



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
**Electronique**  
**Signaux et Communications**

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**Kahoul kenza**

Le : samedi 23 juin 2018

## **Etude et simulation du standard de transmission de donnéesans fil : WIMAX par OPNET comparé avec WIFI**

---

Jury :

Dr.	<b>TOUMI ABIDA</b>	<b>MCA</b>	Université de BISKRA	Président
Dr.	<b>HENDAOUI MOUNIRA</b>	<b>MCB</b>	Université de BISKRA	Rapporteur
Dr.	<b>DIABI FATAH</b>	<b>MCA</b>	Université de BISKRA	Examineur

## ***REMERCIEMENTS***

*D'abord, nous remercions Dieu le tout puissant. C'est grâce à lui que nous avons eu le foie et la force pour accomplir ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Mademoiselle HINDAOUI MOUNIRA, Docteur à l'université de BISKRA, pour ses précieux conseils, ses incessants encouragements et surtout sa grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a témoignée.*

*Mes remerciements les plus vifs, vont également à pour mes frères Ibrahim, Mouhamed, Mosstafa, Amel, Ferail, Affafe, Souad, Chamss, et khalto, surtout Soufian, qui était un père pour moi qui m'ont donné un environnement idéal durant toute mon enfance et ils m'ont enseigné l'humilité et l'honnêteté avec lesquelles j'ai essayé de mener à terme ce travail scientifique.*

*Je remercie tous les enseignants qui ont participé à ma formation au département d'électronique et tout collègues (Master 2 Télécommunications et Réseaux) Surtout Karima, Fatima, Mejda, Ahlam...Et beaucoup de copines que je n'oublierai jamais : Amina, Hind, Ahlam, Zineb, Hanan, Asma, Aicha, Assil, Rahima, Khadija, Roufida et Yassmin Jouri.*

## **DÉDICACE**

*Je dédie ce projet de fin d'études, aux personnes qui me sont les plus chères :*

*A ma mère et à mon père, que Dieu ait pitié d'eux,*

*A mes frères qui m'ont énormément soutenu dans les moments les plus difficiles, partagé mes joies, qui se sont toujours sacrifiés pour moi.*

*Pour mes sœurs (Ferail et Amel) les encourager à moi.*

*A mon encadreur Mademoiselle HINDAOUI MOUNIRA Pour avoir bien voulu encadrer ce travail ainsi que pour sa riche contribution et ses précieux conseils.*

*A mes amis et collègues. A Mes professeurs de l'université MOUHAMED KHIDHER.*

*Qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*KENZA.*

*Liste des abréviations*

**A**

- ADSL Asymmetric Digital Subscriber Line
- AMC Advanced Modulation and Coding
- AP Access Point : borne émettrice du réseau WIFI.
- ATM Asynchronous Transfer Mode (Mode de transfert asynchrone)

**B**

- BLR Boucle Locale Radio
- BPSK Binary Phase-Shift Keying
- BR Bandwidth Request
- BS Base Station borne émettrice du réseau WIMAX.
- BSS Basic Service Set type d'architecture du WIFI
- BTS Base Transceiver Station

**C**

- CDMA Code Division Multiple Access
- CID Charge-Injection Device
- CPS Common Part Sublayer
- CRC Cyclic Redundancy Check (Contrôle de redondance cyclique)
- CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance.

**D**

- DS Distribution System (système de distribution.)
- DSL Digital Subscriber Line (ligne numérique d'abonné)
- DNS Domain Name System

**E**

- EC Encryption control
- EKS Encryption Key Sequence
- ESS Extended Service Set type d'architecture WIFI.

**F**

- FDD Frequency Division Duplexing
- FDDI Fiber Distributed Data Interface
- FTP File Transfer Protocol (Protocole de transfert de fichiers)
- FUSC Full Usage of Subchannels

**G**

- 4G 4ème génération
- GPRS General Packet Radio Service
- GSM Groupe Spécial Mobile

**H**

- HSC Header Check Sequence
- HT Header type
- HTTP Hypertext Transfer Protocol

**I**

- IBSS Independent Basic Set Service
- IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
- IFFT Transformée de Fourier Inverse
- ISI Inter symbol intrference
- ISO International Standards Organization

**L**

- L2 (Layer 2) niveau 2 du modèle OSI.
- L3 (Layer 3) niveau 3 du modèle OSI.
- LAN Local Area Network
- LEN Length
- LLC Logical Link Control
- LOS Line Of Sight
- LTE Long Term Evolution

**M**

- MAC Media Access Control
- MIB Management Information Base
- MIMO Multiple Input Multiple Output
- MS Mobile Station (station de mobile)
- MN Mobiles Nœuds
- MPEG Moving Picture Experts Group

**N**

- NIC Network Interface Controller
- NLOS Non Line Of Sight

**O**

- OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access
- OPNET Optimum Network Performance
- OSI Open Systems Interconnection

**P**

- PCI Peripheral Component Interconnect
- PCMCIA Personal Computer Memory Card International Association
- PDA Personal Digital Assistant
- PMP Point à Multipoint
- PS Physical Slot
- Ps Privacy Sublayer
- PUSC Partial Usage of Subchannels

**Q**

- QAM            Quadrature Amplitude Modulation
- QOS            Quality Of Service (Qualité de service)
- QPSK           Quadrature phase-shift keying

**R**

- RSV            Reserved (Réservation)

**S**

- SC             Single Carrier
- SISO           Single Input, Single Output
- SMTP          Simple Mail Transfer Protocol
- SNR            Rapport Signal sur bruit
- SS             Subscriber Station
- SSCS          Service Specific Convergence Sublayer

**T**

- TCP/IP        Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
- TDD           Time Division Duplex
- TDM           Time division multiplexing
- TUSC          Tile Usage of Subchannels

**U**

- UDP           User Datagram Protocol
- UGS           Unsolicited Grant Services
- UMTS          Universal Mobile Telecommunication System
- USB           Universal Serial Bus

**V**

- VOIP          (Voice over IP) : téléphonie sur le protocole IP.

**W**

- WIFI          Wireless Fidelity
- WIMAX        Worldwide Interoperability for Microwave Access
- WLAN         Wireless Local Area Networks
- WMAN         Wireless Metropolitan Area Networks
- WPAN         Wireless Personal Area Networks
- WWAN         Wireless Wide Area Networks
- WWW          World Wide Web

## ***Résumé***

Il peut être l'un des rêves les plus simples d'une personne qui peut accéder à Internet simplement et profiter des services merveilleux sans être lié par un câble : Comme un appel à la voix (VOIP) ou payer des factures ou réserver des billets... etc. Même si on est dans un restaurant en train de prendre notre déjeuner donc c'est ce qu'on appelle la mobilité qui est le service le plus demandé dans nos jours pour faciliter notre vie quotidienne. Les réseaux qui peuvent nous offrir ce genre de service est bien les réseaux sans fil, qui sont notre sujet dans ce mémoire.

Un réseau sans fil, c'est un ensemble d'appareils connectés entre eux et qui peuvent s'envoyer et recevoir des données sans qu'aucune connexion « filaire » physique reliant ces différents composants entre eux ne soit nécessaire.

Parmi les réseaux nous avons étudié le WIMAX «World Wide Interoperability for Micro Waves Access» qui est une technologie sans fil pour la transmission des données sur une grande distance à des débits élevés et nous les comparerons donc à la norme WIFI pour évaluer les performances et l'efficacité de WIMAX.

Nos résultats de simulation par OPNET, ont prouvé la robustesse du WIMAX envers WIFI, concernant le débit, le chargement et le trafic envoyé et reçu, aussi le WIMAX présente un réseau où les data dropped sont presque nulle, ce qui rend le WIMAX comme un réseau très important est demandé surtout dans les zones isolées (Le désert, au océan, les montagnes....etc).

Cette technologie du nom WIMAX est un complément indispensable à l'ADSL. Les déploiements de réseaux de type WIMAX sont déjà en cours dans plusieurs pays, il est envisageable de voir une forte adoption de cette forme de diffusion d'informations dans les prochaines années.

## ***Abstract***

It can be one of the simplest dreams of a person who can access the Internet simply and enjoy wonderful services without being tied by a cable: Like a voice call (VOIP) or pay bills or book tickets ... etc. Even if you are in a restaurant eating breakfast, this is called mobility, the most requested service in our day to make our

daily life easier. The networks that can offer us this kind of service are wireless networks, which are our subject in this memory.

Wireless networks is a set of connected devices that can send and receive data without any physical "wired" connection connecting these different components to each other. Among the networks we studied WIMAX "World Wide Interoperability for Micro Waves Access" is a wireless technology for the transmission of data over a long distance at high speeds and we will therefore compare them with the WIFI standard to evaluate the performance and effectiveness of WIMAX..

Our simulation results by OPNET, proved the robustness of WIMAX towards WIFI, concerning the throughput , the load and the sent and received traffic, also the WIMAX presents a network where the data dropped are almost null, which makes the WIMAX like a very important network is asked especially in isolated areas (The desert, ocean, mountains). This technology WIMAX is an essential complement to ADSL to allow coverage of perfectly remote areas.

WIMAX type network deployments are already underway in several countries; it is conceivable to see a strong adoption of this form of information dissemination in the coming years.

### الملخص

قد يكون من ابسط الاحلام عند اي شخص ان يستطيع الوصول الى الانترنت بكل بساطة والاستمتاع بخدماتها الرائعة دون أن يكون مقيدا بأسلاك: كإجراء مكالمة صوتية عبر بروتوكول IP (VOIP) او دفع الفواتير او حجز التذاكر حتى لو كنت في مطعم تتناول وجبة الإفطار وهذا ما يسمى بخاصية التنقل (la mobilité)؛ وهي الخدمة الأكثر طلبًا في ايامنا هذه من اجل حياة أسهل؛ الشبكات التي يمكن أن تقدم لنا هذا النوع من الخدمات هي شبكات لاسلكية، والتي هي موضوعنا في هذه المذكرة.

الشبكات اللاسلكية هي مجموعة من الأجهزة المتصلة التي يمكنها إرسال واستقبال البيانات دون أي اتصال سلكي يربط فيما بينها؛ من بين الشبكات التي سنتطرق لها تقنية ال WIMAX وهي تقنية لاسلكية لنقل البيانات عبر مسافات طويلة بسرعات عالية ؛ ولذلك سنقارنها مع معيار WIFI لتقييم أداء وفعالية شبكة واي مكس.

أثبتت نتائج المحاكاة باستعمال برنامج OPNET، مدى قوة WIMAX بالنسبة لتقنية WIFI، فيما يتعلق بالإنتاجية، والحمولة وحركة المرور (المرسلة والمستقبلة) ، كما انه يتميز بقدر قليل من البيانات الضائعة، مما يجعل WIMAX شبكة مهمة للغاية وخاصة في المناطق المعزولة (الصحراء والمحيطات والجبال.....الخ)؛ تقنية WIMAX هي مكمل أساسي ل ADSL للسماح بتغطية المناطق النائية تمامًا.

يتم نشر شبكات من نوع WIMAX في العديد من البلدان، ومن المتصور أن نرى اعتماداً قوياً لهذه التقنية في السنوات القادمة





**Table des matières**

Remerciements

Dédicace

Glossaire

Résumé de la mémoire

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

**Introduction général ----- 1**

**Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux sans fil**

1. INTRODUCTION----- 4

2. RESEAU SANS FIL----- 4

    2.1 Description----- 4

    2.2 Cas d'utilisations ----- 5

3. LES DIFFERENTS TYPE DE RESEAUX SANS FIL----- 5

    3.1 Réseaux personnels sans fil----- 5

        3.1.1 Bluetooth : ----- 5

        3.1.2 ZigBee : ----- 6

        3.1.3 Les liaisons infrarouges : ----- 6

    3.2 Réseaux locaux sans fil (norme IEEE 802.11)----- 6

        3.2.1 Présentation de WIFI (802.11)----- 6

        3.2.2 Les différentes normes WIFI----- 7

        3.2.3 Les équipements WIFI----- 8

            3.2.3.1 Les adaptateurs sans fil ou cartes d'accès ----- 8

            3.2.3.2 Les points d'accès----- 8

            3.2.3.3 Les antennes----- 9

        3.2.4 Classification des réseaux Wi-Fi ----- 9

3.2.4.1 Les réseaux sans infrastructure -----	9
3.2.4.2 Les réseaux avec infrastructure-----	9
3.2.5 Les avantage et l'incontinent-----	11
3.2.5.1 Avantages du Wi-Fi -----	11
3.2.5.2 Inconvénients du wifi -----	11
3.3 Réseaux métropolitains sans fil (norme IEEE 802.16) -----	11
3.4 Réseaux étendus sans fil -----	12
4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX SANS FIL -----	12
5 MODELE OSI ET MODELE TCP/IP -----	14
5.1 Le modèle OSI-----	14
5.1.1 Les différentes couches :-----	14
5.2 Le modèle TCP/IP -----	16
6. CONCLUSION -----	18
<b>Chapitre 2 : Généralité sur les réseaux WIMAX</b>	
1. INTRODUCTION-----	<b>20</b>
2. L'HISTORIQUE DU WIMAX-----	<b>20</b>
2.1 Origines du WIMAX -----	20
2.2 Apport de WIMAX -----	21
2.3 Les Types du WIMAX -----	22
2.3.1 WIMAX FIXE-IEEE 802.16-2004-----	22
2.3.2 WIMAX MOBILE-802.16e-2005-----	22
2.4 Architecture du WIMAX -----	23
3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU WIMAX-----	<b>23</b>
4. LES DIFFERENTES NORMES -----	<b>25</b>
5. APPLICATION DU WIMAX -----	<b>26</b>
6. Particularités techniques -----	<b>26</b>
6.1 Etude technique de WIMAX -----	26

6.1.1 La couche MAC-----	27
6.1.2 La couche physique-----	27
6.2 Les techniques de multiplexage-----	28
6.2.1 Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence -----	28
6.2.2 L’OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) -----	29
6.2.3 MIMO : Multiple Input Multiple Output-----	30
6.2.4 Modulation adaptative -----	31
6.3 Techniques de Duplexage-----	32
6.3.1- TDD (Time Division Duplexing)-----	32
6.3.2- FDD (Frequency Division Duplexing) -----	32
7. LE FORMAT DES TRAMES. -----	33
7.1 Les en-têtes de la trame Wimax-----	33
7.2 Le payload -----	34
8. LA SECURITE -----	34
9. La qualité de service dans le WiMAX-----	35
10. La différence entre le WIFI et le WIMAX -----	36
10.1 Les application du WIFI et WIMAX -----	37
11. Conclusion -----	38

Chapitre 3 : Simulations des performances d’un réseau par OPNET

1. INTRODUCTION-----	40
2. SIMULATION-----	40
2.1 Outil de simulation (OPNET modeler) -----	40
2.2 Modèles utilisés -----	41
2.3 Éditeur de projet (Project Editor) -----	41
2.4. Éditeur de modèle de réseau (Network Model Editor).-----	42
2.5 Éditeur de modèle de nœud (Node Model Editor) -----	42
3. MODEL DE DESCRIPTION-----	43

3.1	Projet 1 : Topologie WIMAX	43
3.1.1	Section 1 : Distance entre l'utilisateur et BS (La portée maximale)	43
3.1.2	Section 2 : Nombre d'utilisateurs	44
3.1.3	Section 3 : L'influence des paramètres du réseau sur ses performances.	44
3.2	Projet 2 : Topologie WIFI	45
3.2.1	Section 1 : Distance entre l'utilisateur et AP (La portée maximale)	45
3.2.2	Section 2 : Nombre d'utilisateurs	46
3.3	Projet 3 : Topologie WIFI_WIMAX	46
3.3.1	: Nombre d'utilisateurs (WIFI_WIMAX)	46
3.3.2	: Topologie WIFI_WIMAX	47
4.	<b>Simulation</b> (résultats et discussion)	<b>48</b>
4.1	Portée de ce projet	48
4.2	Configuration des paramètres	48
4.3	Résultats de Projet 1 : Topologie WIMAX	49
4.3.1	Section 1 : Distance entre l'utilisateur et BS (La portée maximale)	49
4.3.1.1	la variation de débit du MS au long de trajet	49
4.3.1.2	Variation de distance consécutif du lieu BS (0Km, 5Km, 25Km, 24Km et 25.5Km. -----	51
4.3.2	Section 2 : Nombre d'utilisateurs	52
4.3.3	Section 3 : Le choix des meilleurs paramètres pour nos modèles de simulation	54
4.3.3.1	Les modulations (16QAM , 64QAM ,et BPSK)	54
4.3.3.2	Les puissances d'émission (0.5 , 5,et 50)W	56
4.3.3.3	Les technologies (OFDM et SC)	57
4.3.3.4	Les gains d'antenne (-1, 14 et 15) dBi	59
4.3.3.5	Différents modèles de trajets multiples (vehicular et pedestrian)	61
4.4	Résultats de Projet 2 : Topologie WIFI	62
4.4.1	Section 1 : Distance entre l'utilisateur et AP (La portée maximale)	62

4.4.2 Section 1 : Nombre d'utilisateurs -----	64
4.5 Résultats de Projet 3 : Topologie WIFI_WIMAX -----	66
<b>5. CONCLUSION -----</b>	<b>71</b>
<b>CONCLUSION GENERALE -----</b>	<b>71</b>
<b>Annexe -----</b>	<b>74</b>
<b>Références bibliographiques -----</b>	<b>82</b>

## List des figures

Figure 1.1 : Les différentes technologies sans fil	P5
Figure 1.2 : Logo de Bluetooth	P6
Figure 1.3 : Logo de Zig Bee	P6
Figure 1.4 : Mode Infrastructure du WIFI	P7
Figure 1.5 : cartes d'accès	P8
Figure 1.6 : Les points d'accès	P8
Figure 1.7 : La décomposition des réseaux sans fil	P9
Figure 1.8 : réseau local sans fil de base avec point d'accès	P10
Figure 1.9 : réseau sans fil étendu	P10
Figure 1.10 : Effets multi-trajets des ondes radio.	P13
Figure 1.11 : Le modèle OSI	P14
Figure 1.12 : la différence entre le modèle TCP/IP et le modèle OSI	P16
Figure 2.1 : Historique du WiMAX.	P21
Figure 2.2 : Exemple d'un réseau WiMAX avec les deux variantes fixe et mobile	P22
Figure 2.3 : Exemple d'un réseau WiMax	P23
Figure 2.4 : LOS & NLOS	P24
Figure 2.5 : Couches protocolaires d'IEEE 802.16	P27
Figure 2.6 : Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence.	P28
Figure 2.7 : Différence entre les signaux SC et OFDM reçus	P29
Figure 2.8 : Description fréquentielle de l'OFDMA	P29
Figure 2.9 : Schéma simplifié d'un système MIMO	P31
Figure 2.10 : Couche physique adaptative	P31
Figure 2.11 : Duplexage TDD, (figure extraite de la norme)	P32
Figure 2.12 : La trame Wimax	P33
Figure 2.13 : en-têtes Wimax	P33
Figure 2.14 : Illustration du payload	P34
Figure 2.15 : Etablissement de connexion Wimax entre une BS et une station cliente	P35
Figure 3.1 : Project editor	P41
Figure 3.2 : palette des objets OPNET	P42
Figure 3.3 : Node Model Editor	P42
Figure 3.4 : Scénario WIMAX avec 4 stations de base (4 cellules).	P43
Figure 3.5 : Les trois scénarios représente (1,8 et 30) MS	P44
Figure 3.6 : WIMAX paramètres	P45
Figure 3.7 : Lien Wifi avec 4 utilisateurs mobiles et un AP	P45
Figure 3.8 : les trois scénarios représente (1, 20 et 40 nœuds mobiles.)	P46
Figure 3.9 : scénarios 1 représente 1 MS pour topologie wifi et topologie wimax	P46
Figure 3.10 : scénarios 2 représente 20 MS pour wifi et wimax	P47
Figure 3.11 : scénarios 3 représente 40 MS pour wifi et wimax	P47
Figure 3.12 : Topologie de l'étude de cas WiMAX_WIFI	P47
Figure 3.13 : Vue d'ensemble de la configuration de simulation projet WIMAX	P49
Figure 3.14 : Le changement qui a lieu au débit de l'utilisateur en passant sur le trajet	P49
Figure 3.15 : Débit WIMAX de global (4BS) et MS (paquets/Sec)	P50
Figure 3.16 : Perte de données et débit de MS (packets/Sec)	P50
Figure 3.17 : Perte de données et Trafic reçu / Trafic envoyé de MS (bit/Sec)	P50
Figure 3.18 : Scénario WIMAX avec 5 MS et 1 BS (1 cellules).	P51
Figure 3.19 : débit sur MS pour des distances de 0Km, 5Km, 24Km, 25Km et 25.5Km.	P51
Figure 3.20 : Perte de données sur MS pour des distances de 0Km, 25.5Km et 26Km	P52
Figure 3.21 : le débit de MS	P53
Figure 3.22 : le débit de BS	P53

Figure 3.23 : le débit de global	P53
Figure 3.24 : La charge de MS pour 1, 8, et 30	P53
Figure 3.25 : la charge global pour 1, 8, et 30 MS	P53
Figure 3.26 : Perte de données pour 1, 8, et 30 MS	P53
Figure 3.27 : Comparaison en débit WiMAX	P54
Figure 3.28 : Comparaison en retard	P54
Figure 3.29 : Comparaison en charge WiMAX	P55
Figure 3.30 : Comparaison en Perte de données	P55
Figure 3.31 : wimax paramètre (maximum transmission power)	P56
Figure 3.32 : Comparaison en Debit WiMAX	P56
Figure 3.33 : Comparaison en charge WiMAX	P56
Figure 3.34 : Comparaison en retard WiMAX	P57
Figure 3.35 : Comparaison en debit WMAX	P57
Figure 3.36 : Comparaison en retard WiMAX	P58
Figure 3.37 : Comparaison en perte de donnéesWiMAX	P58
Figure 3.38 : wimax paramètre (Antenna Gain)	P59
Figure 3.39 : Comparaison en debit WiMAX	P59
Figure 3.40 : Comparaison en retard WiMAX	P59
Figure 3.41 : Comparaison en charge WiMAX	P60
Figure 3.42 : Comparaison en perte de donnéesWiMAX	P60
Figure 3.43 : Débit de MS avec différents modèles de trajets multiples	P60
Figure 3.44 : Data dropped de MS avec différents modèles de trajets multiples.	P61
Figure 3.45 : Delay de MS avec différents modèles de trajets multiples.	P61
Figure 3.46 : debit sur MS pour des distances de 70 m, 200 m, 1 km, et 1.5 km	P62
Figure 3.47 : débit sur le MS WLAN pendant que le MS s'éloigne du point d'accès.	P62
Figure 3.48 : 3 scénarios représente (1, 20 et 40 nœuds mobiles.)	P63
Figure 3.49 : le débit de MS	P64
Figure 3.50 : le débit global	P64
Figure 3.51 : Perte de données de (1MS 20MS 40MS)	P64
Figure 3.52 : Trafic reçu / Trafic envoyé de (1MS 20MS 40MS)	P64
Figure 3.53 : Retard de (1MS 20MS 40MS)	P65
Figure 3.54 : charge de (1MS 20MS 40MS)	P65
Figure 3.55 : Comparaison en debit de MS (WiMAX et WIFI) (les resultas séparé)	P66
Figure 3.56 : Comparaison en debit de MS(WiMAX et WIFI)	P66
Figure 3.57 : Comparaison en debit de BS et AP	P67
Figure 3.58 : Comparaison en charge global (WiMAX et WIFI)	P67
Figure 3.59 : Retard des statistiques globales de WiMAX et WiFi	P68
Figure 3.60 : Debit dans plusieurs MS _wimax	P69
Figure 3.61 : Debit dans plusieurs MS _wifi	P69



***List des tableaux***

Tableau 1.1 : <b>Technologie Wifi- IEEE 802.11</b>	P7
Tableau 2.1 : <b>Les différentes normes d'IEEE 802.16x</b>	P25
Tableau 2.2 : <b>la différence entre le Wi-Fi et le WIMAX</b>	P37
Tableau 3.1 : <b>Les modelés OPNET utilisés au WIMAX</b>	P41
Tableau 3.2 : <b>Les modelés OPNET utilisés au WIFI</b>	P41
Tableau 3.3 : <b>Paramètres de BS et MS WIMAX.</b>	P48
Tableau 3.4 : <b>Paramètres d'AP et MN wifi</b>	P49

## ***Introduction général***

Aujourd'hui, les systèmes de communication sans fil sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne et ils tendent à remplacer l'utilisation excessive des câbles.

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

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

Plusieurs kilomètres et est donc destiné principalement aux réseaux métropolitains. En effet, la portée prévue des ondes est d'environ 50 km. Néanmoins cette portée est théorique et la portée réelle devrait se situer plutôt aux alentours de 8 ou 30 km. Ce qui reste néanmoins suffisant pour proposer une connectivité à l'échelle d'une ville.

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

Ce mémoire se divise en trois chapitres est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons les différents types de réseaux sans fil ainsi qu'une classification de ces réseaux. Comme on ne peut comparer WIMAX avec le wifi sans parler de la description générale du standard IEEE 802.11, le deuxième parti dans ce chapitre donne un aperçu sur la technique wifi (WLAN).

Le second chapitre est destiné à la description générale du réseau sans fil WIMAX et son principe de fonctionnement, il établit un état de l'art des différentes normes WIMAX, est consacré à l'étude technique du standard IEEE 802.16 ainsi qu'à la description de différentes techniques de multiplexages.

Le troisième chapitre expose les résultats obtenus de dimensionnement orienté couverture et capacité du standard (IEEE 802.16, IEEE 802.11), ce chapitre fournit une comparaison et une analyse technique des solutions de rechange pour la mise en œuvre des services à large bande sans fil. Il fournit des différences techniques détaillées entre les réseaux sans fil 802.11 (Wi-Fi) et 802.16 (WIMAX). nous représentons la partie la plus importante puisqu'elle comprend les résultats de simulation sur les performances de réseau WIMAX.

L'objectif de notre travail est de modéliser et évaluer les performances de réseau WIMAX et compare avec le wifi on utilisant le simulateur OPNET Modeler qui est un outil de simulation à événements discrets qui permet de spécifier graphiquement des modèles. Il permet d'étudier les performances des systèmes existant sous des conditions variables.

Et nous avons finalisé notre mémoire par une conclusion générale qui présente une récapitulation de tous ce que nous avons traité dans ce mémoire.

**Chapitre 1 :**  
**Généralité sur les réseaux sans fi**

## 1. INTRODUCTION

En raison de leur facilité de déploiement et de leur coût relativement faible, les réseaux sans fil sont de plus en plus utilisés. Ce chapitre donne un aperçu sur les différents types des réseaux sans fil. Il définit aussi Les réseaux mobiles de type 802.xx spécialement 802.11 et 802.16 qui seront étudiés tout au long de ce le chapitre.

## 2. RESEAU SANS FIL

Un réseau sans fil (en anglais : Wireless network) est un réseau informatique ou numérisé [1], autrement dit c'est un ensemble d'appareils connectés entre eux et qui peuvent s'envoyer et recevoir des données sans qu'aucune connexion « filaire » physique reliant ces différents composants entre eux ne soit nécessaire [2].

### 2.1 Description

La norme la plus utilisée actuellement pour les réseaux sans fil est la norme IEEE 802.11, mieux connue sous le nom de Wi-Fi.

Le rayonnement géographique des ondes est relativement limité étant donné la faible puissance d'émission des solutions matérielles actuelles. Les réseaux sans fils constituent une alternative aux réseaux câblés. Leur compatibilité avec les réseaux câblés permet également de les y ajouter comme extensions [1].

Il existe principalement deux méthodes pour la transmission dans les réseaux sans fil :

- La transmission par les ondes infrarouges nécessite que les appareils soient en face l'un des autres et aucun obstacle ne sépare l'émetteur du récepteur. Cette technique est utilisée pour créer des petits réseaux de quelques dizaines de mètres. (Télécommande de : télévision, les jouets, voitures...).
- La transmission par les ondes radios est utilisée pour la création des réseaux sans fil qui a plusieurs kilos mètres. Les ondes radios ont l'avantage de ne pas être arrêtés par les obstacles car sont émises d'une manière omnidirectionnelle. Le problème de cette technique est les perturbations extérieurs qui peuvent affecter la communication à cause de l'utilisation de la même fréquence par exemple [2].

## 2.2 Cas d'utilisations

Ils seront également utilisés dans les cas suivants :

- Pour réaliser des réseaux temporaires, ou à mettre en place très rapidement (conférence, réunion).
- Pour permettre d'éviter de gros travaux de câblage dans des endroits où cela s'avère difficile ou même prohibé.
- Pour donner la possibilité de transmettre des données dans le cas d'applications mobiles (capteurs d'entreprises...) [1].

## 3. LES DIFFERENTS TYPE DE RESEAUX SANS FIL

Comme pour les réseaux filaires, on classe généralement les réseaux sans fil selon leur domaine de couverture : les réseaux personnels WPAN, les réseaux locaux WLAN, les réseaux métropolitains WMAN et les réseaux nationaux WWAN [3].

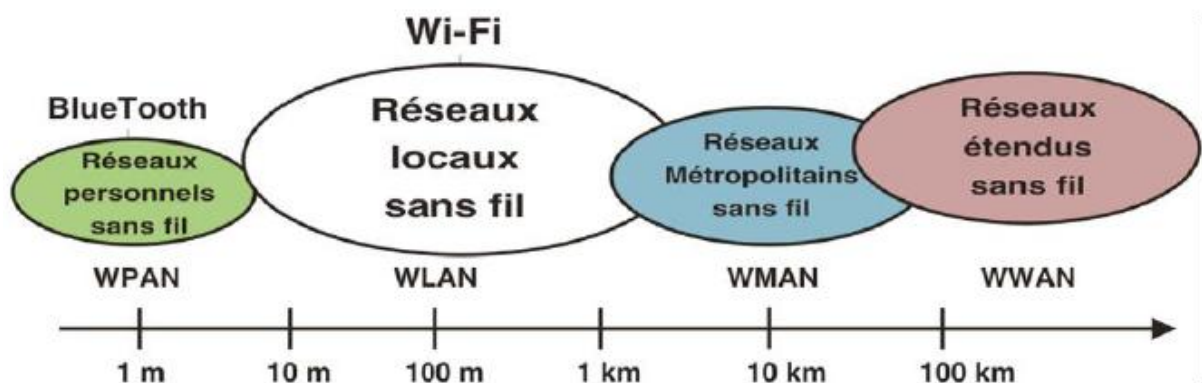


Figure 1.1 : Les différentes technologies sans fil [4]

### 3.1 Réseaux personnels sans fil

Les **WPAN** sont des réseaux sans fil de faible portée (quelques dizaines de mètres) à usage personnel. Ils sont déjà présents sous différents noms [3] :

#### 3.1.1 Bluetooth :

Le plus utilisé des technologies WPAN, connu sous la norme 802.15.1 développé par Ericson en 1994 [5].



Figure 1.2 : Logo de Bluetooth

### 3.1.2 ZigBee :

Connu sous la norme IEEE 802.15.4 permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégré dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, jouets, ..) [6].



Figure 1.3 : Logo de Zig Bee

### 3.1.3 Les liaisons infrarouges :

Elles sont peu utilisé, permet de créer des petit réseaux .elles ne dépasse pas les obstacles alors il faut que les appareilles soient en face. L'utilisation principale de cette technologie dans la domotique (télécommande) [5].

## 3.2 Réseaux locaux sans fil (norme IEEE 802.11)

### 3.2.1 Présentation de WIFI (802.11)

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

IEEE 802.11 définit deux technologies, le mode infrastructure divisé en deux architectures :

- L'architecture BSS (Basic Service Set) : composée d'une seule cellule couverte par un seul point d'accès (AP) qui est l'intermédiaire permettant l'échange d'informations entre plusieurs stations.

- L'architecture ESS (Extended Service Set) : composée de plusieurs points d'accès connectés par un système de distribution, et formant un large réseau composé de plusieurs cellules.

Le deuxième mode défini par le WIFI est le mode Ad-Hoc qui permet l'échange direct des informations entre les stations sans obligation de passage par le point d'accès.

L'architecture du mode infrastructure est illustrée dans la figure ci-dessous [7]

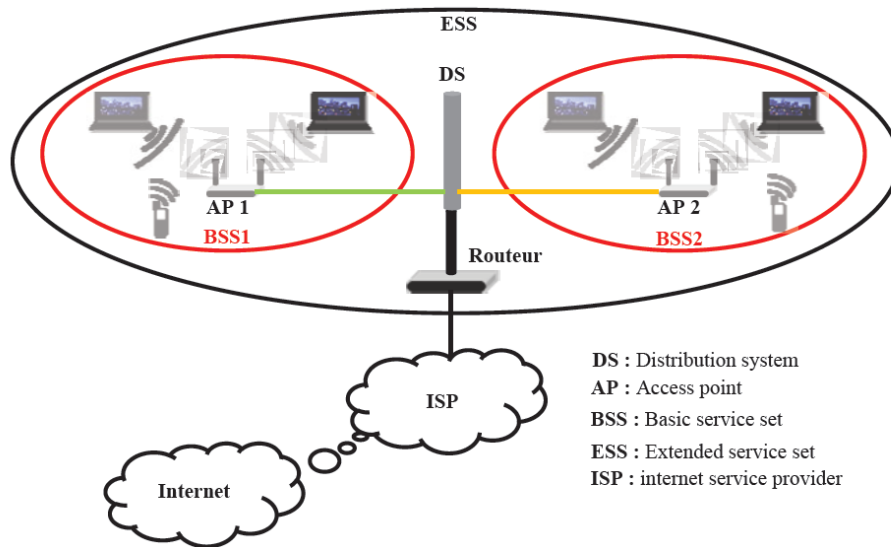


Figure 1.4 : Mode Infrastructure du WIFI. [7]

### 3.2.2 Les différentes normes WIFI

La norme IEEE 802.11 est en réalité la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mbps. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit (c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b et 802.11g, appelées normes 802.11 physiques) ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité. La logique aurait voulu un ordre alphabétique. 80211a pour le moins performant 80211 b, c. mais non. Voici un tableau présentant les différentes révisions de la norme 802.11 et leur signification : [8]

Norme	Bande de fréquence	Débit théorique	Portée
IEEE 802.11a	5 GHz (5,7 à 5,8 GHz en Guinée)	54 Mbit/s	10 m
IEEE 802.11b	2,4 GHz (2,4 à 2,5 GHz en Guinée)	11 Mbit/s	300 m
IEEE 802.11g		54 Mbit/s	
IEEE 802.11n	2,4 GHz ou 5 GHz (2,4 à 5,8 GHz en Guinée)	300Mbit/s	100 m

Tableau 1.1 : Technologie Wifi- IEEE 802.11



### 3.2.3 Les équipements WIFI

Il existe différents types d'équipement pour la mise en place d'un réseau sans fil Wifi :

#### 3.2.3.1 Les adaptateurs sans fil ou cartes d'accès

En anglais *Wireless adapter* ou *network interface Controller*, noté NIC. Il s'agit d'une carte réseau à la norme 802.11 permettant à une machine de se connecter à un réseau sans fil. Les adaptateurs Wifi sont disponibles dans de nombreux formats (carte PCI, carte PCMCIA, adaptateur USB, carte compact flash, ...). On appelle station tout équipement possédant une telle carte. A noter que les composants Wi-Fi Deviennent des standards sur les portables (label Centrino d'Intel).



Figure 1.5 : cartes d'accès

#### 3.2.3.2 Les points d'accès

Notés AP pour *Access point*, parfois appelés bornes sans fil, permettant de donner un accès au réseau filaire (auquel il est raccordé) aux différentes stations avoisinantes équipées de cartes WiFi. Cette sorte de hub est l'élément nécessaire pour déployer un réseau centralisé en mode infrastructure. Certains modèles proposent des fonctions de modem ADSL et comprennent plus ou moins de fonctions comme un pare-feu [8]



Figure 1.6 : Les points d'accès

### 3.2.3.3 Les antennes

En pratique, chaque carte WIFI est équipée d'une antenne interne, qui ne peut être mobile que si la station elle-même est mobile. Si une station se trouve cachée par un obstacle tel que mur, meuble, personne, ....etc. ou qu'elle soit assez éloignée du point d'accès, il se peut qu'elle ne puisse accéder au réseau [4].

### 3.2.4 Classification des réseaux Wi-Fi

Les réseaux mobiles de type 802.11 peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure [3].

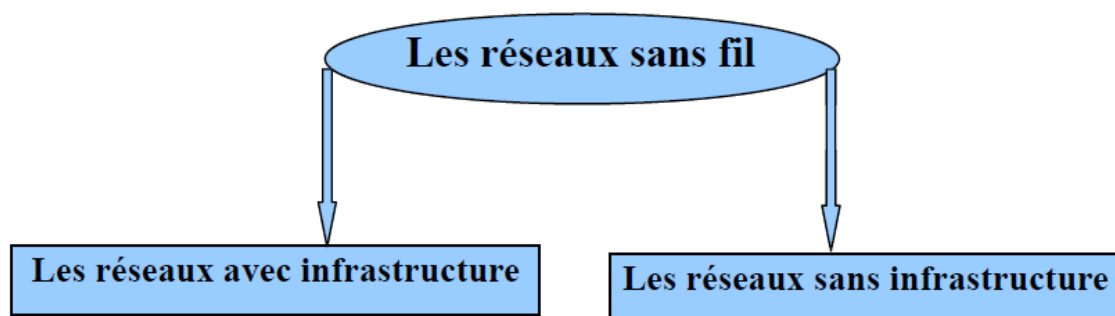


Figure 1.7 : La décomposition des réseaux sans fil

#### 3.2.4.1 Les réseaux sans infrastructure

Dans le mode de fonctionnement sans infrastructure appelé aussi mode Ad-hoc, un groupe de terminaux s'associe pour former un IBSS dont le rôle consiste à permettre aux stations de communiquer sans l'aide d'une quelconque infrastructure. Chaque station peut établir une communication avec n'importe quelle autre station dans l'IBSS sans être obligée de passer par un point d'accès. Les réseaux ad hoc font partie des réseaux fonctionnant en mode sans infrastructure. De tels réseaux ont pour particularité de s'auto créer, s'auto organiser et s'auto administrer : il s'agit de réseaux autonomes et très dynamiques.

#### 3.2.4.2 Les réseaux avec infrastructure

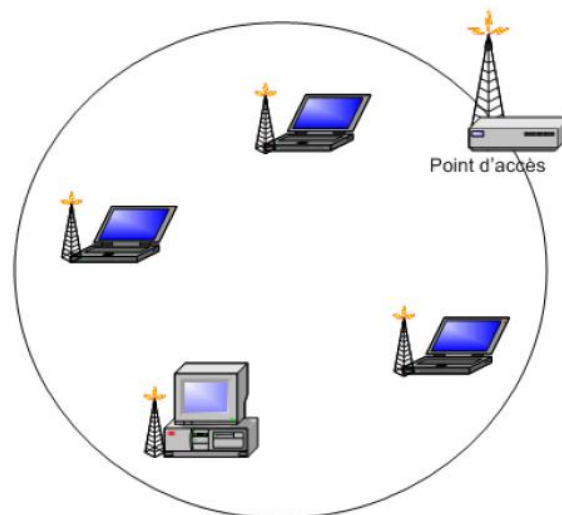
Le mode infrastructure est défini pour fournir aux différentes stations des services spécifiques sur une zone de couverture déterminée par la taille du réseau. Les réseaux d'infrastructure sont établis en utilisant des points d'accès, ou AP (Access Point), qui jouent le rôle de station de base pour une cellule de base, appelée BSS (Basic Set Service).

Un point d'accès sur un réseau sans fil équivaut à un concentrateur (hub) sur un réseau filaire. Chaque terminal sans fil reçoit donc tout le trafic circulant sur le réseau.

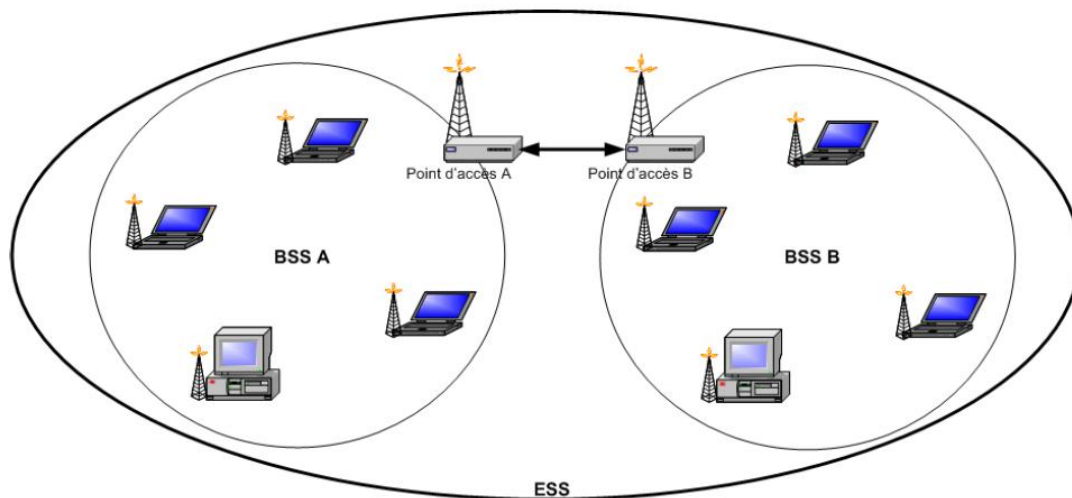
Lorsque le réseau est composé de plusieurs BSS, chacun d'eux est relié à un système de distribution, ou DS (Distribution System), par l'intermédiaire de leur point d'accès (AP) respectif. Un groupe de BSS interconnectés par un système de distribution forme un ESS. Le système de distribution est responsable du transfert des paquets entre différents BSS d'un même ESS.

Les points d'accès peuvent être reliés entre eux par des liaisons radio ou filaires et un terminal peut alors passer d'un point d'accès à un autre en restant sur le même réseau.

Dans le cas où les points d'accès sont des routeurs radio (reliés par des liaisons radio), le réseau est appelé un réseau maillé (mesh network) [3].



**Figure 1.8** : réseau local sans fil de base avec point d'accès



**Figure 1.9** : réseau sans fil étendu [6]

### 3.2.5 Les avantage et l'incontinent

#### 3.2.5.1 Avantages du Wi-Fi

**Mobilité** : La connexion au réseau sans fil permet de se déplacer librement dans le rayon disponible. On peut ainsi emmener son laptop de la salle de réunion à l'atelier sans avoir à brancher/débrancher quoi que ce soit.

**Facilité** : Un réseau WIFI bien configuré permet de se connecter très facilement, à condition, bien sûr, de posséder une autorisation. Il suffit généralement de se trouver dans la zone de couverture pour être connecté.

**Souplesse** : La souplesse d'installation du WIFI permet d'adapter facilement la zone d'action en fonction des besoins. Si le point d'accès est trop faible, on ajoute des répéteurs pour étendre la couverture.

**Coût** : La plupart des éléments du réseau WIFI (point d'accès, répéteurs, antennes...) peuvent être simplement posés. L'installation peut donc parfois se faire sans le moindre outillage, ce qui réduit les coûts de main-d'œuvre. Le budget de fonctionnement est similaire à un réseau filaire.

**Evolutivité** : La facilité d'extension ou de restriction du réseau permet d'avoir toujours une couverture WIFI correspondant aux besoins réels.

#### 3.2.5.2 Inconvénients du wifi

**Qualité et continuité du signal** : Un réseau Wifi bien installé et bien configuré est généralement fiable et d'une qualité constante. Cependant, il suffit parfois de peu pour perturber le signal : un radar de gendarmerie ou un émetteur Bluetooth, par exemple.

**Sécurité** : Le Wifi étant un réseau sans fil, il est possible de s'y connecter sans intervention matérielle. Cela veut dire qu'il faut particulièrement étudier la sécurisation du réseau si l'on veut éviter la présence d'indésirables ou la fuite d'informations [9].

### 3.3 Réseaux métropolitains sans fil (norme IEEE 802.16)

La B.L.R. (Boucle Locale Radio) fait partie des réseaux sans fil de type WMAN. La BLR est une technologie sans fil capable de relier les opérateurs de télécommunication à leurs clients grâce aux ondes radio sur des distances de plusieurs kilomètres. Les réseaux sans fil de type WMAN sont en train de se développer. Ce phénomène risque de s'amplifier dans les années à venir. La norme IEEE 802.16, est plus connue sous son nom commercial WIMAX.

Techniquement, le WIMAX permet des débits de l'ordre de 70Mbps avec une portée de l'ordre de 50km. Actuellement, le WIMAX peut exploiter les bandes de fréquence 2.4Ghz, 3.5Ghz et 5.8Ghz. Aujourd'hui, en France, la bande de fréquence 2.4Ghz est libre, la bande de fréquence 5.8Ghz est interdite en utilisation extérieure et la bande des 3.5Ghz est licenciée à un unique opérateur.

### 3.4 Réseaux étendus sans fil

Le réseau étendu sans fil est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes :

- **GSM** (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile)
- **GPRS** (General Packet Radio Service)
- **UMTS** (Universal Mobile Telecommunication System)... etc [3].

## 4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES RESEAUX SANS FIL

La majorité des réseaux sans fil disposent des mêmes avantages, à savoir la mobilité, une facilité et une rapidité d'installation et d'utilisation.

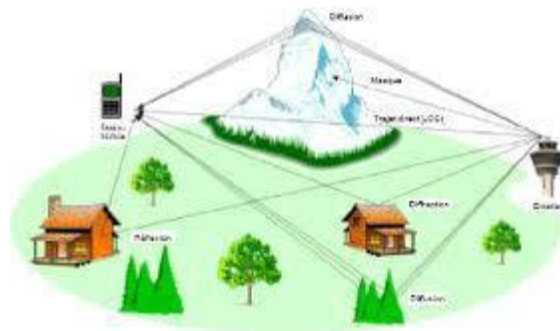
- **Mobilité** : c'est évidemment le principal avantage qu'offre un WLAN, contrairement au réseau fixe, un utilisateur peut accéder à des informations partagées ou se connecter à Internet sans avoir à être relié physiquement au réseau.
- **Simplicité d'installation** : l'installation d'un WLAN est relativement simple et rapide, comparée à celle d'un réseau local, puisqu'on élimine le besoin de tirer des câbles dans les murs et les plafonds. De ce fait, les WLAN peuvent être installés là où les câbles ne peuvent être déployés facilement, par exemple pour couvrir un événement limité dans le temps, comme un salon, une conférence ou une compétition sportive.
- **Topologie** : la topologie d'un WLAN est particulièrement flexible, puisqu'elle peut être modifiée rapidement. Cette topologie n'est pas statique, comme dans les réseaux locaux filaires, mais dynamique. Elle s'édifie dans le temps en fonction du nombre d'utilisateurs qui se connectent et se déconnectent.
- **Coût** : l'investissement matériel initial est certes plus élevé que pour un réseau filaire mais, à moyen terme, ces coûts se réduiront. Par ailleurs, les coûts d'installation et de maintenance sont presque nuls, puisqu'il n'y a pas de câbles à poser et que les modifications de la topologie du réseau n'entraînent pas de dépenses supplémentaires.

- **Inter connectivité avec les réseaux locaux** : les WLAN sont compatibles avec les LAN existants, comme c'est le cas des réseaux WIFI et Ethernet, par exemple, qui peuvent coexister dans un même environnement
- **Fiabilité** : les transmissions sans fil ont prouvé leur efficacité dans les domaines aussi bien civils que militaires. Bien que les interférences liées aux ondes radio puissent dégrader les performances d'un WLAN, elles restent assez rares. Une bonne conception du WLAN ainsi qu'une distance limitée entre les différents équipements radio (station set ou points d'accès), permettent au signal radio d'être transmis correctement et autorisent des performances similaires à celles d'un réseau local. Etant donné que la norme 802.11 est l'objet de notre étude, dans la suite du document on va étudier et présenter les différentes normes.

Comme rien n'est jamais parfait, ce type de réseau présente également quelque inconvénient

#### Inconvénient :

- Problèmes liés aux ondes radio (taux d'erreur plus important) :
  - Interférences (provenant d'autres réseaux) ;
  - Effets multi-trajets comme il est indiqué dans la Figure 1.10



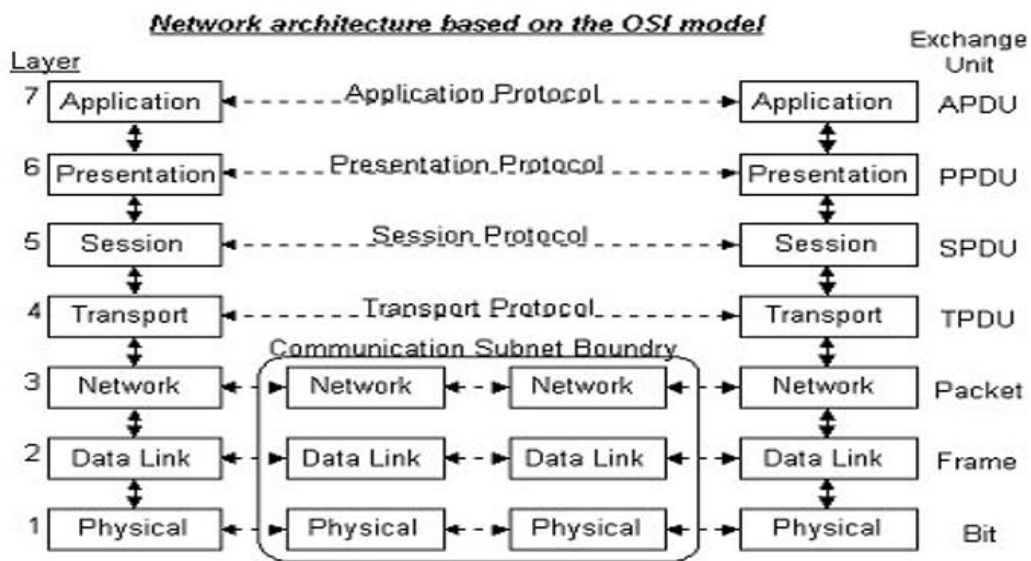
**Figure 1.10** : Effets multi-trajets des ondes radio.

- La réglementation ;
- Effets sur la santé ;
- La sécurité ;
- Typiquement très peu de bande passante (comparer aux réseaux filaires) ;
- Plusieurs solutions propriétaires (la normalisation prend du temps = consensus)
- Les produits doivent se conformer aux restrictions nationales : difficile d'avoir une solution globale [11]

## 5 MODELE OSI ET MODELE TCP/IP

### 5.1 Le modèle OSI

Le modèle OSI est basé sur une proposition de l'International Standards Organization (ISO) dans le but de standardiser les protocoles utilisés dans les différents niveaux. Le modèle a été révisé en 1995 et s'appelle désormais l'ISO OSI. OSI signifie Open Systems Interconnection car il fonctionne avec les systèmes ouverts.



**Figure 1.11** : Le modèle OSI

Le modèle OSI n'est pas une architecture réseau car on ne spécifie pas exactement les services et les protocoles utilisés dans les différentes couches. Seule une définition générale des niveaux est donnée. De plus on parle bien de couches d'abstraction, il ne faut pas prendre au pied de la lettre les noms des couches. Ces noms ne sont pas représentatifs des processus implémentés dans les différentes couches !

**5.1.1 Les différentes couches** : Les couches 1 à 3 sont des couches chaînées. Les couches 4 à 7 sont des couches end-to-end.

- 1. La couche Physique (Physical)** : La couche physique (L1) ne transmet que des bits. Elle a été conçue pour interagir directement avec la partie électrique/mécanique et le moyen de

transmission physique (physical transmission medium) qui est présent directement en-dessous de la couche Physique.

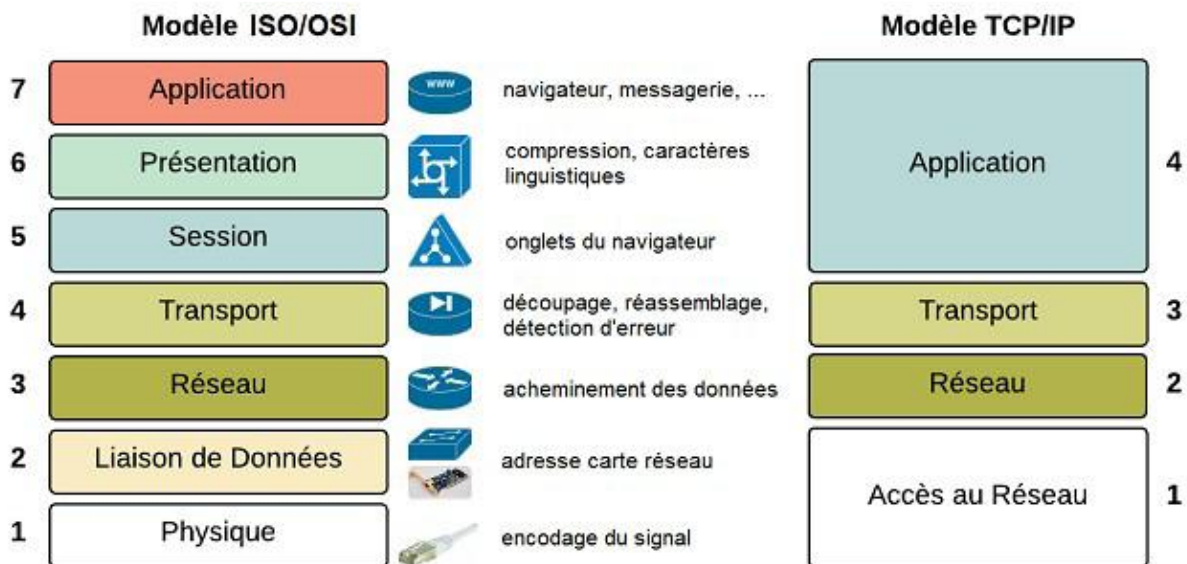
2. **La couche liaison de Données (Data link)** : La couche de liaison de données (L2) transforme une transmission brute en une ligne sans erreurs de transmission jusqu'à la couche réseau (L3). Pour cela les données brutes sont découpées en trames (Frames en anglais) comprises entre 100 et 1000 octets. Puis elles sont envoyées de manière séquentielles.
3. **La couche Réseau (Network)** : La couche réseau est en charge des opérations du sous-réseau. C'est ici que va se dérouler le routage des paquets (packets) : quelles routes vont emprunter les paquets pour aller de la source à la destination et surtout par quel chemin. C'est également dans cette couche que la Qualité de Service (QoS) est gérée.
4. **La couche Transport (Transport)** : Le but principal de la couche de transport est de prendre en charge les données qui viennent des couches supérieures, de les découper en plus petits morceaux puis de les faire transiter jusqu'à la couche réseau (L3). La couche de transport détermine également le type de services qu'il faudra pour la couche Session. Le type de transport de connexion le plus classique est l'envoi des messages ou des octets dans le sens d'envoi. La couche de transport de la source, à la différence des couches inférieures, communique directement avec la couche de transport de la machine de destination. Dans les couches inférieures (1 à 3), des protocoles font la liaison entre les machines et leurs voisins immédiats.
5. **La couche Session (Session)** : La principale fonction de cette couche est de permettre d'établir des sessions entre les utilisateurs de machines différentes. C'est dans ce niveau que les tokens sont gérés ainsi que la synchronisation. En effet la synchronisation permet de reprendre où la session s'était arrêtée en cas de crash...
6. **La couche Présentation (Presentation)** : A la différence des autres niveaux, la couche de présentation ne touche qu'à la sémantique et la syntaxe des informations transmises. Ce ne sont plus des bits qui sont manipulés. Ce sont avant tout des représentations de données qui sont communiqués.
7. **La couche Application (Application)** : C'est dans cette couche que vous retrouverez la plupart des protocoles utilisés par les utilisateurs. On peut citer notamment le protocole HTTP lors de l'accès à une page web, le protocole SMTP pour les mails, le FTP pour le transfert de fichiers...



## 5.2 Le modèle TCP/IP

Le modèle TCP/IP est dérivé de l'ARPANET et deviendra plus tard connu sous le nom de worldwide internet. Il en découle un réseau basé sur le routage de paquets à travers une couche appelée Internet. La connexion de cette couche est de type connectionless (sans connexion préalable) : tous les paquets transitent indépendamment les uns des autres et sont routés suivant leur contenu. Le modèle TCP/IP est donc le modèle utilisé pour Internet. Le nom de modèle TCP/IP est étroitement lié à deux protocoles : le protocole TCP (Transmission Control Protocol) et le protocole IP (Internet Protocol). Ceci est en partie dû au fait que sont les deux protocoles les plus utilisés pour Internet.

Voici une figure qui illustre la différence entre le modèle TCP/IP et le modèle OSI :



**Figure 1.12** : la différence entre le modèle TCP/IP et le modèle OSI

Différences flagrantes : 4 couches pour le modèle TCP/IP et fusion des couches Présentation et Session en une grosse couche Application.

1. **La couche Host-to-Network** : Couche assez sombre, le modèle TCP/IP en dit peu sur cette couche excepté que l'hôte doit se connecter au réseau depuis certains protocoles de sorte à pouvoir envoyer des paquets IP à travers le réseau.
2. **La couche Internet** : Le but de cette couche est de permettre d'injecter des paquets dans n'importe quel réseau et de faire en sorte qu'ils arrivent à destination. Tous les paquets ne

prendront pas le même chemin pour arriver à bon port, mais ceci n'est pas un problème. S'ils arrivent dans le désordre, un protocole, placé dans une couche supérieur, se chargera de les ordonner. C'est dans la couche internet qu'est défini le format officiel des paquets et son protocole : le protocole IP pour Internet Protocol. La fonction de la couche internet est de délivrer les paquets IP au bon endroit. Vous l'aurez compris, le routage des paquets est ici très critique et on souhaite éviter une éventuelle congestion. On peut faire l'analogie avec la couche network du modèle OSI.

3. **La couche Transport** : Tout comme pour le modèle OSI, la couche de transport permet aux hôtes source et destination de faire une conversation. C'est dans cette couche-ci que sont définis deux protocoles end-to-end pour le transport :

- **TCP** (Transmission Control Protocol), protocole fiable qui nécessite une connexion entre la source et la destination. Le protocole permet de délivrer un flux d'octets, le tout sans erreurs. Le flux d'octets est d'abord découpé en messages, puis les passe les uns après les autres à la couche Internet. Le destinataire réassemble ensuite les messages reçus. Le protocole TCP dispose également de mécanismes de contrôle pour éviter qu'un émetteur trop rapide n'inonde un receveur trop lent.
- **UDP** (User Datagram Protocol), protocole non-fiable qui ne nécessite pas de connexion préalable (sans négociation). Ce protocole ne dispose pas de mécanisme de contrôle de flux. Ce protocole est surtout utilisé dans une architecture de clients-serveur voir de requête-réponse, pour la VOIP, les jeux en ligne, les appels vidéos. En effet on peut envoyer des plus grosses quantités de données d'un seul coup par rapport au TCP et on part du principe, lors de l'usage de l'UDP, que si on perd quelques paquets ce n'est pas trop grave. On préfère par exemple avoir une conversation téléphonique hachurée qu'avec du délai.

4. **La couche Application** : Le modèle TCP/IP n'a pas besoin des couches Session ni Présentation. La couche application contient des protocoles haut-niveaux : FTP pour le transfert de fichiers, SMTP pour les mails, HTTP pour le WWW, DNS pour les noms de domaine... [12]

## **6. CONCLUSION**

En conclusion, Les réseaux sans fil en général, (le WIFI et le WIMAX) en particulier sont des technologies intéressantes et très utilisées dans de divers domaines comme l'industrie, la santé et le domaine militaire. Cette diversification d'utilisation revient aux différents avantages qu'apportent ces technologies, comme la mobilité, la simplicité d'installation (absence de câblage) c'est-à-dire dans un réseau sans fil les stations ne sont plus reliées entre elles physiquement par un câble mais par l'intermédiaire d'un support sans fil, La disponibilité (aussi bien commerciale que dans les expériences). Et finalement les réseaux sans fil ne visent toutefois pas à remplacer les réseaux filaires mais plutôt à leur apporter les nombreux avantages découlant d'un nouveau service : la mobilité de l'utilisateur.

**Chapitre 2**  
**Généralité sur les réseaux WIMAX**

## 1. INTRODUCTION

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

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

## 2. L'HISTORIQUE DU WIMAX

### 2.1 Origines du WIMAX

A l'origine un réseau mondial de consultation de données, Internet est aujourd'hui un réseau de télécommunication, permettant la transmission des données et la téléphonie. Il offre de multiples applications multimédia aux utilisateurs, tels que le téléchargement des vidéos et de la musique, l'envoi et la réception du courrier électronique, l'écoute d'une station radio...

De ce fait Internet est un outil de travail incontournable dans la mesure où il intéresse le grand public, les entreprises, les universités, les organismes internationaux et autres. Bien qu'Internet offre des multiples services, pour en bénéficier il faut pouvoir y accéder. Plusieurs technologies en permettent l'accès. A savoir : le Satellite, les réseaux câblés, les réseaux mobiles et les réseaux sans fils [13].

Le réseau WIMAX a été, à l'origine, créé par les sociétés Intel et Alvarion en 2002, poussé par un consortium d'une cinquantaine de membres, dont Intel, Nokia, Fujitsu Microelectronics et China Motion Telecom et ratifié sous le nom de IEEE 802.16.

La norme 802.16 a connu de nombreuses évolutions au fur et à mesure qu'elle gagne en popularité. Destinées originellement à desservir les zones les plus éloignées en haut débit en tant que réseau d'accès, cette norme s'oriente de plus en plus vers la mobilité notamment dans la version 802.16 e. Le WiMAX est principalement fondé sur une topologie en étoile bien que la topologie maillée soit possible. La communication peut être réalisée en ligne de vue (LOS : Line

Of Sight) ou non (NLOS). La dernière mouture du standard qui nous intéresse ici est le standard IEEE 802.16 2005 qui couvre les terminaux mobiles et définit des mécanismes évolués de gestion des handovers [14].

Basé sur le standard IEEE 802.16, le WiMAX est une technologie de transmission haute débit par ondes radio. Contrairement au Wi-Fi destiné à l'origine à la mise en place de réseaux locaux, le WiMAX est conçu dès le départ pour la couverture des surfaces importantes [13].

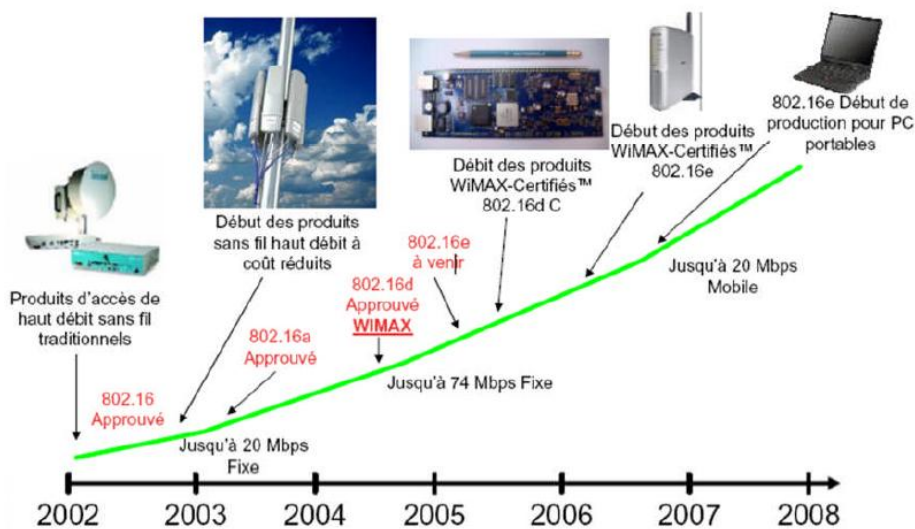


Figure 2.1 : Historique du WIMAX.

## 2.2 Apport de WIMAX

L'objectif du WIMAX est de fournir une connexion Internet à haut débit sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres de rayon. Le standard WIMAX possède l'avantage de permettre une connexion sans fil entre une station de base et des milliers d'abonnés sans nécessiter de ligne visuelle directe LOS ou NLOS. Dans la réalité le WIMAX ne permet de franchir que de petits obstacles tels que des arbres ou une maison mais ne peut en aucun cas traverser les collines ou les immeubles. Le débit réel lors de la présence d'obstacles ne pourra ainsi excéder 20 Mbit/s.

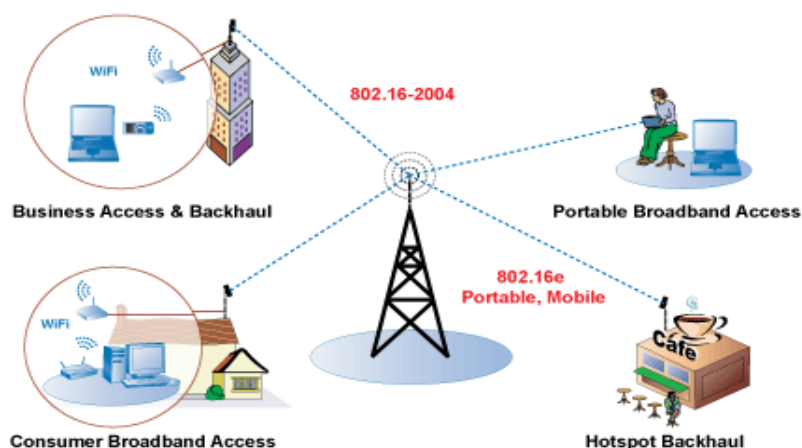
Les premiers déploiements en WIMAX devraient permettre à des zones isolées, mal desservies par le DSL ou le câble ou souhaitant tirer profit d'une connexion sans fil, de disposer d'un accès Internet large bande. Le développement du WIMAX pourrait donc jouer un rôle important dans l'aménagement numérique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

Le débit et la portée présentent les atouts du WiMax. Il fonctionne à 70 Mbit/s maximum théoriquement dans des conditions extrêmement favorables, 12 Mbits/s pratiquement et peut couvrir des zones de rayon allant jusqu'à 50 Km [15].

### 2.3 Les Types du WIMAX

Le WIMAX se présente sous deux types :

- ✚ **Fixe** : remplacer l'ADSL dans les zones rurales.
- ✚ **Mobile** : permet d'avoir un modem ADSL dans sa poche et d'être toujours connecté.



**Figure 2.2** : Exemple d'un réseau WIMAX avec les deux variantes fixe et mobile [15].

#### 2.3.1 WIMAX FIXE-IEEE 802.16-2004

Le standard IEEE 802.16-2004 est prévu pour un usage fixe, c'est-à-dire un usage via une antenne fixée sur le toit par exemple, semblable aux antennes TV. Le WIMAX opère dans les bandes de fréquence 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire, ainsi que la bande libre des 5.8 GHz. Le débit théorique est de 75 Mbits par seconde sur une portée de 10 km [15].

#### 2.3.2 WIMAX MOBILE-802.16e-2005

En anglais Wimaxtable, c'est le standard IEEE 802.16e. Il prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau internet. On peut ainsi imaginer à terme la possibilité pour les téléphones mobiles de se connecter à ce réseau haut débit. Le débit théorique est plus faible que le

WIMAX fixe mais permettra néanmoins d'atteindre 30 Mbits par seconde sur une distance de plus de 3 km [16].

## 2.4 Architecture du WIMAX

L'architecture de la technologie WiMax se compose principalement de stations de base (*BS, Base Station*), et des stations mobiles (*SS, Subscriber Station*). La station de base joue le rôle d'une antenne centrale chargée de communiquer et de desservir les stations mobiles qui, à leur tour, servent les clients utilisant le WIFI ou l'ADSL. La figure (2.3) représente L'architecture générale d'un réseau d'accès à large bande :

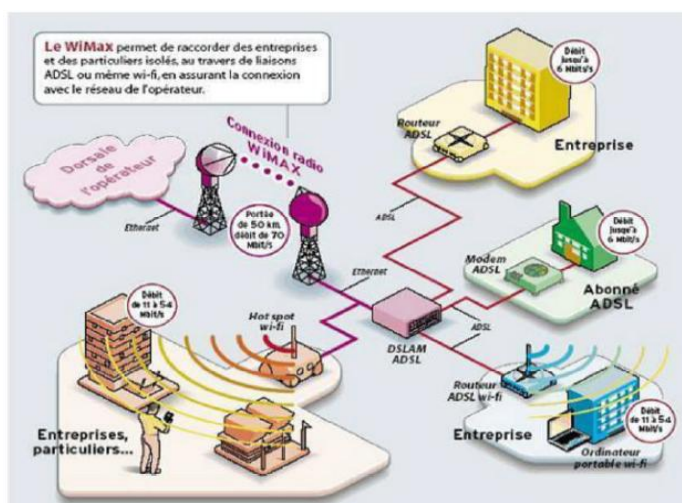


Figure 2.3 : Exemple d'un réseau WiMax

La Figure 2.3 illustre un exemple d'un réseau WiMAX avec ses deux variantes, à savoir fixe et mobile. Tel que le montre la figure 2.3, ce réseau se compose essentiellement d'une station de base, qui joue le rôle d'un noeud émetteur, et des stations réceptrices qui jouent le rôle des clients WiMAX. Nous allons ultérieurement présenter le principe de fonctionnement d'un tel type de réseau [17].

## 3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU WIMAX

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

Dans un système WIMAX, la station de base est connectée au réseau public en utilisant la fibre optique, le câble, la liaison à ondes radio, ou n'importe autre connexion point à point haute



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

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

Un signal émis par une station de base peut franchir de petits obstacles, tels que les maisons et les arbres. On parlera alors d'une communication NLOS (Non Line Of Sight). Une communication NLOS connaît une diminution en termes de débit, qui pourra atteindre les 20Mbits/s. En outre, les grands obstacles tels que les collines et les grands immeubles ne peuvent malheureusement pas être franchis par les signaux WiMAX. Les connexions LOS sont donc plus puissantes et plus stables que les connexions NLOS, qui connaissent un taux d'erreur plus élevé [18].

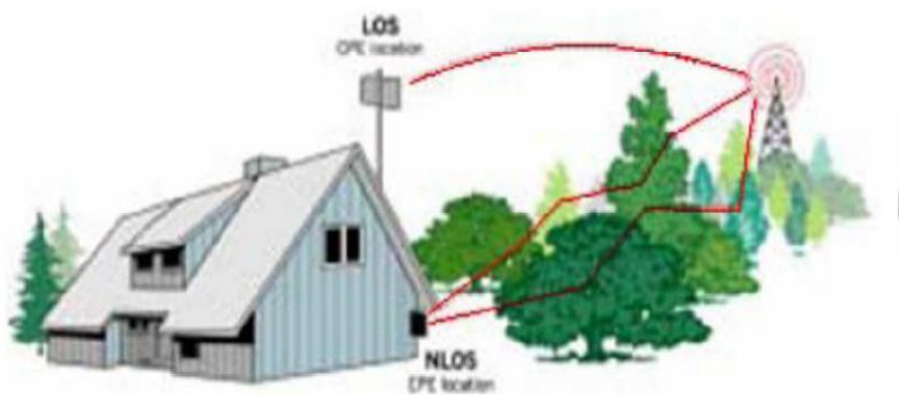


Figure 2.4 : LOS & NLOS

Une station de base (Base Transceiver Station : BTS) permet d'atteindre des milliers d'utilisateurs équipée par des antennes situées sur un toit d'un immeuble. Le WiMax a la possibilité de franchir de petits obstacles comme des collines ou des arbres. Différents moyens sont mis en oeuvre afin de pouvoir envoyer un signal :

- ❖ NLOS (Non-line-of-sight)
- ❖ LOS (Line-of-sight) [15].

#### 4. LES DIFFERENTES NORMES

Le WIMAX est une famille des normes, qui définit des connexions à haut débit par voie radio. Le développement des normes de 802.16 et leurs spécificités techniques sont expliqués dans le tableau 2.1, Le standard IEEE 802.16 e est la version la plus avancé et la plus intéressant. Cette version apporte la mobilité [19].

Standard	Description	Publié	Statut
IEEE std 802.16-2001	définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10 GHz (jusqu'à 66 GHz)	8 avril 2002	obsolètes
IEEE std 802.16c-2002	définit les options possibles pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.	15 janvier 2003	
IEEE std 802.16a-2003	amendement au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 GHz.	1 <sup>er</sup> avril 2003	
IEEE std 802.16-2004 (également désigné 802.16d)	il s'agit de l'actualisation (la révision) des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c.	1 <sup>er</sup> octobre 2004	obsolète/actifs
IEEE 802.16e (également désigné IEEE std 802.16e- 2005)	apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile du standard, jusqu'à 122 km/h.	7 décembre 2005	actifs
IEEE 802.16f	Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC (Media Access Control) et PHY (Physical)	22 janvier 2006	

**Tableau 2.1** Les différentes normes d'IEEE 802.16x.

## 5. APPLICATION DU WIMAX :

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

- Offres commerciales grand public *triple play* : données, voix, télévision ;
- Couvertures conventionnelles de zones commerciales (« hot zones ») : zones d'activité économique, parcs touristiques, centres hôteliers... ;
- Déploiements temporaires : chantiers, festivals, infrastructure de secours sur une catastrophe naturelle... ;
- Gestion de réseaux de transports intelligents ;
- Zone hospitalière étendue (lieu médicalisé) ;
- Sécurité maritime et sécurité civile ;
- Systèmes d'information géographique déportés ;
- Météorologie (télémessure, pilotage à distance, relevés géophysiques...). [20]

## 6. Particularités techniques

### 6.1 Etude technique de WIMAX

La figure 2.5 représente l'architecture en couches de la norme IEEE 802.16. Elle est constituée de deux couches : La couche physique (PHY) et la couche MAC.

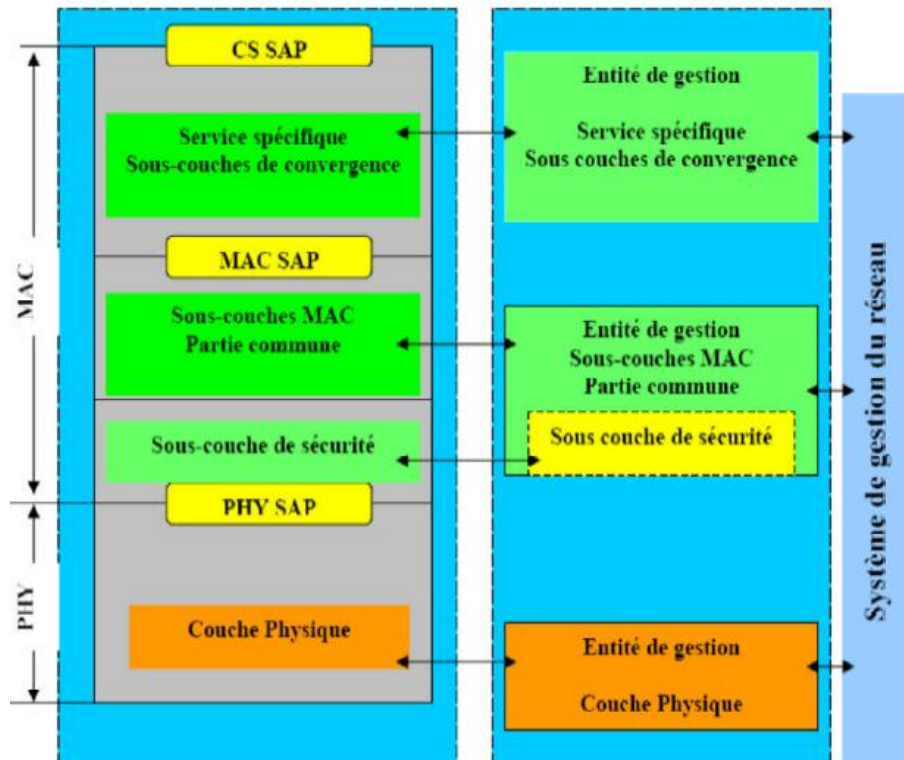


Figure 2.5 : Couches protocolaires d'IEEE 802.16 [21]

### 6.1.1 La couche MAC

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

- ❖ **La sous-couche SSCS** : La sous-couche de convergence spécifique (Service Specific Convergence Sublayer)
- ❖ **La sous-couche CPS** : La sous-couche commune (MAC Common Part Sublayer)
- ❖ **La sous-couche PS** : La sous-couche sécurité (Privacy Sublayer) [15].

### 6.1.2 La couche physique

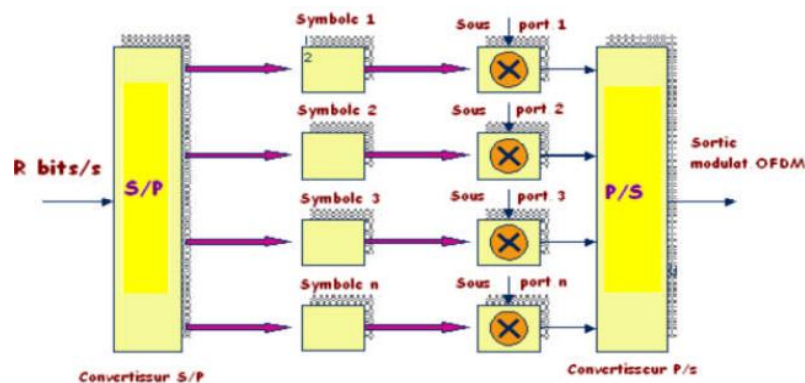
La couche physique pour la spécification 11-66 GHz se base sur une propagation « en ligne de vue » (LOS) c'est-à-dire les stations qui communiquent ensemble sont visible l'une de l'autre directement sans obstacles. Pour la spécification 2-11 GHz, la couche physique a été implémentée pour répondre au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

- ❖ **SC (Single Carrier)** : elle définit une transmission sur un seul canal de fréquence.
- ❖ **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** : cette interface utilise plusieurs bandes de fréquence qu'elle divise en plusieurs porteuses pour la transmission d'un signal. Chaque bande est utilisée à des fins différentes.
- ❖ **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** : similaire à l'OFDM, cette interface offre un plus grand nombre de porteuses du fait du multiplexage effectué sur la fréquence. Dans ce qui suit, nous allons aborder les différentes techniques de multiplexage et duplexage qui peuvent être mises en oeuvre au niveau de la couche physique de la norme 802.16 [15].

## 6.2 Les techniques de multiplexage

### 6.2.1 Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence

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



**Figure 2.6** : Le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence.

D'un point de vue implémentation numérique (figure 2.6), les systèmes OFDM transmettent les données par blocs. Le flux original de données de débit  $R$  est multiplexé en  $N$  flux parallèles de débit  $R/N$ . Il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises  $N$  canaux différents. Afin d'effectuer cette transmission, au lieu de transmettre les données en série comme le font les systèmes mono-porteuses (Single Carrier), la technique OFDM consiste à

transmettre les données par bloc, où un vecteur de N symboles de données est transporté par un seul symbole OFDM [22].

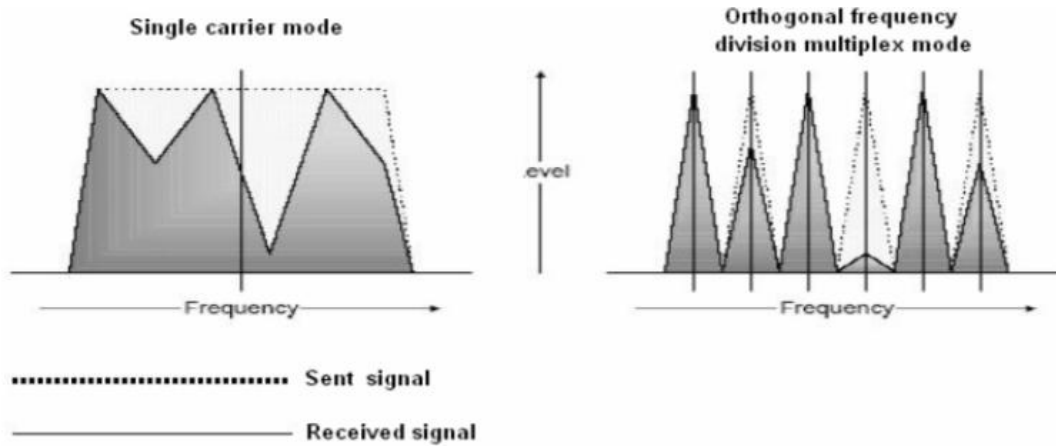


Figure 2.7 : Différence entre les signaux SC et OFDM reçus [24].

### 6.2.2 L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

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

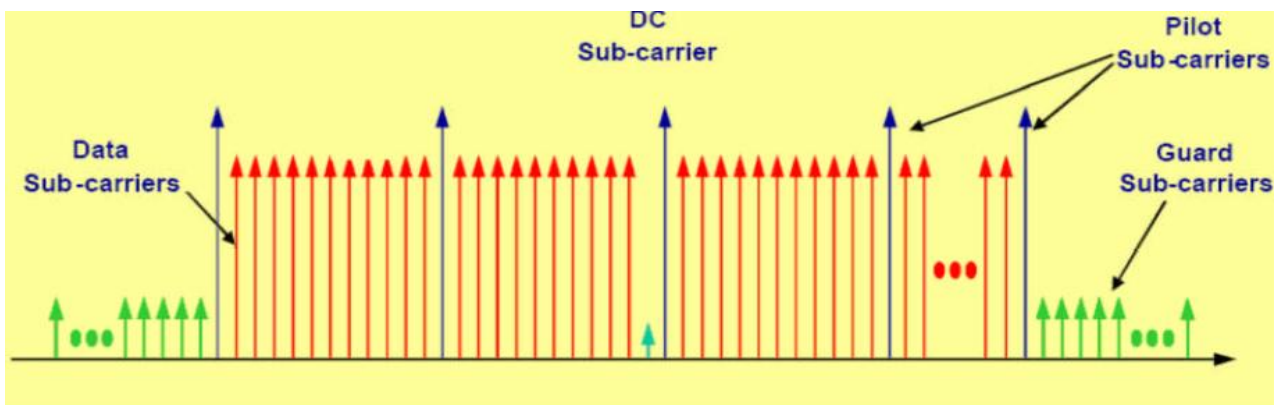


Figure 2.8 : Description fréquentielle de l'OFDMA.

Le symbole OFDMA est divisé en des sous canaux (*subchannels*), de supporter l'accès multiple, et pour une meilleure adaptation aux techniques avancées des antennes.

Pour le *downlink* on dispose de deux modes d'utilisation des subchannels :

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

Pour l'*uplink*, on fait la permutation premièrement (partition en des *subchannels*), ensuite on fait l'attribution des porteuses pilotes et des porteuses données dans chaque *subchannel*.

D'autres types de permutation peuvent être aussi utilisées, dont on peut citer l'AMC (Advanced Modulation and Coding) et le TUSC (Tile Usage of Subchannels).

Un slot dans l'OFDMA est la plus petite unité d'allocation des données possible. Pour qu'il soit bien défini, il exige les 2 dimensions : temps et *subchannels*.

La définition des slots OFDMA dépend de la structure du symbole OFDMA, qui varie pour l'*uplink* et le *downlink*, pour le FUSC et le PUSC, et pour les permutations des sous porteuses. Par exemple si on utilise le mode PUSC pour l'*uplink* avec une certaine permutation, le slot utilisé est égal à 1 *subchannel* x 3 symboles OFDM [15].

### 6.2.3 MIMO : Multiple Input Multiple Output

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

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

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

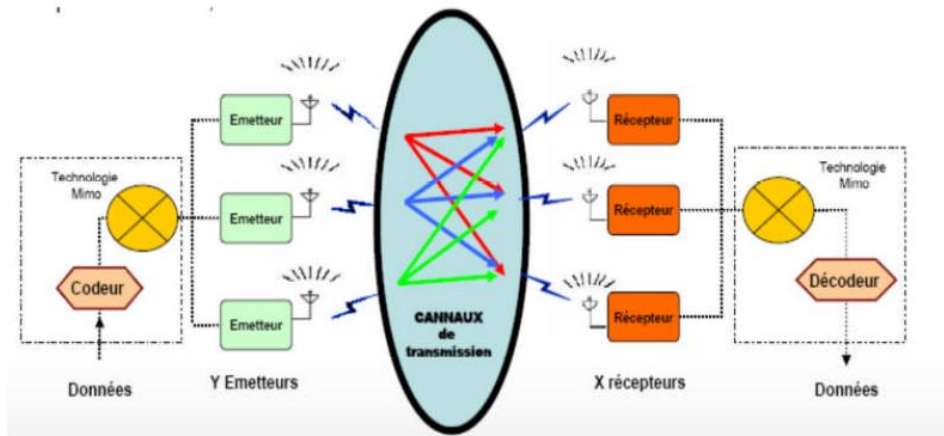


Figure 2.9 : Schéma simplifié d'un système MIMO

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

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

### 6.2.4 Modulation adaptative

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

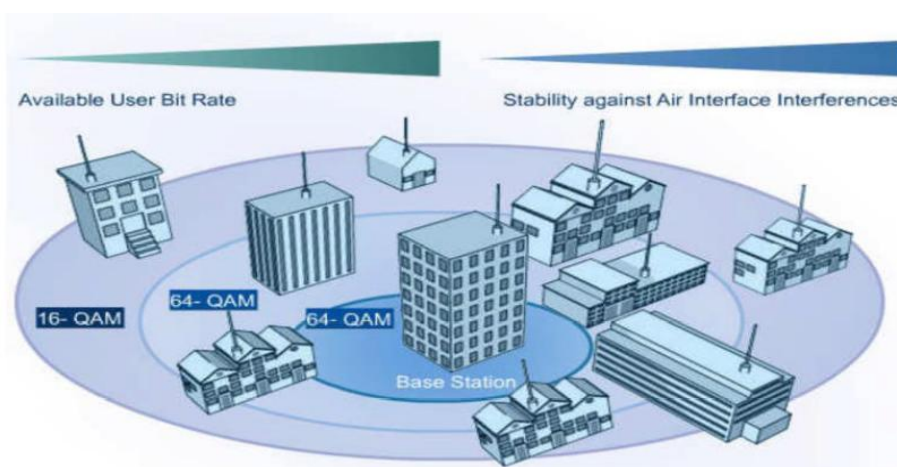


Figure 2.10 : Couche physique adaptative [15]



### 6.3 Techniques de Duplexage

Le duplexage est le processus utilisé pour créer des canaux bidirectionnels pour la transmission des données en uplink et downlink, sachant que le multiplexage utilisé est du type TDM (time division multiplexing). Le standard 802.16 2004 supporte 2 techniques de duplexage [25] :

#### 6.3.1- TDD (Time Division Duplexing)

Les transmissions downlink et uplink se font sur le même canal (même fréquence porteuse), mais à des périodes temporelles différentes.

La trame utilisée pour l'échange des données est d'une durée fixe et contient 2 sous trames, l'une est utilisée pour le downlink, et l'autre pour l'uplink. Elle est formée d'un nombre entier de PSs (Physical Slot : unité de temps, dépendant de la spécification PHY, utilisée pour l'allocation du canal), ce qui facilite la partition du canal. Un système TDD peut diviser le canal entre les 2 sens downlink et uplink d'une façon adaptative, selon la quantité du trafic échangé. Ce transfert asymétrique est approprié au trafic Internet où de grandes quantités de données peuvent être tirées à travers le downlink. La Figure 2.11 résume le principe de TDD.

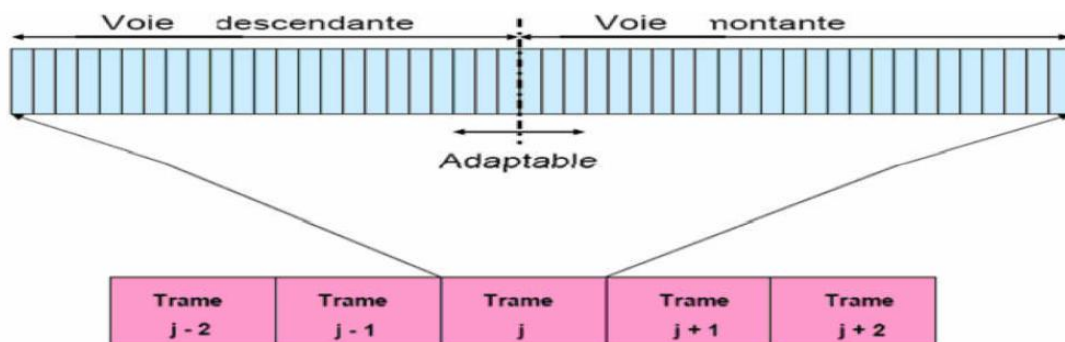


Figure 2.11 : Duplexage TDD, (figure extraite de la norme)

#### 6.3.2- FDD (Frequency Division Duplexing)

Dans FDD les canaux uplink et downlink sont localisés dans 2 bandes de fréquence différentes. Une durée fixe de trame est utilisée pour le downlink et l'uplink, ce qui facilite l'utilisation des différents types de modulation, et simplifie l'algorithme d'allocation des canaux. Deux types de duplexage FDD sont prévus dans 802.16-2004 [26] :

**a) FDD full-duplex :** une full-duplex SS (Subscriber Station) est capable d'écouter continuellement le canal downlink, ce qui lui permet de transmettre et de recevoir simultanément.

b) **FDD half-duplex** : une half-duplex SS peut écouter le canal downlink seulement lorsqu'elle ne transmet pas sur le canal uplink, donc elle n'est pas capable de transmettre et de recevoir simultanément. Une half-duplex SS est moins coûteuse, moins complexe qu'une full-duplex SS, mais elle n'a pas la même efficacité qu'une full-duplex SS. [15]

## 7. LE FORMAT DES TRAMES.

La trame se décompose en trois parties. La première partie correspond à l'en-tête de la trame donnant les informations principales sur le transfert des informations. Le payload correspond aux données transportées par la trame. Et enfin, le CRC. Celui-ci est facultatif, il permet au récepteur de la trame de vérifier l'intégrité de la trame.



Figure 2.12 : La trame Wimax

### 7.1 Les en-têtes de la trame WIMAX

Il existe deux types d'en-têtes aux trames WIMAX :

HT	EC	TYPE	RS	CI	EKS	RS	LEN	CID	HCS
1	1	6	V	1	2	V	11	16	8
			1			1			

HT	EC	TYPE	BR	CID	HCS
1	1	6	19	16	8

HT : Header Type = 1

EC : Encryption Control = 0

RSV : Reserved = 0 ou 1

CI : CRC indicator = 0 ou 1

EKS : EncryptionKeySequence

LEN : Length (en-tête+payload+CRC)

CID : Connection Identifier

HSC : Header Check Sequence

BR : Bandwith Request

Figure 2.13 : en-têtes Wimax

Comme on peut le voir plusieurs champs sont communs. HT nous donne le type d'en-tête, on peut ainsi définir la trame comme incrémentale ou agrégée. EC informe sur l'encryptions de la

trame, si le champ est nul alors la trame n'est pas encryptée. RSV définit une réservation. LEN donne la longueur du paquet en comprenant l'en-tête et le CRC s'il est présent. EKS est l'index de la clé d'encryptage.

## 7.2 Le payload

Le payload est la partie centrale de la trame ; celle-ci contient les données. Comme les en-têtes MAC, cette partie se décompose en sous-parties.

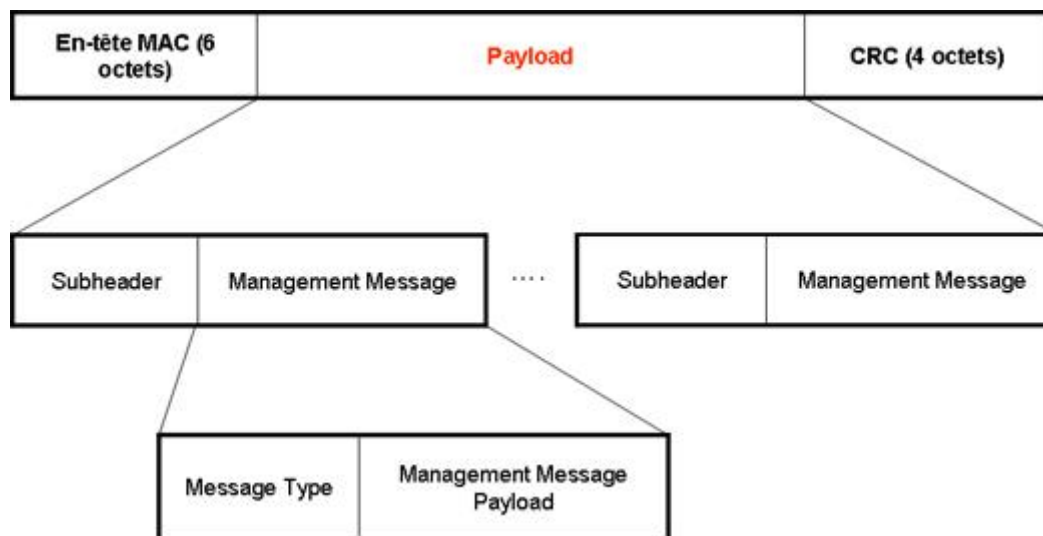


Figure 2.14 : Illustration du payload

Le payload est décomposé en différentes parties contenant chacune une sous en-tête et un message de gestion. Le message de gestion peut quant à lui encore être décomposé. En effet, il contient le type du message suivi du payload de celui-ci [21].

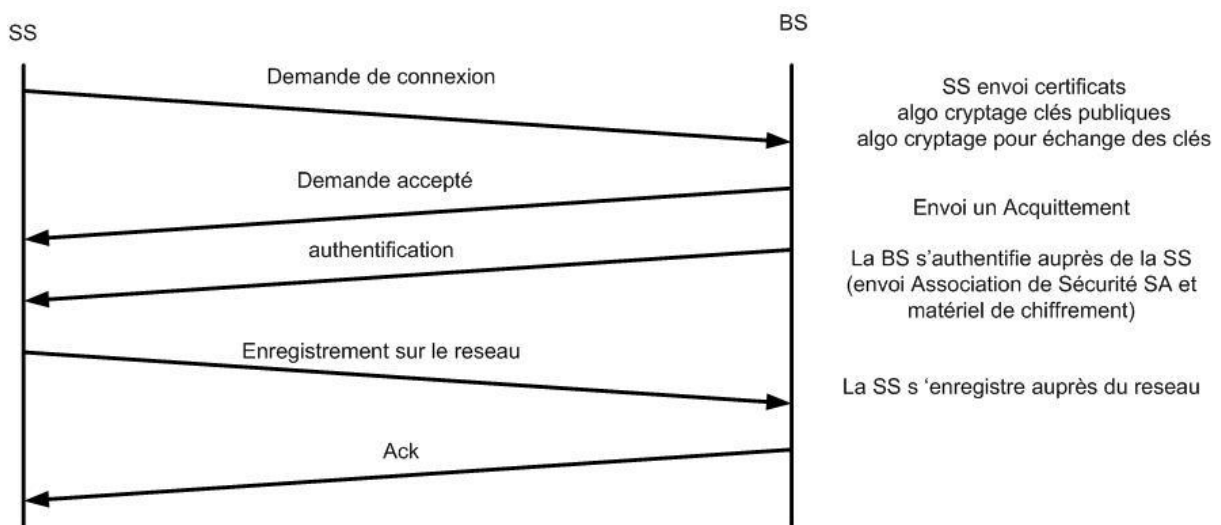
## 8. LA SECURITE

Le WIMAX est l'une des meilleures technologies sans fil au niveau de la sécurité par l'utilisation de plusieurs mécanismes :

- **Key Management Protocol** : Gère la sécurité au niveau de la couche MAC
- **Device/User Authentication** : Authentification de l'équipement /Utilisateur,
- **Traffic Encryption** : chiffrement pour protéger les données des utilisateurs à travers l'interface MAC,
- **Control Message Protection** : protège les données de contrôle,

- **Fast Handover Support** : permet de lutter contre les attaques de man-in-the-middle.

Dans un premier temps la station cliente (SS) envoie une demande de connexion en envoyant ses certificats ainsi que son matériel de cryptage. Si le client a les droits nécessaires, la BS autorise l'accès au réseau et envoie un acquittement crypté avec la clé publique du client. La BS s'authentifie alors devant le client en envoyant une association de sécurité et son matériel de chiffrement. Le client vérifie l'identité de la BS puis s'enregistre sur le réseau, il reçoit par la suite un acquittement crypté, la connexion est maintenant établie et sécurisée [27].



**Figure 2.15** : Etablissement de connexion WIMAX entre une BS et une station cliente

## 9. La qualité de service dans le WiMAX

Le WIMAX utilise des classes de services afin de permettre une QoS différente entre chaque communication.

Nous retrouvons notamment quatre classes de services :

- **Unsolicited Grant Services**: Cette classe de service est utilisée pour transmettre des flux temps réels. La transmission doit s'effectuer avec des trames de taille fixe à intervalle régulier.
- **Real-time Polling Services** : permet la transmission de flux temps réels de taille variable à intervalle régulier. Son utilisation convient très bien pour la transmission de vidéo MPEG.
- **Non-Real-time Polling Services** : permet la transmission de flux qui tolèrent des délais. De plus ces flux contiennent des trames de tailles variables. Seul le taux de transfert

minimum est garanti. Ce type de qualité de service convient très bien aux transferts de fichiers : FTP.

- **Best effort** : Ce service ne donne aucune garantie sur l'acheminement des flux de données. Il convient tout de même à certaines utilisations, par exemple la navigation sur internet.

Il existe quatre types de classes de services :

- La classe Unsolicited Grant Services (UGS). Cette classe est dédiée pour les flux en temps réel. Les trames sont de tailles fixes et émettent régulièrement.
- La classe Real-time Polling Services. Elle permet les flux temps réel. Les trames sont de tailles variables et l'émission peut être irrégulière. Cette classe convient, par exemple, à un flux vidéo.
- La classe Non-Real-time Polling Services. Le flux peut tolérer les délais, les tailles de paquets sont variables. La classe garantit juste un taux de transfert minimum. Cette classe convient bien aux protocoles de transfert de données comme par exemple FTP.
- Le Best Effort. Dans cette classe rien n'est garanti on envoie les données sans garantie de réception. Convient bien à la navigation Internet [21].

## 10. La différence entre le WIFI et le WIMAX

Ces deux technologies sont des normes de transmission de données par radiofréquences. Le WIMAX (norme 802.16) assure un haut débit sur de longues distances, tandis que le Wi-Fi (norme 802.11) est capable de relier sans fil plusieurs appareils proches. L'accès à Internet est la principale utilisation du WIMAX. Grâce à un débit de plusieurs mégabits par seconde sur une portée maximale d'une vingtaine de kilomètres, le WIMAX est plutôt adapté aux secteurs péri-urbains ou aux ruraux ne disposant pas d'une infrastructure téléphonique exploitable pour l'ADSL. Il a d'ailleurs été déployé dans plusieurs régions françaises, et deux opérateurs (Iliad/Free et Bolloré Telecom) proposent des offres commerciales. De son côté, théoriquement, le Wi-Fi sert à créer facilement des réseaux domestiques sans fil à haut débit.

Dans la pratique, il offre deux modes de mise en réseau. Le mode " ad hoc " sert effectivement à connecter entre eux différents matériels compatibles, tels qu'ordinateurs portables, imprimantes, consoles de jeux, smartphones. Le mode " infrastructure " permet, quant à lui, de se connecter à Internet via un point d'accès sans fil (comme une borne Wi-Fi ou un routeur).

Les fournisseurs d'accès à Internet ont installé, et continuent d'installer, des bornes Wi-Fi dans les lieux publics à forte concentration d'utilisateurs potentiels, tels que les gares, les aéroports, les hôtels, les cafés, les trains et même les avions [28].

	Wi-Fi	WIMAX
Services offerts	Wireless LAN	(Broad band Wireless Access) BWA
zone de couverture	20m à 50	50Km(LOS) et 1 à 7Km(NLOS).
bande passante :	2.4 GHz ISN soit 25 Mhz par canal.	2 GHz à 11 GHz. 11 GHz à 66 GHz,
Modulation	QPSK	BPSK,QPSK,16-64-256 QAM.
Protocole d'accès	CSMA/CA.	Request/Grant.
Mobilité	en cours de développement	WiMax mobile 802.16 <sup>e</sup>
duplex	Half	Full
un mécanisme de correction d'erreurs	-	FEC

**Tableau 2.2 :** la différence entre le Wi-Fi et le WiMAX

### 10.1 Les application du WIFI et WIMAX

Le WIFI et le WIMAX peuvent être intégrés et superposés. S'ils peuvent être intégrés, cela signifie que le WIMAX et le WIFI se soutiennent mutuellement. Les deux seront synergisés pour servir plus grand et beaucoup plus d'abonnés. Le WIMAX et le Wi-Fi peuvent offrir des économies de coûts potentiellement significatives pour les opérateurs de réseaux mobiles en fournissant un moyen alternatif pour acheminer le trafic BS du site cellulaire vers les contrôleurs BS.

Les opérateurs de réseaux mobiles utilisent généralement un type d'infrastructure filaire qu'ils doivent acheter auprès d'un opérateur historique. Un maillage WIFI ou WIMAX peut offrir une capacité de liaison beaucoup plus rentable pour les BS dans les environnements métropolitains. Grâce aux normes sans fil haut débit Wi-Fi et WIMAX et à l'informatique mobile, les gouvernements et partenaires peuvent déployer rapidement et à moindre coût des services haut débit vers des zones non desservies, sans perturber les infrastructures existantes (Chandra Shekar, et al. 2005- 2008).

Des réseaux WLAN conformes aux normes et des infrastructures maillées WIFI propriétaires sont installés rapidement et largement dans le monde entier. Les produits WIMAX

conformes aux normes peuvent fournir des solutions backhaul NLOS pour ces réseaux locaux et WIMAX [29].

## 11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le standard 802.16 du point de vue technique. En effet, ce standard qui est une technologie de communication numérique sans fil d'accès au réseau métropolitain présente de nombreux avantages tels que son accessibilité longue distance, son très haut débit, son faible coût et sa variété d'utilisation. Donc, nous avons présenté les couches protocolaires et les différentes techniques de multiplexage et de modulation de la norme IEEE 802.16. Le chapitre suivant traite la simulation des performances du WIMAX avec une compressant enter le WIMAX avec le WIFI.

**Chapitre 3 :**  
**Simulations des performances d'un**  
**réseau par OPNET**



## 1. INTRODUCTION

OPNET (Optimum Network Performance) est une famille des logiciels de modélisation et de simulation de réseaux s'adressant à différent public tel que les entreprises, les opérateurs et la recherche. OPNET est la version académique de cette famille il offre la possibilité de dessiner et d'étudier des réseaux de télécommunication. OPNET modeler se base sur le fait qu'OPNET est l'un des meilleurs logiciel de simulation de réseaux présent sur le marché.

L'environnement OPNET permet la modélisation et la simulation de réseaux de communication grâce à ses bibliothèques de modèles (routeurs, commutateurs, stations de travail, serveurs) et de protocoles (TCP/IP, FTP, FDDI, Ethernet, ATM ...). Le module Radio OPNET permet la simulation des réseaux de radiocommunication : hertzien, téléphonie cellulaire et satellitaire [14].

Le but de ce projet de fin d'étude est de réaliser une simulation du réseau WIMAX à l'aide du logiciel OPNET Modeler, et d'utiliser les principales interfaces et bibliothèques de modèles implantés dans OPNET (modèles standards, matériels, protocolaires et applicatifs).






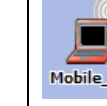



## 2. SIMULATION

### 2.1 Outil de simulation (OPNET modeler)

OPNET est un outil de simulation de réseau axé sur la recherche. C'est un outil logiciel très puissant qui simule le comportement réel des réseaux filaires et sans fil. La version 14.5 d'OPNET Modeler a été utilisée dans ce projet pour simuler des liaisons WLAN (Wi-Fi) et WIMAX. Le module sans fil OPNET et le modèle WLAN offrent une modélisation, une simulation et une analyse haute-fidélité des réseaux sans fil, y compris l'environnement RF, les interférences, les caractéristiques émetteur / récepteur, la pile de protocole complet, MAC, routage, protocoles et applications. En outre, la possibilité d'intégrer la mobilité des nœuds et l'interconnexion avec les réseaux filaire offrent une modélisation d'environnement riche et réaliste. [15]







**2.2 Modèles utilisés**

Les modèles OPNET utilisés dans le premier projet (WIMAX) sont répertoriés dans le tableau 3.1

Mobility Config	Application Config	Profile Config	WiMAX Config	WiMAX Base Station	Mobile Station	Server	Router	subnet
								

**Tableau 3.1 :** Les modelés OPNET utilisés au WIMAX

Les modèles OPNET utilisés dans le premier projet (WIFI) sont répertoriés dans le tableau 3.2

Application Config	Profile Config	Point d'accès	Mobile Station	Server	switch
					

**Tableau 3.2 :** Les modelés OPNET utilisés au WIFI

**2.3 Éditeur de projet (Project Editor)**

C'est l'interface principale du logiciel. Elle permet d'implanter des modèles issus des bibliothèques OPNET ainsi que des modèles créés par l'utilisateur. C'est aussi à partir du Project Editor que les simulations peuvent être configurées puis lancées et que les résultats issus de ces simulations peuvent être affichés. Les principales fonctions de cette interface sont disponibles sous formes d'icônes [14].



**Figure 3.1 :** Project editor

- 1 – Ouvrir la palette d'objet
- 2 – Echouer les objets sélectionnés
- 3 – Récupérer les objets sélectionnés
- 4 – Retour au réseau supérieur
- 5 / 6 – Zoom + / -
- 7 – Lancer la simulation
- 8 – Visualiser les graphiques et statistiques collectés

9 – Visualiser le rapport le plus récent

10 – Visualiser tous les graphiques

## 2.4. Éditeur de modèle de réseau (Network Model Editor).

Permet de représenter la topologie d'un réseau de communication constitué de nœuds et de liens par l'intermédiaire de boîtes de dialogues (palettes et glisser/poser).

Cette interface tient compte du contexte géographique (caractéristique physique pour la modélisation [14]).

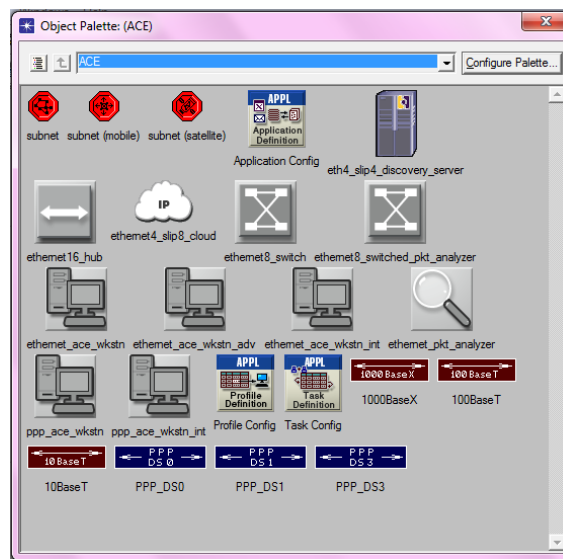


Figure 3.2 : palette des objets OPNET

## 2.5 Éditeur de modèle de nœud (Node Model Editor)

Affiche une représentation modulaire d'un élément de la bibliothèque ou d'un élément créé par l'utilisateur. Chaque module envoie et reçoit des paquets vers d'autres modules. Les modules représentent des applications, des couches protocolaires ou des ressources physiques [14].

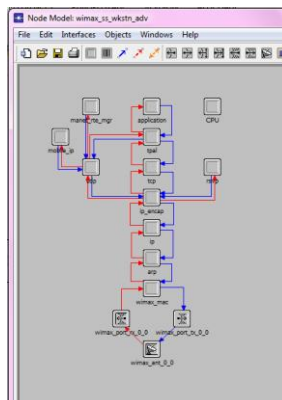


Figure 3.3 : Node Model Editor

### 3. MODEL DE DESCRIPTION

Nous avons créé trois projets

- 1. Topologie WIMAX mobile pour évaluer leur performance.
- 2. Topologie WIFI pour évaluer leur performance.
- 3. Le dernier pour comparaison entre wifi et WIMAX

#### 3.1 Projet 1 : Topologie WIMAX

Le premier projet WIMAX consiste en trois sections pour évaluer leur performance. Le modèles OPNET est développé pour les stations fixes et mobiles dans un réseau WIMAX à petite échelle de 10 km × 10 km.

##### 3.1.1 Section 1 : Distance entre l'utilisateur et BS (La portée maximale)

Cette section est constituée d'une station mobile (MS1), le MS se déplace aléatoirement. Et 4 stations de base WIMAX (BS). La BS est connecté au routeur et au serveur par une câble(fibre optique), le serveur est configuré pour toutes les applications réseau, dans ce projet nous avons choisi l'application VOIP. Sont représentés sur la figure 3.4

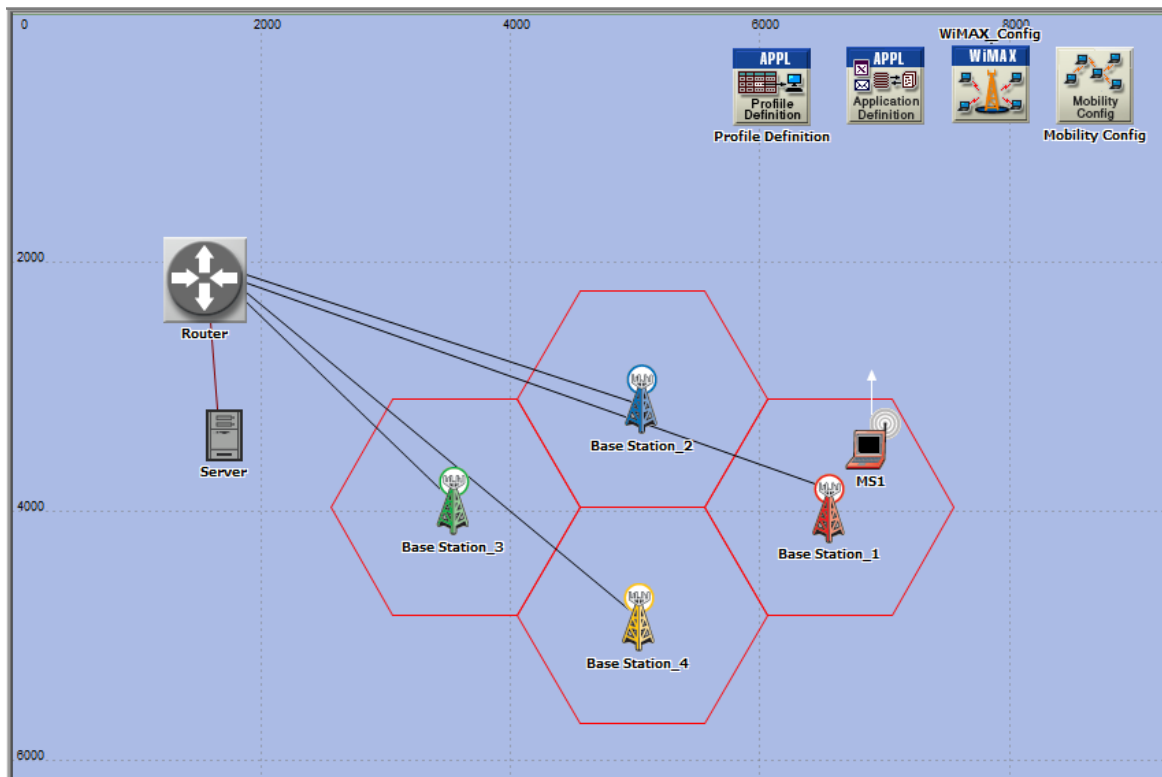
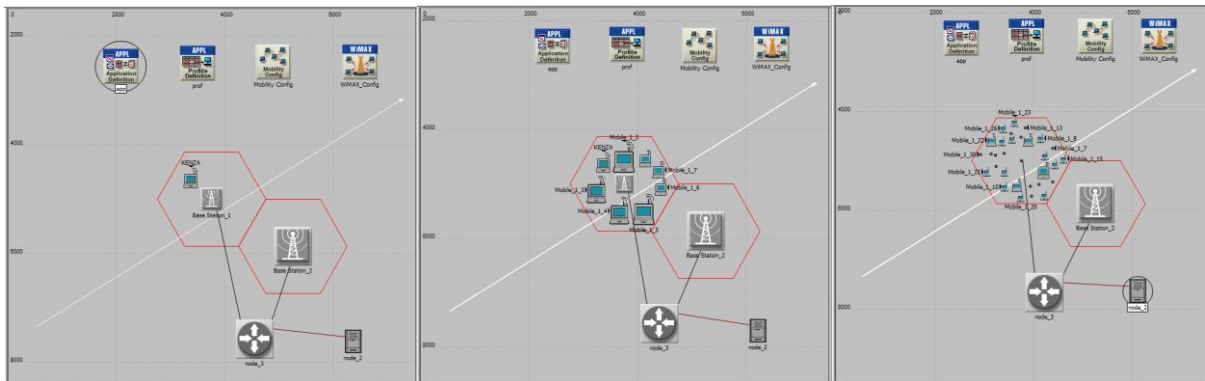


Figure 3.4 Scénario WIMAX avec 4 stations de base (4 cellules).

### 3.1.2 Section 2 : Nombre d'utilisateurs

Dans cette section, les scénarios WIMAX ont 2 station de base BS. Le nombre de MS est changé car le premier scénario contient 1MS, le deuxième scénario contient 8 MS et le dernier contient 30 MS qui se déplacent aléatoirement sur des trajectoires définies qui sont identiques.

Dans cette section constituée de 3 scénarios (1, 8 et 30 nœuds mobiles.) Ils partagent tous le même routeur et sont placés à la même distance de la BS, la Figure 3.5 montrent les trois configurations de WIMAX avec 1, 8 et 30 utilisateurs mobiles respectivement.



**Figure 3.5 :** Les trois scénarios représente (1,8 et 30) MS

### 3.1.3 Section 3 : L'influence des paramètres du réseau sur ses performances.

Pour cette section on modifie les paramètres du WIMAX pour optimise les performances de notre réseau, les paramètres sont :

1. La modulation
2. Le gain d'antenne
3. La puissance d'émission
4. La technologie (OFDM et SC)
5. Modèle de canal multi-trajets

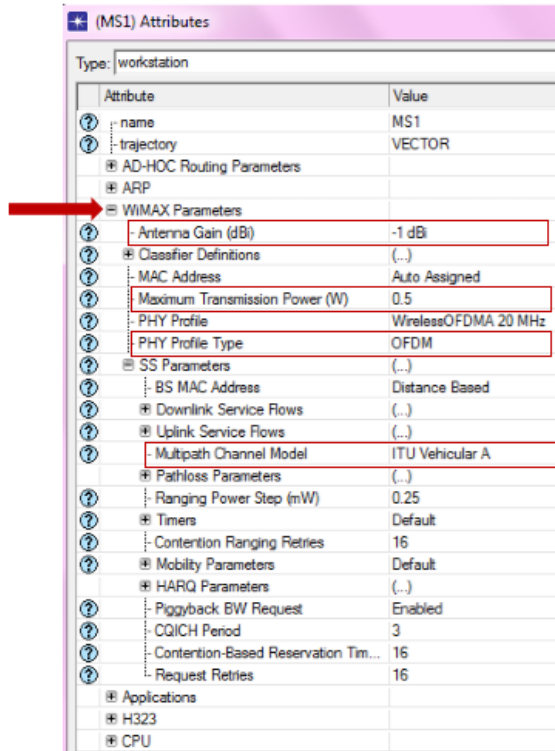


Figure 3.6 : WIMAX paramètres

### 3.2 Projet 2 : Topologie WIFI

#### 3.2.1 Section 1 : Distance entre l'utilisateur et AP (La portée maximale)

Le but de ce scénario est de trouver la plage de simulation maximale du lien WIFI avec le client illustré à la figure 3.7

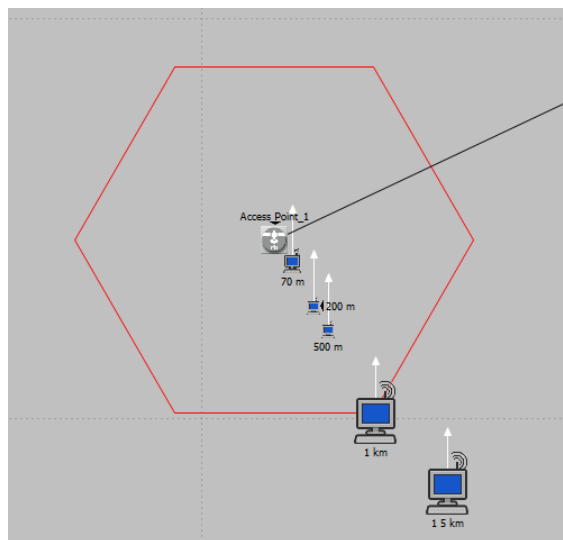


Figure 3.7 : Lien Wifi avec 4 utilisateurs mobiles et un AP

### 3.2.2 Section 2 : Nombre d'utilisateurs

Dans cette section consiste en 3 scénarios (1, 20 et 40 nœuds mobiles.) Ils partagent tous le même switch et sont placés à la même distance de la AP. La Figure 3.8 montre les trois configurations de WIFI avec 1, 20 et 40 utilisateurs mobiles respectivement.

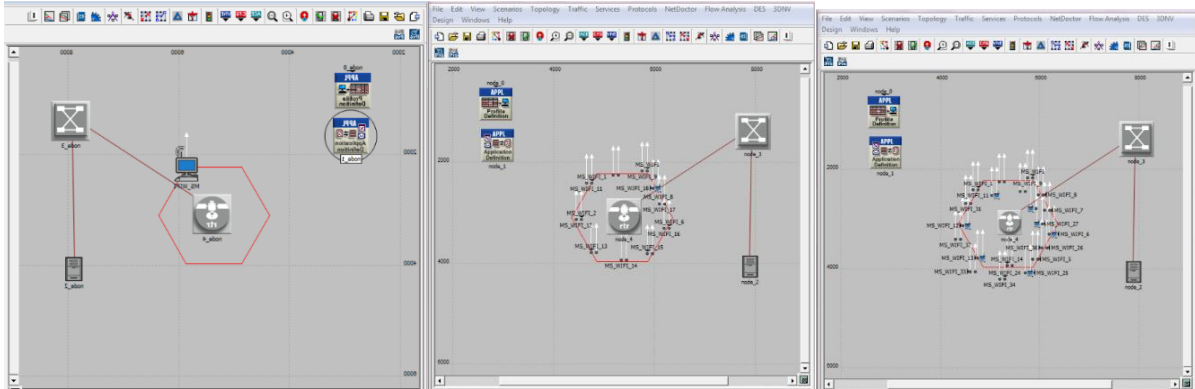


Figure 3.8 : les trois scénarios représente (1, 20 et 40 nœuds mobiles.)

### 3.3 Projet 3 : Topologie WIFI\_WIMAX

#### 3.3.1 : Nombre d'utilisateurs (WIFI\_WIMAX)

Dans cette section, nous avons créé trois scénarios différents en termes de nombre d'utilisateurs à la fois Topologie WIMAX et Wi-Fi utilisé un rayon de cellule unique de 1 km et nous avons étudié et comparé le résultat

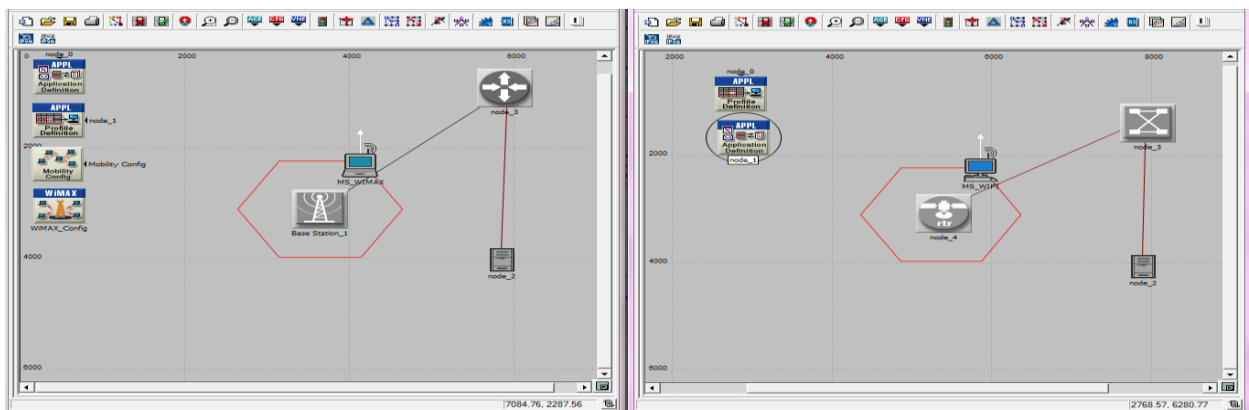


Figure 3.9 : scénarios 1 représente 1 MS pour topologie WIFI et topologie WIMAX

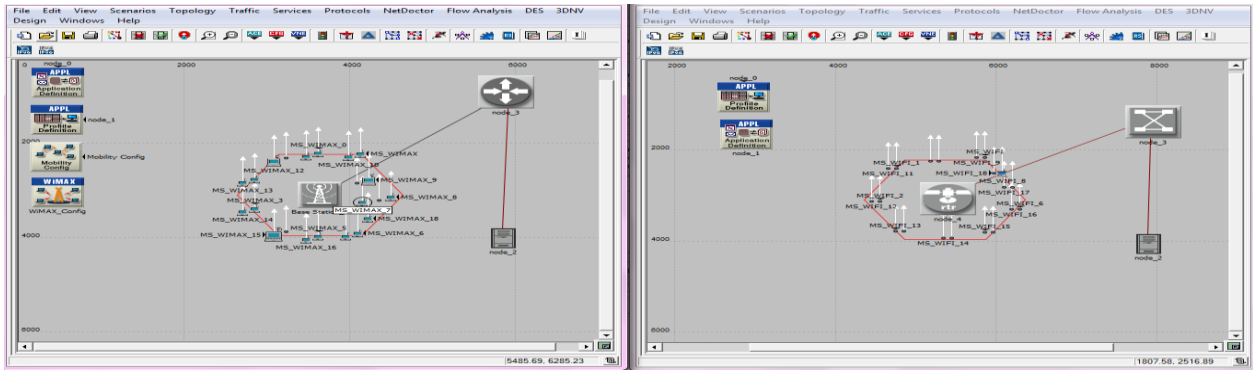


Figure 3.10 : scénarios 2 représente 20 MS pour la topologie WIFI et la topologie WIMAX

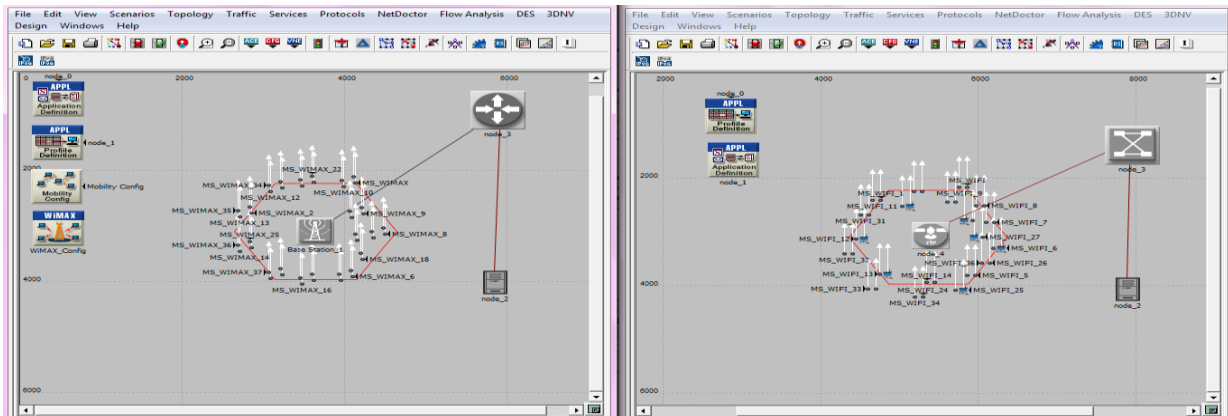


Figure 3.11 : scénarios 3 représente 40 MS pour la topologie WIFI et la topologie WIMAX

### 3.3.2 : Topologie WIFI\_WIMAX

Dans ce projet, l'outil de simulation OPNET 14.5 est utilisé pour comparer les performances de la VOIP sur le LAN sans fil IEEE 802.11 avec WIMAX sans fil IEEE 802.16. Les réseaux modèles pour les deux technologies se composent de un nœud sans fil, AP, BS, router et switch répartis dans 10km × 10 km, comme indiqué sur Figure 3.12

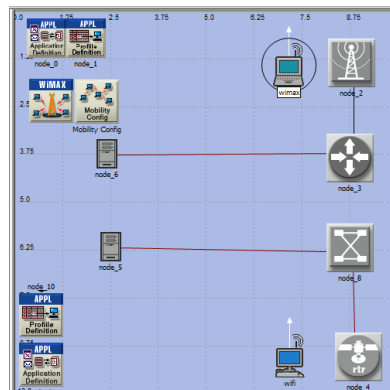


Figure 3.12 : Topologie de l'étude de cas WiMAX\_WIFI



## 4. SIMULATION (résultats et discussion)

Des paramètres globaux tels que le débit, le retard et la charge (delay, throughput and load) sont également définis pour évaluer les performances du réseau.

Le service que nous avons appliqué et le VOIP qui ne demande pas un très grand débit de données.

### 4.1 Portée de ce projet

- Pour ce projet, les topologies WIMAX et Wifi sont configurés
- la voix sur IP est diffusée depuis un serveur vers les utilisateurs Wifi et WIMAX, La VOIP est choisie pour surcharger le lien sans fil.
- La performance d'avoir 1 à 30 utilisateurs WIMAX et Wifi se connectant à une base station (BS) ou à un point d'accès (AP) unique est analysé.
  - o Retard (Delay)
  - o Débit (throughput)
  - o Perte de données (Data dropped)
  - o Trafic reçu / Trafic envoyé ( Trafic received / Trafic sent)
- L'effet des différents modèles de trajets multiples sont examinés. Véhicule & Piéton.
- La portée maximale de la liaison WIMAX et Lien WiFi, dans des conditions optimales
- Ce test est effectué avec une puissance de transmission maximale juste pour comparer la différence de portée de simulation de WiFi et WIMAX

### 4.2 Configuration des paramètres

	BS	Mobile station
Antenna gain (dBi)	-1 dBi	-1 dBi
MAC address	Auto Assigned	Auto Assigned
Maximum transmission power (W)	20	0.5
PHY profile	Wireless OFDMA 20 MHz	Wireless OFDMA 20 MHz
Modulation et Codage	Adaptive	Adaptive
Service Class Name	Gold	Gold

**Tableau 3.3** : Paramètres de BS et MS WIMAX.

	AP	Mobile Node
Data rate	11 Mbps	11 Mbps
Receiver Power Threshold	-95dBm	-95dBm
Maximum transmission power (W)	0.005	0.005
PHY characteristics	Direct sequence	Direct sequence
AP functionality	Enabled	Disabled

Tableau 3.4 : Paramètres d'AP et MN wifi

### 4.3 Résultats de Projet 1 : Topologie WIMAX

#### 4.3.1 Section 1 : Distance entre l'utilisateur et BS (La portée maximale)

##### 4.3.1.1 la variation de débit du MS au long de trajet

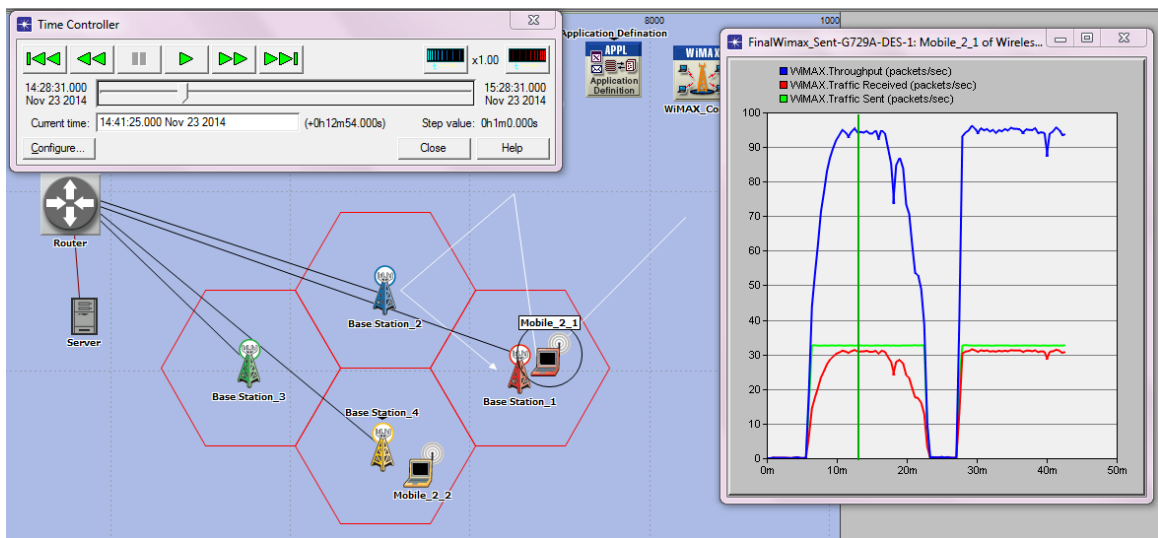


Figure 3.13 Vue d'ensemble de la configuration de simulation projet WIMAX

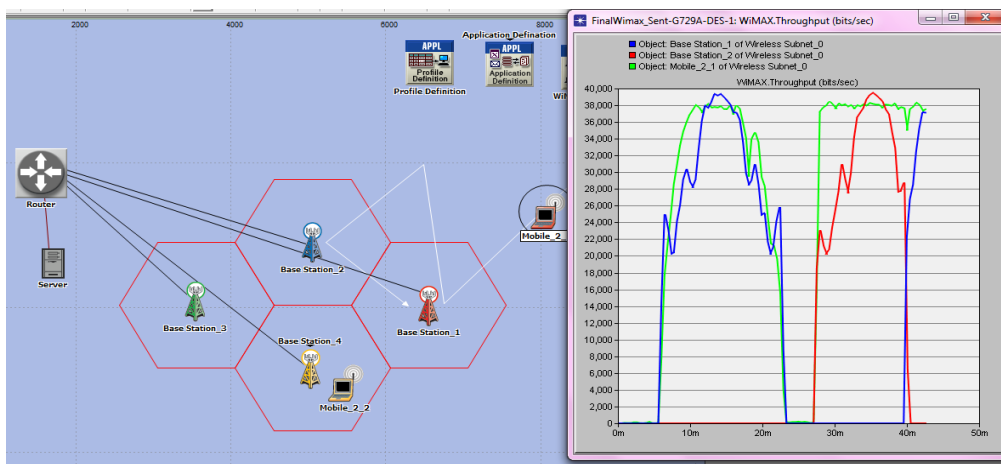


Figure 3.14 : Le changement qui a lieu au débit de l'utilisateur en passant sur le trajet

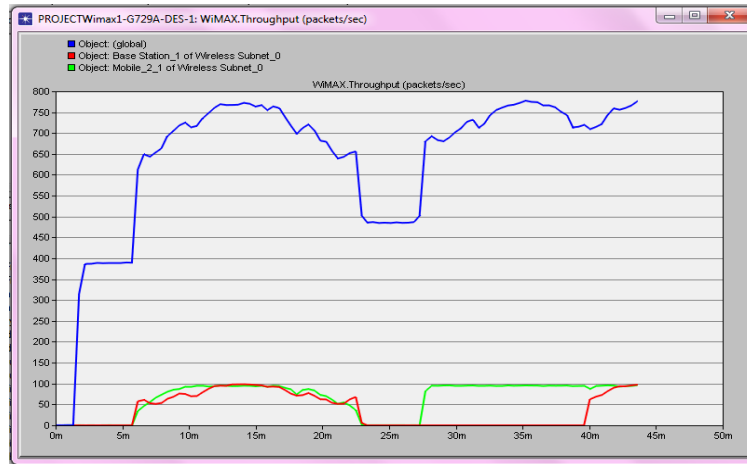


Figure 3.15 : Débit WIMAX de global (4BS) et MS (packets/Sec)

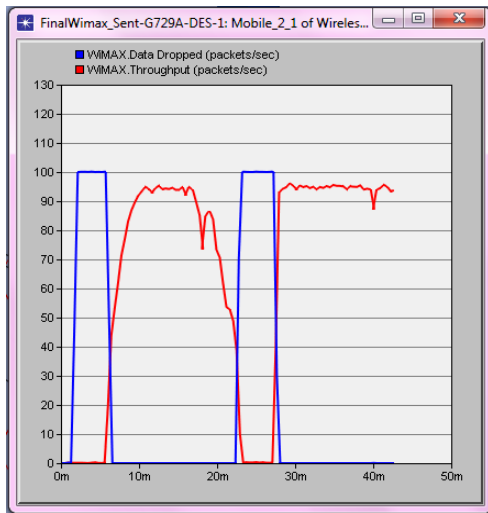


Figure 3.16 : Perte de données (Data dropped) et debit de MS (packets/Sec)

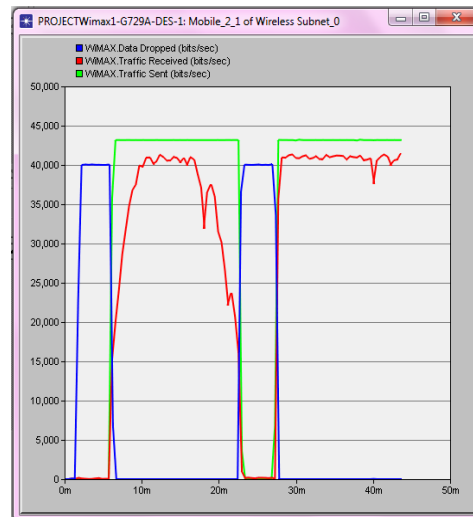


Figure 3.17 : Perte de données (Data dropped) et Trafic reçu / Trafic envoyé de MS (bit/Sec)

La figure 3.17 montrent les données reçues / envoyées (received/sent), les données ont diminué (data dropped) sur le nœud mobile WIMAX (MS) pendant que MS approche du BS et augmente lorsque el mobile s'éloigne du BS sur la trajectoire définie contrairement au trafic sent et reçu qui augmente en rapprochant du BS et diminu en s'éloignant du BS.

4.3.1.2 Variation de distance consécutif du lieu BS (0Km, 5Km, 25Km, 24Km et 25.5Km).

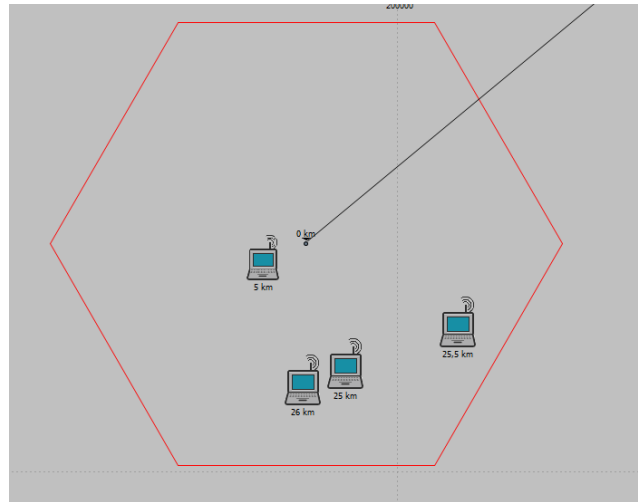


Figure 3.18 : Scénario WIMAX avec 5 MS et 1 BS (1 cellules).

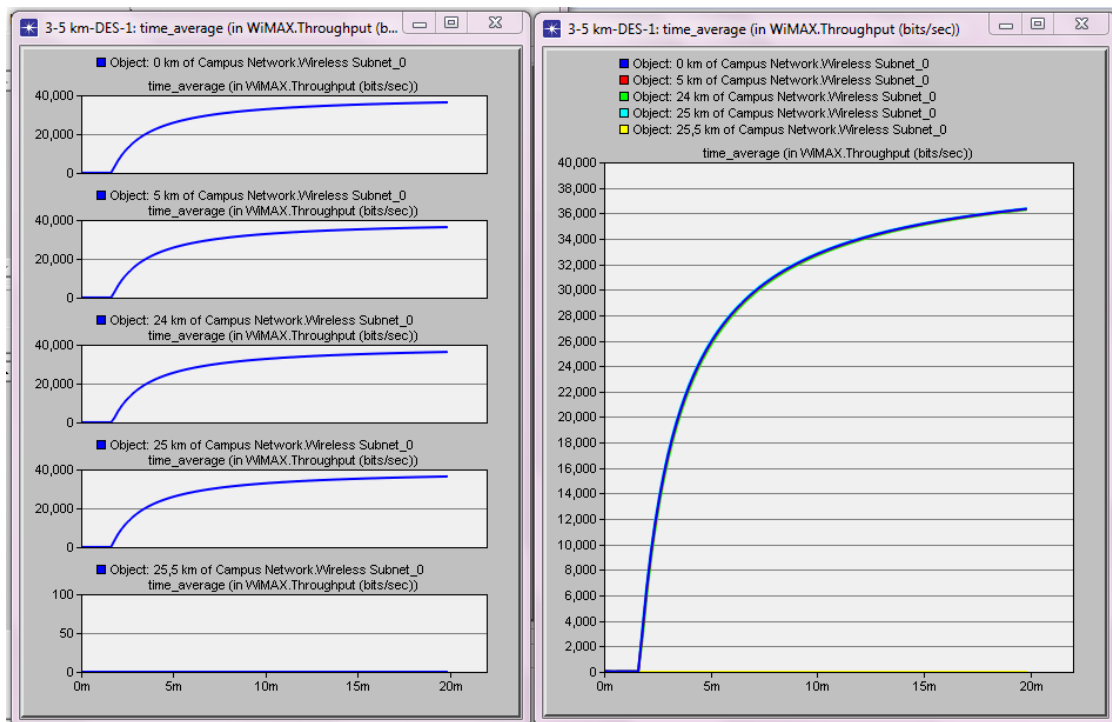
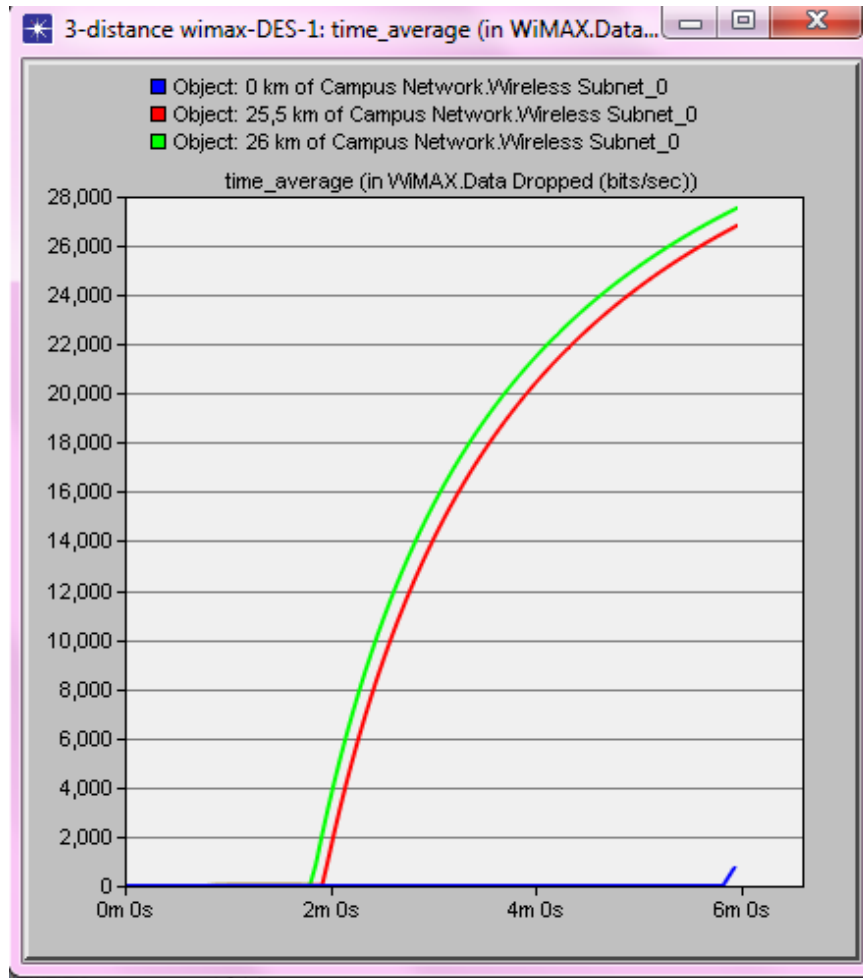


Figure 3.19 : Débit sur MS pour des distances de 0Km, 5Km, 24Km, 25Km et 25.5Km.

Comme le montre la Figure 3.19, le WiMAX MS ne reçoit aucun débit au-delà de 25Km car c'est la couverture WIMAX maximale avec les paramètres sélectionnés. Bien que les données soient reçues jusqu'à une distance de 25Km de la BS, il y a une augmentation de Perte de données (Data dropped) à mesure que la distance augmente.

Perte de données (Data dropped) des distances de 0Km, 25.5Km et 26Km est montré dans la figure 3.19. Les data dropprd entre 25.5Km et 26Km sont environ 28.000 (bit/s).



**Figure 3.20** : Perte de données (Data dropped) sur MS pour des distances de 0Km, 25.5Km et 26Km

#### 4.3.2 Section 2 : Nombre d'utilisateurs

Les topologies WIMAX avec 1, 8 et 30 nœuds mobiles (MS) a été configuré pour recevoir VOIP sur le serveur en même temps. Les performances de ces réseaux ont été comparées dans ce scénario. Tout d'abord, le débit de (MS, BS, global) est représenté respectivement sur les figures 3. (21 22 23).

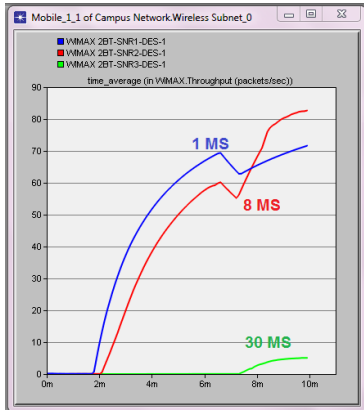


Figure 3.21 : le débit de MS

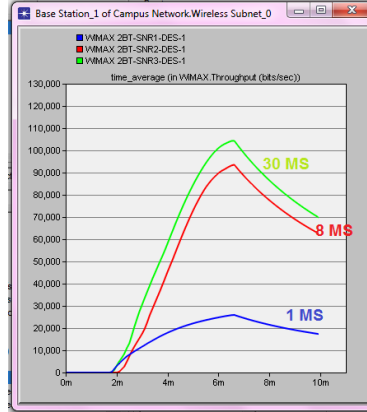


Figure 3.22 : le débit de BS

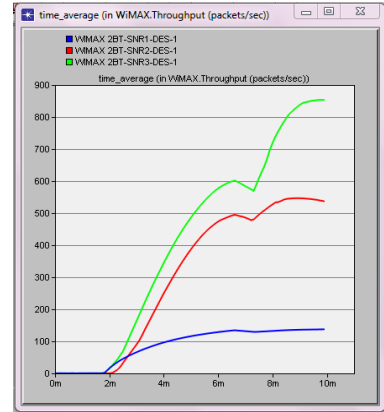


Figure 3.23 : le débit de global

La charge (load) de MS, et global est représenté respectivement sur les figures 3.24 et 3.25.

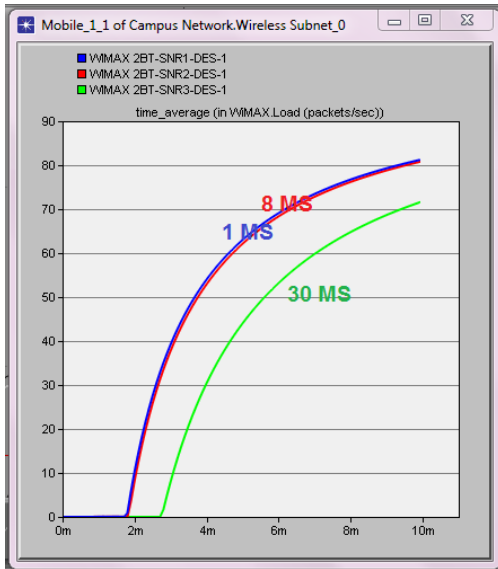


Figure 3.24 : La charge (load) de MS pour 1, 8, et 30

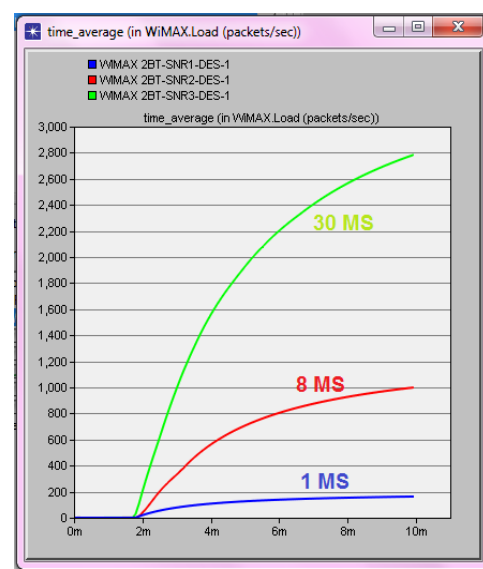


Figure 3.25 : La charge (load) global pour 1, 8, et 30 MS

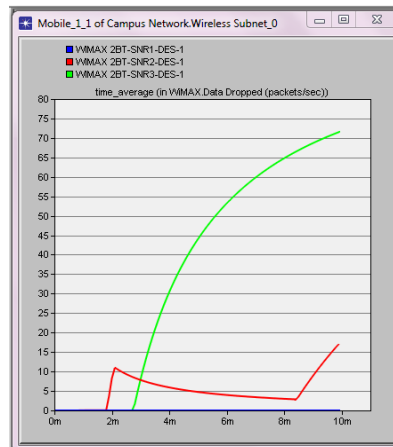


Figure 3.26 : Perte de données (Data dropped) pour 1, 8, et 30 MS

On remarque que pour 1 et 8 usager le débit est le même qui prend le maximum ,apres 8 usagers le débit commence à diminuer, ce qui veut dire que le meilleur nombre d'utilisateurs au resau WIMAX pou une BS est 8 MS.

À mesure que le nombre d'utilisateurs augmente, la quantité de données envoyées augmente (débit global et la charge global) mais les obstacles de congestion et de collisions dans le réseau augmentent, ce qui augmente le nombre de données perdues (data dropped) et les erreurs, ce qui reflétera les faibles données qui seront fournies dans le seconde.

Ce qui reflète les pénuries de débit et load à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente, augmentation de la quantité de perte de données (Data dropped). Concernant la MS, le débit diminu avec l'augmantation de number d'utilisateur.

### 4.3.3 Section 3 : Le choix des meilleurs paramètres pour nos modèles de simulation :

#### 4.3.3.1 Les modulations (16QAM , 64QAM ,et BPSK)

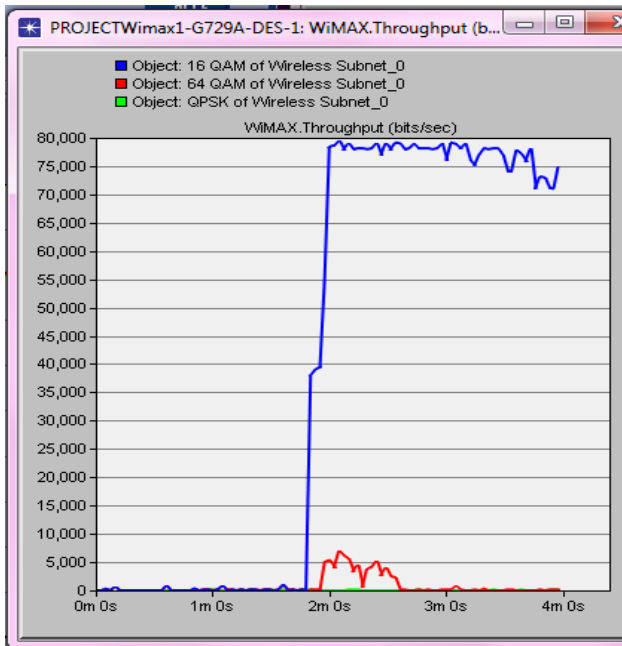


Figure 3.27 : Comparaison en debit WiMAX

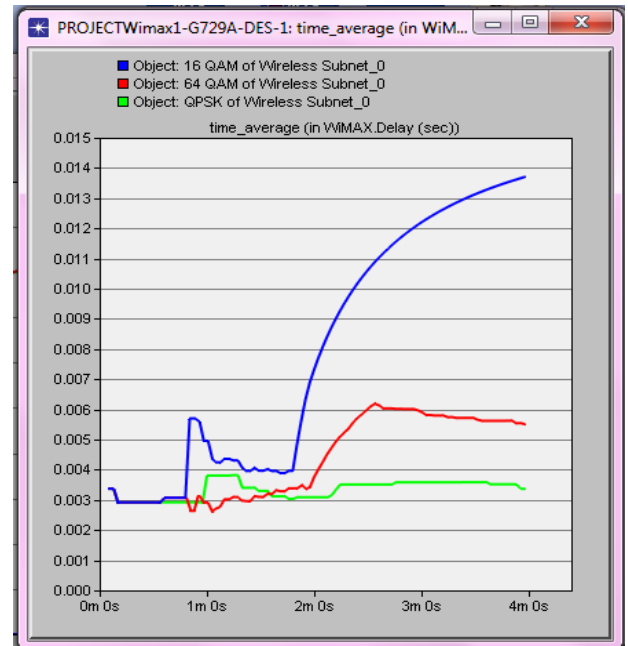
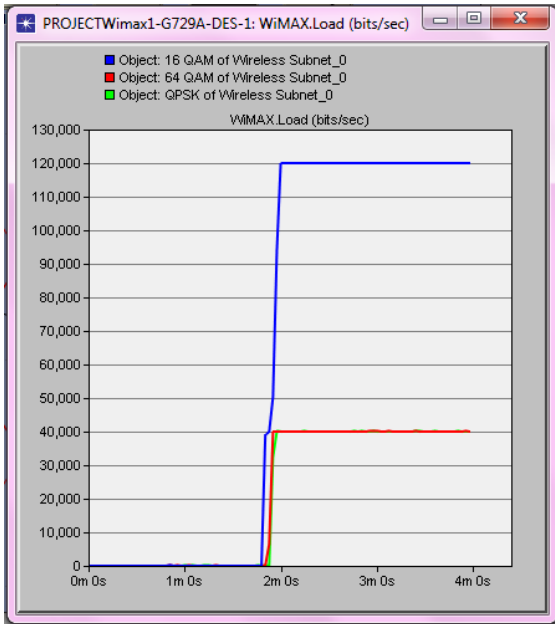
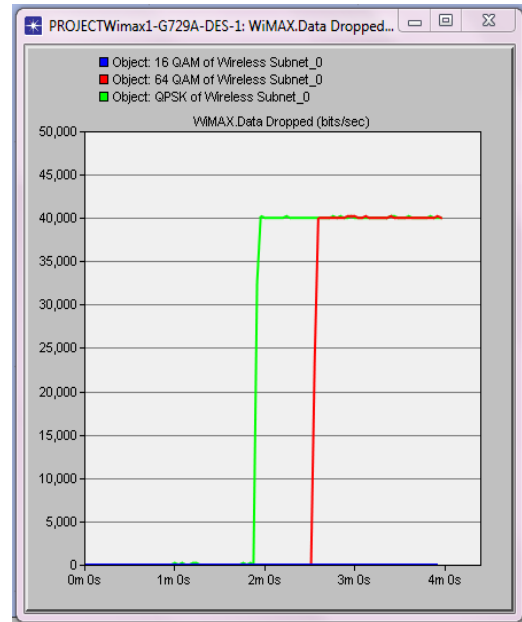


Figure 3.28 : Comparaison en Retard (Delay)



**Figure 3.29 :** Comparaison en La charge (load)  
WiMAX



**Figure 3.30 :** Comparaison en Perte de données  
(Data dropped)

Il est clair à partir de la figure 3.27, que la valeur maximale du débit est 80.000 bit/s est celle du 16 QAM, alors que d'après la figure 3.28 que le retard est maximum pour 16 QAM et minimum pour QPSK, sachant que le retard est juste de l'ordre de la MS, et que d'après la figure 3.29 du courbe du charge de 16 QAM est le maximum et le minimum pour la modulation QPSK.

Et pour le data dropped on trouve que perte de données de la modulation QPSK est le plus élevé que celle du 16 QAM qui est presque inexistante ; représenté sur la figure 3. 30, ce qui nous amène à choisir la meilleure modulation dans nos prochaines simulations la 16 QAM.

Cette section est seulement l'étude comparative des techniques de modulation numérique qui peuvent être utilisées dans OFDM qui est la partie centrale du modèle WIMAX. Après cette étude et en comparant les résultats que nous avons observée, nous pouvons trouver la techniques de codage-décodage et de modulation-démodulation qui conviendront le mieux aux attentes actuelles de l'utilisateur final.



4.3.3.2 Les puissances d'émission (0.5 , 5,et 50)W

Attribute	Value
name	KENZA_2
trajectory	123
AD-HOC Routing Parameters	
ARP	
WiMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	-1 dBi
Classifier Definitions	(...)
MAC Address	Auto Assigned
Maximum Transmission Power (W)	5.0

Attribute	Value
name	KENZA
trajectory	123
AD-HOC Routing Parameters	
ARP	
WiMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	-1 dBi
Classifier Definitions	(...)
MAC Address	Auto Assigned
Maximum Transmission Power (W)	0.5

Attribute	Value
name	KENZA_3
trajectory	123
AD-HOC Routing Parameters	
ARP	
WiMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	-1 dBi
Classifier Definitions	(...)
MAC Address	Auto Assigned
Maximum Transmission Power (W)	50

Figure 3.31 : WIMAX paramètre (maximum Transmission Power)

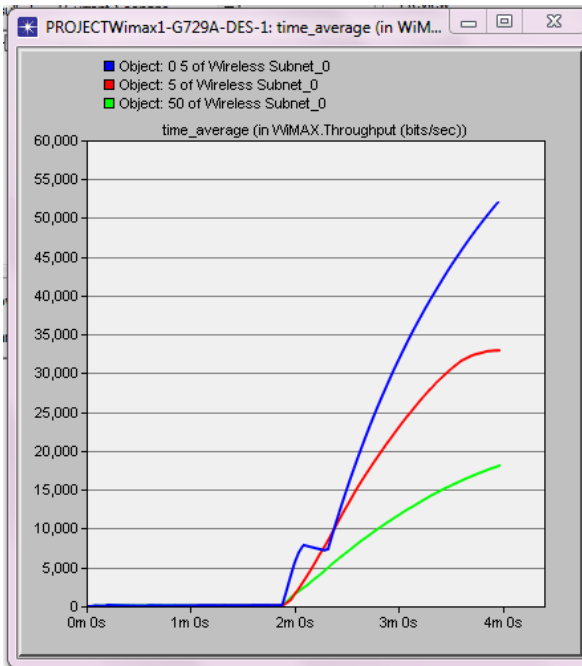


Figure 3.32 : Comparaison en Debit WiMAX

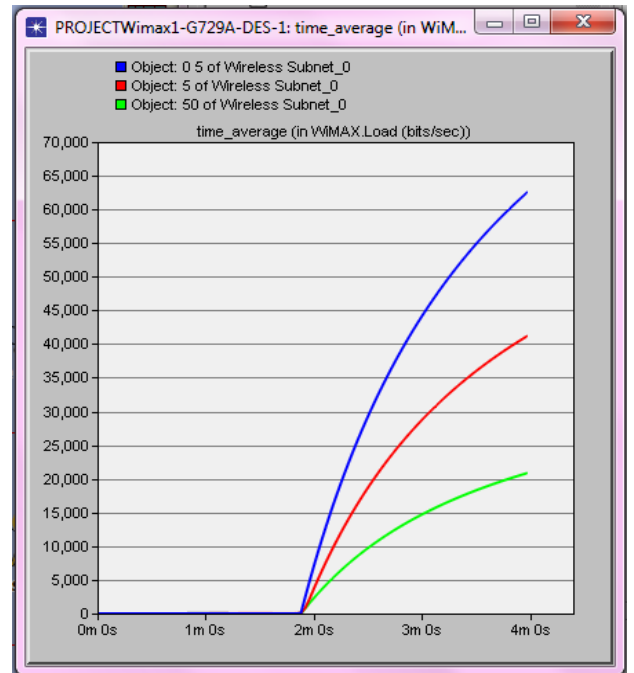


Figure 3.33 : Comparaison en charge WiMAX

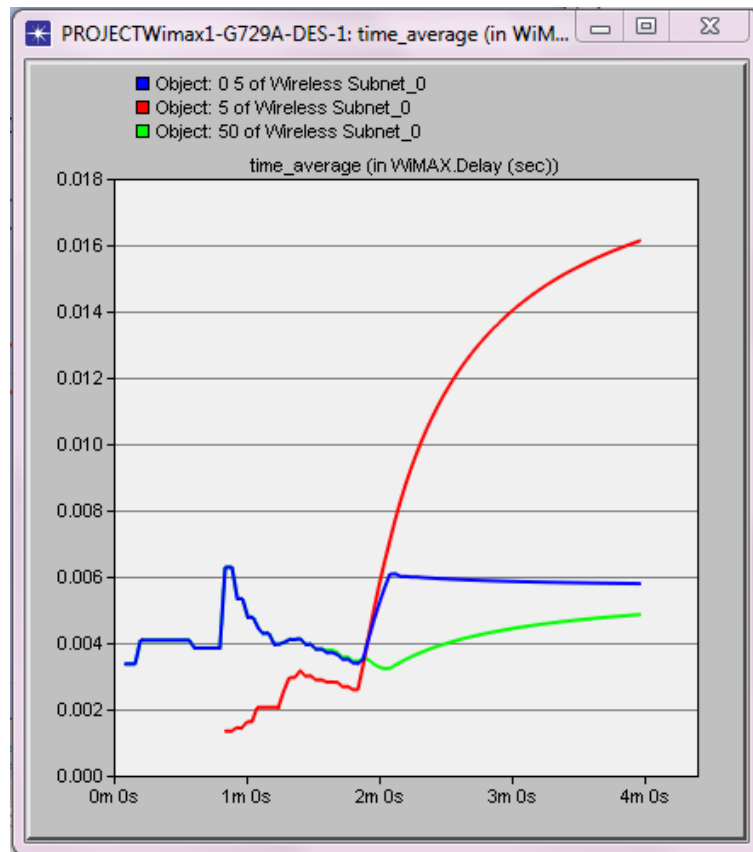


Figure 3.34 : Comparaison en retard WiMAX

A travers les résultats obtenus par les figures 3.(32, 33, 34). la valeur idéale de Transmission Power est 0.5 w C'est la même valeur que nous trouvons par default on OPNET modeler.

#### 4.3.3.3 Les technologies (OFDM et SC)

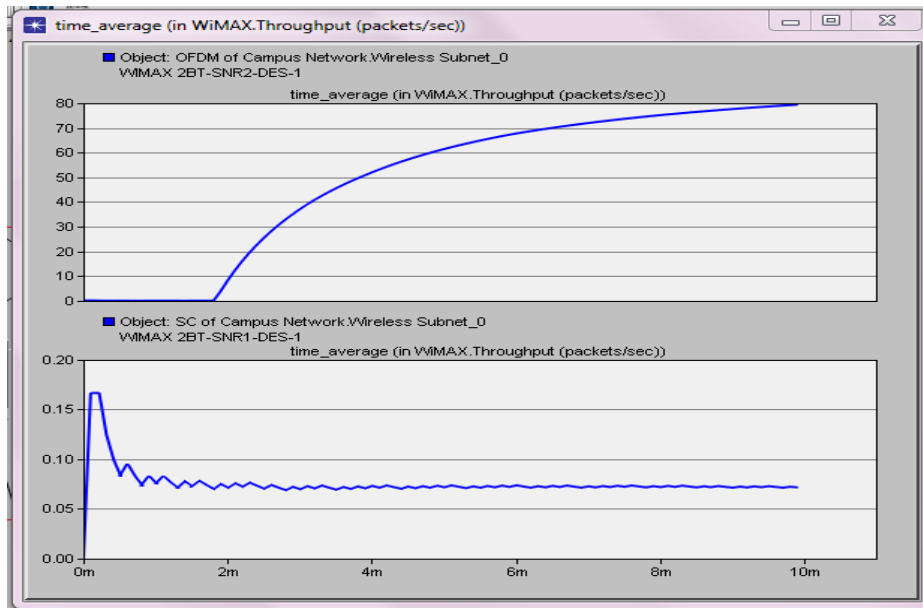


Figure 3.35 : Comparaison en débit WMAX

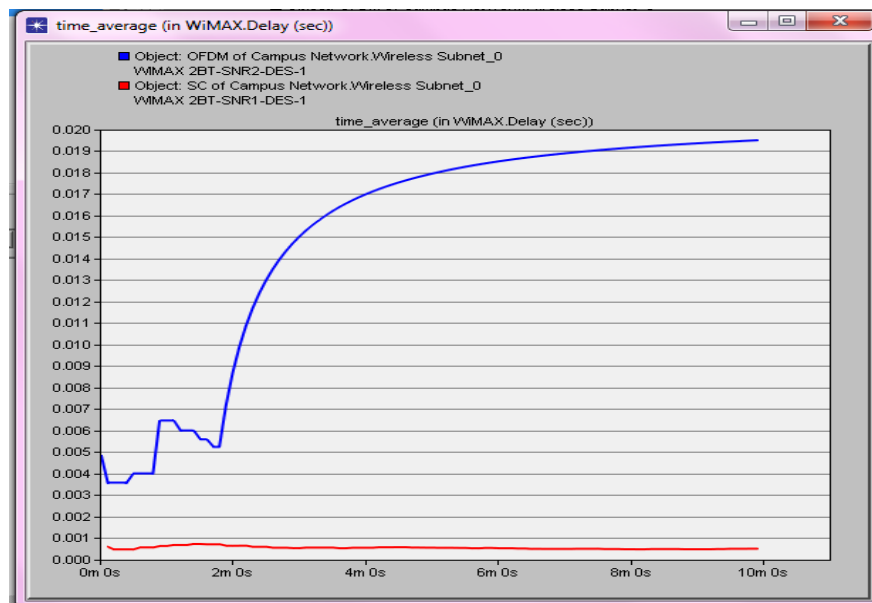


Figure 3.36 : Comparaison en retard WiMAX

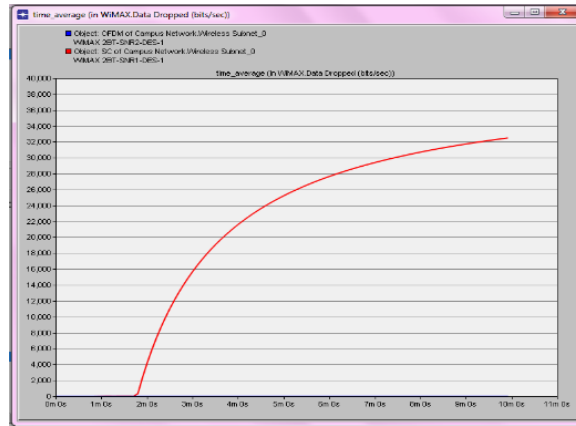


Figure 3.37 : Comparaison en perte de données (Data dropped) WiMAX

D'après les résultats des figures on trouve que le débit du SC est presque nul devant la technologie de OFDM ,et que le perte de données du celle du OFDM est presque nul devant celle du SC qui est au contraire tres grand , ce qui veut dire que la meilleur technologie adopté dans nos prochains simulations est l'OFDM.

4.3.3.4 Les gains d'antenne (-1, 14 et 15) dBi

Attribute	Value
name	KENZA
trajectory	123
AD-HOC Routing Parameters	
ARP	
WiMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	-1 dBi

Attribute	Value
name	KENZA_3
trajectory	123
AD-HOC Routing Parameters	
ARP	
WiMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	15 dBi

Attribute	Value
name	KENZA_2
trajectory	123
AD-HOC Routing Parameters	
ARP	
WiMAX Parameters	
Antenna Gain (dBi)	14 dBi

Figure 3.38 : WIMAX paramètre (Antenna Gain)

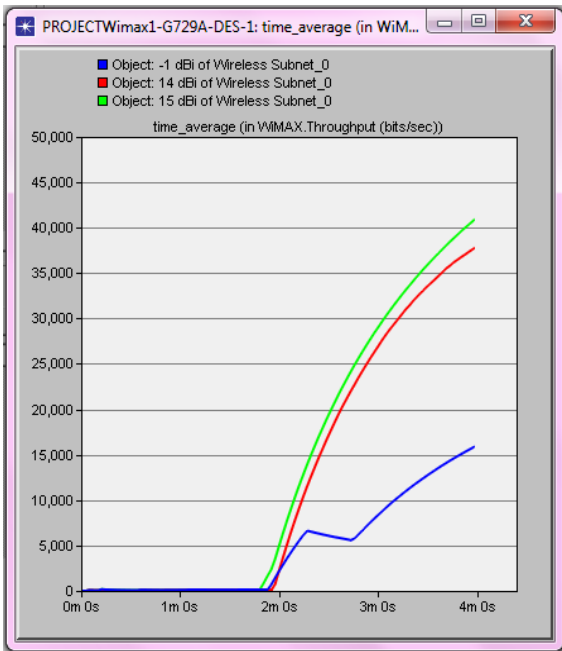


Figure 3.39 : Comparaison en débit  
WiMAX

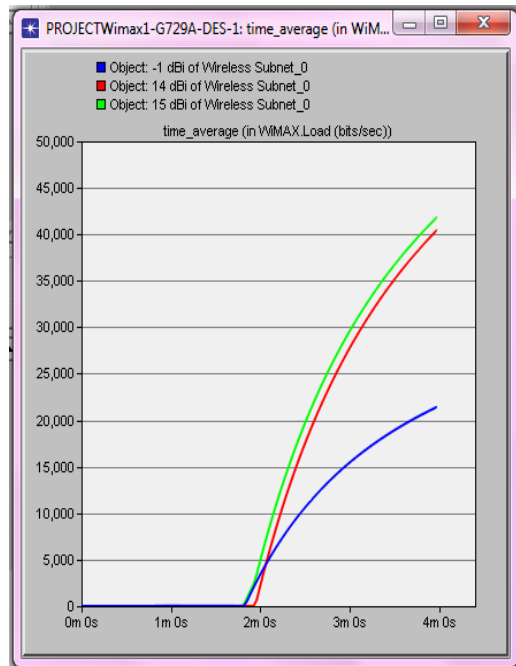


Figure 3.41 : Comparaison en la charge  
WiMAX

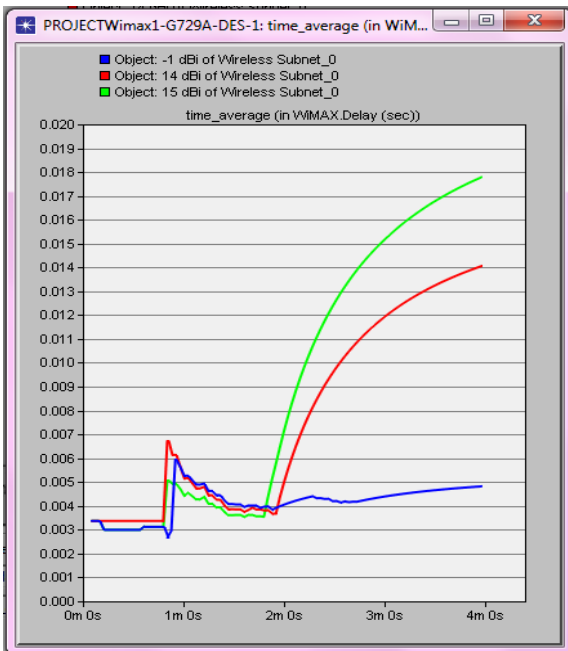


Figure 3.40 : Comparaison en retard  
WiMAX

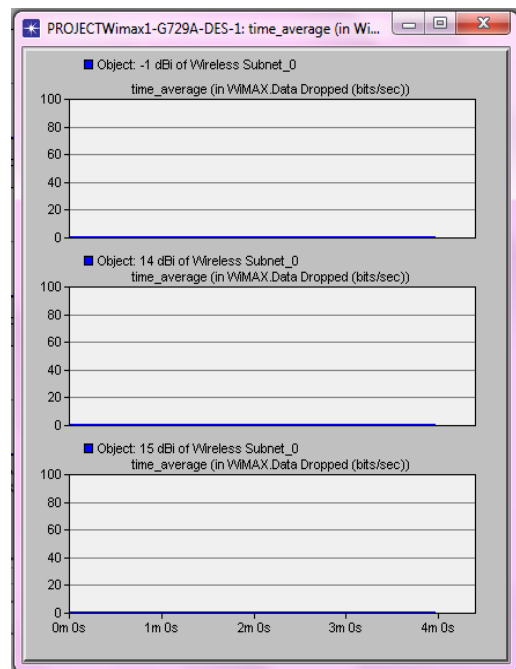


Figure 3.42 : Comparaison en Perte de  
données (Data dropped) WiMAX

D'après les résultats des figures le débit du -1, 14, 15 on trouve que le meilleur gain est 15 .

4.3.3.5 Différents modèles de trajets multiples (vehicular et pedestrian)

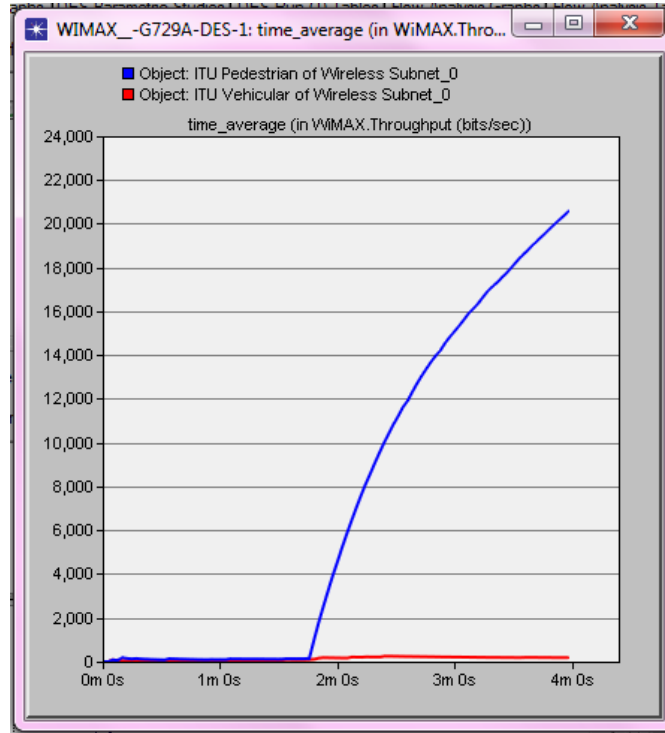


Figure 3.43 : Débit de MS avec différents modèles de trajets multiples (vehicular et pedestrian).

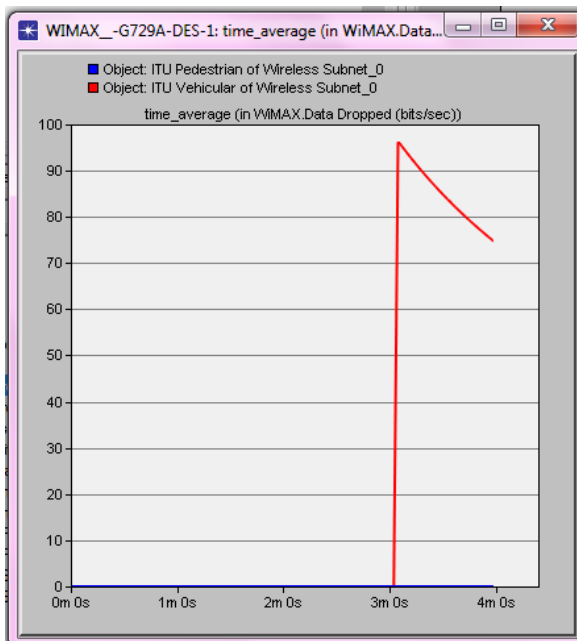


Figure 3.44 : Perte de données (Data dropped) de MS avec différents modèles de trajets multiples.

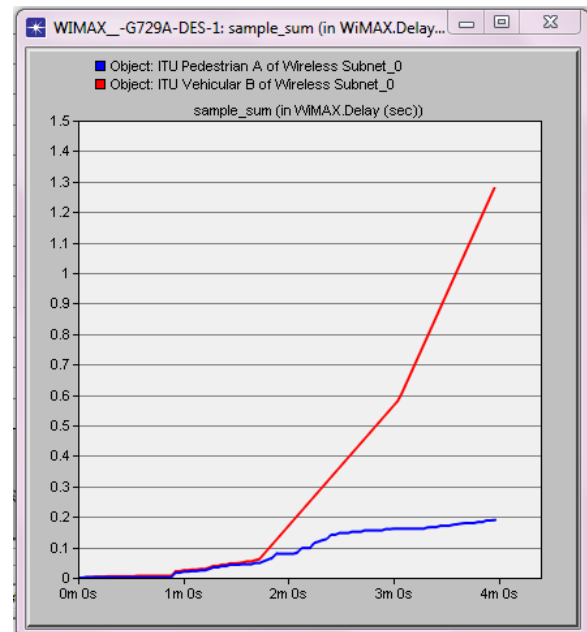


Figure 3.45 : le retard de MS avec différents modèles de trajets multiples.

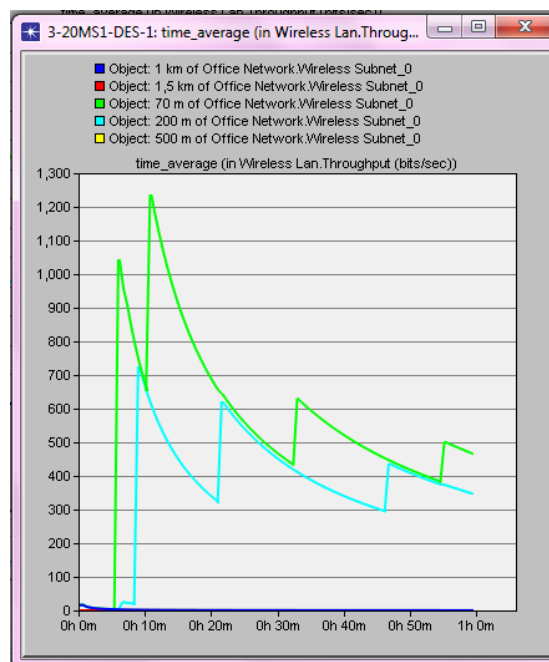
On remarque clairement que la valeur de débit de l'utilisateur piéton est plus grande que celle de l'utilisateur véhiculé qui influs sur la qualité de signal reçu Figure 3.43, et que les valeurs du perte de données (Data dropped) et celle du retard du piéton est plus faible que celle du poste véhiculé, ce qui veut dire que la connexion du poste piéton est meilleur que celle du véhicule ce qui est proportionnelle avec la réalité (dans notre vie quotidienne).

Et comme récapitulation dans nos prochain simulations on va choisir les paramètres suivants : La modulation 16 QAM, Puissance 0.5, Technologie OFDM et le Gain 15. Sans oublier que la connexion est meilleur pour un usager piéton que pour un usager véhiculé.

✚ Après l'étude de notre réseau WIMAX ,maintenant on va entamé une petite étude sur le réseau WIFI .

#### 4.4 Résultats de Projet 2 : Topologie WIFI

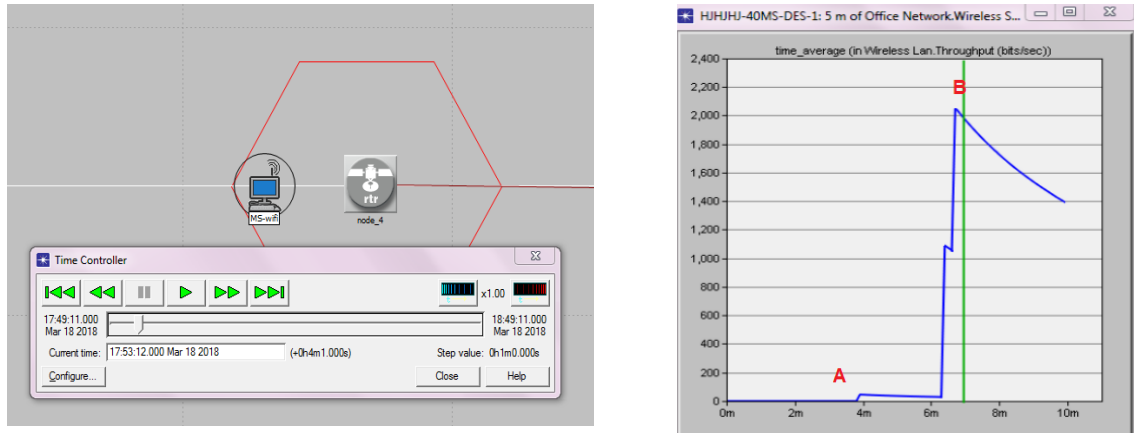
##### 4.4.1 Section 1 : Distance entre l'utilisateur et AP (La portée maximale)



**Figure 3.46** : debit sur MS pour des distances de 70 m, 200 m, 1 km, et 1.5 km

Comme le montre la Figure 3.46, le MS ne reçoit aucun débit au-delà 1Km car c'est la couverture Wifi maximale avec les paramètres sélectionnés. Alors la gamme WiFi est de 1 Km .

Dans ce scénario, nous avons trouvé que la distance entre le MS et le point d'accès est un facteur qui a un effet significatif sur le débit du MS. Pour étudier plus en détail cette relation, nous construisons le scénario suivant: une analyse de station mobile (MS).



**Figure 3.47 :** débit sur le nœud mobile WLAN pendant que le nœud mobile s'éloigne du point d'accès.

De la figure 3.47, je divise en deux zones. La zone A correspond au point de départ avant d'entrer dans la plage effective du point d'accès. La zone B est à l'intérieur de la plage d'AP. Nous sommes plus intéressants sur la zone B.

Avant d'entrer dans la zone B, le poste de travail a besoin de beaucoup de données à envoyer en utilisant VOIP, mais en raison de la force du signal, il ne peut pas être fait en temps voulu. Une fois que la station se déplace dans la zone B qui se trouve à l'intérieur de la plage affective d'AP, le poste de travail envoie toutes les données dans le tampon qui sont censées être envoyées dans un temps précédant. C'est pourquoi nous avons vu une impulsion très forte quand le MS s'approche de l'AP, ensuite, lorsque le poste de travail sort de la plage, le débit s'estompe.

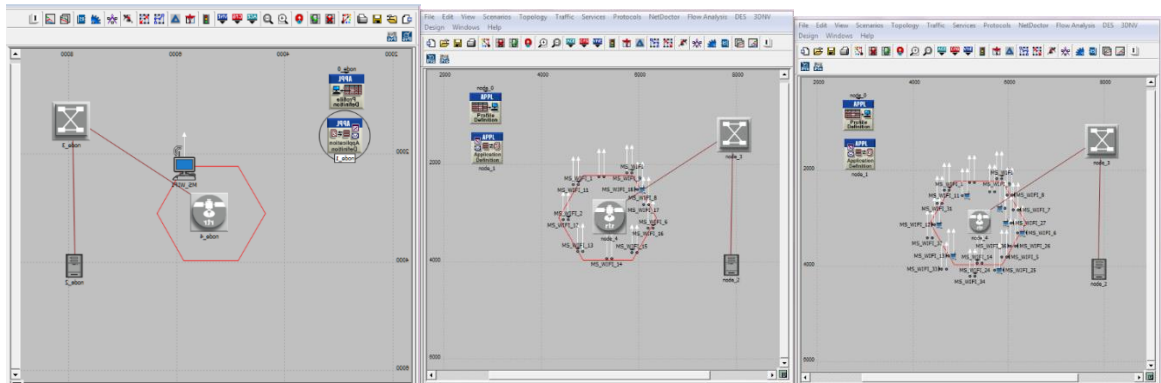
De toute évidence, nous pouvons voir que le MS à l'intérieur de la gamme fonctionne à pleine charge comme prévu. Le MS en dehors de la plage ne peut pas transmettre autant que demande par application. Cela est dû à la force du signal est plus faible en augmentant la distance entre le MS et AP (**Figure 3.47**), Une chose plus intéressante, nous avons constaté que, pour le MS à l'intérieur de la gamme, le débit est un graphique de forme d'onde Sa valeur jusqu'à 2000 bit /s ; mais pour un MS en dehors de la plage, le débit se rapproche



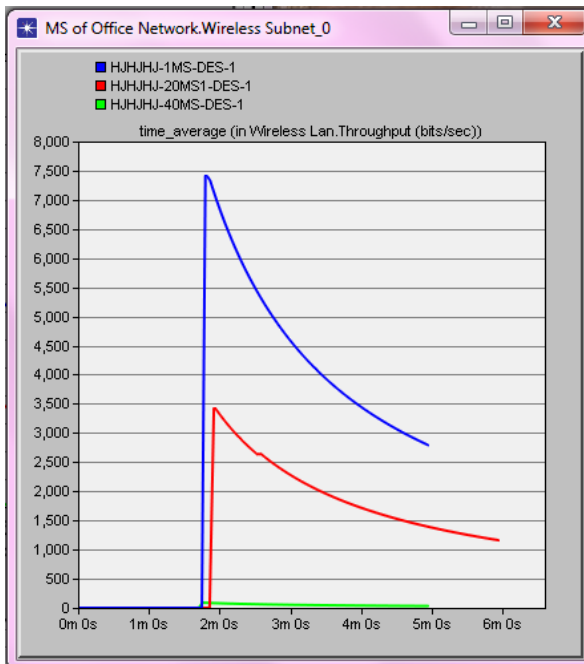
d'une ligne droite. L'application que nous exécutons ici est faire un appel vocal sur un protocole IP (VOIP) de durée 10 mn.

**4.4.2 Section 1 : Nombre d'utilisateurs**

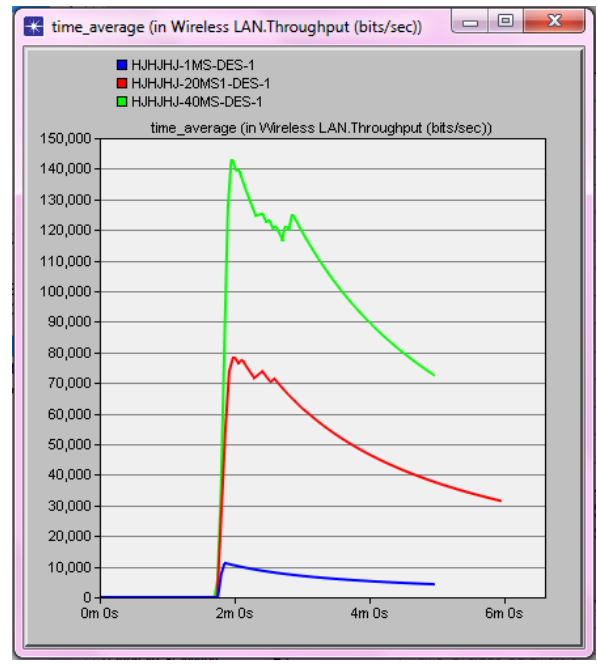
Dans cette section, nous exécutons 3 scénarios en augmentant le nombre de postes de travail de 1, 20, 40 MS avec la même application, la figure 3.48 montre les trois scénarios.



**Figure 3.48 :** 3 scénarios représente (1, 20 et 40 nœuds mobiles.)



**Figure 3.49 :** le débit de MS



**Figure 3.50 :** le débit global

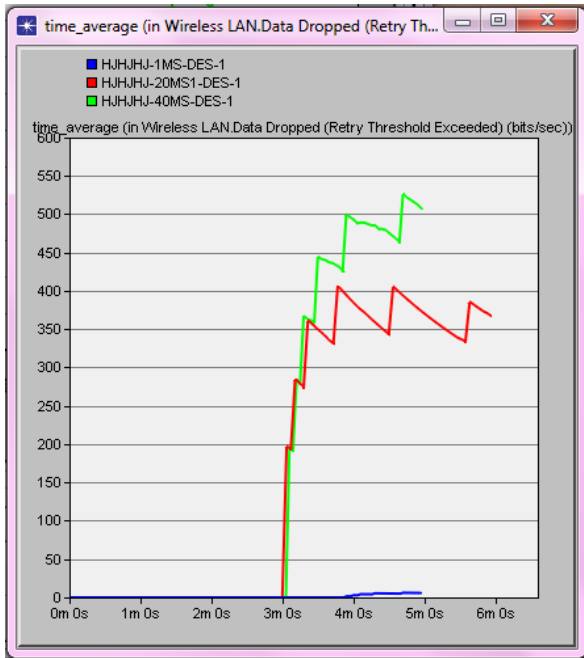


Figure 3.51 : Perte de données (Data dropped) de (1MS 20MS 40MS)

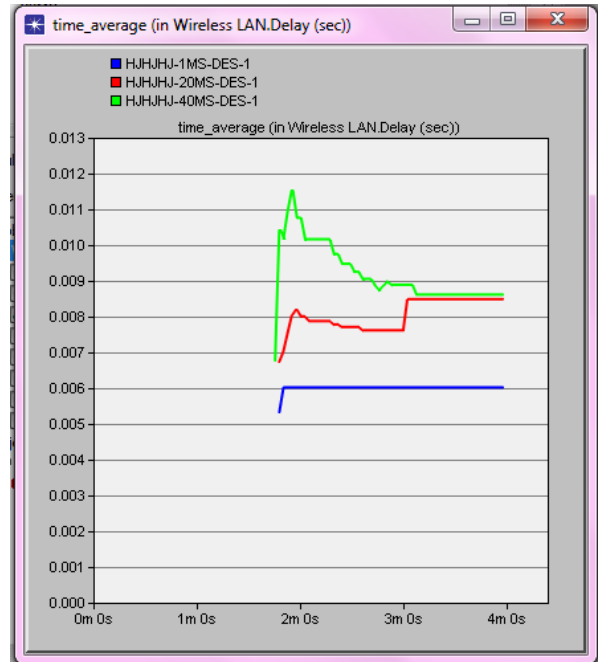


Figure 3.53 : Retard de (1MS 20MS 40MS)

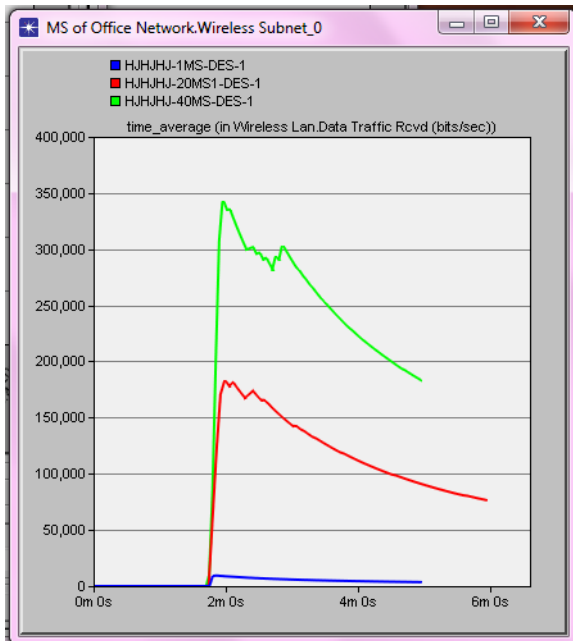


Figure 3.52 : Trafic reçu de (1MS 20MS 40MS)

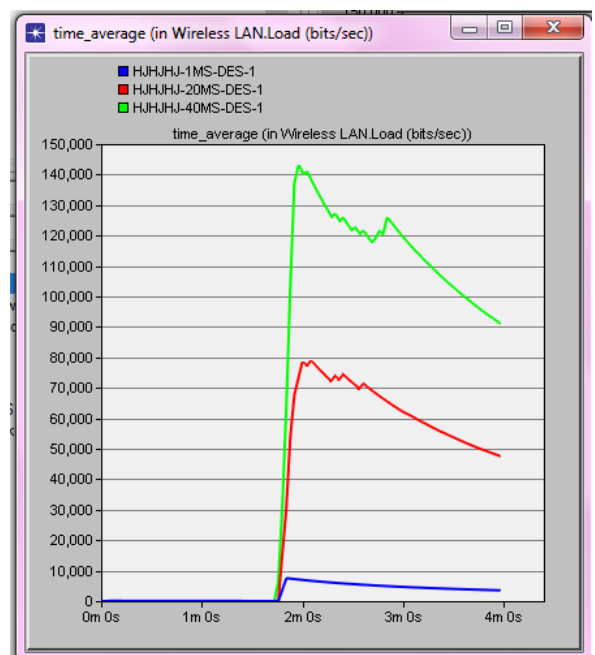


Figure 3.54 : la charge de (1MS 20MS 40MS)

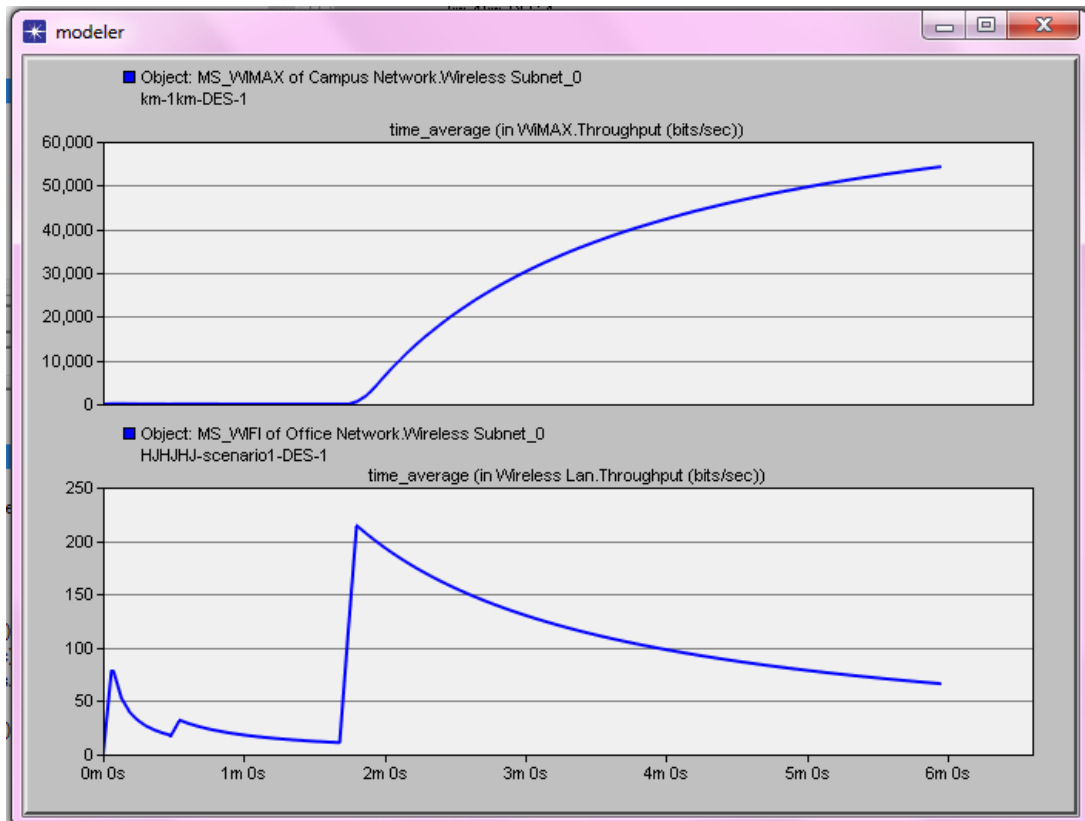
De toute évidence, le réseau de 40 MS a le plus long retard (delay) Figure 3.53 que prévu car nous avons 40 MS qui utilise ce réseau.

Sur les figures 3. (49.50), tous les MS fonctionnent en FT (charge lourde) de haute intensité ; Cependant, toutes les stations de travail ne sont pas transmises idéalement comme prévu.

Le débit de l'émetteur radio n'est pas seulement limité à l'application que nous utilisons ; il est également limité par la bande passante AP et le temps de retard. Plus de MS connectés au réseau utiliseront plus de bande passante ; par conséquent, le débit d'une station unique diminue en augmentant le nombre total de MS dans le réseau.

#### 4.5 Résultats de Projet 3 : Topologie WIFI\_WIMAX

Dans ce projet, l'outil de simulation OPNET 14.5 est utilisé pour comparer les performances de la VOIP sur le LAN sans fil IEEE 802.11 WIFI avec WIMAX sans fil IEEE 802.16.



**Figure 3.55 :** Comparaison en debit de MS (WiMAX et WIFI)

(les resultas séparé)

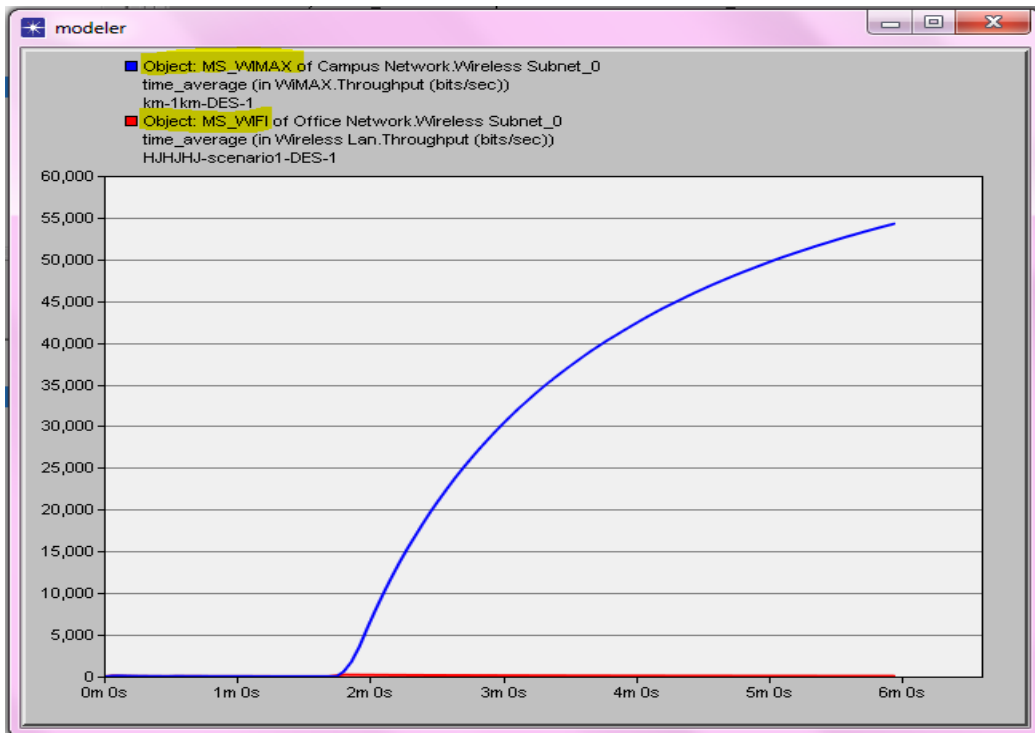


Figure 3.56 : Comparaison en debit de MS(WiMAX et WIFI)

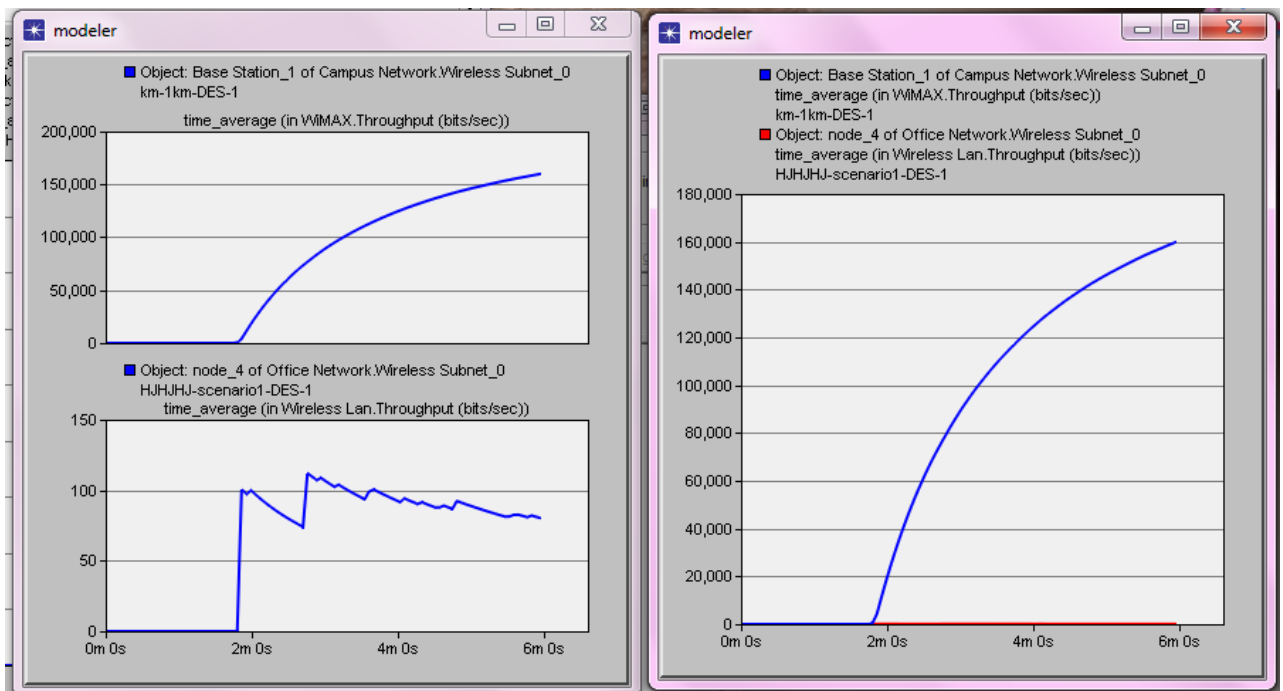
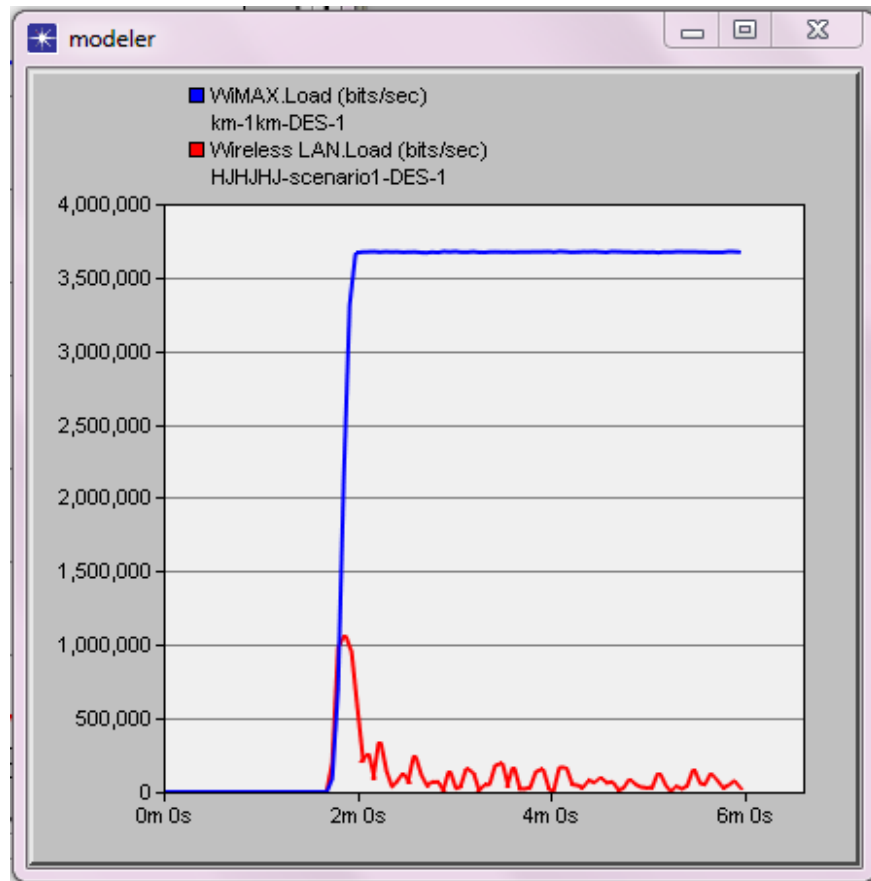


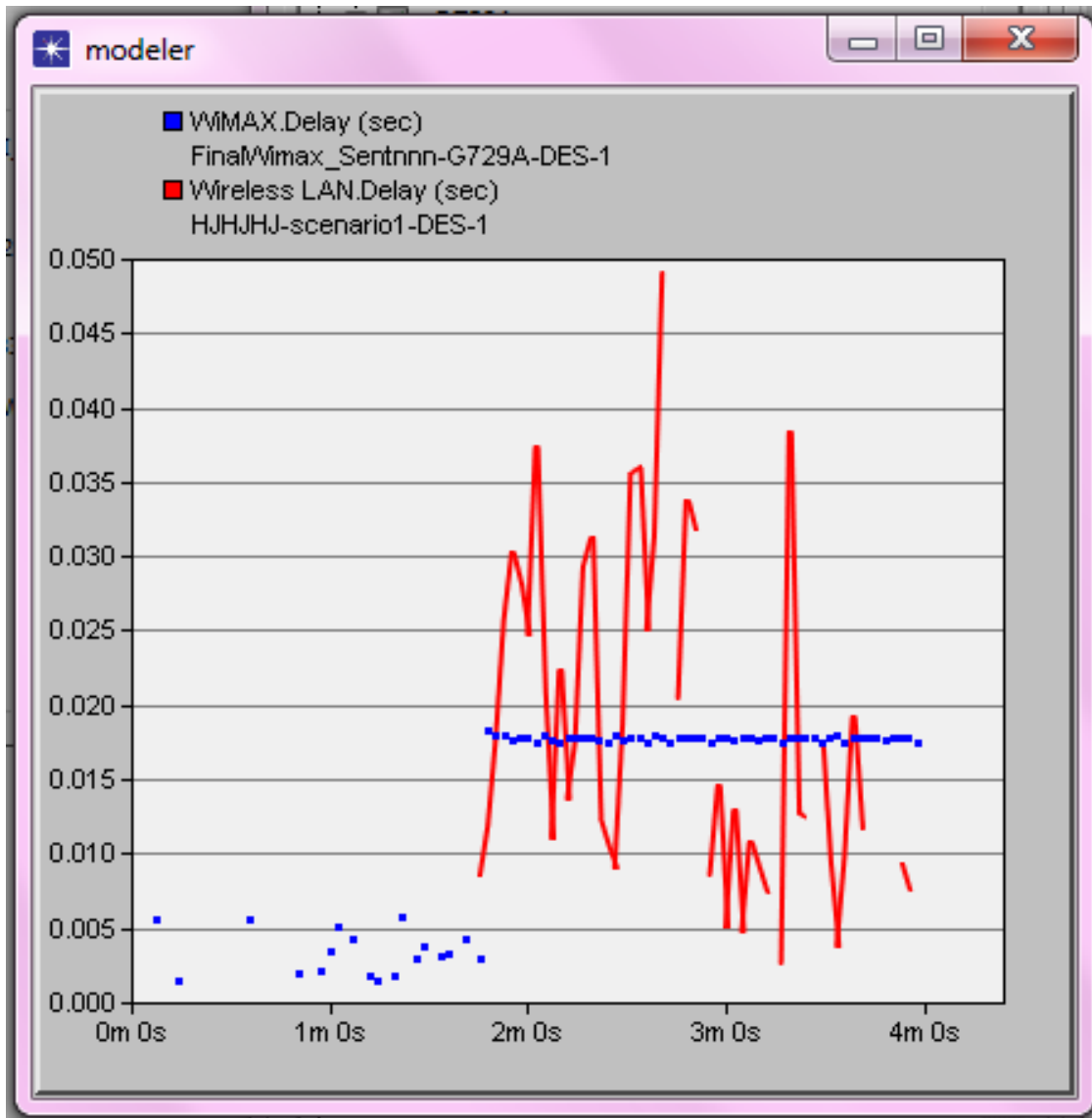
Figure 3.57 : Comparaison en debit de BS et AP



**Figure 3.58 :** Comparaison en load global (WiMAX et WIFI)

Comme on peut le voir dans la figure 3.55, le débit MS du WIFI est nettement inférieur au débit MS du WIMAX, car le débit WIFI est environ 200 bit/s tandis que le débit WIMAX atteint environ 55000 bit/s, Pareil pour débit de BS et AP.

Même chose en remarque que pour le débit du AP est très faible est presque nul devant le débit du BS de notre réseau WIMAX, ce qui montre la robustesse du réseau WIMAX par rapport au WIFI.



**Figure 3.59 :** le retard des statistiques globales de WiMAX et WiFi

Dans le cas des retards(delay), il est clair quel scénario a de meilleurs paramètres pour la prestation de services en temps réel. le bleu est une caractéristique du scénario retard wimax quasi constants autour de 0.020 s (les points bleus dans presque une ligne constante) sont montrés, alors que dans le deuxième scénario WIFI, le retard est plus grand (long) et très fluctuant (les points rouge dans un grand groupe) qui atteindre environ 0,050 s.

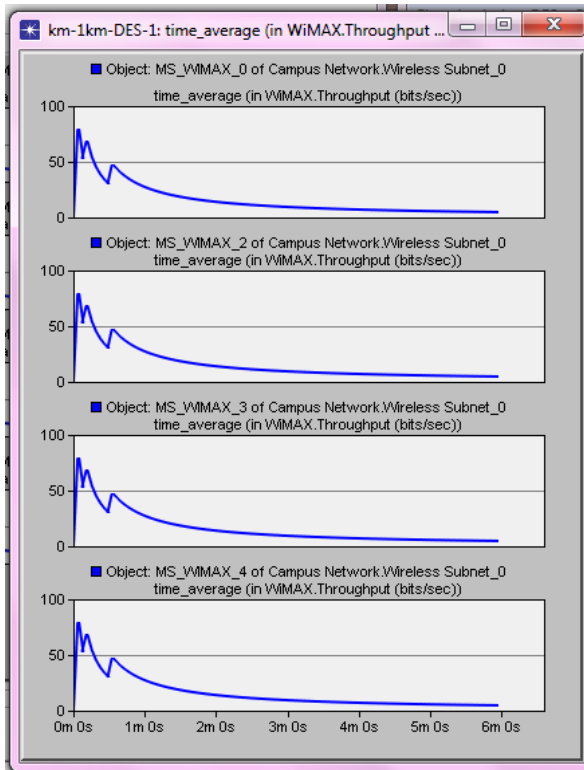


Figure 3.60 : Debit dans plusieurs MS  
\_wimax

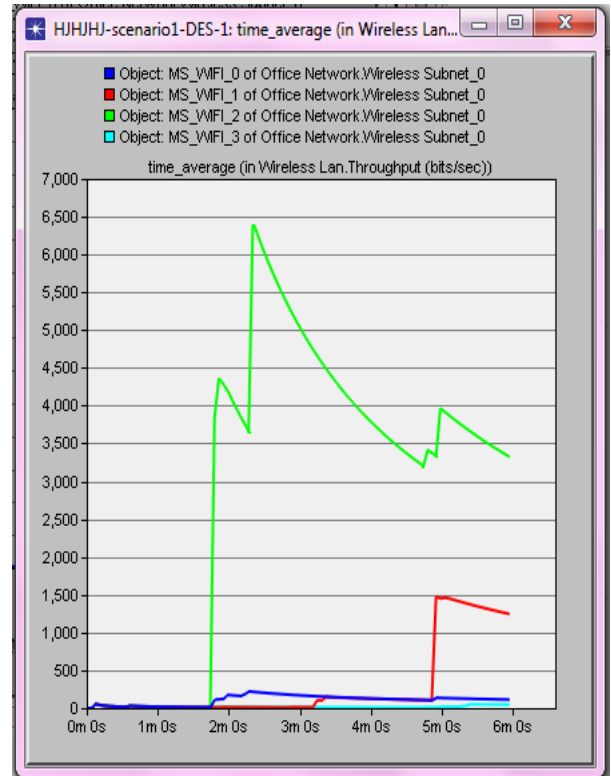


Figure 3.61 : Debit dans plusieurs MS \_wi

Afin de confirmer ce qui précède, nous avons trouvé les quatre utilisateurs d'un réseau WIMAX ont le même débit car nous avons déjà trouvé pour le WIMAX 8 utilisateurs avec le même débit, alors que les quatre utilisateurs en Wi-Fi n'ont pas le même débit et sa aussi confirme les résultats précédents, ce qui indique que pour le WIFI, pour un AP, si nous avons plus d'un utilisateur, ces utilisateurs n'ont pas le même débit, ce qui montre encore la robustesse du réseau WIMAX par rapport au réseau WIFI.

## 5. CONCLUSION

A l'aide des résultats obtenues à partir de différents scénarios WIMAX et WIFI, il a été constaté que à mesure que le nombre d'utilisateurs augmente, la quantité de données envoyées augmente (débit global et la charge globale). Et la couverture WIMAX maximale avec les paramètres sélectionnés est 25Km. L'effet de trajets multiples sur le lien WIMAX a été observé (Véhicule & Piéton).

D'après nos résultats, on a remarqué que pour le WIMAX on peut avoir jusqu'à 8 usagers qui fonctionnent avec le maximum du débit donné par la BS, alors que pour le WIFI nous avons remarqué qu'après un seul usager le débit commence à diminuer.

Dans mon scénario de projet, la gamme WIMAX était environ 50 fois plus que le lien WIFI, WIFI ont moins de perte de paquets dans un réseau de petite taille.

Le retard de mise en file d'attente dans le WIFI ne dépend pas de la mobilité de la MS, mais dans le cas du WIMAX, il augmente au fur et à mesure que MS se déplace. Il y a une perte de paquets en WIMAX lorsque MS commence à se déplacer avec une trajectoire. WIMAX peut gérer plus de charge par rapport au WIFI.

Différents paramètres tels que retard, la charge, débit affectent les performances du WIMAX dans une petite zone. Les paramètres de différents modèles tels que la station de base, le routeur et la station d'abonné ont été étudiés.

Le retard (Delay) pour la MS\_WIMAX et MS\_WIFI a été comparé et comme attendu le retard du MS\_WIMAX était moindre. Comme prévu WIFI fonctionne mieux dans une petite zone par rapport à WIMAX.



## ***Conclusion générale***

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

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

L'objectif principal de ce travail était d'étudier la technologie WIMAX et de dimensionner un réseau WIMAX mobile. Son installation moins couteuse, plus simple et rapide fait de cette technologie un concurrent à l'ADSL. De plus elle apporte de meilleures performances en termes de débit et de portée, Dans le premier chapitre nous avons commencé par présenter le réseau sans fil, son émergence et ses spécificités ainsi que l'évolution des normes 802.11 et 802.16x, nous sommes arrivés à la confirmation qu'aujourd'hui, l'existence d'une étroite relation entre le monde de la téléphonie mobile et celui ; fait l'unanimité de tous les acteurs principaux de l'évolution des réseaux sans fil. En effet Internet est construit sur des standards vivants et évolutifs apportant aux opérateurs la possibilité d'enrichir leurs services et offrant ainsi au grand public une riche expérience et une simplicité d'utilisation. La question principale est maintenant comment rendre l'accès à Internet omniprésent ? Ce qui impose la notion de convergence des différentes technologies d'accès réseau sans fil vers une architecture globale centralisée autour d'Internet.

Nous nous sommes intéressés à la convergence entre les réseaux sans fil Wifi et WiMAX. Pour mieux comprendre cette technologie, on a commencé par une présentation et une étude détaillée de son architecture en couche. Nous avons aussi illustré l'architecture d'un tel réseau et ses différents composants.

C'est de ce fait là qu'on a entamé le second chapitre et qui concerne la présentation le standard 802.16 du point de vue technique des différentes couches protocolaires, les techniques de multiplexage et de modulation

En troisième chapitre, nous avons mis en place un outil de dimensionnement d'un réseau WiMAX. Ainsi, nous avons étudié l'effet de certains paramètres : La technologie OFDM/SC, le gain d'antenne, La modulation, La puissance d'émission et Modèle de canal multi-trajets.

Ce projet nous a permis de montrer le processus de dimensionnement du réseau WIMAX en termes couverture et capacité, divers paramètres de performance de qualité de service tels que Delay, Load et Throughput, sont analysés sur différents scénarios WIMAX.

Par la suite, nous avons abordé le processus de dimensionnement d'un réseau WIMAX mais tout d'abord nous avons calculé la portée maximale d'une cellule en utilisant les modèles de propagation conformément au type de terrain d'étude. Après cette étape nous avons étudié un modèle de trajet, densité d'abonnés, une architecture et dimensionnement du réseau.

Enfin, nous avons comparé avec la technologie WIFI, Cela montrera jusqu'où cette technologie a évolué. Les différents modèles de propagation susceptible d'être utilisés lors de la planification d'un réseau WIMAX ont été présentés.

Ce travail nous a permis de mieux cerner cette technologie, de comprendre son dimensionnement qui est lié au processus de planification de la couverture. Il nous a aussi permis de travailler dans des conditions de précision et de rigueur où toutes les décisions doivent suivre une certaine logique.

Ce projet présentait plusieurs défis, tels que la génération d'un réseau WIMAX fonctionnel dans OPNET, le projet a été fait dans OPNET version 14.5. La définition d'attributs pour rendre le réseau réaliste. En outre, l'apprentissage des aspects techniques de WIMAX et de la VOIP permet de déterminer un bon ensemble de scénarios à exécuter.

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

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

Les perspectives de notre travail sont multiples et variés. Par exemple, de nombreuses améliorations peuvent être ajoutées à la stratégie de couplage pour satisfaire des buts alternatifs comme :

- ✚ Optimise le réseau en diminué effet de l' hondover.
- ✚ Codecs audio impact sur la qualité de la VOIP sur la base d'IEEE802.16e Prise en compte de la transmission IP mobile.
- ✚ Simulation de réseau WIMAX de l'OPNET pour une raison d'augmentation de débit.
- ✚ Simulation d'un réseau hybride qui contant un réseau WIMAX inclut un réseau wifi.
- ✚ Créer et simuler un réseau Wimax à Biskra en utilisant un logiciel OPNET.
- ✚ Autres...

Pour finir, nous concluons que nous avons répondu au but que nous sommes fixées au tout début dans cette thèse, en contribuant par une solution simple et efficace au couplage et la convergence des différentes technologies. Nous sommes également parvenues à acquérir un niveau de maîtrise satisfaisant de l'outil de simulation OPNET que nous estimons comme un outil important dans nos futurs travaux de recherche.

## Annexe

Puisque on est à court des livres et les références pour une explication explicite pour la création d'un réseau sur l'interface de logiciel de simulation OPNET qui est l'un des meilleurs logiciels utilisés dans les études des réseaux filaire et des réseaux sans fil.

C'est pourquoi on a utilisé cette annexe pour mettre en évidence les étapes de configuration utilisée ou préalable dans des scénarios ou cours de notre étude réseau WIMAX dans ce mémoire.

L'idée de l'architecture du scénario qu'on veut utiliser dans cette annexe sera sous la forme suivante.

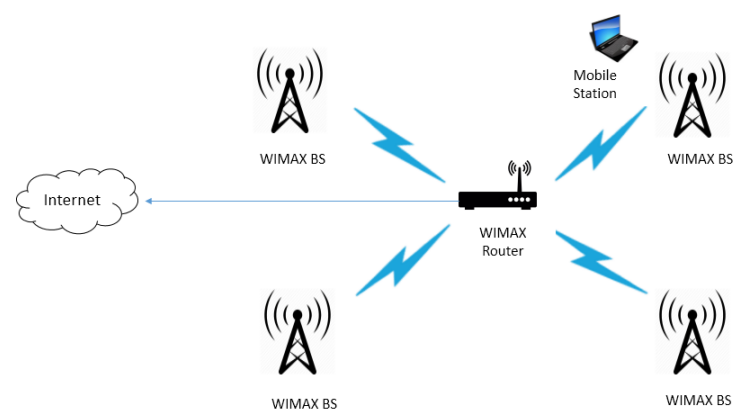


Fig1 : l'architecture du scénario WIMAX

On diffusera quatre BS lié avec Routeur et le Routeur relié au serveur. L'idée tourne autour du MN qui est en mouvement avec les quatre cellules, sa connexion avec les 4 BS et effectuée une communication via internet VOIP ou cours de la transition MN entre les 4 cellules se produira ce qu'on appelle Handover, on remarque l'effet de handover sur le réseau WIMAX

## ❖ D'abord nous ouvrons un nouveau projet

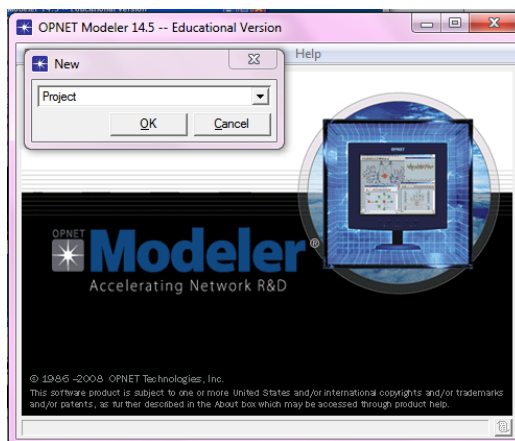


Fig2 : l'interface de logiciel de simulation OPNET

## ❖ l'appelons projet WIMAX\_ANNEX

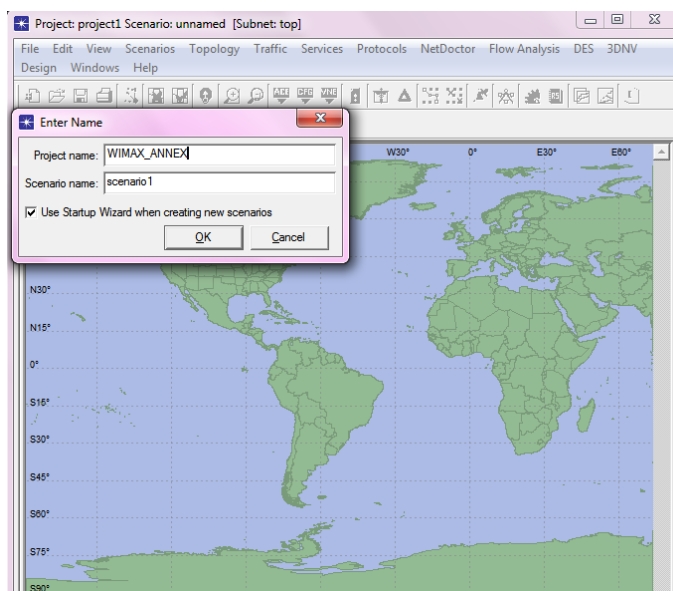


Fig3 : Nom du projet

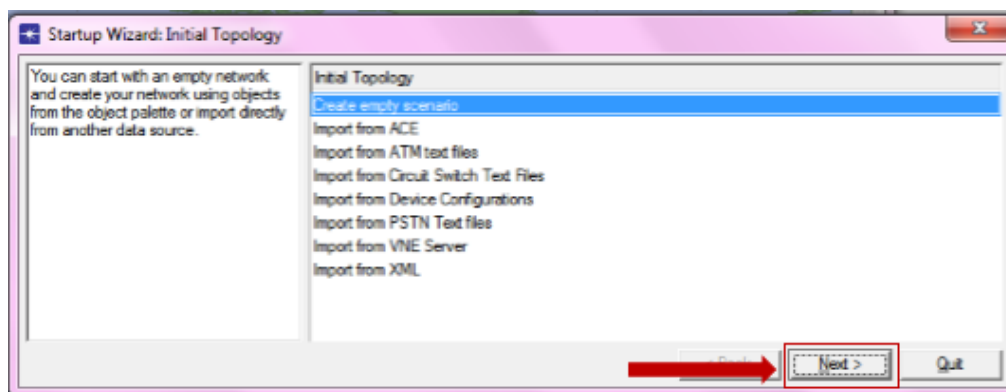


Fig4 : topologie initiale

## ❖ choisissez la zone qui correspond au type de réseau

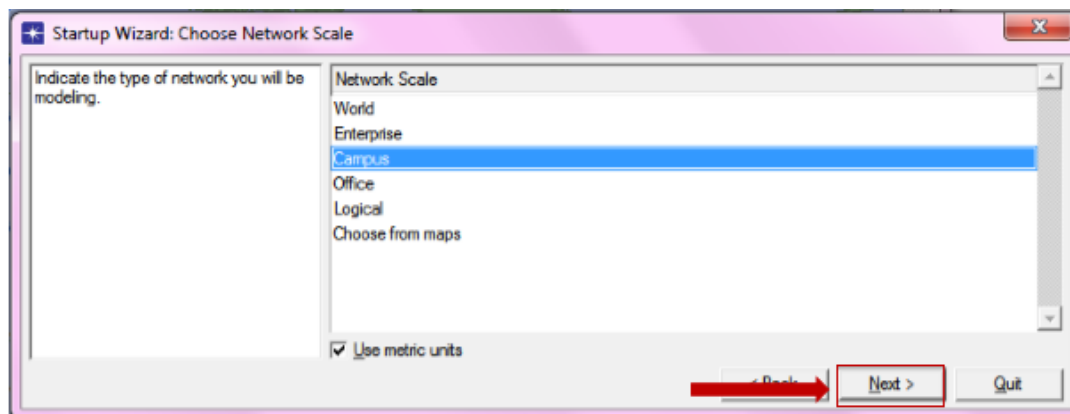


Fig5 : choisissez l'échelle du réseau

## ❖ Ensuite, nous choisissons taille

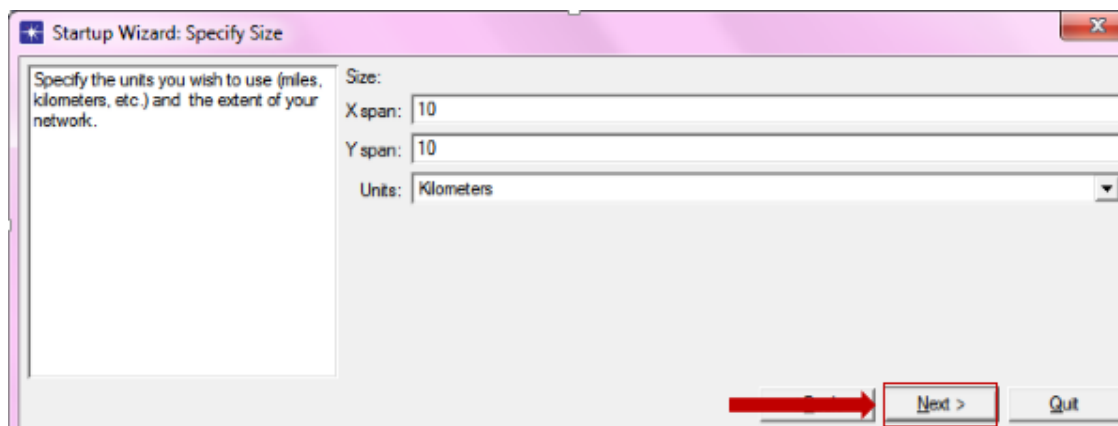


Fig6 : spécifier la taille

## ❖ Activer la technologie que nous utilisons WIMAX adv

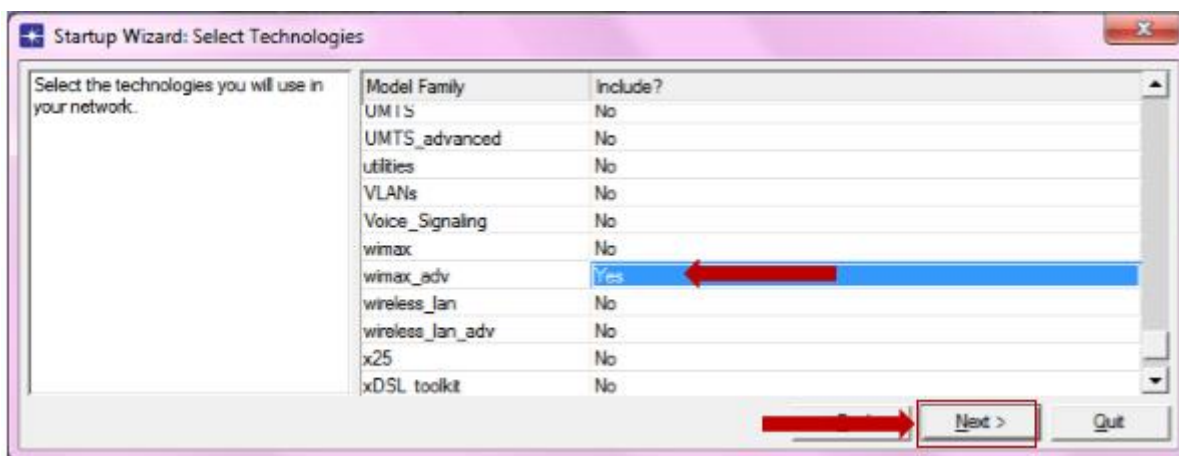


Fig7 : sélectionnez la technologie

❖ Appuyez sur le bouton Terminer

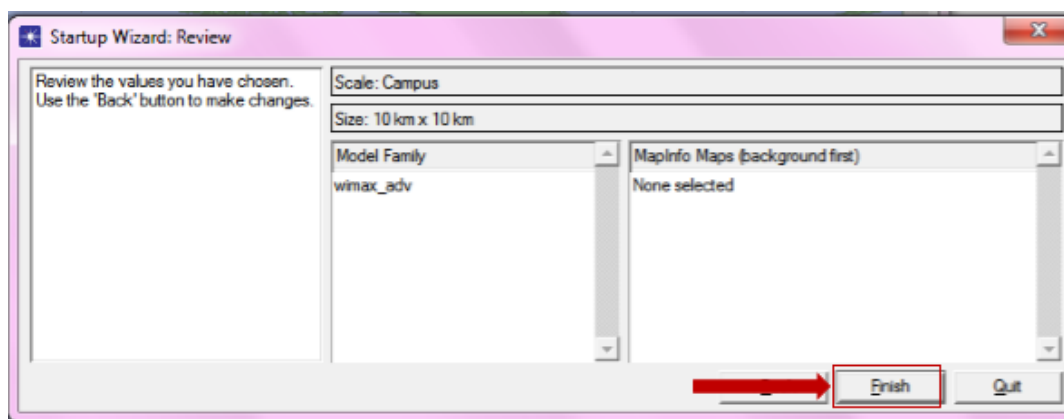


Fig8 : la revue

Ici, nous montrons l'espace de travail des dimensions que nous avons sélectionnées Cliquez sur la **Topologie** pour publier le réseau WIMAX dans l'espace de travail.

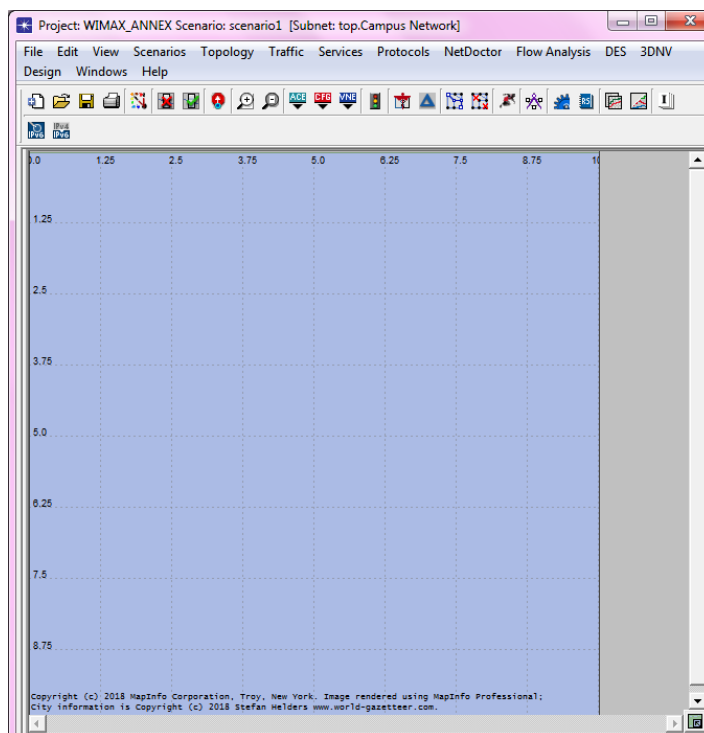


Fig9 : Espace de travail

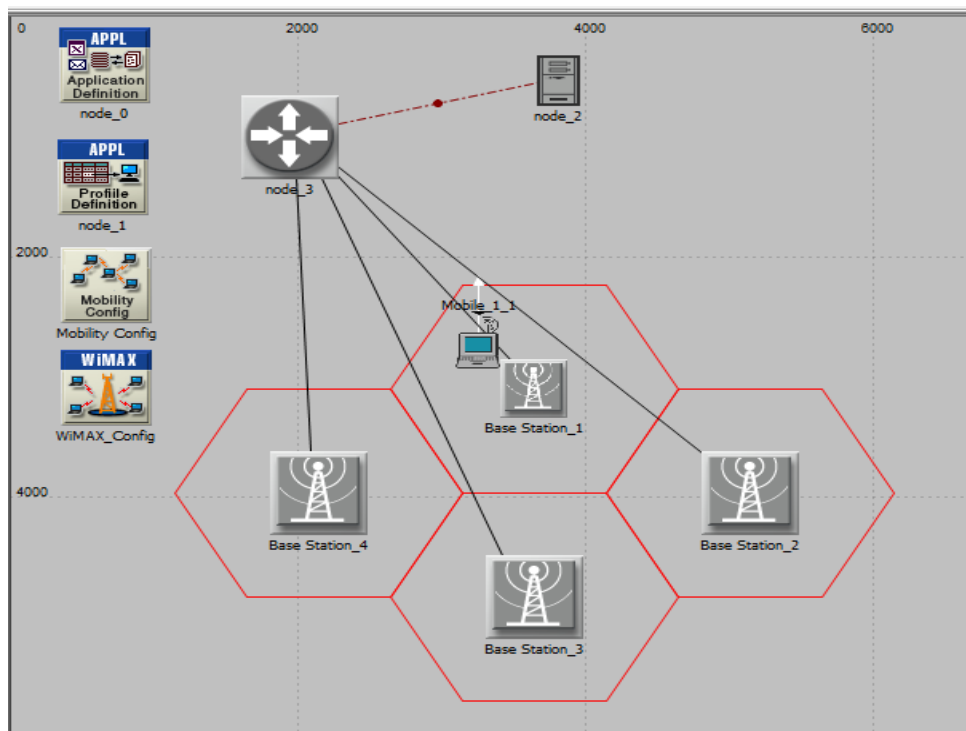


Fig10 : La topologie WIMAX

Lorsque les connexions de câbles seront terminées entre les équipements de réseau, Ici nous commencerons la configuration, car nous étudierons le mouvement mobile que nous souhaitons sur les quatre cellules. Nous choisissons application VOIP.

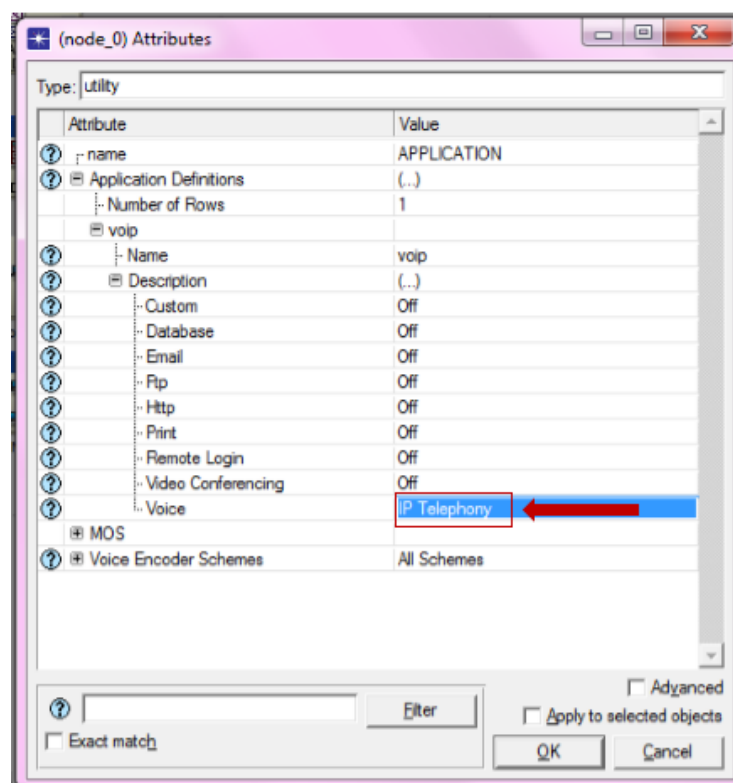


Fig11 : application VOIP



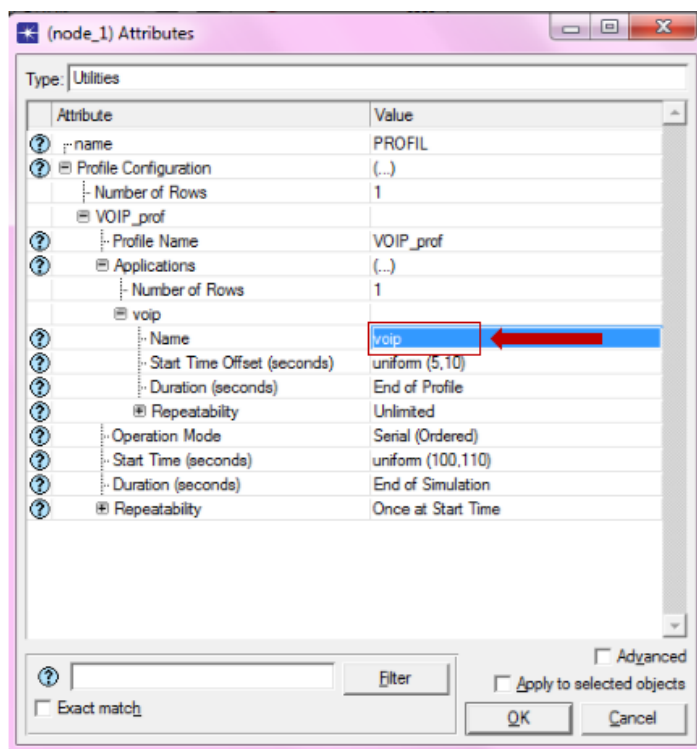


Fig12 : Profil WIMAX

❖ Configurations WIMAX de BS

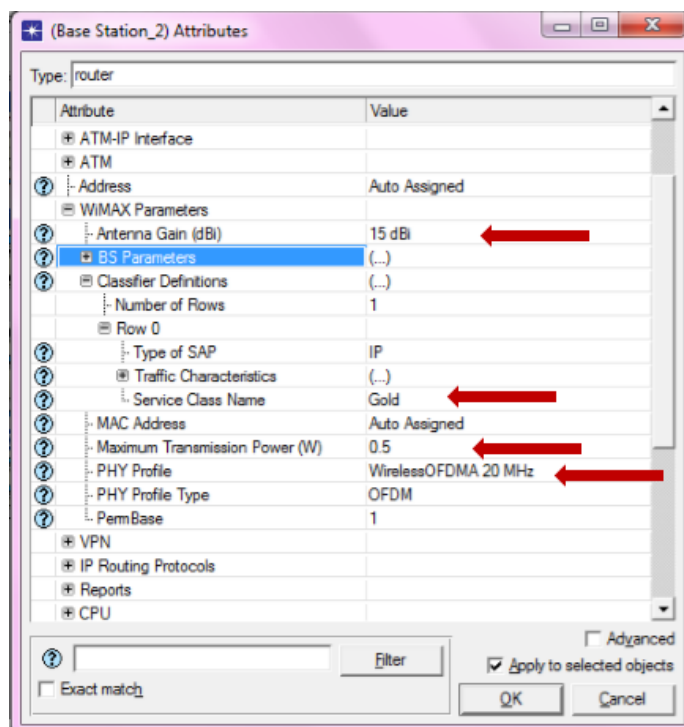


Fig13: Configurations WIMAX de BS

## ❖ Configurations WIMAX de MS

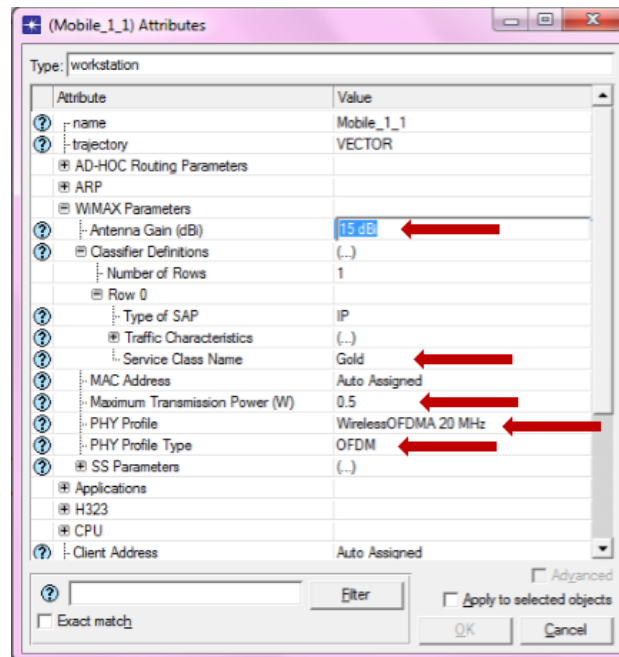


Fig14: Configurations WIMAX de BS

Pour tous les paramètres de configuration on doit choisir les mêmes paramètres pour BS et mobile pour avoir les meilleurs résultats.

## ❖ Définition d'application que nous avons utilisée sur mobile nœud

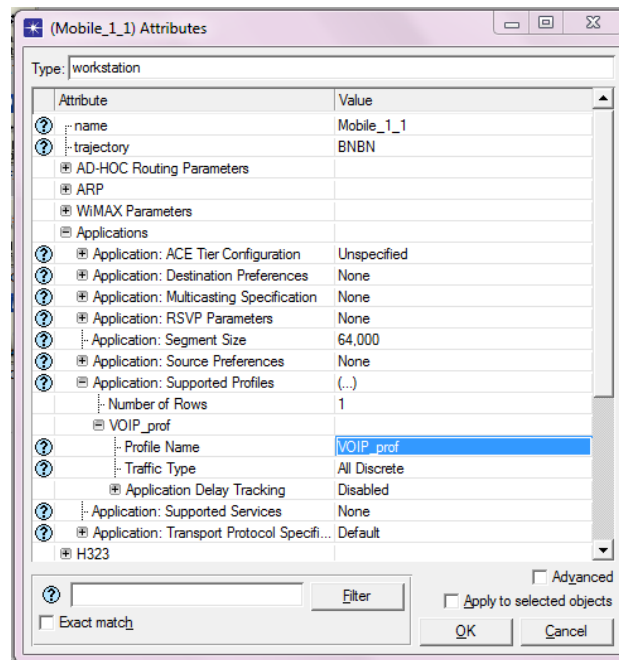


Fig15 : Définition d'application sur mobile nœud

Au cours du mouvement du Mobile, il fera l'appel avec un serveur, que nous devons le configurer.

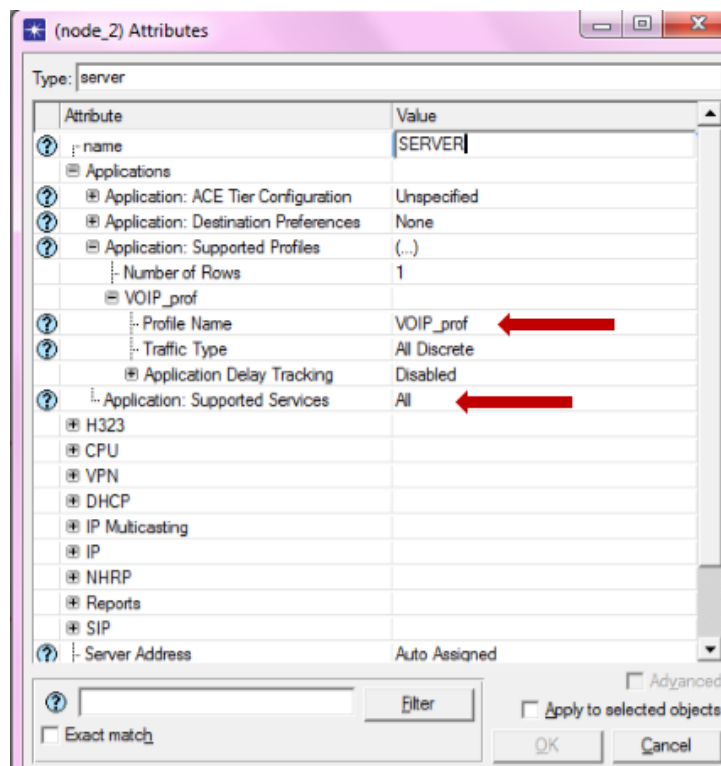


Fig16 : Configurations WIMAX de Server

- ❖ Le temps d'exécution est de 50 m

	X Pos (m)	Y Pos (m)	Distance (m)	Altitude (m)	Traverse Time	Ground Speed	Wait Time	Accum Time	Pitch (degrees)	Yaw (degrees)
1	...2.379713	...7.322541	n/a	0.000000	n/a	n/a	00.00s	00.00s	Autocomputed	Autoc
2	...8.776695	...0.983812	1,972.160038	0.000000	11m49.98s	6.213691	1m00.00s	12m49.98s	Autocomputed	Autoc
3	...6.565257	...3.773454	2,105.669143	0.000000	12m38.04s	6.213719	1m00.00s	26m28.02s	Autocomputed	Autoc
4	...5.749721	...5.635376	1,901.845521	0.000000	11m24.66s	6.213752	1m00.00s	38m52.68s	Autocomputed	Autoc
5	...2.204955	...0.578204	1,764.554693	0.000000	10m35.24s	6.213709	1m00.00s	50m27.92s	Autocomputed	Autoc

Fig17 : éditer l'information de trajectoire

- ❖ Après sa enfin l'exécution de la simulation pour avoir les résultats.

**Références Bibliographiques**

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau\\_sans\\_fil](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_sans_fil)
- [2] M.HADDACHE, « Cours sur les réseaux sans fil », université de Bouira, 2010/2011.
- [3] Omar Cheikhrouhou, Sécurité des réseaux ad hoc, Université de Sfax, 2004.
- [4] Belabdelli Abdelheq et Oukaz Mokhtar, Dimensionnement D'un Réseau Sans Fil Wifi, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2012.
- [5] Mokri Karima et Ikram Sidhom Zineb, Evaluation des performances du réseau WIFI en utilisant le simulateur OPNET Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2015
- [6] Kherbache Zeneb et Laribi Amina, Etude de (QOS) dans les réseaux WIFI, Université de Telemcen, 2011.
- [7] MERAH Hocine, Conception d'un MODEM de la quatrième génération (4G) des réseaux de mobiles à base de la technologie MC-CDMA., Université de Setif, 2012.
- [8] [http://www.icriq.com/fr/productique\\_tfp.html/-/asset\\_publisher/MeX1/content/les-reseaux-sans-fil/maximized](http://www.icriq.com/fr/productique_tfp.html/-/asset_publisher/MeX1/content/les-reseaux-sans-fil/maximized)
- [9] <https://reseau-informatique.prestataires.com/reseau-wifi-avantages-et-inconvenients>.
- [10] D. Pareek, « WiMAX Taking Wireless in the Max », Publié par Auerbach Publications Taylor & Francis Group, 2006.
- [11] Davor Males, ‘‘ WIFI par la pratique ‘‘ 2eme Edition, 2002,2004.
- [12] <https://www.supinfo.com/articles/single/365-modele-osi-modele-tcp-ip>
- [13] Roll Fezzy, l'étude du WiMAX comme technologie d'accès haut débit à Internet, Ecole africaine de développement, Ingénieur 2008.

[14] <http://fr.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

[15] Mellouk Sanna, Etude et dimensionnement d'un réseau WiMAX fixe, Université de Tlemcen, 2013/2014.

[16] <http://molecularvoices.molecular.com/2007/Wimax-redefining-connectivity>

[17] OULD BAMBA MOHAMED, ABDEL FETTAH, ''Développement d'un Outil de planification

[18] PFE Maatalla Moez Sup'Com juin 2006

[19] BENHAMZA AISSA, Institut National des Télécommunication set des Technologies de l'Information et de la Communication, Projet de Fin d'Etude pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état 'Planification d'un réseau WIMAX mobile'2009.

[20] <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/WiMAX/fr-fr/>

[21] [http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/aurelie\\_schell/caracteristiques\\_tech.php](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/aurelie_schell/caracteristiques_tech.php)

[22] [www.ieee802.org/16](http://www.ieee802.org/16)

[23] <http://www.futura-sciences.com/>

[24] <http://www.wimaxforum.org/news/downloads/WiMAXNLOSgeneralversionaug04.pdf>

[25] HWAS MOHAMED WAJIH, ''Etude et dimensionnement d'un réseau WiMAX dans un concept IMS'', Rapport de projet de fin d'étude, école supérieur des télécommunications de Tunis, 2007.

[26] [www.lirmm.fr/~laffargue/teaching/PPD/réformes\\_fiscales](http://www.lirmm.fr/~laffargue/teaching/PPD/réformes_fiscales)

[27] EL HAJJ Paul DAHBI Nabil, ETUDE DE LA TECHNOLOGIE WIMAX MOBILE, Université de Telecom SudParis, 20/01/2010.

[28] <https://www.01net.com/actualites/quelle-est-la-difference-entre-le-wi-fi-et-le-wimax-515300.html>

[29] Sourangsu Banerji, Rahul Singha Chowdhury, Wi-Fi & WiMAX: A Comparative Study, Department of Electronics & Communication Engineering, RCC-Institute of Information Technology, India, 2013.

