais progressivement, des outils faisant intervenir simultanément du transfert de fichier, de la messagerie instantanée, de l'audio ou encore de la vidéo sont apparus. Dès lors, des garanties sur la bande passante, le délai ou encore la gigue devaient être fournies aux utilisateurs pour en assurer le bon fonctionnement.

Cependant, l'architecture de l'Internet, basée sur la pile TCP/IP, n'a pas été conçue dans le but de différencier les types de trafic et est actuellement dominée par un seul modèle de service : le *Best Effort*. Cette architecture ne peut garantir un fonctionnement correct de tous les types d'applications qu'en proposant le surdimensionnement du réseau qui consiste à le doter d'une capacité qui dépasse largement les besoins. Mais cette approche ne fait que repousser le problème et peut difficilement s'appliquer aux technologies d'accès sans fil limitées en bande passante.

Ainsi, une gestion efficace des ressources ainsi qu'une garantie de la couverture est nécessaire pour fournir aux utilisateurs de l'Internet des garanties de QoS adaptées à leur besoin [35].

##### 3.1.1 Réalité sur le réseau

La notion de QoS repose sur l'hypothèse suivante : le réseau possède des ressources finies et une pénurie de ses ressources est fortement possible dans des conditions d'utilisation. Le réseau étant utilisé simultanément et en permanence par plusieurs utilisateurs, ainsi, ce risque de pénurie peut apparaître. Cette pénurie serait provoquée par une demande d'utilisation massive et simultanée des ressources partagées, et aurait pour conséquence la congestion du réseau.

En effet, l'ennemi à combattre est la congestion du réseau, elle peut se traduire par un blocage des données et une dégradation partielle et totale des performances du réseau. D'une part parce qu'elle introduit un retard et que le retard est aussi imprévisible qu'est la congestion elle-même.

### 3.1.2 Les principales métriques liées à la QoS

Selon le standard ISO 8402, la qualité de service se définit comme « l'ensemble des caractéristiques d'un service qui déterminent sa capacité à satisfaire des besoins formulés ou supposés ». La recommandation E800 de l'ITU-T définit quant à elle la QoS comme « l'effet collectif de la performance d'un service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur de ce service ». Enfin, dans, l'IETF définit la qualité de service comme « un ensemble de service pré requis à remplir par le réseau lors du transport d'un flux ».

Différents types de QoS se dégagent alors de ces définitions et peuvent être séparés en trois catégories comme définies dans:

- La qualité de service **intrinsèque** qui est directement fournie par le réseau lui-même et décrite par des paramètres objectifs tels que par exemple le délai ou les pertes. C'est sur ce point que l'IETF se focalise essentiellement.
- La qualité de service **perçue** qui correspond à la qualité ressentie par l'utilisateur (aussi appelée QoE, *Quality of Experience*). Elle dépend fortement des performances du réseau mais est mesurée par une moyenne des opinions des utilisateurs. La méthode la plus utilisée est le MOS (*Mean Opinion Score*) dans laquelle un ensemble d'utilisateurs évaluent séparément la qualité ressentie d'une application entre 1 et 5, une moyenne de leur note étant ensuite réalisée. Le MOS est généralement utilisé pour la qualité audio ou vidéo d'une application mais la QoS perçue peut aussi concerner le temps de connexion, la sécurité perçue par l'utilisateur, la disponibilité du service, etc.
- La qualité de service **évaluée** qui se réfère à la volonté d'un utilisateur de continuer à utiliser tel ou tel service. Cela dépend de la QoS perçue mais aussi du prix, du service d'assistance offert par le fournisseur ainsi que d'autres aspects commerciaux.

Les principaux paramètres qui permettent de décrire la QoS intrinsèque dans les réseaux IP sont les suivants :

- Le **délai** de transfert des paquets, exprimé en millisecondes. Il est généralement mesuré de bout en bout mais peut l'être sur une portion du réseau.
- La **gigue** ou variation du délai de transfert des paquets, exprimée en millisecondes.
- Le **débit** d'informations, exprimé en bits par seconde (bit/s ou bps) ou en octets par seconde.
- Le **taux de perte** de paquet, défini comme le pourcentage de paquets perdus par rapport au nombre total de paquets émis.



### 3.1.3 Gestion de QoS dans WIMAX

Afin de gérer au mieux le trafic, WiMAX cherche à prévoir au plus près les flux qu'il doit transporter. Les utilisateurs passent un contrat dans lequel ils s'engagent à respecter les caractéristiques essentielles du trafic. Cinq classes de services ont été identifiées [35]:

#### 3.1.3.1 Unsolicited Grant Services (UGS)

Les paquets de taille fixe sont envoyés à une cadence fixe.

Nous avons là un mécanisme de type « TDM » particulièrement bien adapté à l'émulation de connexions permanentes (liaisons louées, T1, E1...) au transport de la voix et plus généralement de tous services synchronisé.

#### 3.1.3.2 Extended Real-Time Polling System (ertPS)

La cadence d'envoi des paquets est fixe. Par contre leur taille peut varier. Le transport de la voix avec suppression de blanc est pris en compte.

#### 3.1.3.3 Real-time Polling Services (rtPS)

Cette classe respecte le temps réel. Les paquets sont envoyés sans délai. La taille des paquets comme les cadences d'émission sont variables. Ce mode vise le transport de la vidéo.

#### 3.1.3.4 Non-Real-time Polling Services (nrtPS)

Le temps réel n'est pas garanti, et la taille comme la cadence d'envoi des paquets est quelconque. Seule la bande passante est garantie globalement. Cette classe optimise le transfert des fichiers.

#### 3.1.3.5 Best effort (BE)

Cette classe est dédiée au trafic internet ; elle ne propose aucune garantie de bande passante ou de temps réel.



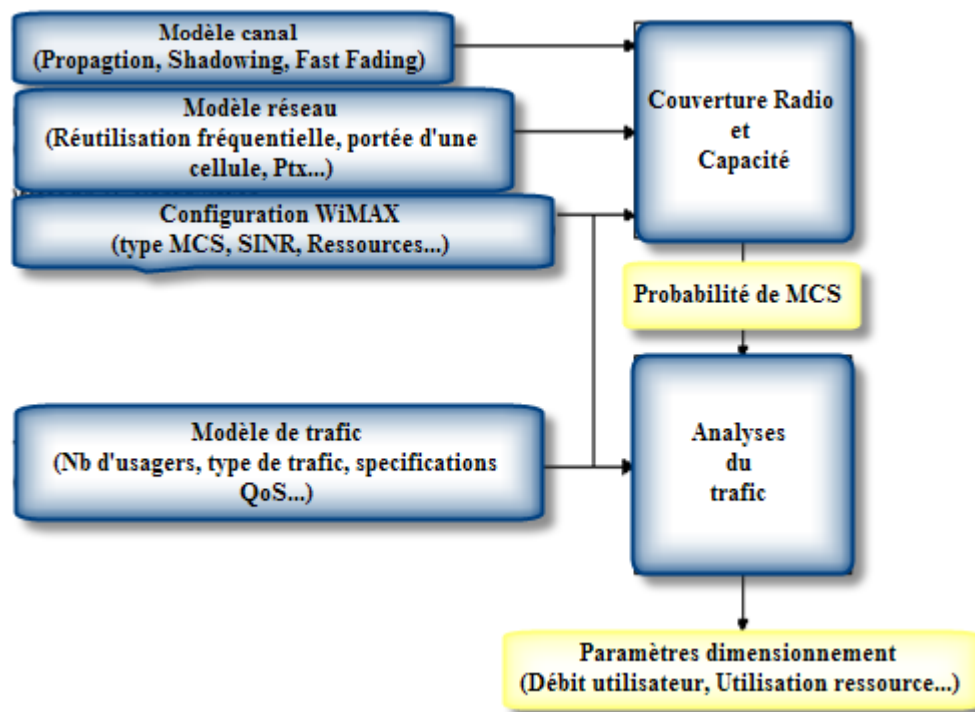
**Figure 3.01 :** Schéma des priorités dans la gestion de la QoS

### 3.2 Principe d'études des performances

De même que l'étude de l'évolution du trafic dans une journée, l'étude de la couverture et de la capacité est de première importance dans l'exercice de l'évaluation des performances des réseaux mobiles. Offrir une couverture radio et une certaine capacité dans une région est une question importante, mais la même chose avec une QoS déterminée représente un défi tout autre. Les paramètres de QoS considérés dans ce mémoire sont : le SINR effectif moyen, le débit moyen des cellules, la probabilité de dépassement et plus important, les valeurs de KPI dans l'évolution du trafic dans une cellule donnée.

Il faut noter que le SINR effectif est différent du SINR habituellement considéré sur une unique porteuse. La probabilité de dépassement est définie comme la probabilité qu'un utilisateur n'atteigne pas le niveau minimum de SINR effectif nécessaire pour se connecter à un service ou décoder les canaux de contrôle commun.

Cette distribution SINR effectif sera une entrée pour la seconde étape qui considère un système dynamique dans lequel les utilisateurs reçoivent un trafic élastique composé de périodes d'activité et de sommeil [16].



**Figure 3.02 :** *Système étudié pour l'évaluation des performances*

### 3.2.1 Indicateurs de performance

#### 3.2.1.1 Indicateur au niveau du déploiement (réutilisation fréquentielle)

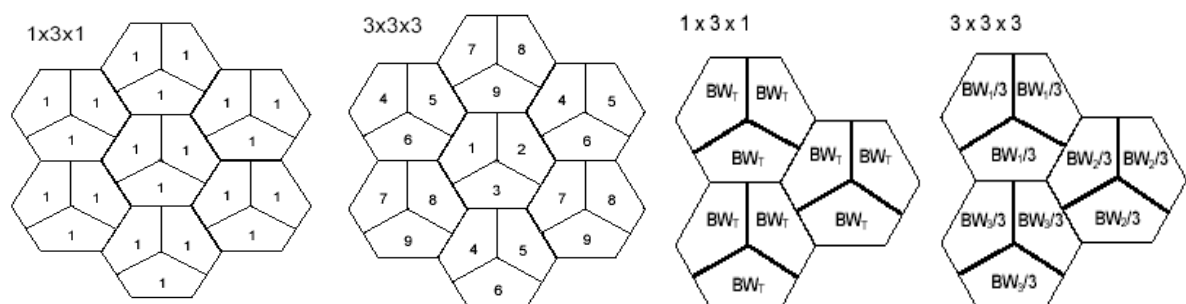
##### a) La réutilisation fréquentielle

La réutilisation fréquentielle est une technique importante dans les réseaux cellulaires. Elle est définie par l'expression :  $N_c \times N_t \times N_f$ ,

Avec  $N_c$  le nombre de cellules dans un cluster réseau, il représente la réutilisation fréquentielle intercellulaire.  $N_t$  représente le nombre de secteurs dans une cellule et  $N_f$  démontre la réutilisation fréquentielle intra cellulaire.

Nous évaluons la performance d'un réseau WiMAX dans des scenarios variés de réutilisation fréquentielle. La qualité radio en termes de SINR et la probabilité de dépassement d'une part, le débit d'autre part, sont les paramètres pris en considération pour cette analyse. Des simulations Monte Carlo, basées sur le calcul de la distribution spatiale SINR effectif en utilisant le modèle d'abstraction MIC, ont été effectuées sur la voie descendante. Les résultats de simulations montrent que certains schémas de réutilisation fréquentielle ayant une très bonne performance en termes de débit global peuvent cependant avoir une probabilité de dépassement importante. Les schémas de réutilisation fréquentielle satisfaisant les deux paramètres (le dépassement et le débit) de la meilleure manière possible, sont suggérés pour les réseaux WiMAX.

L'influence du rayon de la cellule et de la puissance par sous-porteuse est également étudiée pour des schémas de réutilisation fréquentielle différents.



**Figure 3.03 :** Types de réutilisation de fréquences

On présentera les détails sur le modèle de SINR et quelques points importants de simulation suivis par les résultats clés.

Le SINR d'une sous-porteuse  $n$  est calculé selon la formule suivante [16] [24]:

$$SINR_n = \frac{P_{n,Tx} a_{n,ScH}^0 a_{n,FF}^0 \frac{K}{d^{\frac{K}{\alpha}}}}{N_0 W_{Sc} + \sum_{b=1}^B P_{n,Tx} a_{n,ScH}^b a_{n,FF}^b \frac{K}{d^{\frac{K}{\alpha}}} \delta_n^b} \quad (3.01)$$

Où

$P_{n,Tx}$  est la puissance par sous-porteuse,

$a_{n,ScH}^0$  et  $a_{n,FF}^0$  représentent les facteurs du masque (log-normal) et d'évanouissement rapide (Rician/Rayleigh) respectivement sur le signal reçu de la BS serveuse,

B est le nombre de BS interférences,

K et  $\alpha$  sont les constantes du modèle d'affaiblissement de parcours.

$d^0$  est la distance entre le MS et la BS serveuse.

Les termes en exposant b sont liés à toutes les BS interférences.

$W_{Sc}$  est la bande passante d'une sous-porteuse,

$N_0$  est la densité de bruit thermique et  $\delta_n^b$  est égale à 1 si la BS interférence transmet sur la sous-porteuse n et à 0 sinon.

#### *b) Modélisation de la distribution spatiale SINR effectif*

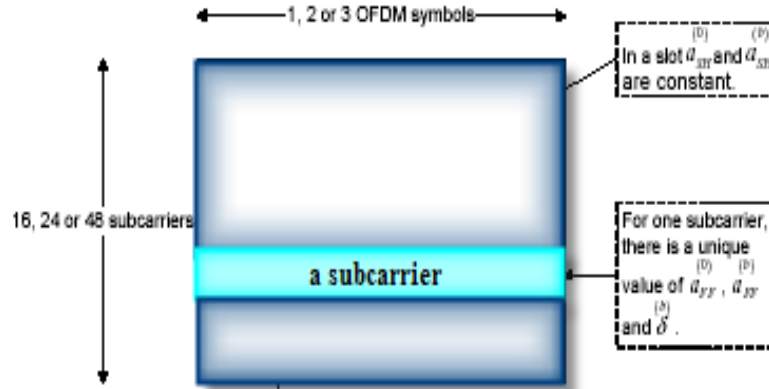
Une fois le SINR d'une sous-porteuse déterminée, le  $SINR_{eff}$  est calculé sur les sous-porteuses d'un slot qui est l'unité de base de la ressource dans le système IEEE 802.16.

Il y a certaines considérations à propos du masque et de l'évanouissement rapide qui sont comptabilisées pendant le calcul du  $SINR_{eff}$ .

Le masque est tiré au hasard pour un slot et est le même pour toutes les sous porteuses d'un slot.

En supposant que la distribution des sous-porteuses en sous canaux est uniforme et aléatoire, l'évanouissement rapide est tiré indépendamment pour chaque sous-porteuse d'un slot [16].

Les simulations Monte Carlo sont effectuées dans le sens descendant. Le SS ou MS est placé dans l'espace cellulaire en utilisant une distribution aléatoire uniforme.



**Figure 3.04 :** Masquage et fast fading sur un slot PUSC/AMC/FUSC

Les paramètres de sortie obtenus par les simulations sont les suivants : les valeurs moyennes de  $SINR_{eff}$ , le débit moyen de la cellule et la probabilité de dépassement.

- Modélisation à partir de MIC

La première étape de cette méthode est de calculer la capacité de la  $n$ ème sous porteuse utilisant la formule de Shannon [16] [24]:

$$C_n = \log_2(1 + SINR_n) \quad (3.02)$$

Puis en utilisant cette valeur, MIC est tiré de la moyenne de la capacité des  $N$  sous porteuses :

$$MIC = \frac{1}{N'} \sum_{n=1}^{N'} C_n \quad (3.03)$$

Finalement,  $SINR_{eff}$  est obtenu à partir de la valeur de MIC par l'équation:

$$SINR_{eff} = 2^{MIC} - 1 \quad (3.04)$$

- Calcul du débit global cellulaire

Le débit moyen global d'une cellule WiMAX  $X$  [bps] est donné par [16] [24]:

$$X = \frac{N_s}{T_F} \sum_{k=1}^K m_k p_k \quad (3.05)$$

Où :

$K$  représente le nombre total de types de MCS considérés.

Les deux autres variables,  $p_k$  et  $m_k$ , sont respectivement la probabilité et la quantité de bits par slot pour chaque MCS de type  $k$  et  $T_F$  la durée d'une trame TDD.

$N_s$  est le nombre de slots dans un sous trame DL d'une cellule et sa valeur dépend de la réutilisation fréquentielle ( $N_c \times N_t \times N_f$ ), de la bande fréquentielle, du type de permutation des sous porteuses et du nombre de symboles OFDM en sous trame DL.

Pour un type de permutation donné et du nombre de symbole OFDM,  $N_s$  le nombre de slots dans une trame DL d'une cellule est donné par:

$$N_s = N_{s111} \times \frac{N_t}{N_c N_f} \quad (3.06)$$

Où  $N_{s111}$  est le nombre de slots en sous trame DL pour une réutilisation 1x1x1.

### *c) Paramètres utilisés dans un modèle de planification*

Etant donné qu'un modèle de planification implique plusieurs étapes et processus, il est donc nécessaire de considérer tous les paramètres qui modélisent chaque module de l'architecture en couche de l'IEEE 802.16 telles que la couche MAC et la couche PHY.

En effet, ces deux couches spécifiques à tout réseau sans fil affichent tous les attributs nécessaires à l'évaluation de performances orientée couverture ainsi qu'au déploiement.

Les tableaux 3.01 et 3.02 ci-dessous résument tous les paramètres nécessaires à la planification d'un réseau WiMAX mais plus important encore, à l'évaluation de ses performances orientée couverture [14]:

| Paramètres           | Description                                                       | Valeurs                                             |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $f$                  | Fréquence porteuse                                                | 2.5GHz                                              |
| $P_{TX}$             | Puissance totale rms transmise dans une cellule                   | 43 dBm                                              |
| $\frac{K}{d^\alpha}$ | Modèle de perte de trajet                                         | COST-HATA-231, $\alpha = 3.5$ ,<br>$K = 1.4 * 10^4$ |
| $N_F$                | Nombre de symbole OFDMA dans une trame                            | 47                                                  |
| $N_{DL}$             | Nombre de symbole OFDMA dans une donnée DL                        | 30                                                  |
| $R_{DLUL}$           | Taux de symbole OFDMA de DL à UL                                  | 2 :1                                                |
| $BW_T$               | Bande de fréquence                                                | 15MHz                                               |
| FFT Size             | Nombre total de sous porteuse avec BW=5MHz                        | 512                                                 |
| $N_{sc}$             | Nombre total de sous porteuse utilisée avec BWT (données+pilotes) | 1260                                                |
| $N_{sch}$            | Nombre total de sous canaux correspondant à BWT                   | 45                                                  |
| $\sigma_{sh}$        | Déviation standard en masquage log normal                         | 9dB                                                 |
| $\Delta f$           | Espacement sous porteuse                                          | 10.93KHz                                            |
| $T_S$                | Durée d'un symbole OFDMA utile                                    | 91.3 $\mu s$                                        |
| $T_F$                | Durée d'une trame                                                 | 5ms                                                 |
| $N_0$                | Densité du bruit thermique                                        | -147dBm/Hz                                          |
| R                    | Rayon d'une cellule hexagonale                                    | 1.5km                                               |
| $h_{BS}$             | Hauteur d'un BS                                                   | 32m                                                 |
| $h_{MS}$             | Hauteur d'un MS                                                   | 1.5m                                                |
| $\theta_{3dB}$       | Largeur d'un faisceau beam à 3dB                                  | 70 deg                                              |
| $G_{FB}$             | Front-to-back antenna power ratio                                 | 25dBi                                               |
| $G_{max}$            | Gain d'antenne (boresight)                                        | 16dBi                                               |

**Tableau 3.01:** *Tableau des paramètres nécessaires à la simulation dans une planification*

| Index | MCS      | Bits par slots $m_k$ | $SINR_{eff}$ [dB] |
|-------|----------|----------------------|-------------------|
| 0     | Outage   | 0                    | <2.9              |
| 1     | QPSK1/2  | 48                   | 2.9               |
| 2     | QPSK3/4  | 72                   | 6.3               |
| 3     | 16QAM1/2 | 96                   | 8.6               |
| 4     | 16QAM3/4 | 144                  | 12.7              |
| 5     | 64QAM1/2 | 192                  | 16.9              |
| 6     | 64QAM3/4 | 216                  | 18                |

**Tableau 3.02:** Seuils des valeurs du SINR effectif pour chaque Modulation et codage MCS [16].

### 3.2.1.2 KPI (perçus par l'utilisateur)

#### a) Définition

Les KPI ou indicateurs clef de performance en français, comme son nom l'indique, sont des indicateurs que l'on mesure ou que l'on prend pour obtenir une valeur afin d'analyser la performance du réseau et de connaître son état.

#### b) Principe

Les KPI jouent un rôle important dans la détermination des failles de la QoS. En effet, ces indicateurs permettent la localisation des anomalies dans le réseau et par la suite, l'identification des causes de ces problèmes afin de faire les actions correctives nécessaires.

Les KPI évaluent fondamentalement la performance d'un service suivant [35]:

Le volume du trafic dans le réseau,

L'accessibilité au réseau,

Le maintien de la connexion,

La gestion des ressources,

Le comportement du Soft et Hard Handover.

Si un des KPI dépassent les seuils fixés par l'opérateur, le superviseur du réseau remarque qu'un problème est parvenu au niveau de la fonctionnalité qu'assure cet indicateur. Dans la phase d'analyse de la performance du réseau et de la détection des anomalies, il y a une comparaison entre les indicateurs obtenus et les paramètres seuils (fixés par l'opérateur) qui présentent les seuils d'une qualité de service acceptable. En effet, la mesure régulière et périodique des KPI est une méthode d'assurer que la fonction d'optimisation progresse et que la maintenance n'affecte pas négativement la performance perçue par l'utilisateur.



| Indicateurs KPI                                  | Seuils |
|--------------------------------------------------|--------|
| Taux de perte de sessions                        | <5%    |
| Taux de congestion                               | <2%    |
| Taux de retransmission de sessions               | <5%    |
| Taux de sessions réussies                        | >95%   |
| Taux d'établissement de sessions                 | >95%   |
| Taux de coupure sessions pendant la réallocation | 2%     |
| Taux de coupure sessions radio                   | 2%     |
| Taux de dépassement ou <i>outage</i>             | <2%    |

**Tableau 3.03:** *Seuils de quelques KPI.*

### 3.2.2 Caractérisation de la performance en WIMAX

La qualité de service d'un réseau cellulaire comme le WiMAX perçue par les usagers du réseau est une notion qui regroupe plusieurs aspects qui peuvent être appréhendés à travers les critères suivants :

Couverture du réseau (puissance du signal reçue en tout point de la couverture) ;

Facilité d'établissement de session ou connexion (taux de congestion du réseau) ;

Interruption de session ou connexion (taux de perte de paquet).

Du côté opérateur, la QoS est évaluée par les moyens donnés par le tableau 3.03 ci-dessous [35]:

| Indicateurs de QoS                   | Mode d'évaluation                     |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Couverture                           | Mesures radio et plaintes des abonnés |
| Taux de congestion                   | Mesures système                       |
| Taux de perte de paquet              | Mesures système                       |
| Taux de dépassement ou <i>outage</i> | Mesures radio et plaintes des abonnés |

**Tableau 3.04:** *Indicateurs de QoS.*

#### 3.2.2.2 Couverture

L'état de la couverture du réseau est évalué par l'abonné directement sur son terminal (PDA, portable, etc.) qui affiche le nombre de barètes indiquant la puissance du signal reçu ou l'aptitude du réseau à fournir son service.

Un faible niveau de champ ou l'absence du champ se traduit par la présence d'une ou deux barrettes sur l'écran du terminal ou par l'indication d'absence du signal [35].

L'indicateur de couverture du réseau exprime en tout point de service la probabilité d'établir une communication de bonne qualité. Une valeur typique de cet indicateur est de 95%. Cet indicateur fait partie des contraintes considérées lors de l'établissement de la couverture du réseau :

Les principales causes d'une mauvaise qualité de service du point couverture sont :

- Nombre insuffisant de stations de base ;
- Mauvais paramétrage (physique et logique) des stations de base (tilts, azimuts, etc.) ;
- Types d'antennes et qualité d'installation (perte dans les câbles, etc.) ;
- Qualité du terminal de l'utilisateur (sensibilité) ou détérioration de la partie émission/réception RF

### 3.2.2.3 Taux de congestion

Cet indicateur reflète la disponibilité des ressources, il donne la probabilité que toutes les ressources soient occupées lors d'une demande de canal. Dans le processus de dimensionnement de ressources, cet indicateur est appelé taux de blocage. Au niveau d'abonné, une mauvaise qualité de service, pour cet indicateur se traduit par la difficulté d'établir une connexion : l'abonné doit tenter plusieurs fois sa connexion avant d'obtenir une ressource.

Les principales causes d'une mauvaise qualité de service du point de vue disponibilité des ressources sont [35]:

- Capacité insuffisante (incohérence entre le dimensionnement des ressources et le trafic) ;
- Valeur inadaptée du seuil d'accès minimum à la cellule ;
- Interférence sur le lien montant ou le lien descendant qui rendent difficile l'établissement d'une liaison de signalisation pour l'établissement d'une connexion ;
- Mauvais paramétrage du réseau qui ne permet pas une répartition homogène du trafic entre les cellules.
- Problèmes d'allocation des ressources radio qui sont des problèmes très critiques.

#### 3.2.2.4 Taux de perte de paquet

La coupure d'une connexion ou session a plusieurs origines. Les principales raisons qui conduisent à la perception d'une mauvaise qualité de service par l'abonné pour l'indicateur d'interruption des connexions ou sessions sont les suivantes [24] [35]:

- Mauvaise couverture (trou de couverture ou zone de couverture insuffisante) ;
- Interférences élevées ayant entraîné l'impossibilité de maintenir les liens de signalisation et/ou de trafic ;
- Problème de handover (Mauvais paramétrage ou congestion dans la cellule cible).
- Mauvais paramétrage radio (liste des cellules voisines incomplète par exemple).
- Problèmes d'allocation de ressources radio.

#### 3.2.2.5 Taux de dépassement ou *outage*

Le taux de dépassement est un critère auquel un utilisateur n'atteint pas le débit minimal acceptable pour se connecter, cela constitue un *outage*, ce genre de circonstance arrive souvent selon les raisons suivantes [29]:

- Interférence sur le lien montant ou le lien descendant qui rendent difficile l'établissement d'une liaison de signalisation pour l'établissement d'une connexion ;
- Mauvais paramétrage du réseau qui ne permet pas une répartition homogène du trafic entre les cellules.
- Mauvaise couverture (trou de couverture ou zone de couverture insuffisante) ;

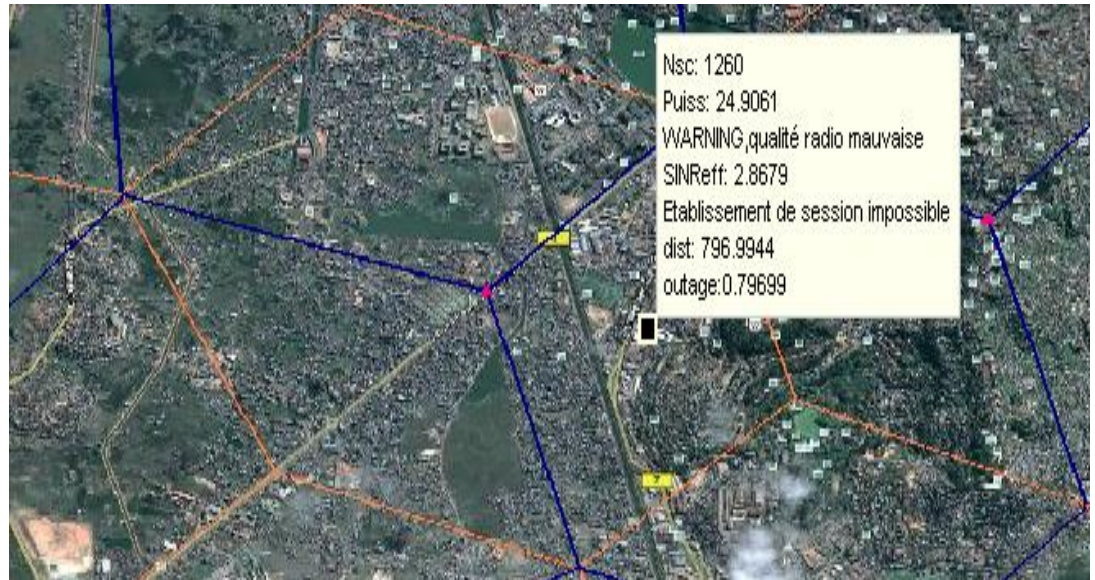
### 3.3 Analyse des performances du réseau

#### 3.3.1 Niveau de couverture selon le choix de la réutilisation de fréquence

Après avoir réuni toutes les données et paramètres nécessaires au réseau, on reproduit graphiquement les analyses sur terrain à l'aide d'une carte virtuelle avec laquelle on simule un usager placé à plusieurs endroits de chaque secteur d'une cellule donnée et géré par une BS. Doit-on faire adopter une configuration Reuse 3 ou Reuse 1 ? Quels sont les choix technologiques concernant la Reuse 1 à adopter afin d'avoir des zones d'interférences minimales ?

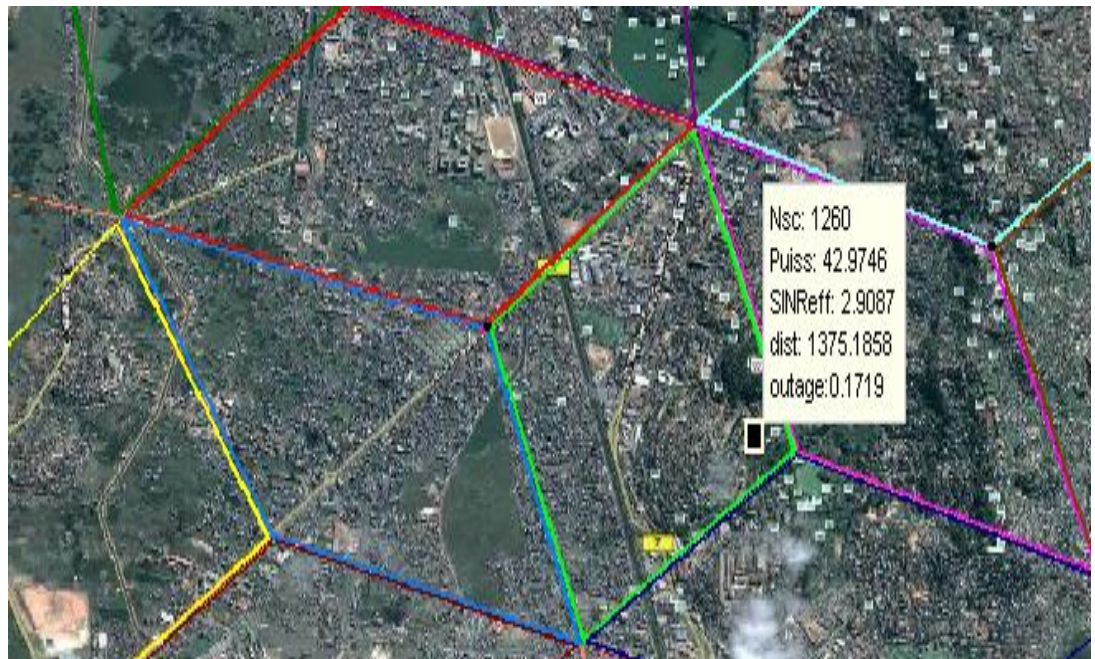
a) Simulation

En cliquant sur le bouton 1x3x1, on obtient une carte où figure la couverture de chaque cellule suivant un schéma de réutilisation de fréquence 1x3x1.



**Figure 3.05 :** *Evaluation de la qualité radio en 1x3x1.*

Et en cliquant sur le bouton 3x3x3, on obtient une carte où figure la couverture de chaque cellule suivant un schéma de réutilisation de fréquence 3x3x3.



**Figure 3.06 :** *Evaluation de la qualité radio en 3x3x3.*

## b) Interprétation

En effectuant un déploiement en Reuse 1, nous sommes amenés à penser que le plan fréquentiel est plus simple à gérer. Cependant, en termes d'interférences, cela est beaucoup plus difficile car il leur faut gérer les zones d'interférences entre chaque secteur et chaque cellule, c'est pourquoi à une certaine distance de la BS, le taux de  $SINR_{eff}$  étant très faible. Par contre, bien que l'objectif de tout opérateur soit d'économiser l'utilisation des ressources, un déploiement en Reuse 3 permet de jouir d'une meilleure qualité radio qu'en Reuse 1.

On peut en déduire à l'aide du tableau ci-dessous :

| Type de réutilisation | Moyenne de $SINR_{eff}$ [dB] | Probabilité de dépassement | Débit moyen [Mbps] |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1x3x1                 | 6                            | 0.44                       | 23.3               |
| 3x3x3                 | 18.3                         | 0.13                       | 7.2                |

**Tableau 3.05:** Comparaison en termes de performance entre la Reuse 1 et la Reuse 3

Dans une situation de Reuse 1, l'ensemble de la trame OFDMA est divisée en trois segments. A chaque secteur est alloué un segment.

|           |
|-----------|
| Segment 1 |
| Segment 2 |
| Segment 3 |

**Figure 3.07 :** Schéma d'allocation de trame en segments

La permutation ne se fait en fait uniquement qu'à l'intérieur des 3 segments lors de l'attribution des sous porteuses aux utilisateurs. C'est la méthode dite PUSC. Cependant, quelle est la situation en bordure de secteur ?

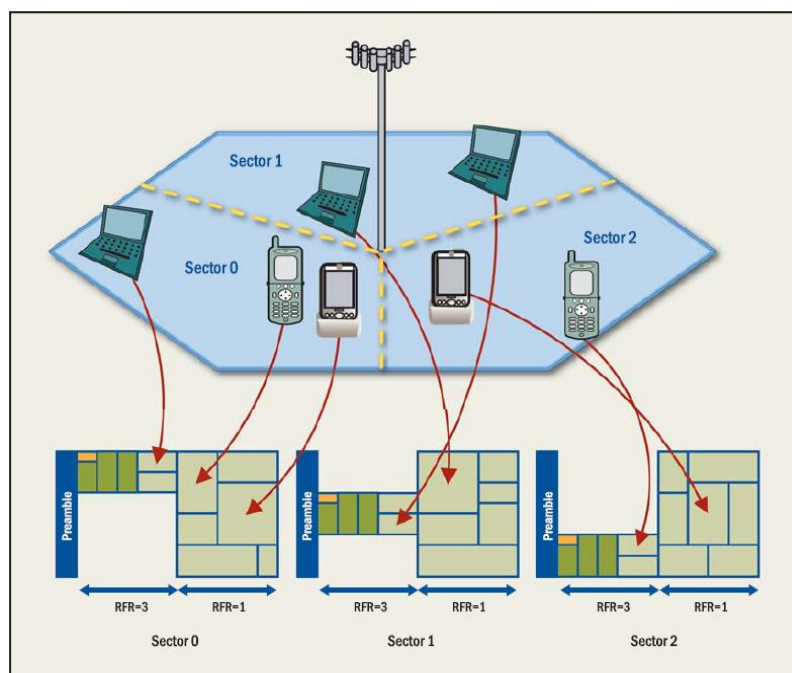
Cela est complexe en effet, au moyen des méthodes d'allocation de sous porteuses, notamment du PUSC, nous sommes assurés que deux utilisateurs ne possèdent pas les mêmes sous porteuses.

Cependant, entre deux secteurs, la probabilité d'avoir deux utilisateurs ayant les mêmes sous porteuses ou quelques sous porteuses communes n'est alors loin d'être nul.

Il aurait suffi, alors d'utiliser la même méthode de permutation des sous porteuses mais d'adjoindre une permutation globale sur l'ensemble des sous porteuses de l'ensemble des segments ; à ce moment, nous nous assurons que les sous porteuses allouées aux utilisateurs entre deux secteurs seront différentes. Cela est dû en fait au mélange global.

Cette solution est tout de même bancable, dans une optique de déploiement en réutilisation fréquentielle de facteur 1.

En effet, nous pourrions utiliser des méthodes dites de fractional frequency reuse. Cela revient en fait à faire un plan fréquentiel comme ci-dessous :



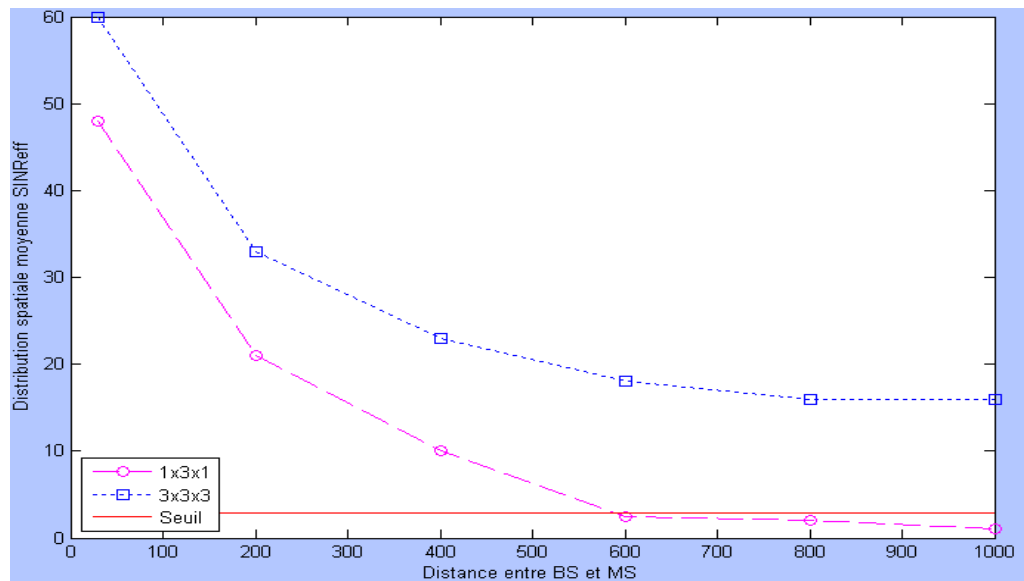
**Figure 3.08 :** Méthode de répartition de ressources dans une trame selon le type de réutilisation de fréquences en WiMAX

Les utilisateurs se situant à proximité du mât sont en fait dans une situation de reuse 1 ; l'ensemble des sous porteuses sont utilisés par tous les utilisateurs.

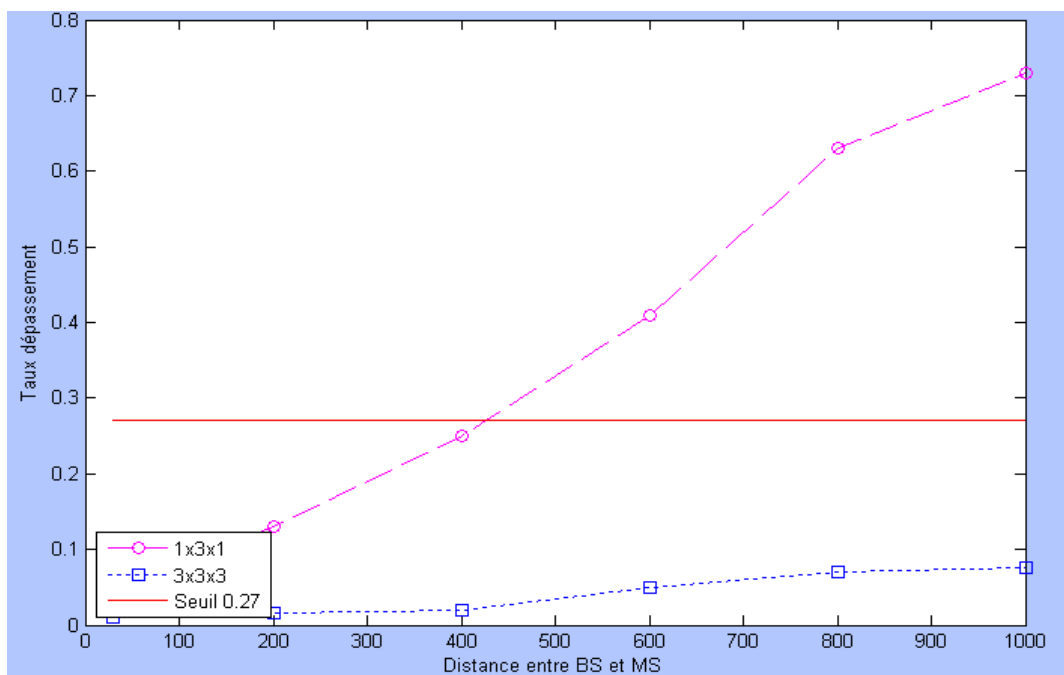
#### c) Taux de dépassement ou *outage*

Ainsi, à partir des données reçues de la figure précédente, on peut analyser la performance de notre réseau en termes de taux d'établissement de session en cliquant sur le bouton TAUX DEPASSEMENT de la fenêtre performance. A noter que le taux maximal acceptable est de 2.9%.

La figure 3.08 et 3.09 donne l'évaluation du SINR et de l'évolution du taux de dépassement en fonction de la distance selon les schémas de réutilisation de fréquence.



**Figure 3.09 :** Comparaison du  $SINR_{eff}$  entre la reuse 1 et 3 en fonction de la distance entre la BS serveuse et le MS.

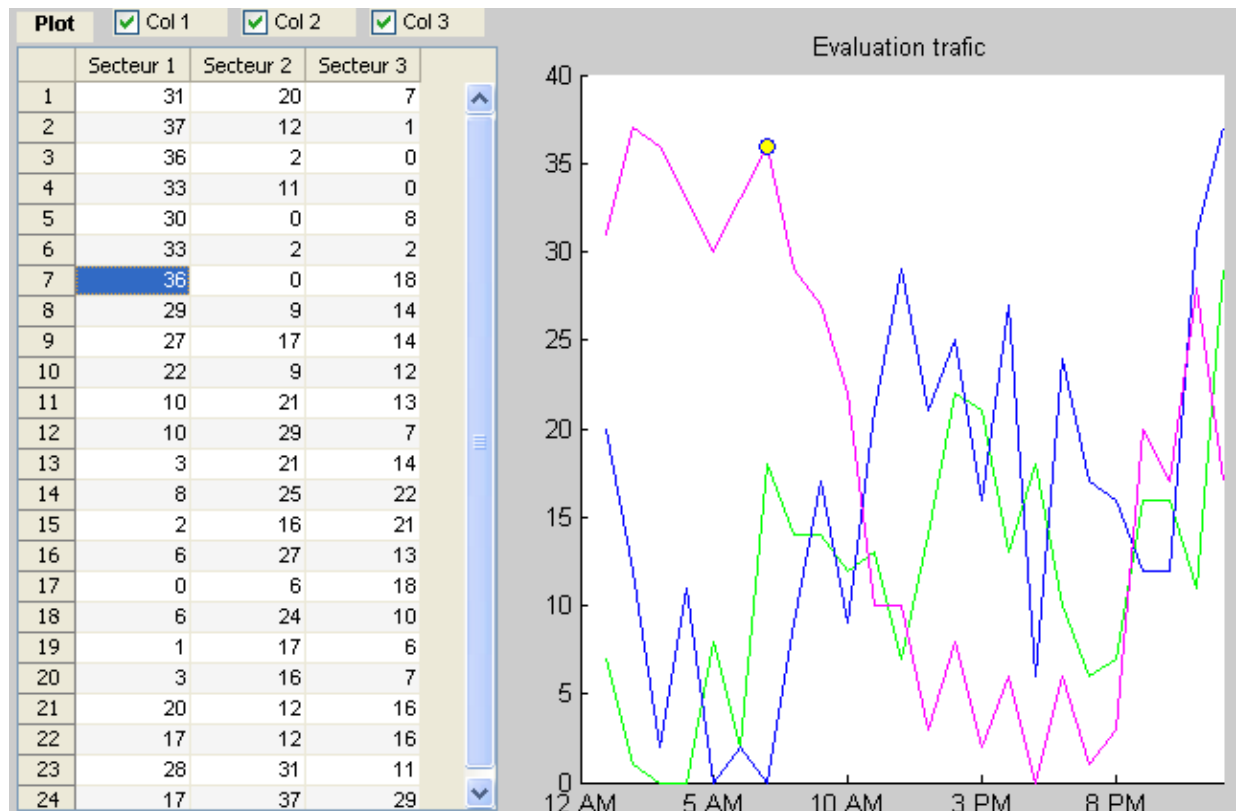


**Figure 3.10 :** Comparaison du taux de dépassement entre la reuse 1 et 3 en fonction de la distance entre la BS serveuse et le MS.



### 3.3.2 Niveau de trafic

Si on clique le bouton NIVEAU TRAFIC, on obtient le graphe des trois secteurs de la cellule considérée.



**Figure 3.11 :** Evolution du niveau de trafic entre les secteurs de la cellule servie par la BS serveuse.

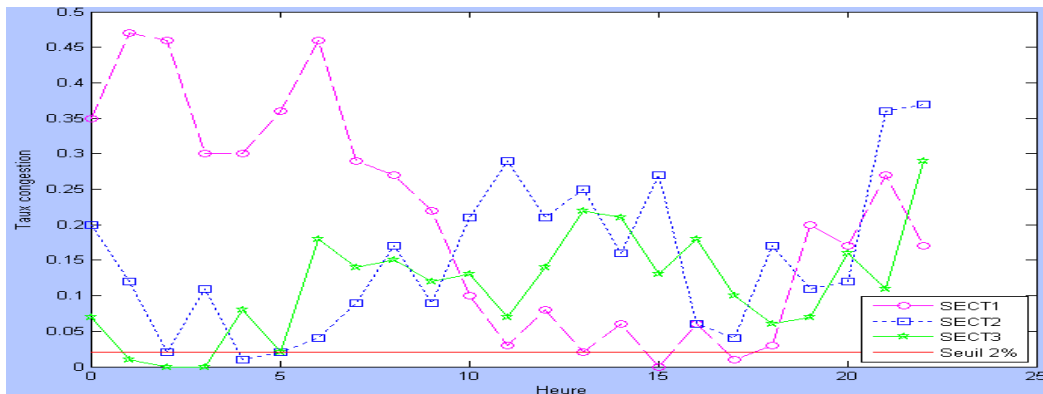
#### a) Interprétation

Pour le secteur 1, la densité de trafic est très accentuée de 0h à 9h puis celle du secteur 2 dépasse la limite de capacité maximale par secteur de 20 Erlang entre 9h et 18h. Donc, on peut tirer que cette BS connaît un taux de saturation par conséquent, une probabilité de dépassement élevée.

#### b) Taux de congestion

A partir de ces données, on peut établir l'évolution du taux de congestion de la BS considérée et voir ainsi les difficultés auxquelles elle est soumise en cliquant sur le bouton TAUX CONGESTION. Il est à noter que le seuil acceptable est de 2%, au delà, le système ne pourra plus fonctionner correctement.





**Figure 3.12 :** Evolution du taux de congestion de la BTS courante

#### c) Interprétation

Chaque secteur géré par la BS connaît un problème d'encombrement de réseau. Ces congestions proviennent essentiellement de la densité excessive de trafic et surtout d'un problème d'allocation et d'ordonnancement de ressources.

### 3.4 Conclusion

Notre étude des motifs de réutilisation fréquentielle montre que les schémas de réutilisation qui offrent une bonne performance du débit posent des problèmes de couverture radio. La probabilité de dépassement devient alors un facteur déterminant et seule la réutilisation 3x3x3 a une valeur acceptable de celle-ci même si elle a un débit plus faible que le schéma de réutilisation 1x3x1. Il est également démontré que les paramètres de performance ne changent pas de manière significative avec des valeurs différentes du rayon de cellule et de la puissance d'émission. Il ressort clairement de la conclusion ci-dessus qu'une réutilisation agressive en débit n'est pas possible sans des fonctionnalités avancées du système.

En résumé, basé sur le principe cellulaire et sur le réseau sans fil, le WiMAX connaît des difficultés en termes de qualité de service et de performance. Cependant, des procédures d'amélioration en termes de transmission existent dans le domaine des télécommunications. L'objectif est donc d'offrir des services fiables en terme de rapidité, de débit mais surtout quelque soit le nombre d'abonnés la minimisation du taux de blocage au niveau du système.

On peut distinguer toutefois quelques solutions comme l'ajustage des paramètres d'ingénieries tel que l'amélioration de la couverture par des options avancées comme l'emploi du beamforming ou la configuration du système tel que l'allocation et ordonnancement des ressources.

## **CHAPITRE 4**

### **AMELIORATION DU TRAFIC AU MIEUX PAR LES TECHNIQUES D'AJUSTAGES AVANCEES ET D'ORDONNANCEMENT DE RESSOURCES RADIO**

#### **4.1 Généralité**

Le processus d'optimisation et d'amélioration s'impose toujours comme une question cruciale des lors qu'on cherche à satisfaire les usagers. Effectivement, un système est toujours associé à des contraintes et limitations physiques des ressources et de technologies imposées par la QoS.

Ainsi, le but de ce chapitre est de simuler en premier lieu, la réutilisation fréquentielle  $1 \times 3 \times 1$  mais en présence d'antennes adaptives, puis en second lieu de simuler un ordonnanceur de trafic Meilleur Effort (Best Effort) suivant deux régimes.

Ceci étant, on va comparer ces deux régimes en évaluant leurs performances sur trois critères qui sont l'utilisation moyenne des ressources, le nombre moyen d'utilisateurs actifs supportés par le système et le débit moyen pouvant être offert.

#### **4.2 Amélioration des performances en Reuse 1 avec beamforming adaptatif**

##### **4.2.1 Introduction**

L'étude de la réutilisation fréquentielle a amené à la conclusion que seulement la réutilisation  $3 \times 3 \times 3$  (sans les options avancées) était acceptable pour les réseaux WiMAX en raison des limitations causées par la probabilité de dépassement.

Toutefois, il a également été remarqué que, à cause du facteur de réutilisation faible, le débit cellulaire est moindre pour la réutilisation  $3 \times 3 \times 3$  par rapport au schéma de réutilisation 1. Par conséquent, nous explorons comment le schéma de réutilisation comme la Reuse  $1 \times 3 \times 1$  peut être rendu possible par la réduction de sa probabilité de dépassement. Les MS au bord de la cellule sont relativement plus enclins au dépassement à cause de la puissance du signal reçue faible et de l'interférence co-canal forte.

Par conséquent, il est important de chercher des techniques qui peuvent réduire l'interférence et/ou augmenter la puissance du signal en même temps. Pour être plus précis, réduire le taux de dépassement et améliorer le taux de distribution spatiale SINR effectif. Une de ces techniques dans le système WiMAX est le beamforming adaptatif.

### 4.2.2 Principe et condition

Le type ou même la possibilité du beamforming adaptif dépend de l'organisation des sous-porteuses pilotes [16] [24]. Cela permet également de déterminer la façon dont l'interférence est modélisée. En fait, les sous-porteuses pilotes sont requises pour l'estimation de canal. En cas de beamforming, des pilotes dédiés sont nécessaires pour chaque faisceau dans la cellule. Donc, il est important d'avoir une idée de la distribution des sous-porteuses pilotes dans les différents schémas de canalisation des réseaux OFDMA.

Par exemple, dans les réseaux WiMAX, il existe trois types de canalisation : PUSC, FUSC et AMC. Pour PUSC et FUSC, il existe un ensemble de sous-porteuses pilotes communs pour un certain nombre de sous-canaux, alors qu'en mode AMC, chaque sous-canal a ses propres sous-porteuses pilotes. Par conséquent, le nombre de faisceaux orthogonaux possibles dans une cellule (du réseau cellulaire) dépend de la distribution de sous-porteuses pilotes et, donc du type de permutation des sous-porteuses.

#### 4.2.2.1 Modèle de perte de trajet

Dans de tel cas l'étude du modèle de perte de trajet NLOS doit être considérée. Dans l'application du beamforming, nous devons avoir une bonne connaissance de la location du MS dans la cellule. Dans ce but, l'environnement Line of Sight (LOS) est considéré dans notre simulation ainsi que le modèle de perte de trajet LOS dans un système macro suburbain tel que l'expression ci-dessous le montre [13] [16] [17]:

$$PL(d) = \{32.44 + 20 \log\left(\frac{f_c}{10^9}\right) + 20 \log(d) \quad \text{si } d < 20m \quad (4.01)$$

ou

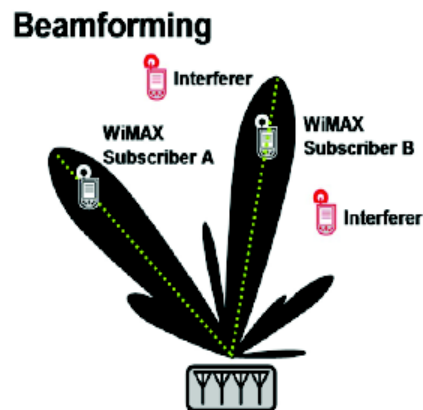
$$PL(d) = \{C(f_c) + 40 \log\left(\frac{d}{d_{BP}}\right) + 23.8 \log(d_{BP}) \quad \text{si } d > d_{BP}$$

Où  $f_c$  la fréquence porteuse en Hz,  $C(f_c)$  est le facteur de fréquence donnée par:

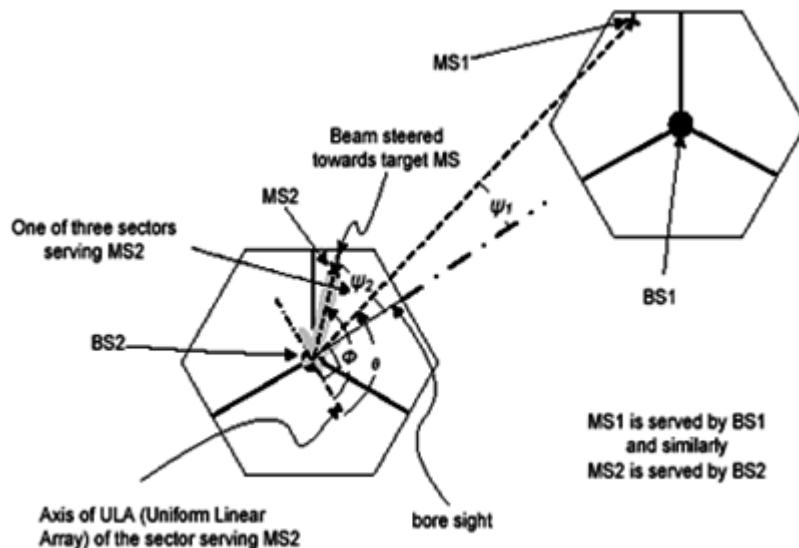
$$33.2 + 20 \log\left(\frac{f_c}{10^9}\right),$$

$d_{BP}$  est la distance breakpoint et  $\sigma_{sh}$  la déviation de masquage en log-normal. La distance breakpoint est déterminée comme:  $d_{BP} = 4h_{BS}h_{MS}/\lambda_c$  avec  $h_{BS}$  et  $h_{MS}$  les hauteurs respectifs du BS et MS. La valeur de  $\sigma_{sh}$  associée au modèle est 4 dB pour  $d \leq d_{BP}$  et est égal à 6 dB devant  $d_{BP}$ .

Par contre, le schéma ci après montre le principe du beamforming en présence d'interféreurs mais aussi un exemple montrant un scénario de beamforming.



**Figure 4.01 :** *Principe du beamforming en présence d'interféreurs.*



**Figure 4.02 :** *Exemple montrant un scénario de Beamforming*

#### 4.2.2.2 Facteur d'étalement en Beamforming

Le modèle beamforming considéré dans notre simulation est le délai et la somme des beamformers (ou beamformer conventionnel) avec un système de repère à étalement uniforme et linéaire (ULA).

Le motif de la puissance de radiation pour un beamformer conventionnel est le produit du facteur d'étalement avec la radiation d'une antenne.

Le facteur d'étalement pour ce motif de la puissance de radiation est donc donné par [16]:

$$AF(\theta) = \frac{1}{n_t} \left| \frac{\sin(\frac{\pi}{2} n_t (\cos \theta - \cos \Phi))}{\sin(\frac{\pi}{2} (\cos \theta - \cos \Phi))} \right|^2 \quad (4.02)$$

Où  $n_t$  est le nombre d'antenne de transmission d'un BS (avec espacement inter-antenne égale à la moitié de la longueur du signal),  $\Phi$  est le lobe principal (vers lequel le beam est dirigé) et  $\theta$  un angle arbitraire.

Le facteur d'étalement est multiplié par le gain d'une antenne pour donner le gain de beamforming.

#### 4.2.2.3 Distribution des faisceaux Beams

Le nombre de beams dans une cellule/secteur est spécifique d'un type de permutation de sous porteuse. Nous pouvons notifier qu'avec FUSC nous pouvons avoir un seul beam par cellule/secteur. Dans un autre cas, le mode AMC peut fournir un maximum de beams possible. Pour trouver la direction des beams adaptifs, un nombre équivalent de MS sont tirés dans une cellule utilisant une distribution spatiale uniforme. Nous discuterons comment les beams sont tirés à partir de PUSC, FUSC et AMC et comment la distribution des beams affecte l'interférence.

#### 4.2.3 Application des permutations de sous porteuses sur le beamforming

En PUSC, les sous-canaux sont regroupés en six groupes. Chaque groupe a son ensemble de sous-porteuses pilotes et donc le beamforming peut être fait par groupe PUSC. On considère que les sous-porteuses d'un sous-canal sont choisies au hasard. Dans ce cas, chaque sous-porteuse de la cellule serveuse peut subir l'interférence des différents faisceaux d'une cellule interféreuse donnée.

De cette façon, les sous-porteuses d'un sous-canal ne subissent pas forcément la même interférence. La puissance de l'interférence dépend alors du gain de réseau d'antennes associé à la sous-porteuse en collision qui appartient à l'un des six faisceaux interférents de la cellule voisine.

Les sous-porteuses pilotes dans FUSC sont communes à tous les sous-canaux, donc un seul faisceau est possible dans chaque cellule.

Contrairement à PUSC, toutes les sous-porteuses d'un sous-canal expérimentent la même interférence.

Cela est dû au fait que chaque sous-porteuse en collision aura le même gain de réseau d'antennes puisqu'il n'y a qu'un seul faisceau par cellule interféreuse.

Quand on considère l'AMC pour le beamforming, il peut y avoir autant de faisceaux orthogonaux que de sous-canaux puisque chaque sous-canal a ses sous porteuses pilotes dédiées. Les sous-porteuses en collision dans un faisceau auront le même gain de réseau d'antenne. En outre, contrairement à PUSC et FUSC, puisque les sous-porteuses d'un sous-canal sont contigües dans AMC, le gain diversité de fréquence n'est pas obtenu [29].

#### 4.2.4 Simulation

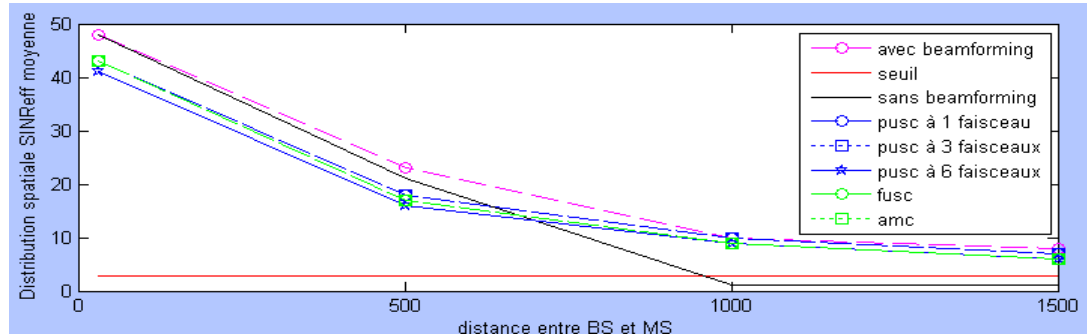
On refait le test du schéma de réutilisation fréquentielle 1 mais cette fois en considérant le beamforming. Le  $SINR_{eff}$ , le débit moyen de cellule et la probabilité de dépassement de l'ensemble de ce type de réutilisation avec et sans beamforming sont analysés [14].

| Types de permutation de sous porteuses | Paramètres                                      | Valeurs |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|
| PUSC                                   | Nb de sous canaux $N_{sch}$                     | 30      |
|                                        | Nb de sous canaux par même groupe $N_c$         | 6       |
|                                        | Nb de sous canaux restants de groupe No         | 4       |
|                                        | Nb de groupes PUSC                              | 6       |
|                                        | Nb total de sous porteuses de données           | 720     |
|                                        | Nb total de sous porteuses pilotes              | 120     |
|                                        | Nb de slots en DL (avec 30 symboles OFDM en DL) | 450     |
| FUSC                                   | Nb de sous canaux $N_{sch}$                     | 16      |
|                                        | Nb total de sous porteuses de données           | 768     |
|                                        | Nb total de sous porteuses pilotes              | 82      |
|                                        | Nb de slots en DL (avec 30 symboles OFDM en DL) | 480     |
| AMC                                    | Nb de sous canaux $N_{sch}$                     | 48      |
|                                        | Nb total de sous porteuses de données           | 768     |
|                                        | Nb total de sous porteuses pilotes              | 96      |
|                                        | Nb de slots en DL (avec 30 symboles OFDM en DL) | 480     |

**Tableau 4.01:** Paramètres pour un FFT 1024 en PUSC/FUSC/AMC

### a) Simulation 1

En cliquant sur le bouton SINR effectif on obtient une comparaison des taux de distribution spatiale entre un système WiMAX avec beamforming et un système WiMAX sans beamforming.



**Figure 4.03 :** Taux de  $SINR_{eff}$  dans un système WiMAX avec beamforming en fonction de la distance entre la BS serveuse et la MS.

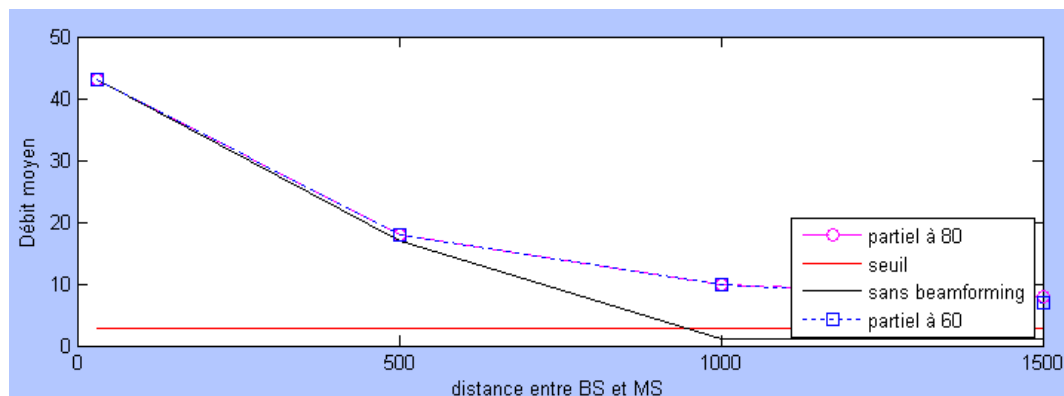
### b) Observation 1

Même si le beamforming adaptatif a considérablement amélioré la performance du système, le schéma de réutilisation 1x3x1 (ou réutilisation 1) a toujours une probabilité de dépassement importante (i.e., 9%).

Dans ce mémoire, nous avons proposé deux méthodes pour réaliser la réutilisation 1 [16].

### c) Simulation 2

La première méthode est la charge partielle des sous-canaux. Les simulations sont effectuées avec 80% et 60% de charge des sous-canaux [16].



**Figure 4.04 :** Taux de  $SINR_{eff}$  dans un système WiMAX à charge partielle des sous canaux associé au beamforming

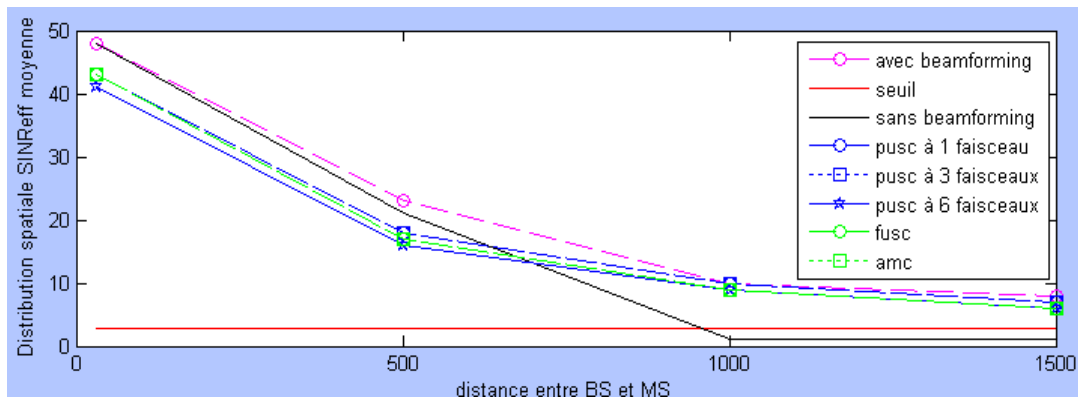
#### d) Interprétation 2

Il est observé à partir des résultats de simulation que 80% de la charge de sous-canaux apporte une probabilité de dépassement pour la réutilisation 1x3x1 bien contrôlée (moins de 5%), mais il est également important de voir son effet sur le débit moyen disponible. Le débit moyen de cette réutilisation est évalué à 80% de la charge des sous-canaux et se trouve à 39.5 Mbps. Cette valeur de débit moyen est supérieure à celles de tous les autres types de réutilisation dans des conditions de pleine charge.

#### e) Simulation 3

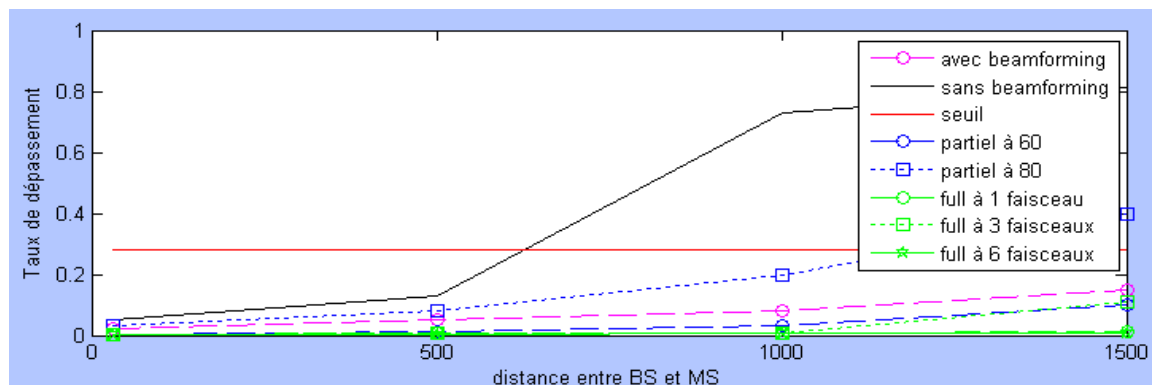
La deuxième méthode proposée est de faire le beamforming par PUSC group.

Les simulations sont effectuées avec six, trois et un faisceau par secteur.



**Figure 4.05 :** Taux de  $SINR_{eff}$  dans un système WiMAX avec beamforming par PUSC group

#### f) Observation 3



**Figure 4.06 :** Evaluation du taux de dépassement en beamforming avec usage complète ou partielle des sous canaux.



On trouve à partir des résultats de simulation que la probabilité de dépassement diminue de façon significative lorsqu'on profite de la diversité offerte par PUSC.

#### g) Interprétation 3

L'augmentation du nombre de faisceaux diminue la probabilité de dépassement d'une valeur inacceptable de 9% (avec un faisceau) à un raisonnable 2% (avec six faisceaux en vert sur le schéma). Il est intéressant de noter que le débit moyen et le  $SINR_{eff}$  moyen ne sont pas touchés par le gain obtenu en termes de probabilité de dépassement.

Ainsi, en employant le beamforming par PUSC Major group, nous avons atteint la réutilisation 1 sans charge partielle des sous-canaux ni coordination entre stations de base.

#### 4.2.5 Conclusion partielle

Lors de l'étude des motifs de réutilisation fréquentielle avec le beamforming, nous avons remarqué que la performance, en termes de qualité de radio et de débit, est améliorée par rapport au cas sans beamforming malgré que la probabilité de dépassement du motif 1x3x1 et soit restée supérieure au seuil de 5%.

Pour réduire encore la probabilité de dépassement du motif de réutilisation 1 avec beamforming, deux méthodes (charge partielle des sous-canaux et beamforming par groupe PUSC) sont proposées.

L'analyse des motifs de réutilisation fréquentielle nous montrent que la distribution du  $SINR_{eff}$  est une mesure cruciale et peut être obtenue précisément par des simulations. Mais l'inconvénient de la simulation réside dans son temps de calcul.

### 4.3 Amélioration des performances par les modèles de trafic au mieux (BE) pour les réseaux WiMAX

Les travaux présentés jusque là considèrent un système statique. Mais l'analyse de la dynamique d'un système est impérative pour compléter le portrait global du dimensionnement.

De ce fait, dans cette partie, nous prenons en compte le système dynamique qui admet en entrée les probabilités stationnaires des MCS fournis par le système statique. Cette analyse prend en compte la nature du trafic et différentes classes de trafic WiMAX (associées à différentes QoS).

Donc, dans ce mémoire, nous expliquons l'analyse de ces modèles pour lesquels un simulateur a été développé pour effectuer des simulations Monte Carlo [37].

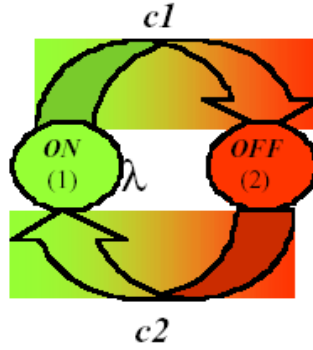
Les entrées de ce bloc Analyse du trafic vu dans le troisième chapitre sont les probabilités des MCS (fournies par le bloc Couverture radio et capacité), la configuration du réseau et le modèle de trafic. Les principaux paramètres de configuration de réseau dans le contexte du trafic sont les suivants : la quantité de ressource radio disponible par cellule, la durée de la trame TDD et la politique d'ordonnancement. Les paramètres du modèle du trafic comprennent le nombre de mobiles présents dans la cellule, les différents types de trafic et leurs paramètres QoS associés. La modélisation du trafic web, qui est de nature élastique, est déjà une tâche difficile. Le caractère variable des ressources radio dû au mécanisme d'adaptation rapide des MCS rend le problème plus ardu encore.

#### 4.3.1 Modélisation en mono profile

Dans un trafic mono profile, quelques points doivent être établis :

- La population de SS ou MS est représentée par  $N$ , ce qui inclue les usagers actifs (en processus de téléchargement) et usagers inactifs (terminant son téléchargement et attendant de recommencer).
- Chaque station mobile MS ou SS (dans  $N$ ) est supposée générer une infinité de trafic élastique ON/OFF. Une période ON correspond à un état de téléchargement d'un élément (ex., page web). Cette période est caractérisée par le volume de données à télécharger (i.e., nombre de bits). Les MS ou SS en période ON sont appelés usagers actifs et ceux en période OFF inactifs. Chaque période ON est toujours suivi par une période OFF (reading time ou temps de lecture) qui est caractérisée par sa durée.
- Dans la partie DL d'une trame WiMAX TDD on attribue aux  $N$  MS un nombre fini  $N_s$  de slots.
- Basés sur ses conditions radios, un MS actif choisit un MCS dans les  $K$  différents MCS (i.e.  $0 \leq k \leq K$ )
- Un slot peut porter  $m_k$  bits avec un MCS de type  $k$ . En général sans perte, MCS type 0 représente l'état de *outage* ou dépassement i.e., les conditions canal du MS sont très mauvaises et qu'il ne peut y avoir ni transmission ni réception de données. Par principe, on prend  $m_0 = 0$ .
- Un MS peut changer son MCS après chaque trame i.e., le canal peut changer après chaque trame.

- Le nombre de MS, qui peut être simultanément multiplexé par une trame TDD, n'est pas limité. De ce fait, chaque demande de connexion sera acceptée et aucun blocage ne sera pris en compte.
- Il n'y aura aucune limite sur le nombre de slots qu'un MS peut allouer dans une trame TDD.



**Figure 4.07 :** Principe du trafic élastique ON/OFF

#### 4.3.2 Modélisation en multi profile

Le trafic BE multi trafic englobe différentes classes d'utilisateurs BE dont chaque classe est spécifique d'un certain profil de trafic. Toutes les suppositions faites sur le trafic mono-profil restent valides pour le multi profil mais en plus améliorées.

Ici, les utilisateurs sont subdivisés en  $R$  classes de trafic, Chacun a son propre profil. Un profil est décrit par deux paramètres : Durée d'une période ON et durée d'une période OFF.

Ces deux périodes sont supposées être des distributions décroissantes exponentielles. Pour une classe  $r$  donnée, Le volume moyen de données  $x^r_{on}$  (en bits) et la durée moyenne d'une période OFF sont notés respectivement par  $x^r_{on}$  et  $t^r_{off}$ . Donc, un profil de trafic d'une classe générique  $r$  sera notée par le couple  $(x^r_{on}, t^r_{off})$ .

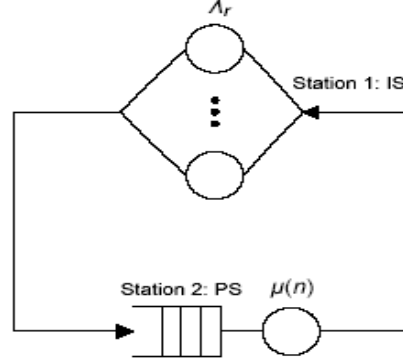
Le nombre total de SS ou MS dans une classe  $r$  est représenté par  $N_r$  tel que  $N = \sum_{r=1}^R N_r$ .

Il est supposé dans un modèle de trafic que tous les paramètres de performance dépendent de ces paramètres de différentes classes.

Le système peut donc être décrit comme un réseau multi classe à file d'attente fermée (a multi-class closed queuing network) avec deux stations démontré par la figure 4.01.

La station 1 est une station à serveur infini (the Infinite Server IS station) pour les modèles de mobiles en période OFF. Comme son nom l'indique, beaucoup de serveurs sont requis pour cette station. Les classes de cette station dépendent d'un taux de service appelé  $\lambda_r = 1/t^r_{off}$ .

Les MS actifs sont gérés par la station 2 appelée Processor Sharing (PS) qui est caractérisée par une classe indépendante du paramètre  $\mu(n)$  avec  $n$  le nombre de SS ou MS actifs. Depuis, tous les MS servis par la station 2 ont la même valeur  $x_{on}$  quelque soit leurs classes de trafic. La valeur de  $\mu(n)$  est calculée de la même manière qu'en mono-profile.



**Figure 4.08 :** Réseau à file d'attente fermée

Cependant, ce réseau multi classe à file d'attente fermée peut être manipulé de la manière suivante :

En utilisant une extension du théorème de BCMP pour des stations à taux dépendants d'états (state-dependent rates) et pour faciliter la compréhension, seulement deux types de profils ( $x^1_{on}, t^1_{off}$ ) et ( $x^2_{on}, t^2_{off}$ ) seront considérés.

Si  $N_1$  et  $N_2$  représentent le nombre total de SS ou MS respectivement de classe 1 et 2 dans la cellule, la population vecteur peut être écrite comme suit:  $\vec{N} = (N_1, N_2)$ . Puis, nous définissons un nouveau vecteur  $\vec{n}$  tel que  $\vec{n} = (\vec{n}_1, \vec{n}_2)$ , où  $\vec{n}_1$  et  $\vec{n}_2$  représentent la population vecteur de MS respectivement dans les stations 1 et 2. Cependant,  $n$  ici correspond au nombre d'utilisateurs actifs dans la cellule. La population vecteur dans une station  $i$  est donnée par :

$\vec{n}_i = (\vec{n}_{i1}, \vec{n}_{i2})$ . Ici,  $n_{i1}$  et  $n_{i2}$  représentent le nombre de MS des classes 1 et 2 dans la station  $i$ . Depuis, on peut apercevoir deux stations incluant des MS de deux classes différentes, nous pouvons donc écrire :  $N_1 = n_{11} + n_{21}$  et  $N_2 = n_{12} + n_{22}$ .

Après avoir défini les variables sur la population de MS, la probabilité d'état stable peut être exprimée en utilisant l'extension de BCMP [36]:

$$\pi(\vec{n}) = \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) = \frac{1}{G} f_1(\vec{n}_1) f_2(\vec{n}_2) \quad (4.03)$$

Avec :

$$f_1(\vec{n}_1) = \frac{1}{n_{11}! n_{12}!} \frac{1}{\lambda_1^{n_{11}} \lambda_2^{n_{12}}} \quad (4.04)$$

$$f_2(\vec{n}_2) = \frac{(n_{21} + n_{22})!}{n_{21}! n_{22}!} \frac{1}{\prod_{k=1}^{n_{21} + n_{22}} \mu(k)} \quad (4.05)$$

Avec G une normalisation constante comme suit :

$$G = \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N} f_1(\vec{n}_1) f_2(\vec{n}_2) \quad (4.06)$$

### 4.3.3 Principe

Les modèles analytiques prennent en compte le trafic BE mono/multi-profil où un profil est un ensemble de paramètres qui représentent une classe de trafic BE.

Ces paramètres sont : le volume de données ON (taille du téléchargement) et la durée de la période OFF (temps de lecture).

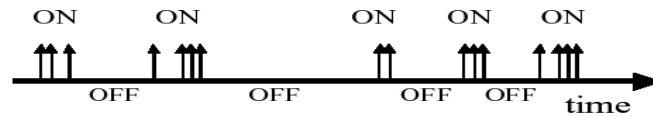


Figure 4.09 : Principe de trafic élastique associé au Best Effort

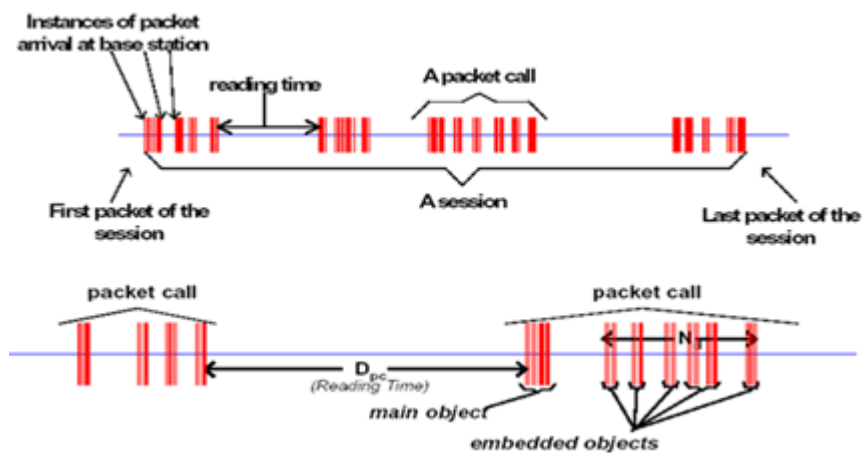


Figure 4.10 : Principe de transfert de données en Meilleur Effort

Quatre politiques d'ordonnancement différentes sont également considérées lors de la formulation de modèles analytiques.

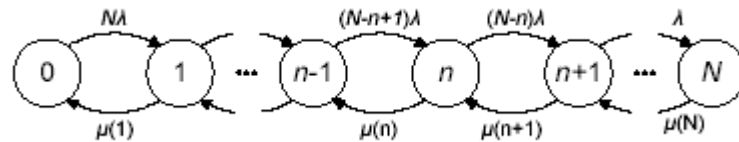
Parmi les quatre types d'ordonnancement considérés, trois sont conventionnels: l'équité en ressource, l'équité en débit et l'opportuniste.

Le quatrième type d'ordonnancement est le régime d'étranglement qui est proposé pour modéliser une métrique de performance de la norme IEEE 802.16e appelé MSTR. Cette métrique spécifie une limite supérieure pour le débit maximal qui pourrait être offert à un utilisateur.

Il y a trois paramètres de performance obtenus à partir du modèle analytique markovien. Ces paramètres sont les suivants : le débit moyen, l'utilisation moyenne de la ressource et le nombre moyen d'utilisateurs actifs.

#### 4.3.4 Modèle analytique de Markov

Le modèle analytique proposé dans le trafic Best Effort de WiMAX est basé sur le CTMC (Continuous Time Markov Chain) à  $N + 1$  états. Ce modèle CTMC est démontré par la figure 4.0 ci-dessous [36]:



**Figure 4.11 :** CTMC avec taux de départ dépendant du nombre de stations mobiles MS actifs

Un état  $n$  de cette chaîne ( $0 \leq n \leq N$ ) correspond au nombre total de MS ou SS actifs (i.e., MS qui sont dans une période ON) à un instant donné.

Une transition en dehors des états génériques  $n$  pour un état  $n + 1$  se produit quand un mobile dans une période OFF termine sa tâche de lecture et entre dans une période ON pour un transfert de données ou un téléchargement.

A un instant donné, cette transition d'arrivée est caractérisée avec un taux  $(N - n)\lambda$  où  $\lambda$  est le taux correspondant à un MS terminant sa période OFF et est donnée par:  $\lambda = 1/t_{off}$ . Ici,  $t_{off}$  représente le temps de lecture moyen (durée moyenne en période OFF).

Le départ d'un état  $n$  à un état  $n-1$  se produit quand un mobile dans une période ON achève son transfert. S'il y a  $n$  MS actifs à un temps donné, cette transition de départ est caractérisée avec un taux  $\mu(n)$ .

Depuis, les MCS utilisés par tous les MS actifs peuvent être le même, de ce fait, la période ON ne dépend pas seulement du volume de données à télécharger mais aussi du MCS utilisé (compris entre  $0 < k < K$ ).

#### 4.3.5 Politique d'ordonnancement conventionnel

Trois politique d'ordonnancement conventionnel (équité ressource, équité débit et opportuniste) sont considérées pour le modèle analytique de trafic BE. L'expression générique pour le taux de départ de ces trois politiques est donnée par [36]:

$$\mu(n) = \frac{\bar{m}(n)N_s}{x_{on}T_F} \quad (4.07)$$

Où  $T_F$  est la durée d'une trame WiMAX TDD,  $x_{on}$  est le volume moyen de données en bits à télécharger (ex. taille d'une page WEB) et  $m(n)$  est le nombre moyen de bits par slot quand il y a  $n$  MS actifs pendant une trame TDD. La valeur de  $m(n)$  repose sur les probabilités d'usage des  $K$  différents MCS représentés par  $p_k$  ( $0 \leq k \leq K$ ) et de la politique d'ordonnancement.

##### 4.3.5.1 Equité ressource

Dans ce type d'ordonnancement, le système ou l'ordonnanceur partage équitablement les  $N$  slots parmi les usagers actifs et qui ne sont pas en état de dépassement (*outage*) pendant une trame TDD. Les données à télécharger par un MS pendant une trame TDD repose sur le MCS équivalent.

##### a) Mono profile

Le nombre de bits par slots est donné par:

$$\bar{m}(n) = \sum_{(j_0, j_1, \dots, j_K) = (0, \dots, 0) | j_0 + \dots + j_K = n | j_0 \neq n}^{(n, \dots, n)} \frac{n!}{n - j_0} \left( \sum_{k=1}^K m_k j_k \right) \left( \prod_{k=0}^K \frac{p_k^{j_k}}{j_k!} \right) \quad (4.08)$$

Où  $j_k$  est le nombre de MS actifs utilisant un  $MCS_k$  et  $p_k$  la probabilité d'état stable du même MCS.

b) Multi profile

Même principe qu'en mono profile.

#### 4.3.5.2 Équité débit

Avec l'équité débit, les slots sont partagés de manière à ce que tous les usagers actifs qui ne sont pas en *outage* ou dépassement bénéficient en même temps d'un même débit. Cependant, les MS utilisant un MCS avec une quantité faible de bits par slot sont assignés à plus de slots comme comparés aux autres MS utilisant un MCS avec une forte quantité de bits par slots pendant une trame TDD.

a) Mono profile

Le nombre de bits par slots est donné par:

$$\bar{m}(n) = \sum_{(j_0, j_1, \dots, j_K) = (0, \dots, 0) | j_0 + \dots + j_K = n | j_0 \neq n}^{(n, \dots, n)} \frac{(n - j_0) n! \prod_{k=0}^K \frac{p_k^{j_k}}{j_k!}}{\sum_{k=1}^K \frac{j_k}{m_k}} \quad (4.09)$$

b) Multi profile

Même principe qu'en mono profile.

#### 4.3.5.3 Opportuniste

Tant que le système considère l'ordonnancement opportuniste, tous les slots seront assignés à un seul MS actifs utilisant le meilleur MCS (avec le taux de bit par slot le plus élevé) parmi tous les MS actifs. Si cependant, plus d'un SS ou MS actif utilisent le même meilleur MCS, les slots seront équitablement partagés entre eux.

a) Mono profile

Le nombre de bits par slots est donné par:

$$\bar{m}(n) = \sum_{i=1}^K \alpha_i(n) m_i \quad (4.10)$$

Où  $\alpha_i(n)$  la probabilité d'avoir au moins un usager actif parmi  $n$  utilisant  $MCS_i$  et que personne d'autre n'utilise un MCS apportant un meilleur taux de transmission (i.e.  $MCS_j$  avec  $j > i$ ). En fait,  $\alpha_i(n)$  correspond à la probabilité que l'ordonnanceur attribue à un temps donné tous les slots au MS qui utilise  $MCS_i$ .



Dans le but de calculer  $\alpha_i(n)$ , il faut exprimer en premier  $p_{\leq i}(n)$ , la probabilité qu'il n'y a aucun mobile MS qui utilise un MCS supérieur en qualité à  $MCS_i$ :

$$p_{\leq i}(n) = (1 - \sum_{j=i+1}^K p_j)^n \quad (4.11)$$

Puis, on calcule  $p_{=i}(n)$  la probabilité qu'il y ait au moins un mobile MS utilisant  $MCS_i$  conditionné par le fait qu'il n'y a aucun mobile MS qui utilise un meilleur MCS:

$$p_{=i}(n) = 1 - (1 - \frac{p_i}{\sum_{j=i+1}^K p_j})^n \quad (4.12)$$

$\alpha_i(n)$  peut être exprimer comme:

$$\alpha_i(n) = p_{\leq i}(n)p_{=i}(n) \quad (4.13)$$

b) Multi profile

Même principe qu'en mono profile.

#### 4.3.6 Politique d'étranglement

Le trafic BE est caractérisé par ses paramètres QoS. L'usage du MSTR (maximum sustained traffic rate) fait partie de ces paramètres car il n'y a pas de garantie dans le BE.

Cependant, un autre type d'ordonnement de ressources appelé politique d'étranglement permet l'implémentation d'un MSTR qui sert à offrir un débit minimal à l'utilisateur lui évitant d'être en *outage* lors des téléchargements et même en une simple connexion.

Dans ce type de politique, on pose un seuil sur le débit maximal attribué à un utilisateur dans une trame TDD, l'utilisateur peut seulement allouer un certains nombres de slots requis pour garantir le MSTR. On présentera en premier lieu l'expression du taux de départ  $\mu(n)$  afin de trouver les paramètres de performances caractérisant le système.

Dans le but de trouver le taux de départ  $\mu(n)$  certains points doivent être pris en considération :

- Quand un MS est en *outage*, il est incapable de recevoir la moindre donnée. Dans le but de corriger cela, un taux de bit d'accroissement instantané appelé Delivered Bit Rate (DBR) est introduit dans la trame qui est donné par [36]:

$$DBR = \frac{MSTR}{1 - p_0} \quad (4.14)$$

- Le nombre de slots par trame  $g_k$  requis par un MS, utilisant  $MCS_k$ , pour atteindre son DBR est trouvé par:

$$g_k = \frac{DBR * T_F}{m_k} \quad (4.15)$$

Avec  $g_0 = 0$ .

- Le nombre de slots par trame  $\bar{g}$  requis par un MS, utilisant K différent MCS, pour réaliser son MSTR peut être déterminé comme:

$$\bar{g} = \sum_{k=1}^K p_k g_k \quad (4.16)$$

- Une fois  $\bar{g}$  obtenu, le taux de départ en politique d'étranglement est donné par:

a) Mono profile

$$\mu(n) = \frac{N_s}{\max(n\bar{g}, N_s)} n \frac{MSTR}{x_{on}} \quad (4.17)$$

b) Multi profile

$$\mu(n) = \frac{N_s}{\max(\bar{g}(n), N_s)} n \frac{MSTR}{x_{on}} \quad (4.18)$$

#### 4.3.7 Paramètres de performances

Il existe trois paramètres de performance pour qui leurs expressions peuvent être dérivées du même modèle. Ces paramètres sont:

- L'utilisation moyenne des ressources instantanées  $U$  (dans une trame TDD)
- Le nombre moyen d'utilisateurs actifs  $Q$  que peut supporter le système
- Le débit moyen offert  $X$  par le système pendant une période ON

#### 4.3.7.1 Paramètres de performances pour les trois politiques conventionnelles

Pour les trois politiques conventionnelles mentionnées auparavant, les expressions de leurs paramètres de performances restent les mêmes à l'exception de l'expression de leurs moyennes respectives de bits par slot  $m(n)$ .

Dans le but de trouver l'expression de ces paramètres, les probabilités d'états stables de CTMC sont requises.

La probabilité d'état stable  $\pi(n)$  est la probabilité que  $n$  stations mobiles MS sont actives à un instant et est donnée par l'équation suivante :

En politique conventionnelle [36]:

$$\pi(n) = \frac{N!}{(N-n)! N_s^n} \frac{\rho^n}{\prod_{i=1}^n m(i)} \pi(0) \quad (4.20)$$

$$\text{Où : } \rho = \frac{\alpha_{on}}{\tau_{off} * MSTR}$$

Et  $\pi(0)$  est obtenu à partir de la normalisation :

$$\pi(0) = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \left( \prod_{i=1}^n \frac{(i-1)\lambda_i}{\mu(i)} \right)} \quad (4.21)$$

Utilisant cette probabilité d'état stable  $\pi(n)$ , les expressions des trois paramètres de performances peuvent être obtenues [36].

- L'utilisation moyenne des ressources instantanées  $U$  (dans une trame TDD) est donnée par :

➤ Mono profile

$$\bar{U} = \sum_{n=1}^N \pi(n) \min\left(n \frac{\alpha_{on}}{N_s \bar{m}(n)}, 1\right) \quad (4.22)$$

➤ Multi profile

$$\bar{U} = \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N | \vec{n}_2 \neq (0,0)} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) (1 - p_0^{n_{21} + n_{22}}) \quad (4.23)$$

- Le nombre moyen d’usagers actifs  $Q$  que peut supporter le système est exprimé comme :

➤ Mono profile

$$\bar{Q} = \sum_{n=1}^N n \pi(n) \quad (4.24)$$

➤ Multi profile

$$\bar{Q}_r = \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N}^N n_{2r} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) \quad (4.25)$$

- Le débit moyen offert  $X$  par le système pendant une période ON est exprimé par :

➤ Mono profile

$$\bar{X} = \frac{x_{on}}{t_{on}} \quad (4.26)$$

Avec  $t_{on}$  la durée moyenne d’une période ON :

Et  $x_{on}$  le volume moyen de données à télécharger pendant une période ON.

$$t_{on} = \frac{\bar{Q}}{\sum_{n=1}^N \mu(n) \pi(n) N_s} \quad (4.27)$$

➤ Multi profile

$$\bar{X}_r = \frac{x_{on} \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) n_{1r} \lambda_r}{\sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N}^N n_{2r} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2)} \quad (4.28)$$

#### 4.3.7.2 Paramètres de performances pour la politique d’étranglement

Pour la politique d’étranglement, les paramètres de performances sont presque les mêmes sur tous les points de vue à part quelques détails comme l’influence du taux de bits délivrés DBR sur le système, la probabilité d’état stable  $\pi(n)$  peut être obtenue à partir du processus de mort et de naissance de la chaine de Markov comme suit [36]:

$$\pi(n) = \frac{N!}{(N-n)! n!} \frac{\rho^n}{\prod_{i=1}^n \frac{N_s}{\max(i, \bar{g}) N_s}} \pi(0) \quad (4.29)$$

Ainsi que l'expression des trois paramètres de performances :

- L'utilisation moyenne des ressources instantanées  $U$  (dans une trame TDD) est donnée par [36]:

➤ Mono profile

$$\bar{U} = \sum_{n=1}^N \pi(n) \min\left(n \frac{x_{on}}{N_s \bar{m}(n)}, 1\right) \quad (4.30)$$

➤ Multi profile

$$\bar{U} = \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) \frac{\bar{g}(\vec{n}_2)}{\max(\bar{g}(\vec{n}_2), N_s)} \quad (4.31)$$

- Le nombre moyen d'utilisateurs actifs  $Q$  que peut supporter le système est exprimé comme :

➤ Mono profile

$$\bar{Q} = \sum_{n=1}^N n \pi(n) \quad (4.32)$$

➤ Multi profile

$$\bar{Q}_r = \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N} n_{2r} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) \quad (4.33)$$

- Le débit moyen offert  $X$  par le système pendant une période ON est exprimé par :

➤ Mono profile

$$\bar{X} = \frac{x_{on}}{\sum_{n=1}^N \mu(n) \pi(n)} \bar{Q} \quad (4.34)$$

➤ Multi profile

$$\bar{X}_r = \frac{x_{on} \sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2) n_{1r} \lambda_r}{\sum_{\vec{n}_1 + \vec{n}_2 = N} n_{2r} \pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2)} \quad (4.35)$$

#### 4.3.8 Simulation

Dans le but d'améliorer la performance d'un réseau WiMAX en terme de trafic, un simulateur qui implémente un générateur de trafic ON/OFF a été développé, un canal sans fil pour chaque utilisateur et un ordonnanceur central qui alloue les ressources radio, i.e., les slots, aux utilisateurs actifs sur chaque trame [36].

Les tableaux 4.02 et 4.03 ci-dessous affichent tous les paramètres nécessaires à l'optimisation du trafic et à l'allocation des ressources disponibles lors de connexions et de téléchargements effectués par tous les usagers présents dans le système à un instant donné.

| Paramètres                             | Valeurs      |
|----------------------------------------|--------------|
| Volume moyen de données en ON $x_{on}$ | 3Mbits       |
| Durée moyenne en OFF $t_{off}$         | 3s           |
| MSTR du plan d'étranglement            | 512/2048Kbps |
| Paramètre pareto $\alpha$              | 1.2          |
| Pareto basse cutoff q                  | 300Mbits     |
| Pareto haute cutoff q                  | 3000Mbits    |
| Paramètre pareto b pour basse cutoff   | 712926 bits  |
| Paramètre pareto b pour basse cutoff   | 611822 bits  |

**Tableau 4.02:** Paramètres trafic du système à simuler

| Etats canal | MCS et outage | Bits par slot $m_k$ |
|-------------|---------------|---------------------|
| 0           | Outage        | $m_0=0$             |
| 1           | QPSK1/2       | $m_1=48$            |
| 2           | QPSK3/4       | $m_2=72$            |
| 3           | 16QAM1/2      | $m_3=96$            |
| 4           | 16QAM3/4      | $m_4=144$           |

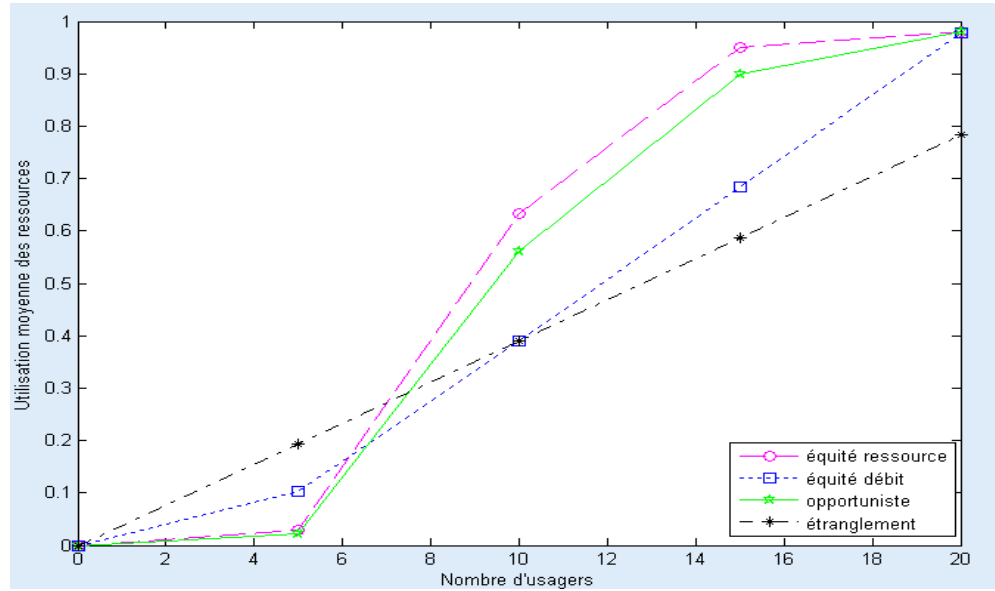
**Tableau 4.03:** Paramètres canal du système

Avec la valeur moyenne de la distribution des paretos, qui sont des paramètres nécessaires pour l'évaluation de la variation du volume  $x_{on}$  de données à télécharger [36]:

$$x_{on} = \frac{\alpha b}{\alpha - 1} \left[ 1 - \left( \frac{b}{q} \right)^{\alpha-1} \right] \quad (4.36)$$

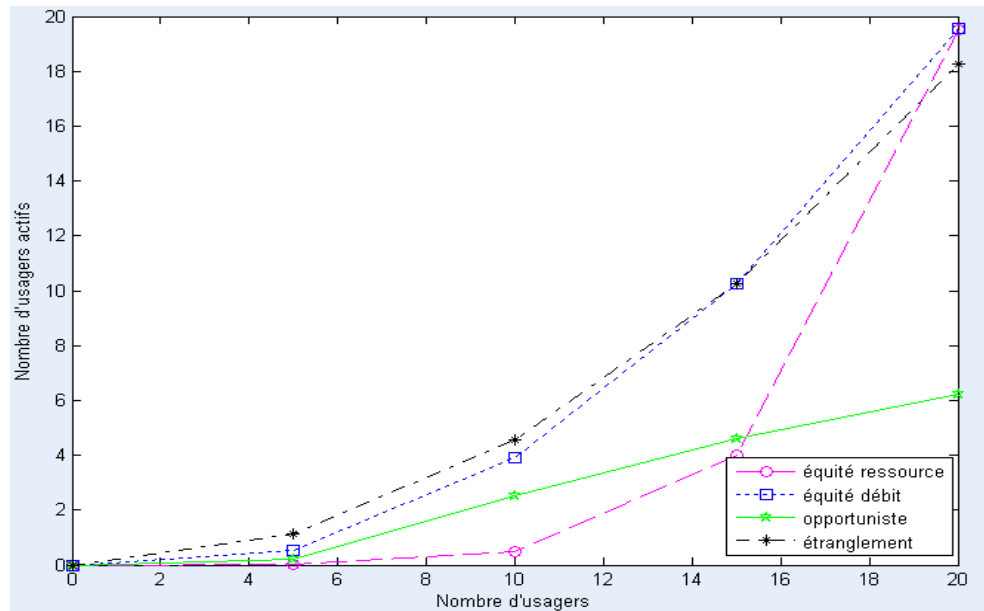
#### 4.3.8.2 Mono profile

##### a) Observation



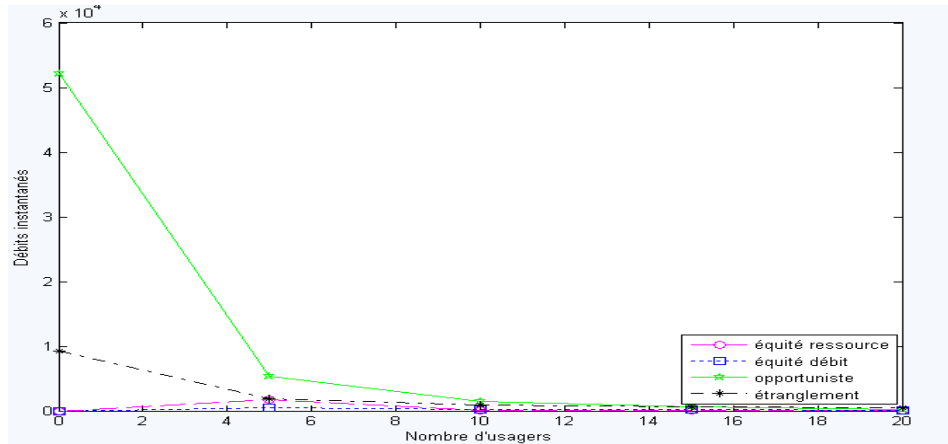
**Figure 4.12 :** Utilisation moyenne des ressources en BE mono profile avec

$$x_{on}=3\text{Mbits}, t_{off}=3\text{s}$$



**Figure 4.13 :** Nombre moyen de MS actifs en BE mono profile avec

$$x_{on}=3\text{Mbits}, t_{off}=3$$



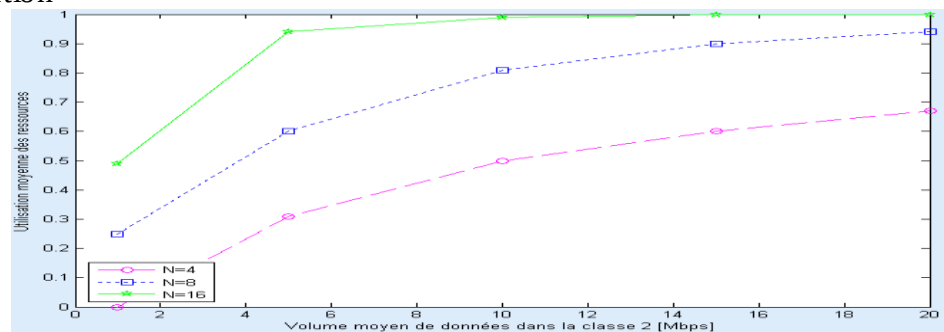
**Figure 4.14 :** Débit moyen en fonction du nombre d'utilisateurs en BE mono profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3$

#### b) Interprétation

On voit qu'un système d'ordonnancement géré par une politique conventionnelle est sensible à l'*outage* du fait de l'accroissement important de l'emploi de ses ressources radios et de son état qui supporte mal plusieurs usagers simultanément actifs. Par conséquent, il ne peut offrir des débits élevés atteignant les Mbps à part le régime opportuniste ne privilégiant que l'utilisateur possédant la meilleure modulation. C'est pourquoi, pour réussir à bien répartir les ressources quelque soit les conditions radio, l'usage du régime d'étranglement permet d'offrir des (MSTR) débits minimales acceptables aux utilisateurs pour éviter l'*outage* et des débits maximales raisonnables pour éviter l'encombrement rapide du réseau.

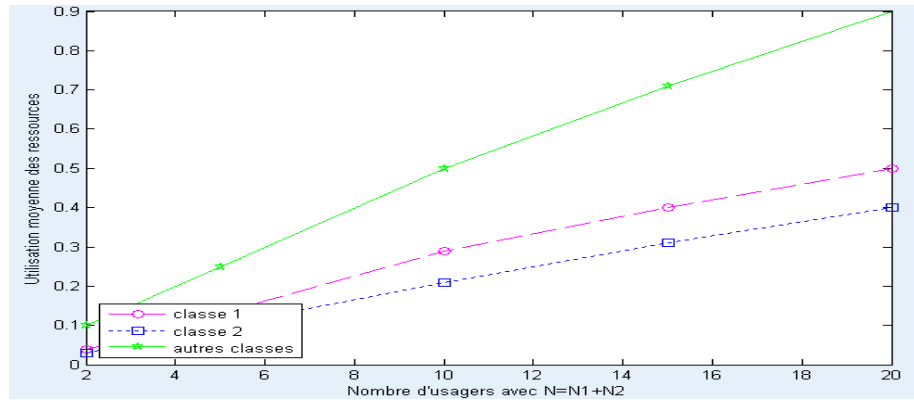
### 4.3.8.3 Multi profile

#### a) Observation

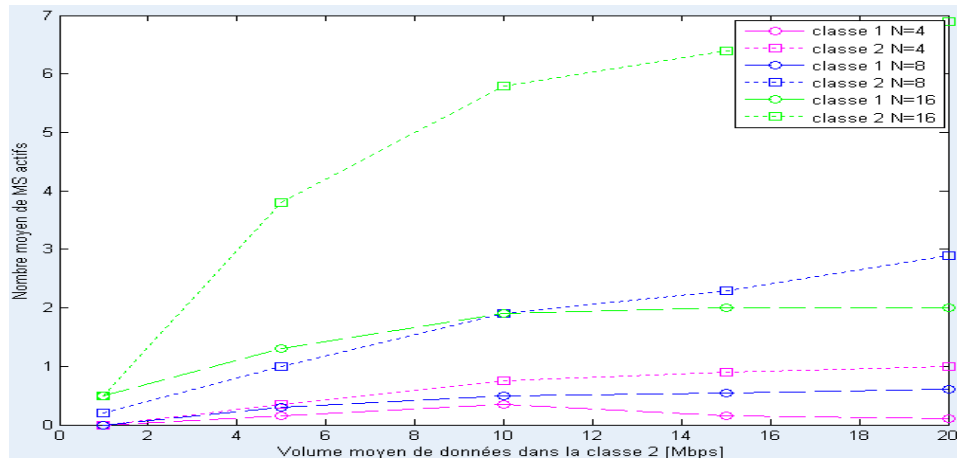


**Figure 4.15 :** Utilisation moyenne des ressources en BE multi profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3\text{s}$  en politique conventionnelle.

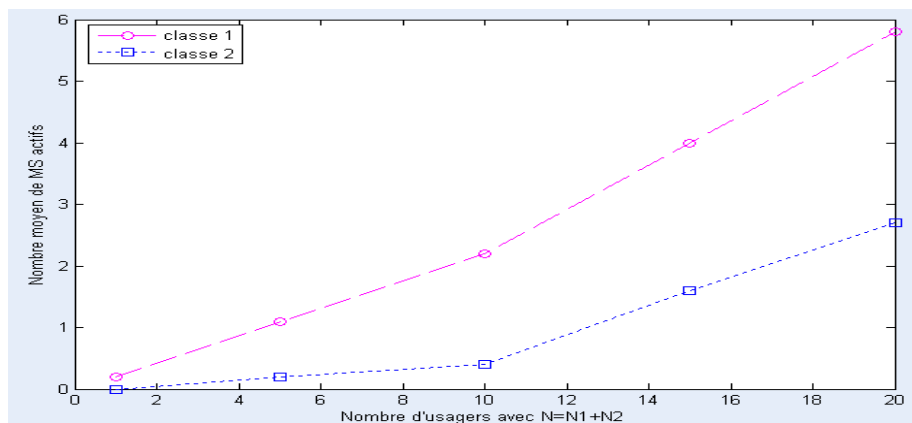




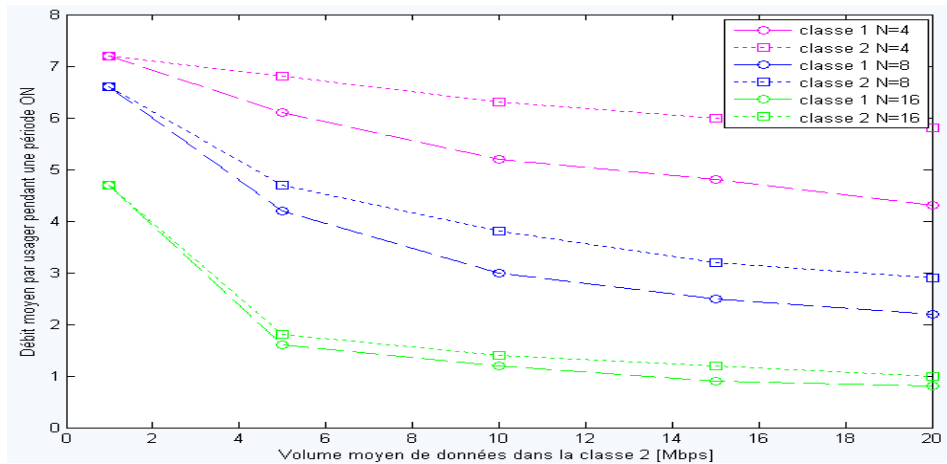
**Figure 4.16 :** Utilisation moyenne des ressources en BE multi profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3\text{s}$  en politique d'étranglement.



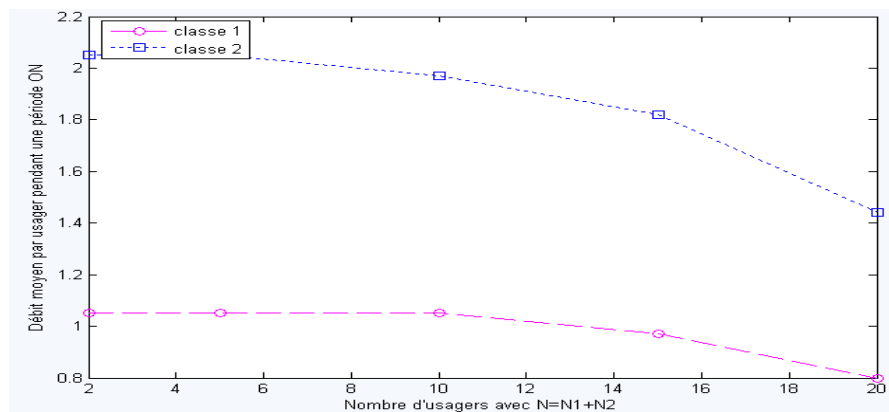
**Figure 4.17 :** Nombre moyen de MS actifs en BE multi profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3$  en politique conventionnelle.



**Figure 4.18 :** Nombre moyen de MS actifs en BE multi profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3\text{s}$  en politique d'étranglement



**Figure 4.19 :** Débit moyen en fonction du nombre d'utilisateurs en BE multi profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3\text{s}$  en politique conventionnelle.



**Figure 4.20 :** Débit moyen en fonction du nombre d'utilisateurs en BE multi profile avec  $x_{on}=3\text{Mbits}$ ,  $t_{off}=3$  en politique d'étranglement.

#### b) Interprétation

Dans un processus d'optimisation, lorsqu'on cherche à minimiser l'outage et à offrir des débits intéressants aux usagers, on a pu trouver que chercher à réaliser une équité entre les utilisateurs (ressources ou débits) ne garantit rien aux usagers en terme de débits que ce soit en mono profile ou multi profile étant donnée la disparité des conditions radio des utilisateurs.

La politique conventionnelle (incluant équité ressource, débit et opportuniste) quant à elle est très sensible à la congestion et au dépassement due à l'accroissement très importante de l'emploi des ressources radios en fonction du nombre des stations mobiles, par suite le système ne pourra supporter qu'un certain nombre limités d'utilisateurs actifs.

Cependant, par le biais du régime d'étranglement qui offre aux usagers des limites inférieures et supérieures (MSTR) pour le débit minimal et le débit maximal, ceci permet aux utilisateurs d'éviter l'outage surtout en phase de téléchargement ou d'activité. C'est pourquoi on a pu constater dans la simulation que ce soit en mono ou en multi profile des valeurs raisonnables de l'exploitation des ressources et du système, et par conséquent une offre de débit acceptable à l'image d'un réseau NGN.

#### **4.3.9 Conclusion partielle**

Après avoir présenté une brève conclusion de nos travaux, on propose des extensions possibles. Dans le cas des systèmes statiques, on a étudié la performance du beamforming adaptatif pour le schéma de réutilisation fréquentielle  $1 \times 3 \times 1$ . On suggère de faire la même analyse avec les réseaux MIMO et de comparer les deux. Les techniques de coordination de BS sont importantes dans le contexte de la permutation de sous-porteuse AMC et doivent être analysées. Notre étude des systèmes dynamiques considère uniquement le trafic élastique. Il serait utile d'inclure le trafic temps réel dans les modèles analytiques et de le mixer avec du trafic non temps-réel. Cela permettrait de donner une image complète de la dynamique du système et devrait prendre en compte le type d'affectation des ressources aux deux types de trafic. Retard et de gigue ne sont pas pris en compte dans les travaux présentés et doivent donc être étudiés.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les performances cibles fixées pour le système WiMAX sont très prometteuses. Cependant, pour atteindre ces objectifs, des outils d'ingénierie sont indispensables.

Dans ce mémoire, nous avons présenté un certain nombre de méthodes d'ingénierie des systèmes WiMAX. Ces méthodes concernent à la fois les systèmes statiques et dynamiques.

On a d'abord développé une technique de simulation qui nous a permis de comparer les différents schémas de réutilisation fréquentielle notamment la reuse  $1 \times 3 \times 1$  et la reuse  $3 \times 3 \times 3$  en considérant certains paramètres de QoS. Il est montré que certains schémas de réutilisation fréquentielle offrant un débit élevé sont aussi confrontés à une probabilité de dépassement élevée. Donc, un compromis entre les deux est demandé. On est capable de montrer que sans les fonctionnalités avancées, les systèmes OFDMA ne peuvent pas employer une réutilisation des fréquences en 1 (en débit) en raison d'une probabilité de dépassement considérable.

En incluant le beamforming adaptatif dans la comparaison des motifs fréquentiels, on a conclu que des schémas de réutilisation de fréquences plus agressifs (à l'exception de la réutilisation 1) que  $3 \times 3 \times 3$  fournissaient plus de débit avec une probabilité de dépassement acceptable. Ensuite, on a examiné la possibilité de parvenir à la réutilisation 1.

En ce qui concerne l'étude du système dynamique, on a fait une étude comparative des modèles analytiques développés pour les systèmes WiMAX. Ces modèles fournissent les paramètres de performance qui sont utilisés dans le processus de dimensionnement. Les modèles prennent en compte différentes politiques d'ordonnancement et classes de trafic. On a montré que les résultats obtenus par les modèles sont proches de ceux obtenus avec les simulations.

Nous avons également conclu que le modèle fournit des résultats acceptables pour différents canaux radio, distributions de trafic et conditions de charge.

L'adaptation des modèles à LTE serait aussi une tâche importante. Dans les systèmes dynamiques, on a considéré une cellule dans le réseau multicellulaire, il serait utile d'étudier l'effet de l'interaction entre les cellules du réseau.

## ANNEXE 1

### A1.1 Pseudo-codes d'un algorithme d'ordonnement en BE

Trame par trame, l'ordonnanceur alloue des slots DL pour les usagers actifs selon leurs conditions radio (leurs MCS) et le type de politique.

Déjà mentionné, l'ordonnanceur n'alloue pas de ressources aux usagers actifs en outage. La façon d'attribuer un certains nombre de slots pour chaque usager se fait comme suit:

$$N_s = \sum_{k=0}^K N_s^{(k)} n^{(k)}$$

Où  $N_s^{(k)}$  est le nombre de slots alloués aux MS utilisant  $MCS_k$  et  $n^{(k)}$  est le nombre de MS actifs utilisant  $MCS_k$ . A noter que  $N_s^{(k)}$  dépend de la politique d'ordonnement et que le nombre d'usagers actifs vérifie  $n = \sum_{k=0}^K n^{(k)}$ .

L'unique moyen que les individus dans  $N_s^{(k)}$  soit choisi par l'ordonnanceur est détaillée ci-dessous :

#### A1.1.1 Pseudo code pour la politique conventionnelle :

Soit  $K_F \subset [0...K]$  le domaine d'existence des MCS utilisés par les MS actifs dans une trame considérée.

Opportuniste

$$\begin{aligned} &\text{Find } k_{max} = \max K_F \\ &N_s^{(k)} = \frac{N_s}{n^{(k_{max})}} \text{ for } k=k_{max} \\ &N_s^{(k)} = 0 \text{ for all } k \neq 0 \end{aligned}$$

Equité slot

$$\begin{aligned} &N_s^{(k)} = 0 \text{ for } k = 0 \\ &N_s^{(k)} = \frac{N_s}{\sum_{k=0}^K n^{(k)}} \text{ for } k \neq 0 \end{aligned}$$

Equité débit

```

if k=0
   $N_s^{(k)} = 0$ 
  
$$N_s^{(k)} = \frac{\frac{N_s}{m_k}}{\sum_{k=0}^K \frac{n^{(k)}}{m_k}}$$

end

```

### A1.1.2 Pseudo code pour la politique d'étranglement :

Dans le but d'offrir un DBR pour tous les MS actifs dans une trame, certains nombres de slots  $N_s^{(k)}$  sont requis. Si  $N_s^{(k)} > N_s$ , en d'autres termes, si  $N_s^{(k)} < N_s$ ,  $N_s - N_s^{(k)}$  slots vont être inutilisés dans une trame. Le nombre de slots  $N_s^{(u)}$  requis pour chaque MS dans une trame pour atteindre la valeur de DBR sera calculé comme suit:

```

if  $m_k^{(u)} \neq 0$ 
  
$$N_s^{(u)} = \frac{\min(x_{on}^{(u)}, DBR \times T_F)}{m_k^{(u)}}$$

else (i.e. if the MS is in outage)
   $N_s^{(u)} = 0$ 
end

```

Où  $x_{on}^{(u)}$  est une valeur aléatoire des volumes ON téléchargés par un  $MS_u$  et  $m_k^{(u)}$  le nombre de bits par slot d'un  $MS_u$  utilisant  $MCS_k$  pendant une trame TDD.

Le nombre total de slots requis dans une trame TDD pour n usagers actifs sera donc:

$$N_s^{(F)} = \sum_{k=0}^K N_s^{(u)}$$

Dans le but de trouver le facteur de dégradation D, la procédure suivante est employée:

```

if  $N_s^{(F)} \leq N_s$ 
   $D = 1$ 
else
  
$$D = \frac{N_s}{N_s^{(F)}}$$

end

```

Finalement, le nombre de slots alloués pour un MS actif dans une trame est:

$$N_s^{(u)} = D \times N_s^{(u)}$$

## ANNEXE 2

### A2.1 Fenêtre d'accueil



Figure A2.01 : Fenêtre d'accueil.

En cliquant sur EVALUATION de la fenêtre d'accueil, on a la fenêtre de la figure A2.02.

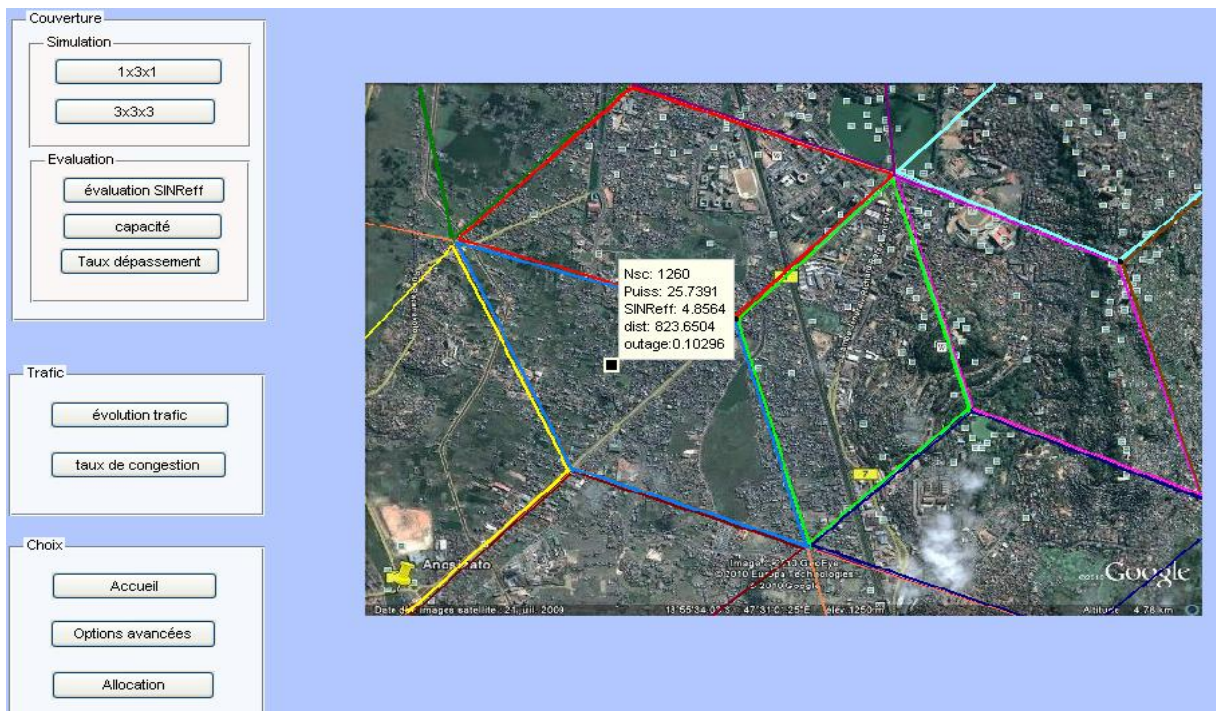


Figure A2.02 : Fenêtre évaluation performances.

En cliquant sur OPTIONS AVANCEES de la fenêtre d'évaluation, on a la fenêtre de la figure A3.03 puis la fenêtre pour l'allocation (figure A2.04) en cliquant sur ALLOCATION.

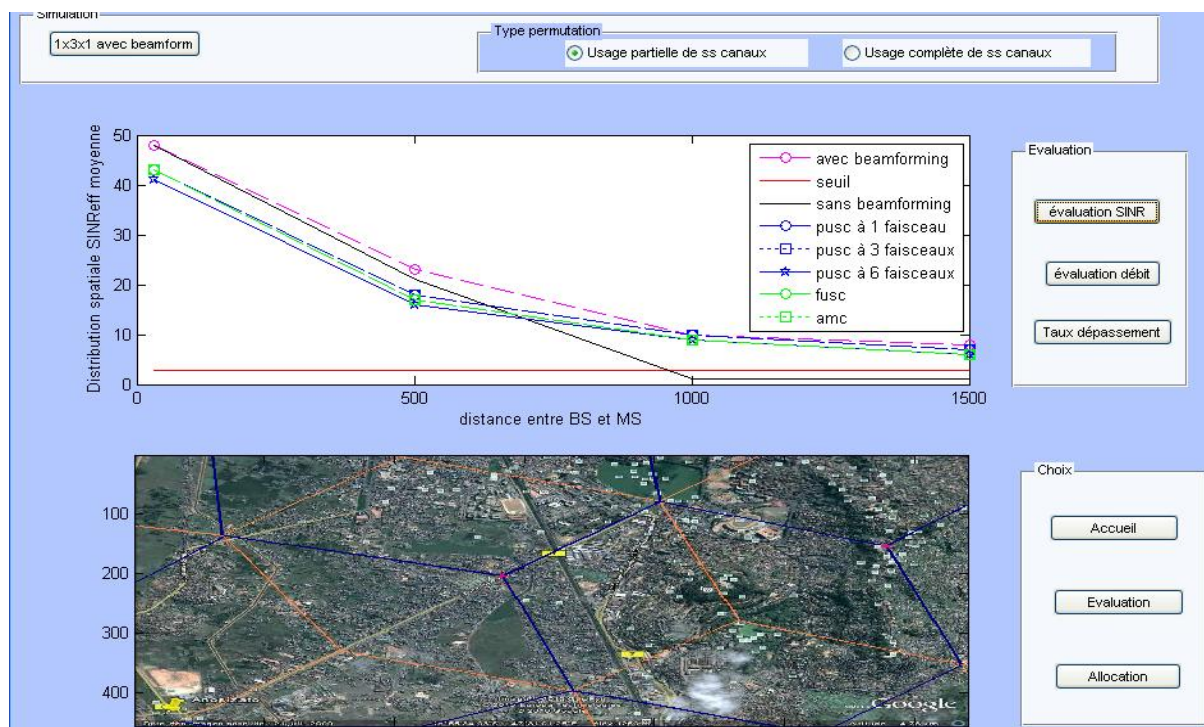


Figure A2.03 : Fenêtre options avancées.



Figure A2.04: Fenêtre allocation.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] WiMAX forum. « *Mobile WiMAX-Part1: A Technical Overview and Performance Evaluation* ». August 2006.
- [2] Maqbool M., Coupechoux M. and Godlewski P., « *Achieving Frequency Reuse 1 in WiMAX Networks with Beamforming* ». TELECOM ParisTech & CNRS LTCI, Paris France. juin 2006
- [3] Jacquemin B., « *Architectures pour la Mobilité et la Qualité de Service dans les Systèmes Satellites DVB-S2/RCS* ». Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 24 Juin 2010.
- [4] Maqbool M., Coupechoux M. and Godlewski P., « *Comparative Study of Reuse Patterns for WiMAX Cellular Networks* ». Institut TELECOM, TELECOM ParisTech. Juin 2006.
- [5] Hasan M.A., « *Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer* ». Thesis of Master of Science in Technology, Espoo, Juin 2007.
- [6] Louay M.A. Jalloul and Sam P. Alex., « *Evaluation Methodology and Performance of an IEEE 802.16e System* ». {jalloul,salex}@beceem.com, Décembre 2007.
- [7] WiMAX forum. « *Mobile WiMAX-Part 2: A Comparative Analysis*», Mai 2006.
- [8] Maciej J. N., Dohler M., Aghvami A. H., « *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation* », Theory and Practice. Octobre 2003.
- [9] Koliopoulos C., Chronopoulos S., « *Simulation, Modeling, and Performance Analysis of IEEE 802.16e OFDMA Systems for Urban and Rural Environments*», Arta, Greece kangelis@teiep.gr, février 2008

- [10] Baudron J., « *WiMAX à l'usage des communications haut débits : WiMAX ET LA QoS* ». *jacques.baudron@ixtel.fr.*, Forum ATENA Janvier 2009.
- [11] Muquet B. Biglieri E., A. Goldsmith, and H. Sari., « *MIMO Techniques for Mobile WiMAX Systems* ». SEQUANS Communications. Septembre 2007.
- [12] Raj J. « *WiMAX System Level Modeling Methodology: A Tutorial* », <http://www.cse.wustl.edu/~jain>. Washington University in Saint Louis and WiMAX Forum. Mai 2009.
- [13] Tcheugoue N. E.A, « *Ingénierie et modèles de propagations des réseaux cellulaires UMTS* ». Mémoire de fin d'études, Dép.TCO.—E.S.P.A., A.U. :2009.
- [14] Eira J.P., Rodrigues A. J, « *Analysis of WiMAX data rate performance* ». Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon. Janvier 2007.
- [15] Kim. B-H., Yun J., « *Capacity Estimation and TCP Performance Enhancement over Mobile WiMAX Networks*». Washington University in St. Louis. Avril 2008.
- [16] Maqbool M., Coupechoux M. and Godlewski P., « *Effect of Distributed Subcarrier Permutation on Adaptive Beamforming in WiMAX Networks*». ENST & CNRS LTCI. Janvier 2005.
- [17] Tarhini C., Chahed T. « *On capacity of OFDMA-based IEEE802.16 WiMAX including Adaptive Modulation and Coding (AMC) and inter-cell interference* », GET/Institut National des Télécommunications. Juin 2004.
- [18] Parsa K. « *Survey of WiMAX, LTE and UMB*», <http://www.clicktoconvert.com>. 30 Décembre 2007.
- [19] Raj J. « *WiMAX System Modeling Methodology* », <http://www.cse.wustl.edu/~jain>. Washington University in Saint Louis and WiMAX Forum. Mai 2009

- [20] SR Telecom., « *WiMAX Capacity White Paper* ». August 2006.
- [21] WiMAX Forum., « *WiMAX's technology for LOS and NLOS environments* ». 2006.
- [22] Layec P., « *Techniques de multiplexage spatial avec voie de retour limitée pour les systèmes multi-antennes multiutilisateurs* ». thèse de doctorat, Ecole Doctoral STITS mai 2009.
- [23] Halidou O. et Mrabet R., « *Gestion de la Qualité de Services par les Règles de Politiques dans IP au dessus de 802.16* ». Université Mohammed V – Souissi, Mars 2005.
- [24] Ibrahim K., « *Gestion des ressources des réseaux mobiles de nouvelle génération par rapport à la mobilité des utilisateurs* ». thèse doctoral, École Doctorale 166 «Information Structures Systèmes». Mars 2008.
- [25] Anamul Islam A. Md., « *BER Performance Analysis of a Real Data Communication through WiMAX-PHY Layer over an AWGN and Fading Channels* ». Dept. of Applied Physics and Electronic Engineering Rajshahi University. Juillet 2007.
- [26] Stephan A., « *Resource Allocation Strategies and Linear Precoded OFDM Optimization for Ultra-Wideband Communications* ». thèse doctoral, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes. Juillet 2008.
- [27] Radiocommunications Mobiles, « *De SISO à MIMO – exploiter toutes les ressources de l'interface air (II)* ». Novembre 2009.
- [28] Defez N., « *Le WiMAX* », Université Montpellier II, DESS TNI, Décembre.2004.

- [29] Lengoumbi C., « *Accès multiple OFDMA pour les systèmes cellulaires post 3G : allocation de ressources et ordonnancement* ». Thèse de doctorat, Telecom ParisTech, mars 2008.
- [30] Baudron J., « *WiMAX à l'usage des communications haut débits : un peu de technique* ». jacques.baudron@ixtel.fr. Forum ATENA Janvier 2009.
- [31] Lu X., Antikainen J., « *Link level simulation study of downlink MIMO and uplink HARQ in IEEE 802.16e WiMAX System* ». University of Oulu Finland. Décembre 2009.
- [32] Lax M.C. and Dammander A. « *WiMAX - A Study of Mobility and a MAC-layer: Implementation in GloMoSim* ». Master's Thesis in Computing Science, Avril 2006.
- [33] Shao J., « *WiMAX Sheduling* », UC Berkeley, Mai 2006.
- [34] Bestetti A., « *WiMAX: MAC Layer Performance Assessments* », University of Siena. Aout 2007.
- [35] Solofomanana T.M.D, « *Performances d'un réseau WiMAX: Méthodes d'allocation des ressources radio OFDM* ». Mémoire de fin d'études, Dép.TCO.— E.S.P.A., A.U. :2010.
- [36] Baynat B., Doirieux S., Nogueira G., Maqbool M., Coupechoux M., « *An Efficient Analytical Model for WiMAX Networks with Multiple Traffic Profiles* ». firstname.lastname@lip6.fr, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. Mai 2005.

## FICHE DE RENSEIGNEMENTS



Nom : ANDRIANAIVORAVELO  
Prénoms : Nantenaina Frédéric  
Adresse de l'auteur : Lot VB 46 Ambatonakanga  
Téléphones : 0337830776-0324202421  
Email : ericadrianai@yahoo.fr

Titre du mémoire : « **Planification d'un réseau WiMAX avec prise en compte de contrainte de qualité de service et capacité** »

Nombre de pages : 106  
Nombre de tableaux : 14  
Nombre de figures : 53  
Mots clés : Performances, options avancées, WiMAX, QoS, ordonnancement, couche MAC, couche PHY

Directeur du mémoire : M.RANDRIAMITANTSOA Andry Auguste

## RESUME

Avec la croissance fulgurante de l'utilisation des systèmes de communication sans fil nouvelles générations et la forte expansion de l'internet mobile dans les quatre coins du globe, la majorité des travaux de recherche dans ce domaine se focalisent sur le déploiement de nouvelles technologies permettant de rendre les réseaux sans fil comme WiMAX de plus en plus performants. Cependant, la conception des nouvelles générations de réseaux sans fil se trouve toujours confrontée au problème d'accès, de maintien de la qualité radio, de pénuries de ressources et une puissance d'émission souvent limitée. Afin de surmonter ces handicaps, une étude approfondie d'évaluation de performances permet d'améliorer les services offerts aux usagers. En effet, un choix judicieux sur la réutilisation fréquentielle ou l'optimisation d'une reuse 1 à l'aide d'option d'ingénierie avancée, permet de réduire la possibilité d'*outage*, tout comme une bonne gestion des ressources radio même dans un trafic en Meilleur effort permet de repousser les problèmes de limitations de capacités et de débits.

## ABSTRACT

With dazzling progress of new generation wireless communication use and a strong expansion of mobile internet in earth, all research about this insist on new technologies deployments allow possibility to make wireless network as WiMAX more efficient. However, new generation wireless network conception sustains with access, quality radio maintenance, resources shortage problems. So, to overcome these hindrances, a strong research of performance evaluating makes it possible to improve the services offered to the users. Indeed, a judicious choice on frequential reuse and use of advanced planning make is very important to avoid the outage state, as right radios resources managing allow to push away capacities and throughputs limitations problems.