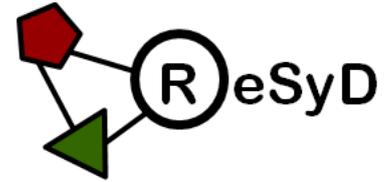


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Mira Abderrahmane de Bejaia



Faculté des Sciences Exactes, Département d'Informatique
ÉCOLE DOCTORALE ReSyD (Réseaux et Systèmes Distribués)

par

MERABET Adil

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE MAGISTÈRE EN INFORMATIQUE

INGÉNIERIE ET OPTIMISATION DU RÉSEAU
MOBILE POUR UNE COUVERTURE MAXIMALE
AVEC MINIMISATION D'ANTENNES

Jury :

DAHMANI Abdelnasser	Professeur, Université de Bejaïa	Président
KHIREDDINE Abdelkrim	MCA, Université de Bejaïa	Rapporteur
TARI Abdel Kamel	MCA, Université de Bejaïa	Rapporteur
BEGHDAD Rachid	MCA, Université de Bejaïa	Examineur
MELIT Ali	Professeur, Université de Jijel	Examineur

Table des matières

Tables des matières	IV
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures	IX
Remerciements	XII
Abstract	XIII
Introduction générale et problématique	1
Chapitre I : Les réseaux cellulaires	
Introduction	4
I.1- Définition	4
I.2- L'évolution des systèmes cellulaires	5
I.2.1- La première génération : NMT, AMPS,...	5
I.2.2- La deuxième génération : IS-95, DAMPS, PDC, GSM,...	5
I.2.3- La troisième génération : UMTS,...	6
I.2.4- La quatrième génération	6
I.3- Taille des cellules	6
I.4- Réutilisation du spectre	7
I.5- Formation des clusters	9
I.6- Les schémas d'allocation de ressources	11
I.6.1- FDMA (Frequency Division Multiple Access)	11
I.6.2- TDMA (Time Division Multiple Access)	12
I.6.3- CDMA (Code Division Multiple Access)	12
I.6.4- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	13
I.6.5- SDMA (Space Division Multiple Access)	14
I.7- GSM (Global System for Mobile Communication)	14
I.7.1- Architecture du système GSM	15

I.7.1.1- Stations mobiles (MS)	15
I.7.1.2- Réseau Radio – Base Station Subsystem (BSS)	16
I.7.1.3- Réseau de Commutation – Mobile Switching Subsystem (MSS)	17
I.7.1.4- Réseau de supervision – Operation and Maintenance Subsystem (OMS)..	18
I.7.2- Les interfaces et protocoles d'un système GSM	18
I.7.3- L'établissement d'un appel téléphonique en GSM	20
I.8- GPRS (General Packet Radio Service)	20
Conclusion	21

Chapitre II : La propagation des ondes

Introduction	22
II.1- Rappel sur les ondes électromagnétiques	23
II.2- Les Antennes	24
II.2.1- Principe	24
II.2.2- Antenne isotrope	25
II.2.3- Caractéristiques des antennes	26
II.2.3.1- Puissance de rayonnement d'une onde: P_r	26
II.2.3.2- Directivité	26
II.2.3.3- Gain	27
II.2.4- Les différents types d'antennes pour station de base	28
II.3- La propagation des ondes	29
II.3.1- L'atmosphère	29
II.3.2- Modes de propagation	30
II.3.2.1- Propagation directe	30
II.3.2.2- Propagation par ondes de sol	31
II.3.2.3- Réflexions ionosphériques	31
II.3.2.4- Propagation E – sporadique	32
II.3.3- Bandes de fréquences	32
II.3.4- Effets sur la propagation du signal	33
II.3.4.1- L'absorption	34
II.3.4.2- Les réflexions	34
II.3.4.3- Les réfractions	34
II.3.4.4- Les Difractions	35
II.3.4.5- Phénomène multi-trajet	36
II.3.4.6- Zone de silence et Zone d'interférences	36

Conclusion	37
 Chapitre III : Les Standards Radios	
Introduction	38
III.1- Modèle OSI de l'ISO	38
III.2- Les interfaces radio dans l'IEEE 802	39
III.2.1- Le standard IEEE 802.11	40
III.2.2- Le standard IEEE 802.15	42
III.2.3- Le standard IEEE 802.16	42
III.3- Motivation du standard choisi «IEEE 802.16»	43
III.4- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	44
III.4.1- Multi-Porteuse et notion d'orthogonalité	45
III.4.2- Multi-trajet	47
III.4.3- Schéma d'un système de transmission OFDM	50
III.5- MIMO (Multiple Input Multiple Output)	51
III.6- Techniques de duplexage TDD et FDD	52
III.7- Accès Multiple sur OFDM	53
III.7.1- OFDM-TDMA	53
III.7.2- OFDM-FDMA (OFDMA)	54
III.7.3- SOFDM (Scalable OFDMA)	54
III.8- Les couches de l'IEEE 802.16	55
III.8.1- La couche MAC	55
III.8.2- La couche PHY	56
Conclusion	57
 Chapitre IV : La conception de réseau	
Introduction	59
IV.1- L'architecture du réseau	60
IV.1.1- L'architecture d'une cellule	60
IV.1.1.1- Composants de la cellule	60
IV.1.1.2- Modèle de la cellule	61
IV.1.1.3- IP-BTS	63
IV.1.2- L'architecture de plusieurs cellules	63
IV.1.3- Routage entre les cellules	64
IV.1.3.1- Station de base	64

IV.1.3.2- Pont (bridge)	64
IV.1.3.3- Routeur	65
IV.1.4- L'interconnexion des sous-réseaux	66
IV.1.4.1- Utiliser des ponts	66
IV.1.4.2- Utiliser un accès satellitaire	67
IV.1.4.3- Utiliser la fibre optique	68
IV.1.5- Architecture globale du réseau	70
IV.2- Circulation du trafic dans le réseau	71
IV.2.1- Le dialogue entre les équipements	71
IV.2.2- Les applications	73
IV.2.2.1- La téléphonie	73
IV.2.2.2- L'accès à l'internet	74
IV.2.2.3- Visioconférence	75
Conclusion	76
 Chapitre V : L'implémentation sous Opnet	
Introduction	77
V.1- Présentation d'Opnet Modeler	77
V.2- Modèles de simulation	80
V.2.1- Architecture globale du réseau	80
V.2.2- Architecture d'un sous-réseau	81
V.2.3- Architecture d'une station de base	82
V.3- Circulation du trafic	83
V.3.1- La téléphonie	84
V.3.2- L'internet	90
V.3.3- Vidéo conférence.....	92
Conclusion	93
 Conclusion et perspectives	 94
 Bibliographie	 97

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les interfaces d'un réseau GSM	19
Tableau 2.1 : Applications des fréquences les plus connues	23
Tableau 2.2 : Les couches de l'ionosphère	29
Tableau 3.1 : Caractéristique de l'IEEE 802.16e-2005	56
Tableau 5.1 : Quelques caractéristiques du système	83
Tableau 5.2 : Les valeurs recommandées par l'ITU	84
Tableau 5.3 : La description du MOS par l'ITU	85
Tableau 5.4 : Comparaison des codages principaux	85

Liste des figures

Figure 1.1 : L'évolution de la technologie cellulaire	5
Figure 1.2 : Les différentes capacités cellulaires	7
Figure 1.3 : Une division géographique d'une ville	8
Figure 1.4 : Représentation des cellules	9
Figure 1.5 : Formation des clusters et réutilisation des fréquences dans les réseaux cellulaires « K=3 et K = 7 »	9
Figure 1.5 : FDMA (Frequency Division Multiple Access)	11
Figure 1.6 : TDMA (Time Division Multiple Access)	12
Figure 1.7 : CDMA (Code Division Multiple Access)	13
Figure 1.8 : OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	14
Figure 1.10 : Architecture d'un réseau GSM	15
Figure 1.11 : Composants d'une station mobile	16
Figure 1.12 : Les interfaces d'un réseau GSM	18
Figure 1.13 : L'architecture d'un réseau GPRS	20
Figure 2.1 : Onde Electromagnétique OEM	24
Figure 2.2 : Principe de transmission	25
Figure 2.3 : Antenne isotrope	25
Figure 2.4 : Signification de la directivité	26
Figure 2.5 : Couches atmosphériques mises en jeu en fonction de la fréquence d'émission	30
Figure 2.6 : Propagation en ligne de vue	30
Figure 2.7 : Propagation par ondes de sol	31
Figure 2.8 : Modes de réflexions ionosphériques	31
Figure 2.9 : Facteurs affectant la propagation des ondes	33
Figure 2.10 : La réflexion d'une onde électromagnétique	34
Figure 2.11 : La réfraction d'une onde électromagnétique entre deux milieux avec indices de réfraction différents	35
Figure 2.12 : La diffraction d'un signal autour d'un obstacle	35
Figure 2.13 : Exemple de réception d'un signal multi-trajets	36

Figure 2.14 : Zone de silence	36
Figure 2.15 : Zone d'interférence	36
Figure 3.1 : Les communications entre couches dans le modèle OSI	39
Figure 3.2 : Modèle OSI	39
Figure 3.3 : Types des interfaces radio	40
Figure 3.4 : La portée de l'IEEE 802.16 (selon le type de l'antenne)	44
Figure 3.5 : Sous-porteuses OFDM	45
Figure 3.6 : Comparaison de l'OFDM avec l'FDMA	46
Figure 3.7 : Le gain de la technique OFDM en terme de la bande passante	46
Figure 3.8 : Les interférences inter symboles (ISI)	48
Figure 3.9 : L'intégration de l'intervalle de garde dans le signal	49
Figure 3.10 : Schéma d'un système OFDM	51
Figure 3.11 : La technique MIMO avec augmentation de la qualité	52
Figure 3.12 : La technique MIMO avec augmentation du débit	52
Figure 3.13 : Techniques de duplexages TDD et FDD	53
Figure 3.14 : OFDM-TDMA	53
Figure 3.15 : OFDM-FDMA	54
Figure 3.16 : SOFDMA	54
Figure 3.17 : Modèle référence des couches de l'IEEE 802.16	55
Figure 3.18 : Adaptation du codage à la qualité de communication	57
Figure 4.1 : Les principaux composants d'une cellule	60
Figure 4.2 : Une cellule tri-sectorisée	62
Figure 4.3 : Modèle de l'architecture d'une cellule	62
Figure 4.4 : Modèle d'une architecture multicellulaire	63
Figure 4.5 : Les différentes interfaces d'une station de base	64
Figure 4.6 : Mécanisme point to point (un pont ou bridge)	65
Figure 4.7 : Positionnement du routeur entre les cellules	66
Figure 4.8 : Interconnexion des sous-réseaux	67
Figure 4.9 : Réseau de fibres optiques en Algérie (Algérie Telecom)	70
Figure 4.10 : Architecture du réseau	71
Figure 4.11 : Le dialogue entre BS et SS pour établir une connexion	72
Figure 4.12 : La téléphonie	74
Figure 4.13 : L'accès à l'internet	75
Figure 4.14 : La visioconférence	76
Figure 5.1 : Modélisation hiérarchique dans l'environnement Opnet	79

Figure 5.2 : L'implémentation du réseau sous Opnet	80
Figure 5.3 : L'architecture d'un sous-réseau	81
Figure 5.4 : L'architecture d'un routeur	82
Figure 5.5 : Les couches du standard IEEE 802.16 sous Opnet	82
Figure 5.6 à Figure 5.20 : Résultats de l'implémentation	86

Remerciements

Je loue Dieu de la grâce qu'il m'a faite en me donnant la santé, la patience et la détermination sans lesquelles je n'aurais jamais pu porter mon projet à son terme.

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Abdelkrim KHIREDINE, pour avoir encadré cette thèse et pour les bonnes conditions de travail et d'encadrement. Je le remercie pour son soutien, sa disponibilité, et surtout pour sa confiance.

Je remercie très sincèrement Monsieur Tari Kamel, responsable de la formation ReSyD, chef de département d'informatique de l'université de Bejaia et Co-directeur de cette thèse pour son aide, ses conseils et sa disponibilité durant ces dernières années. Un merci bien distingué à mes enseignants de l'école doctorale ReSyD.

J'adresse ma profonde reconnaissance au président de jury pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse, ainsi les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Il serait impossible de ne pas citer et remercier Kahlessenane Fares, Kidar Ali et tous les étudiants de l'école doctorale ReSyD pour l'environnement de travail très agréable durant ces deux dernières années. Je tiens également à associer ces remerciements à l'ensemble de mes amis kimouche Abd el-Kader et Labiad Ali qui m'auront soutenu et supporté pendant tout ce temps, que ce soit durant ces deux dernières années ou avant.

Plus largement, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes celles et ceux qui m'ont apportée leur soutien, leur amitié ou leur expérience tout au long de ce travail de thèse ou avant.

Finalement, je tiens tout particulièrement à remercier ma famille, notamment mes parents pour leurs encouragements et leur soutien constant durant toutes ces années d'étude. Sans vous je n'aurais jamais pu arriver à ce stade.

Abstract

The applications of wireless communications never cease to grow and always ask more throughput, mobility and quality. That's why last years were marked by the rise of a revolution in computer networks and wireless systems. By combining the connectivity and mobility, new technologies are about to fundamentally change the information systems and infrastructures.

In this document, we propose a next generation network design for Algeria based on the IEEE 802.16 standard and its various technologies in order to minimize the number of antennas within the city and maximize coverage by connecting several cities together.

Keywords: Network, Cellular, IEEE 802.16, OFDM.

Introduction générale et problématique

Introduction et problématique

Ces dernières années ont été marquées par la montée en puissance d'une véritable révolution des réseaux informatique : celles des systèmes sans-fil. En alliant la connectivité et la mobilité, ces nouvelles technologies sont en passe de modifier en profondeur les systèmes d'information et leurs infrastructures aussi sûrement et durablement que l'avènement de la téléphonie mobile a impactée le monde de télécom.

Les applications de communications sans fil ne cessent jamais de se développer. Aujourd'hui, il est possible d'accéder à l'internet dans des espaces publics comme les aéroports, les centres de commerces, les jardins, les restaurants et les hôtels, et même de regarder la télévision sur les téléphones portables.

La problématique repose sur l'absence d'un réseau sans fil national en Algérie qui permet aux utilisateurs de rester connectés en permanence, c'est ça ce qui nous pousse à proposer une conception prend en compte les nouvelles technologies pour répondre aux besoins des entreprises et des citoyens, surtout, pour l'accès à l'internet.

Sur le terrain en Algérie et à part le réseau *GSM*, le domaine des communications sans fil est très limité où les réseaux ne se trouvent que dans certains universités et quelques sociétés ou entreprises privés.

L'état actuel de notre pays, qui est mal classé même avec les pays voisins, nécessite d'affronter le domaine en utilisant les nouveaux standards et technologies disponibles pour monter un réseau appartient à la nouvelle génération, et qui permet aussi d'améliorer sensiblement les différents secteurs, surtout le secteur économique et éducatif.

L'objectif donc est d'investir dans l'infrastructure des réseaux de la troisième et la quatrième génération, avec des équipements qui supportent les communications à haut débit. Le système doit baser sur les standards radios afin de substituer les réseaux filaires en offrant des gammes de services avec des débits comparables, mais avec l'avantage d'une mobilité supplémentaire même si elle est faible par rapport à celle des réseaux cellulaires mobiles (*GSM*).

Actuellement, un des enjeux dans le monde des télécommunications est de savoir si les réseaux sont capables de satisfaire certaines exigences, se feront sur des bases filaires, sans fil ou mixtes,... ? En effet, les réseaux filaires sont plus fiables alors que la transmission d'informations sans fil est plus susceptible d'être affectée par de nombreux facteurs extérieurs. En même temps, le déploiement d'une liaison sans fil ne nécessite pas de travaux de génie civil et leurs zones de couverture ne sont pas liées à la proximité d'un répartiteur.

Le réseau que nous allons présenter dans ce document est mixte, repose sur la technologie WiMAX du standard *IEEE 802.16* à l'intérieur des villes et une liaison câblée à travers un réseau de fibres optiques entre les villes.

L'objectif du WiMAX est de fournir un accès internet à haut débit, il a été montré qu'en théorie cette technologie permet d'obtenir des débits montants et descendants de 70 Mbit/s avec une portée de 50 kilomètres. Malgré le débit réel ne pourra pas excéder 20 Mbit/s à cause de la présence des différents obstacles, il reste un très bon débit. Pour une meilleure qualité de service, la technologie WiMAX est associée à des modulations haut débit telle que l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ainsi qu'à des techniques de traitement d'antennes, telle que le MIMO (Multiple Input Multiple Output) qui permettent d'exploiter efficacement les ressources radio disponibles.

Plan de mémoire

L'objectif de la thèse présentée dans ce mémoire est de clarifier la possibilité d'installer ce type de réseaux en concevant et en simulant ses différents composants. Le mémoire est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre est dédié à l'étude de la structure générale d'un réseau basé sur un concept cellulaire. Nous commençons par présenter un historique rapide des réseaux cellulaires et leurs découpages en générations. Ensuite, une description des contraintes et des concepts à respecter dans la conception comme la réutilisation des fréquences, la formation des clusters et les schémas d'allocations. Le chapitre termine par un bref résumé sur GSM, l'un des réseaux de deuxième génération les plus populaires.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'interface air située entre l'équipement de l'utilisateur (la station mobile) et l'équipement de l'opérateur qui fournit les services (la station de base). Après un rappel sur les ondes électromagnétique, nous allons aborder une partie sur les antennes qui génèrent ces ondes et une autre partie sur les modes de propagation de ces ondes dans l'air.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des standards radios qui organisent l'interface air et indiquent comment partager la ressource radio. Une attention particulière a été portée sur le standard *IEEE 802.16e* choisi comme standard sur lequel notre réseau sera basé, où il est caractérisé par un ensemble de techniques d'actualité comme l'*ODFM* et *MIMO*.

Le quatrième chapitre aborde dans la première partie la conception de l'architecture du système basée sur le standard détaillé dans le chapitre précédent. Puis dans la deuxième partie, une description des services pour lesquels le réseau a été conçu dont le but est d'assurer une bonne circulation des trois flux de trafics: la téléphonie, l'accès à l'internet et la vidéoconférence.

Le chapitre cinq propose la simulation du système avec Opnet Modeler, l'utilisation d'un tel logiciel s'avère importante car il permet d'une part de simuler parfaitement les réseaux et d'autre part de faciliter les études statistiques que nous avons été amenés à faire.

Chapitre

I

Les réseaux cellulaires

Introduction

Ce chapitre, propose une vue d'ensemble des réseaux cellulaire et des concepts de base pour comprendre la suite du document. D'abord en commence par une définition, puis un coup d'œil sur l'évolution de ces systèmes. Dans les sections qui suivent, on explique un peu en détail les fondamentaux, les techniques et les recommandations pour la conception d'un réseau cellulaire. Enfin, on présente un exemple des réseaux cellulaires qui a prouvé son existence et son succès, le *GSM* (Global System for Mobile Communication) et sa version complémentaire *GPRS* (General Packet Radio Service).

I.1- Définition

Le concept *cellulaire* est introduit dans les années 1970 par Bell Labs, où une cellule est une zone géographique couverte par une antenne de transmission placée au centre d'une surface. Les systèmes cellulaires sont conçus pour augmenter la mobilité des terminaux.

Un utilisateur est en mesure de passer d'une cellule à une autre sans coupure de la communication, ce passage appelé *handover* permet au terminal de changer de cellule sans interruption. À cette fin, le système et le terminal doivent embarquer tous les composants nécessaires à la gestion de la communication [3].

I.2- L'évolution des systèmes cellulaires

Basant sur l'utilisation, le coût, la quantité et la qualité de services l'évolution de la technologie cellulaire a été divisée en *générations*, ce terme désigne les améliorations incrémentales au cours de l'évolution.

I.2.1- La première génération : *NMT, AMPS,...*

Référencée par *1G*, cette période est caractérisée par des terminaux analogiques, et les services fournis sont quasi inexistantes en dehors de la téléphonie, son succès restait très faible en raison du coût des équipements, qui n'ont pas encore connu de miniaturisation.

Le Japon pris un avance dans le déploiement du premier réseau cellulaire à Tokyo, suivi par le déploiement de *NMTs* (Nordic Mobile Telephone) en Europe, tandis que *AMPS* (Advanced Mobile Phone Service) déployé en *USA*, chacun de ces réseaux mit en œuvre sa propre norme.

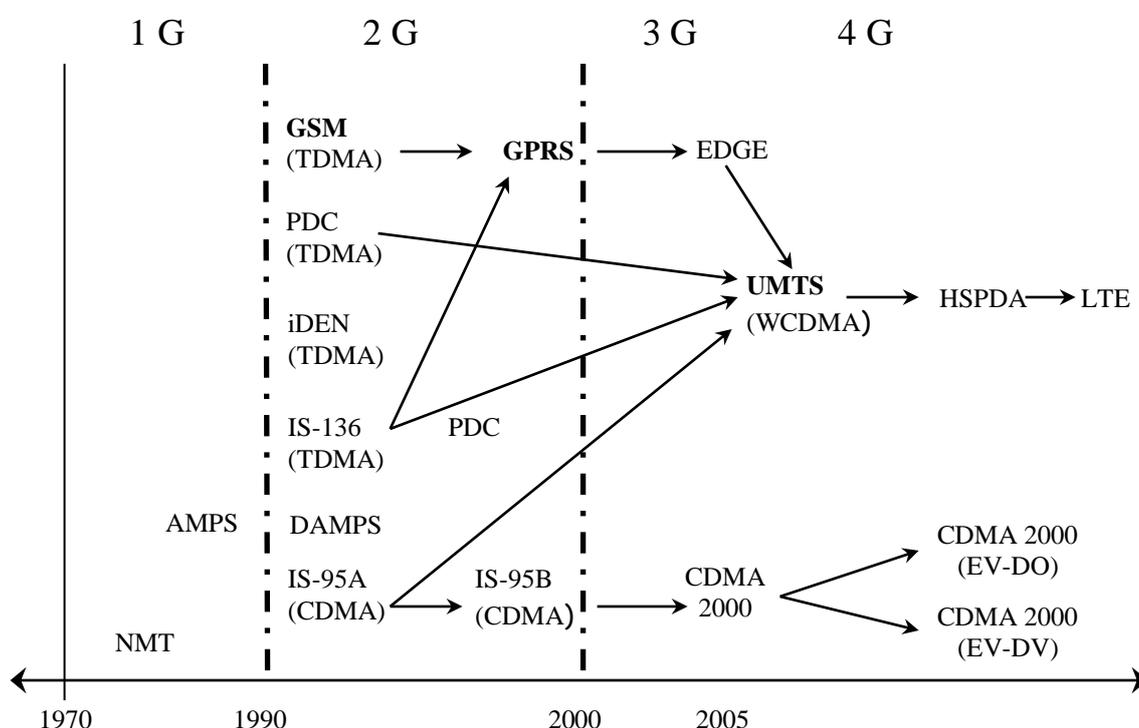


Figure 1.1 : L'évolution de la technologie cellulaire

I.2.2- La deuxième génération : *IS-95, DAMPS, PDC, GSM,...*

Puisque les différents systèmes de la génération précédente étaient incompatibles, le développement de la prochaine technologie, mit en œuvre le début des années 1990, dans le but de conduire à un environnement plus harmonisé.

Cette deuxième génération est passée au circuit numérique (au lieu de l'analogique), et une normalisation d'un faible nombre d'interfaces air a permis le développement de composants en grande série et l'arrivée du téléphone mobile dans le grand public.

Plusieurs technologies numériques font leur apparition (figure 1.1) telle que *GSM* (Global Systems for Mobile Communication), *CDMA IS-95*, *PDC* (Personal Digital Cellular),....

Ces systèmes favorisent la mise au point d'un terminal portable doté d'une autonomie acceptable, et offre plus de services tel que les messages textes, *CSD* (Circuit-Switched Data), et un protocole de compression avancé.

I.2.3- La troisième génération : *UMTS*,...

L'apparition des réseaux plus rapides et avec des qualités meilleur ont permis de fournir toute une gamme de services de télécommunication aux utilisateurs, comme appels vidéo, multimédias en continu (streaming), jeux sur mobiles, et une navigation internet plus rapide. Ce qui a entraîné l'introduction du standard *UMTS* (Universal Mobile Télécommunication System) capable de supporter des plages de données de 144 Kbit/s à plus de 2 Mbit/s.

I.2.4- La quatrième génération

Sont les systèmes de la prochaine génération qui seront un remplacement complet des réseaux actuels et être en mesure de fournir la voix, les données, et multimédias en continu de haute qualité aux utilisateurs à l'instant de demande et n'importe où.

I.3- Taille des cellules

En tenant en compte de la fréquence disponible et de la puissance, on distingue différentes tailles de cellules : picocellule, microcellule, cellule, macrocellule et cellule parapluie [3].

Chacune des zones représentées sur la figure 1.2 caractérise un environnement spécifique. La première zone, de quelques mètres, correspond à un environnement de grande densité, comme un étage d'un grand bâtiment ou d'un centre commercial dans lesquelles le trafic est très important.

Dans les deux zones suivantes, de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, la mobilité augmente tandis que le débit diminue. Puis les macrocellules, sont les plus courantes, responsables de la couverture du réseau, leur zone d'action s'étend jusqu'à 30 km selon les obstacles rencontrés.

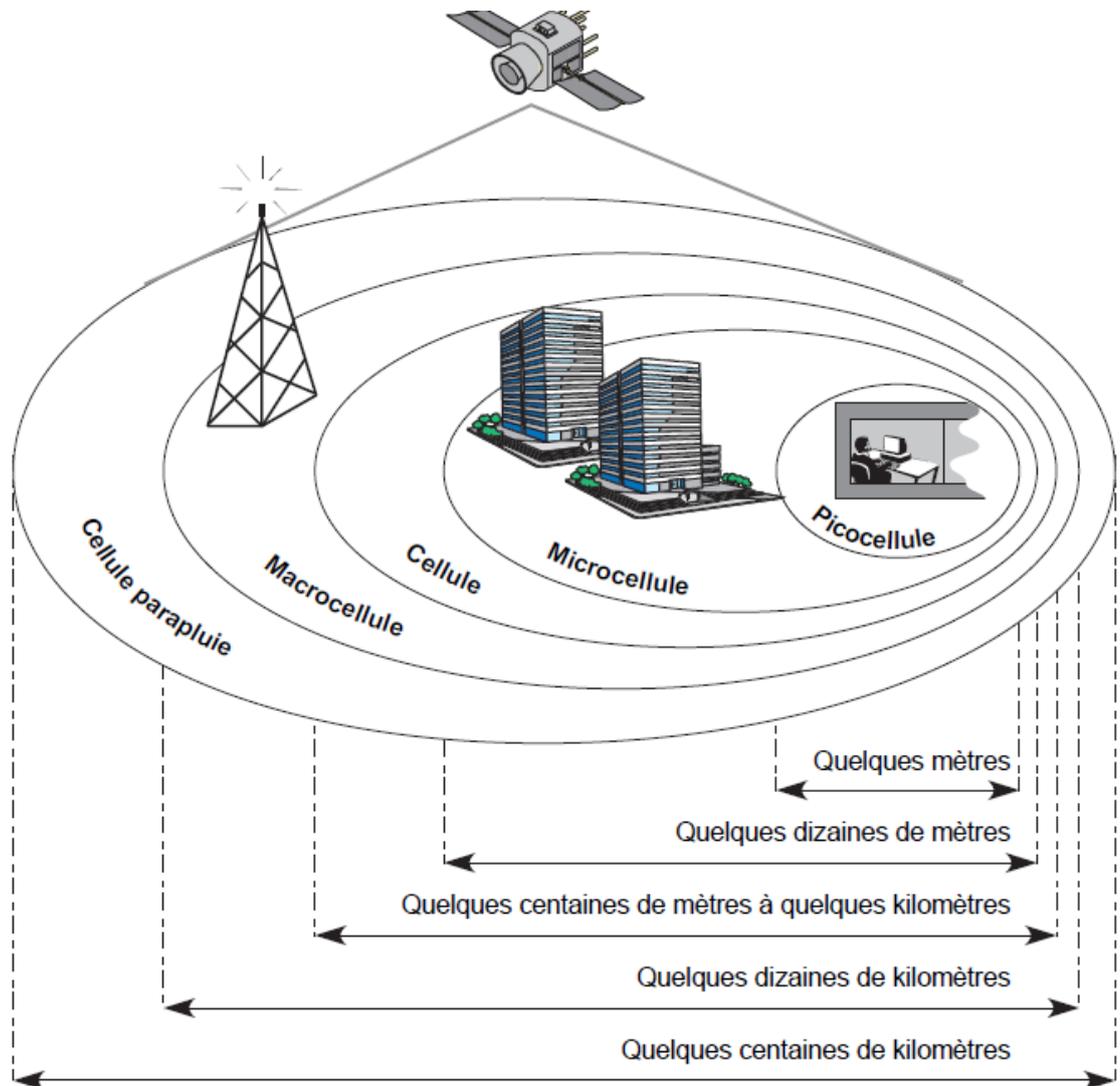


Figure 1.2 : Les différentes capacités cellulaires

Dans la dernière zone, caractérisée par le composant satellite où la mobilité est globale. Les situations terrestre, maritime et aéronautique sont incluses dans les objectifs de ces cellules parapluie, de ce fait, l'utilisateur se trouvant dans un véhicule, sur un bateau ou dans un avion bénéficie d'une disponibilité continue des services.

I.4- Réutilisation du spectre

Les opérateurs mobiles utilisent les fréquences radio pour fournir leurs services, mais le spectre est une ressource rare, donc il faut une utilisation efficace des fréquences disponibles.

Exemple d'illustration : le système doit allouer à chaque utilisateur un canal. En utilisant un système analogique typique, chaque canal doit avoir une bande passante de l'ordre de

25 KHz afin d'avoir une qualité d'audio suffisante. Il faut aussi une bande de garde pour assurer qu'il n'y aura pas d'interférences entre deux bandes adjacentes.

L'utilisation de ce concept permet à 40 utilisateurs d'utiliser le système pour une bande de 1 MHz, et même avec 100 MHz, que 4000 utilisateurs peuvent avoir accès à ce système.

Aujourd'hui, les systèmes cellulaires ont des millions d'abonnés et donc une méthode plus efficace d'utiliser le spectre disponible est nécessaire.

La méthode utilisée est de permettre une réutilisation des fréquences. Une antenne couvre une région limitée, mais une interférence peut se produire pour les utilisateurs dans la zone de chevauchement des couvertures, cela signifie qu'il est possible de réutiliser un canal une fois en dehors de la portée de l'antenne [4].

Est c'est ça le principe de la technologie cellulaire qui repose sur une division géographique (figure 1.3) de l'espace en petites zones plutôt que de diviser les fréquences.

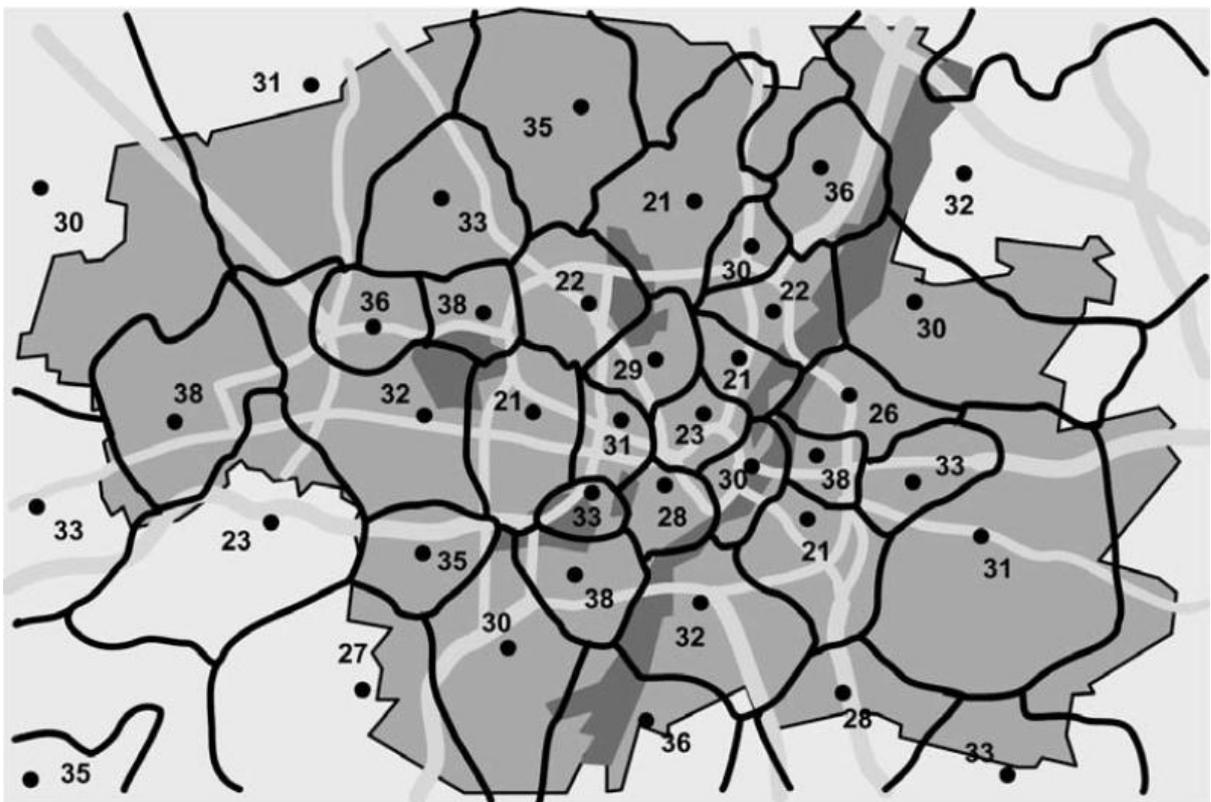


Figure 1.3 : une division géographique d'une ville

Ces petites zones appelées conventionnellement *Cellules* sont montrées schématiquement avec des formes *hexagonales* (figure 1.4.a).

En réalité, des frontières très irrégulières dessinées principalement par des facteurs de terrain et d'autres facteurs, en fonction de ces facteurs la force du signal diminue progressivement vers les bords de la cellule [4] (conditions de propagation variables). Ce qui implique l'impossibilité de définir exactement les bords d'une cellule (figure 1.3).

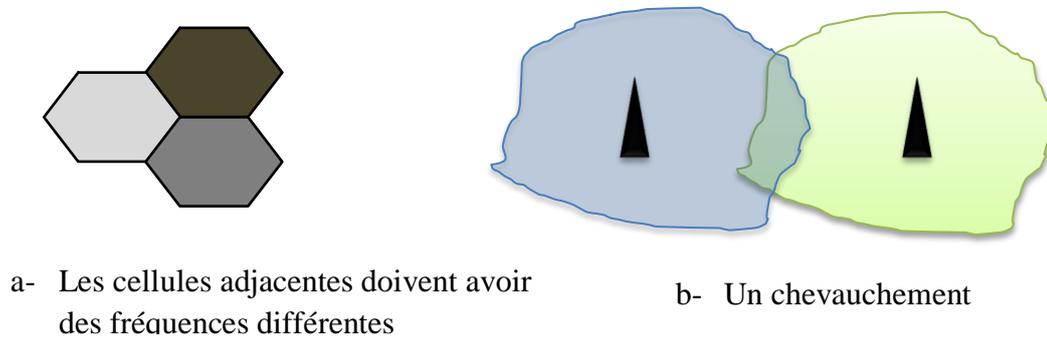


Figure 1.4 : représentation des cellules

A ce stade, deux situations peuvent se produire, des *chevauchements* et des *trous* dans la couverture.

Un chevauchement entre deux cellules couvertes par deux antennes qui utilisent la même fréquence provoque des interférences (figure 1.4b), donc pour surmonter ce problème, les bandes de fréquences attribuées à des cellules adjacentes dans un système cellulaire doivent être différentes pour qu'ils puissent se chevaucher sans causer d'interférences.

I.5- Formation des clusters

Pour distribuer les fréquences, les cellules peuvent être regroupées dans ce qu'on appelle « cluster », la taille d'un cluster est définie par le nombre de cellules K .

La répartition spatiale des fréquences est faite de façon systématique, dont on doit respecter une distance D , cette distance doit être choisie suffisamment grande pour que les interférences ne se produisent pas, et peut être dérivée à partir du modèle géométrique hexagonale en fonction de K et le rayon de cellule R :

$$D = R \sqrt{3K} \quad , \text{ Ou } K = i^2 + ij + j^2 \quad \text{ donc } K = 3,4,7,9,12 \dots \quad [7]$$

i étapes le long d'une direction

j étapes dans l'autre sens

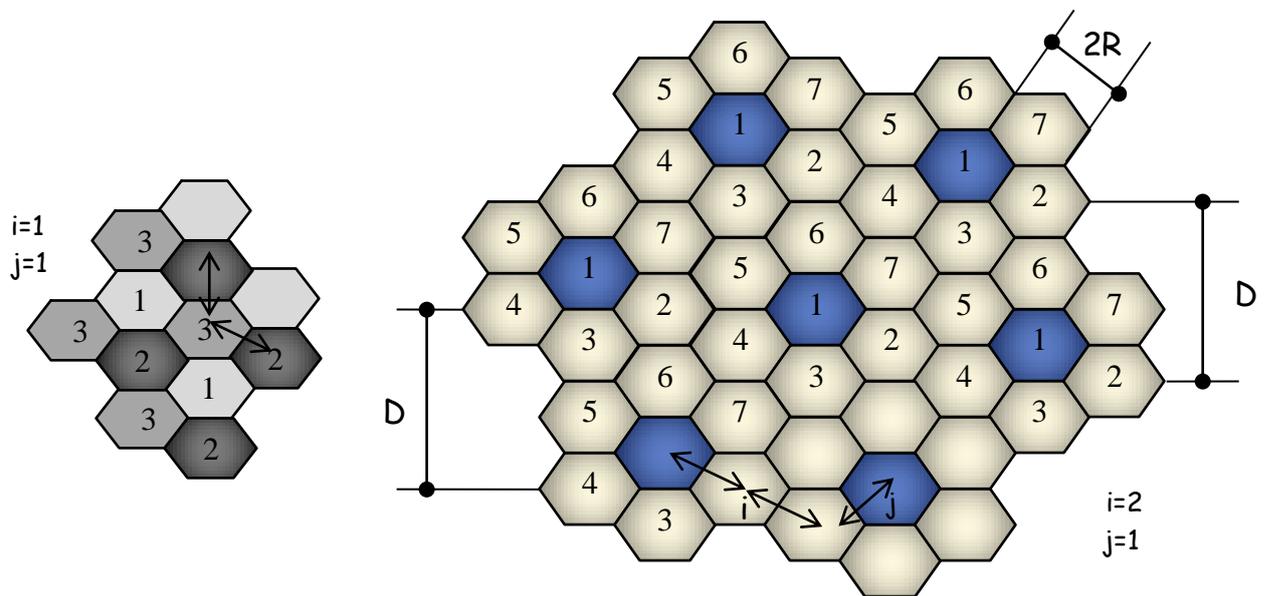


Figure 1.5 : Formation des clusters et réutilisation des fréquences dans les réseaux cellulaires « K=3 et K = 7 »

❖ **Un cluster a les caractéristiques suivantes :**

- Un cluster peut contenir toutes les fréquences du système.
- Dans un cluster, aucune fréquence ne peut être réutilisée.
- Un grand cluster avec une grande valeur de K implique un petit nombre de canaux et de clients actifs supportés par chaque cellule.

Pratiquement, le nombre $k = 7$, est un nombre recommandé pour une variété de raisons (d'autres configurations sont également possible) :

Parmi ces raisons, il donne une isolation suffisante entre les cellules qui utilisent les mêmes fréquences.

Une autre raison, est qu'un groupe de canaux est alloué à chaque cellule. Et comme le nombre de canaux est limité, avec $k = 7$ un nombre suffisant de canaux peuvent être alloués à chaque cellule.

❖ **Diminution de la taille des cellules a comme effet:**

- Augmentation du nombre d'utilisateurs,
- Augmentation du nombre de handovers par appel,
- Augmentation de la complexité dans la localisation du client,
- Consommation faible de puissance au terminal mobile, donc allongement du temps de parler,
- Délais plus courts de propagation.

I.6- Les schémas d'allocation de ressources

Le régulateur national alloue un nombre fixe de bandes de fréquences à un système cellulaire, des techniques d'accès multiple sont alors déployées pour permettre à plusieurs utilisateurs de partager la bande disponible d'une façon efficace.

Les techniques principales d'accès multiple utilisées dans les systèmes cellulaires sont : *FDMA* (Frequency Division Multiple Access), *TDMA* (Time Division Multiple Access), *CDMA* (Code Division Multiple Access), et l'*OFDM* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

I.6.1- FDMA (Frequency Division Multiple Access):

Les unités mobiles partagent la bande de fréquence disponible en allouant à chaque unité mobile une partie de cette bande, appelée canal de trafic [23].

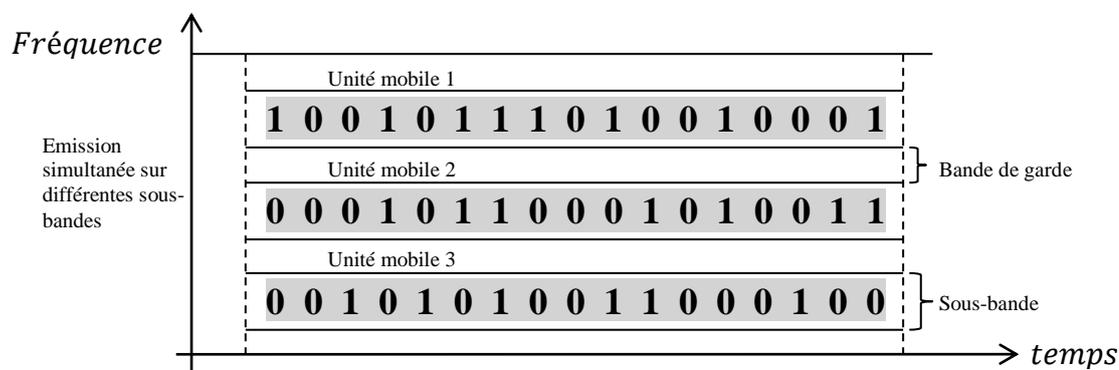


Figure 1.5 : FDMA (Frequency Division Multiple Access)

La puissance du signal de l'unité mobile est donc concentrée dans cette sous-bande de telle sorte qu'on peut allouer à des unités mobiles différentes sous-bandes utilisables en parallèle. L'interférence entre deux canaux adjacents est limitée par l'utilisation de bandes de garde (figure 1.5), des filtres passe-bande assurent la séparation des signaux associés aux différentes unités mobiles qui peuvent ainsi émettre en parallèle.

Afin d'éviter les collisions, les canaux ou sous-bandes de fréquences sont allouées aux unités mobiles au fur et à mesure que celles-ci se présentent dans la cellule. Une telle stratégie se révèle inefficace, en effet, si une ou plusieurs unités mobiles n'ont aucune donnée à transmettre sur le canal qui leur est alloué, la sous-bande associée à ce canal demeure donc inutilisée.

I.6.2- TDMA (Time Division Multiple Access):

La technique *TDMA* est utilisée dans les systèmes cellulaires numériques dont la bande de fréquences disponible est divisée en sous-bandes ou canaux de fréquence (comme dans le *FDMA*). Ces canaux sont à leur tour répartis en un certain nombre de tranches de temps. On attribue à chaque utilisateur une tranche de temps qui permet l'accès au Canal de fréquence pour la durée de cette tranche de temps [23] (figure 1.6).

Le canal de trafic donc, consiste en des tranches de temps allouées à tour de rôle aux unités mobiles qui émettent avec la même fréquence sur l'ensemble de la sous-bande. Dans les systèmes *TDMA*, les bandes de garde sont nécessaires aussi bien entre les canaux de fréquence qu'entre des tranches de temps.

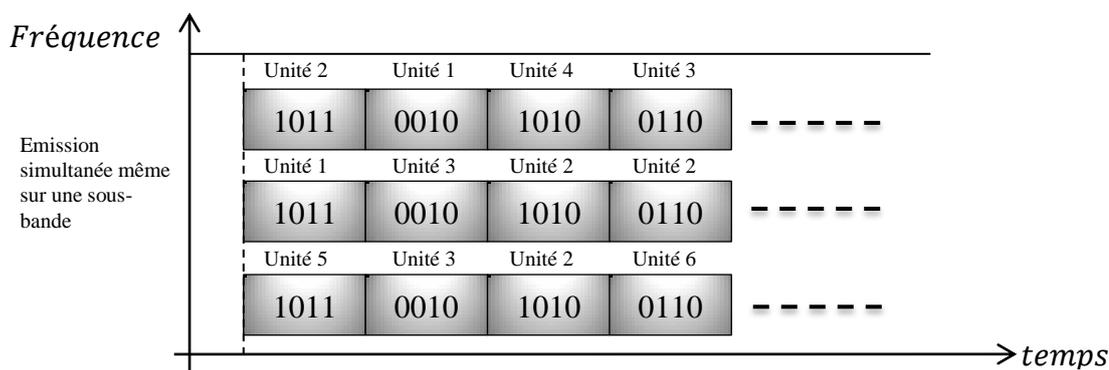


Figure 1.6 : TDMA (Time Division Multiple Access)

La *TDMA* est la technique d'accès de choix pour plusieurs systèmes cellulaires. elle est habituellement combinée à *FDMA*, parce que différentes fréquences porteuses sont utilisées dans différentes cellules. Les fréquences ne sont réutilisées que dans des cellules suffisamment éloignées pour réduire l'interférence au minimum. Cette technique offre un rendement de loin supérieur au *FDMA*.

I.6.3- CDMA (Code Division Multiple Access):

Les unités mobiles d'une même cellule partagent un même canal où la technique d'étalement de spectre est utilisée pour affecter à chaque utilisateur un code unique qui détermine la fréquence et la puissance utilisées [23] (figure 1.7).

En Fait, ce code d'étalement ou code PN (Pseudo-random Noise) permet aux multiples utilisateurs de partager une même bande de fréquences.

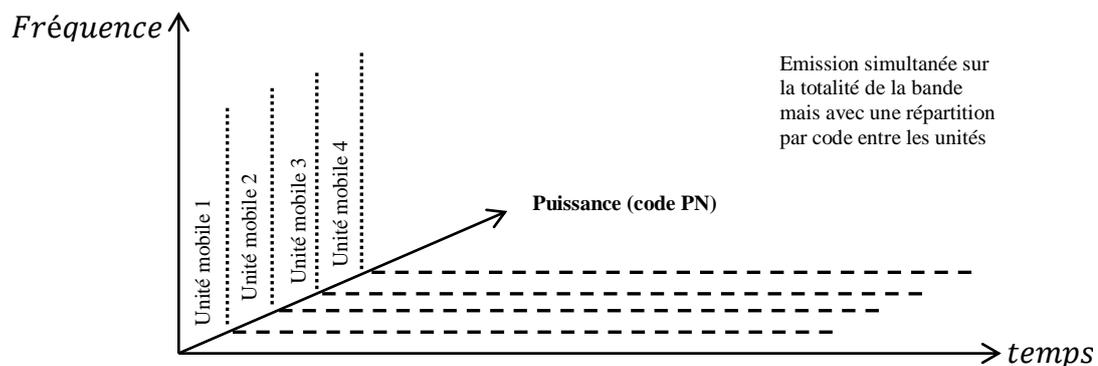


Figure 1.7 : CDMA (Code Division Multiple Access)

En attribuant à chaque client ce code unique, on peut émettre simultanément sur la totalité de la bande passante, mais en ayant recours à une répartition par code entre les unités mobiles. Il devient possible de réutiliser les mêmes fréquences dans les cellules adjacentes. La difficulté demeure de pouvoir fournir des codes assez différents à chaque utilisateur connecté pour éviter les interférences, d'une part, et pour que l'antenne puisse récupérer les émissions s'effectuant en parallèle, d'autre part.

Dans les systèmes cellulaires *CDMA* qui utilisent les techniques directes d'étalement de spectre, l'information à transmettre est modulée grâce à un code PN unique affecté à chaque utilisateur, tous les signaux modulés en code PN provenant de différentes unités mobiles sont alors transmis sur le canal de fréquence, à la fin de la réception, pour récupérer le signal désirable, on désétale le signal avec une copie de la séquence d'étalement ou avec le code PN de chaque utilisateur dans le corrélateur du récepteur. Tous les autres signaux (appartenant à d'autres utilisateurs) dont le code PN ne correspond pas à celui du signal désiré ne sont pas désétalés, et en conséquence, le corrélateur les considère comme du bruit. Puisque les signaux utilisent entièrement la bande de fréquence allouée. Aucune bande de garde n'est nécessaire (figure 1.7).

La définition de canaux pour l'attribution dans un système cellulaire est assez simple dans le cas de systèmes basés sur des méthodes *FDMA* et *TDMA*. En revanche, les systèmes basés sur la technique d'étalement du spectre de *CDMA* exigent une conception différente et complexe du canal radio.

I.6.4- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

L'*OFDM* est une des techniques les plus demandées aujourd'hui dans les réseaux modernes. Elle utilise la technique d'allocation *FDMA*, mais au lieu d'être obligé de séparer les canaux des

différentes fréquences, on utilise des fréquences orthogonales : lorsque la puissance est maximale sur une fréquence, elle est nulle sur les fréquences connexes. Cette solution est illustrée à la figure 1.8 et plus tard au chapitre 3.

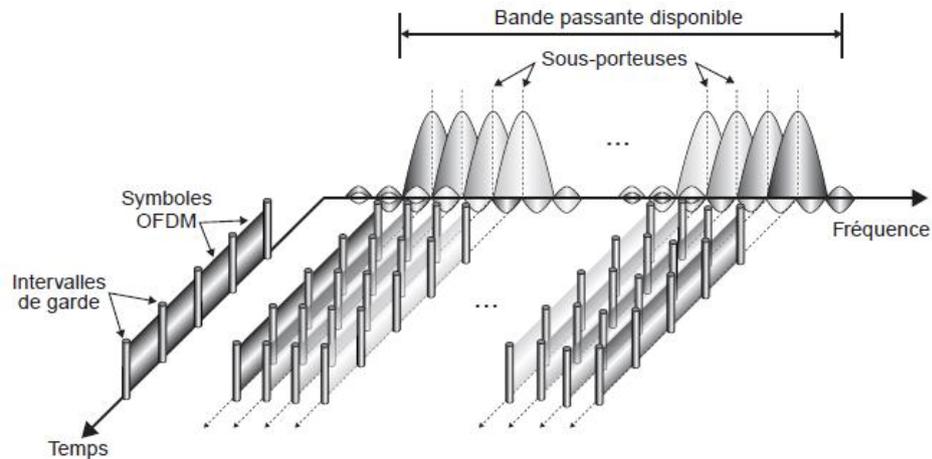


Figure 1.8: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Cette solution permet de transporter des éléments binaires différents sur chaque sous bande, de telle sorte que plusieurs bits voire octets peuvent être transmis simultanément.

1.6.5- SDMA (Space Division Multiple Access):

Consiste à diviser l'espace en plusieurs secteurs, de sorte qu'une antenne directive n'émette que sur un espace réduit au lieu de diffuser ses signaux dans toutes les directions. Cette solution permet de beaucoup mieux utiliser l'espace hertzien et donne une forte réutilisation des fréquences. De plus, le signal étant directif, la portée peut-être bien plus grande.

Le *SDMA* est une technologie encore peu utilisée qui demande une antenne intelligente capable de s'adapter pour émettre sur un secteur précis, avec une puissance déterminée. Si une station est située près de l'antenne de réception, il est en effet inutile d'émettre avec une forte puissance et dans toutes les directions à la fois. La méthode *SDMA* permet de limiter géographiquement la surface sur laquelle la fréquence est utilisée en permettant ainsi une excellente réutilisation.

1.7- GSM (Global System for Mobile Communication)

Le *GSM* est le standard digital des réseaux cellulaires le plus populaire, développé dans les années 80s et standardisé par l'*ETSI* (European Telecommunications Standards Institute). La

première spécification est publiée en 1990, tandis que l'opération commerciale a commencé en 1991 en exploitant la bande 900 MHz. A la même année, une dérivée de *GSM* apparue, connu sous le nom de *DCS 1800* (Digital Cellular System) qui a converti le *GSM* en bande 1800 MHz, l'*USA* a adapté le *DCS 1800* à la bande 1900 MHz avec le nom *PCS 1900* (Personal Communication System).

Au milieu de 2009, *GSM* a dépassé 3.9 milliards utilisateurs dans plus de 219 pays et territoires dans le monde entier, avec une part de 89% de marché des réseaux sans fil [5].

I.7.1- Architecture du système GSM

Un système de réseaux mobiles *GSM* comporte deux grands volets : les *infrastructures installées* (le réseau), et les *stations mobiles* (représente les abonnés qui utilisent les services du réseau). Le réseau sans fil installé peut être à nouveau subdivisé en 3 sous-réseaux : réseau radio, réseau de commutation et réseau de supervision [8].

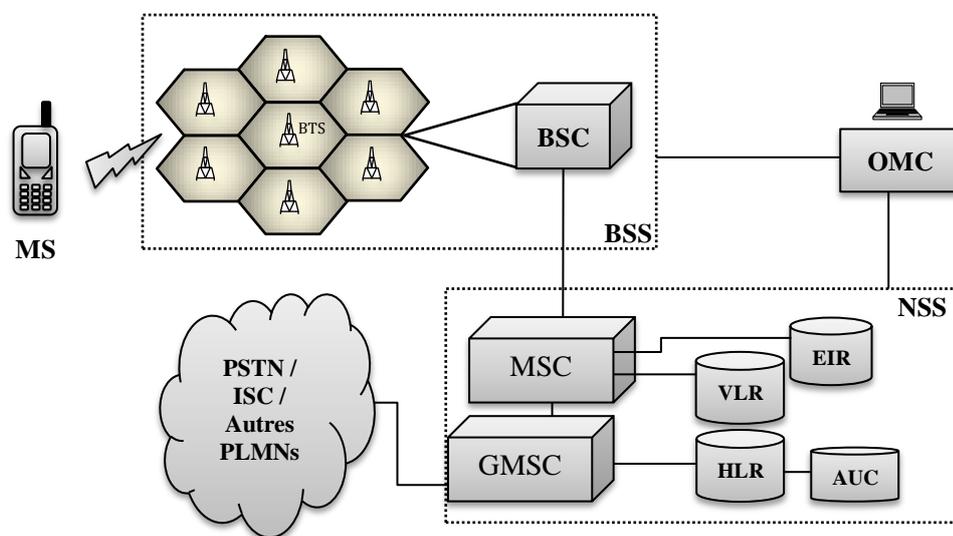


Figure 1.10 : Architecture d'un réseau GSM

I.7.1.1- Stations mobiles (MS)

C'est un équipement utilisé par l'abonné pour accéder aux services du système, composé de : l'équipement mobile (*ME*), et un module d'identification de l'abonné *SIM* (Subscriber Identity Mobile), ce dernier identifie l'abonné au réseau en stockant certaines de ses paramètres (figure 1.11), la carte *SIM* peut contenir aussi d'autres données personnels.

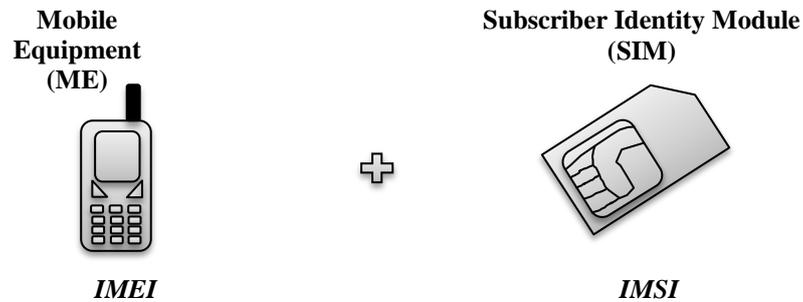


Figure 1.11 : Composants d'une station mobile

a) International Mobile Station Equipment Identity (IMEI) :

Ce numéro de série identifie de manière unique les stations mobiles internationalement, il est attribué par le fabricant de l'équipement et enregistré par les opérateurs de réseaux qui les stockent dans l'EIR (Equipment Identity Register) [8].

b) International Mobile Subscriber Identity (IMSI) :

Lors de l'inscription, chaque abonné reçoit un identifiant unique, c'est le *IMSI* stocké dans la carte *SIM*, et il est constitué de :

3 chiffres : Mobile Country Code (*MCC*),

2 chiffres : Mobile Network Code (*MNC*),

au max 10 chiffres : Mobile Subscriber Identification Number (*MSIN*).

Une station mobile fonctionne quand on a une carte *SIM* avec un *IMSI* valide inséré dans un équipement avec un *IMEI* valide [8].

1.7.1.2- Réseau Radio – Base Station Subsystem (BSS)

Comme la figure 1.10 montre, la *BSS* fournit une connexion entre la *MS* et le réseau *GSM* via l'interface air, cette partie est composée de deux entités : *BTS* et *BSC* [6],

a) Station de base : BTS (Base Transceiver Station)

C'est une antenne assurant la couverture radio de la cellule, elle dispose de plusieurs fréquences pour desservir à la fois les canaux de trafic des utilisateurs, un canal de diffusion, un canal de contrôle, et des canaux de signalisation.

b) Contrôleur de station de base : BSC (Base Station Controller)

Un *BSC* relie plusieurs *BTS* dans le but de : administrer les fréquences, contrôler les *BTS*, gestion des handovers,... etc.

I.7.1.3- Réseau de Commutation – Mobile Switching Subsystem (MSS)

Composé d'un centre de commutation et des bases de données qui stockent les données nécessaires pour le routage et provisionnement des services [8].

a) MSC (Mobile Switching Center) :

Le nœud de commutation d'un réseau mobile est appelé le *MSC*, il exécute toute les fonctions de commutation d'un nœud, par exemple la recherche d'un chemin de routage et acheminement des signaux.

Un réseau peut avoir plusieurs *MSC*, où chacun est responsable de servir une région, un ensemble de *BSC* sont subordonnés à un seul *MSC*.

b) GMSC (Gateway MSC) :

Responsable de passer le trafic entre les réseaux (fixes et mobiles). Si le réseau est incapable de satisfaire un appel entrant à l'échelle locale, il achemine la requête vers le *GMSC*.

Le *GMSC* demande les informations de routage de la base *HLR* (Home Location Register) et achemine l'appel au *MSC* ayant sur son territoire la station mobile en question.

La connexion à d'autres réseaux à l'échelle internationale est faite par l'acheminement de la requête au centre international de commutation (*ISC*).

c) Les bases de données : HLR, VLR, AUC, EIR

Un réseau mobile utilise plusieurs bases de données :

- ❖ **Home Location Register (HLR)** : le *HLR* stocke l'identité et les données de tous les abonnés appartenant au réseau.
- ❖ **Visitor Location Register (VLR)** : le *VLR* stocke les données de toutes les stations mobiles présentes dans la région administré par le *MSC* associé.
- ❖ **Authentication Center (AUC)** : stocke les clés secrètes utilisées pour authentifier les demandes de services ainsi que pour les chiffrements utilisés.
- ❖ **EIR (Equipment Identity Register)** : stocke les numéros de série *IMEI* (fournis par le fabricant) qui permet de bloquer l'accès pour les stations mobiles volées.

Remarques :

- En générale il y a un *HLR* central par *PLMN* (Public Land Mobile Network : ensemble des cellules servies par le réseau d'un opérateur) et un *VLR* par chaque *MSC*.

- Pour un abonné l'adresse de *VLR* actuel peut être enregistrée temporairement dans la carte *SIM*.

I.7.1.4- Réseau de supervision – Operation and Maintenance Subsystem (OMS)

Tout le réseau est contrôlé et maintenu par l'*OMS*, dont les fonctions de contrôles sont supervisées et initialisées par le centre d'exploitation et de maintenance (*OMC*), l'*OMC* a l'accès au *GMSC* et aux *BSCs*, certain de ses fonctions sont :

- Administration et opérations commerciales (abonnés, terminaux, coûts, statistiques, ...),
- Gestion de sécurité,
- Gestion des performances et configurations du réseau,
- Tâches de maintenance,
- ...

L'*OMC* configure les *BTS* à travers les *BSC*, et permet à l'opérateur de superviser et vérifier tous les composants attachés au système.

I.7.2- Les interfaces et protocoles d'un système GSM

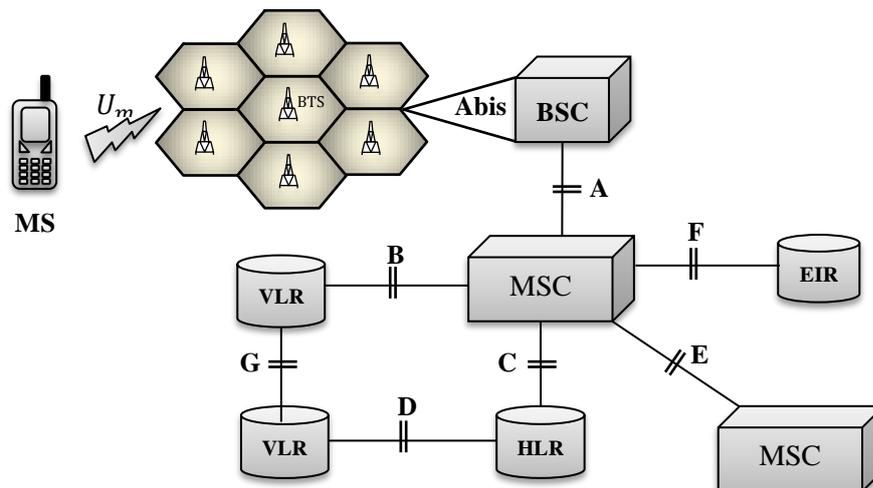


Figure 1.12 : Les interfaces d'un réseau GSM

Les interfaces assurent le dialogue entre les équipements et permettent leur interfonctionnement comme indique la figure 1.12.

Interface	Entre	Description [10]
U_m	<i>MS-BSS</i>	L'interface d'air est utilisée pour les échanges entre une <i>MS</i> et une <i>BSS</i> . La signalisation et la liaison de données sont grâce au protocole <i>LAPD</i> .
<i>Abis</i>	<i>BSC-BTS</i>	C'est une interface interne de la <i>BSS</i> qui lie une <i>BSC</i> à une <i>BTS</i> , elle n'a pas été normalisée. Grâce à <i>Abis</i> , La <i>BSC</i> peut contrôler les équipements radios et l'allocation des fréquences de la <i>BTS</i> .
<i>A</i>	<i>BSS-MSC</i>	Cette interface contrôle l'allocation appropriée des ressources radio au <i>MS</i> et gestion de mobilité. Elle utilise les protocoles <i>BSSAP</i> (<i>BSSMAP</i> et <i>DTAP</i>).
<i>B</i>	<i>MSC-VLR</i>	L'interface <i>B</i> traite la signalisation entre l' <i>MSC</i> et son <i>VLR</i> . Le <i>MSC</i> doit accéder aux données des <i>MS</i> présents dans sa région, il interroge le <i>VLR</i> en utilisant le protocole <i>MAP/B</i> à travers l'interface <i>B</i> .
<i>C</i>	<i>MSC-HLR</i> <i>GMSC-HLR</i>	Chaque appel commence en dehors de l'opérateur doit passer par <i>GMSC</i> pour obtenir l'information de cheminement exigée pour accomplir l'appel, et le protocole <i>MAP/C</i> au-dessus de l'interface <i>C</i> est utilisé à cet objectif. Aussi le <i>MSC</i> peut optionnellement envoyer l'information de facturation au <i>HLR</i> après la terminaison de l'appel.
<i>D</i>	<i>VLR-HLR</i>	Utilise le protocole <i>MAP/D</i> pour échanger les données liées à l'endroit de la <i>MS</i> et les données de l'abonné.
<i>E</i>	<i>MSC-MSC</i>	Inter <i>MSCs</i> , L'interface <i>E</i> échange les données qui sont liées au handover par le protocole de <i>MAP/E</i> .
<i>F</i>	<i>MSC-EIR</i>	Utilise le protocole de <i>MAP/F</i> pour vérifier le statut de l' <i>IMEI</i> obtenu par le <i>MSC</i> de la <i>MS</i> .
<i>G</i>	<i>VLR-VLR</i>	Relie deux <i>VLRs</i> de deux <i>MSCs</i> différents et utilise le protocole <i>MAP/G</i> pour transférer les informations d'un abonné (par exemple, pendant une procédure de mise à jour d'endroits).
<i>X25</i>	<i>BSC-OMC</i> <i>MSC-OMC</i>	Exigé afin d'échanger les données avec l' <i>OMC</i> (control, configurations, facturations,...).

Tableau 1.1 : Les interfaces d'un réseau GSM

I.7.3- L'établissement d'un appel téléphonique en GSM

L'appelant signale d'abord la *BTS* de la cellule, puis passe à travers la *BSC* pour arriver enfin au *MSC* qui vérifie à son niveau les droits de l'abonné (autorisation d'accéder à ce service, état de l'abonnement,...). S'il remplit les conditions, le *MSC* utilise les bases de données qui lui sont raccordées pour acheminer l'appel vers la *BSC* (peut passer éventuellement par d'autres *MSC*) puis vers la *BTS* où l'abonné demandé est présent.

Ce scénario est dans le cas où l'appelé se situe chez le même opérateur, sinon le *MSC* doit transmettre la requête au *GMSC* et demande à la *BSC* de réserver un canal.

Le *GMSC* détermine la nature de la destination et affecte l'appel vers le chemin approprié qui sera soit vers un autre réseau local ou *ISC*.

I.8- GPRS (General Packet Radio Service)

Le *GPRS* incarne une nouvelle génération du standard *GSM*, il rend possible la prise en charge des applications de données à moyen débit dans le cadre de la mobilité. Il constitue en outre une transition vers la troisième génération, caractérisée par le passage d'un débit de 14,4 Kbit/s (9,6 Kbit/s utilisable) à un débit beaucoup plus important, pouvant être multiplié par 8 au maximum.

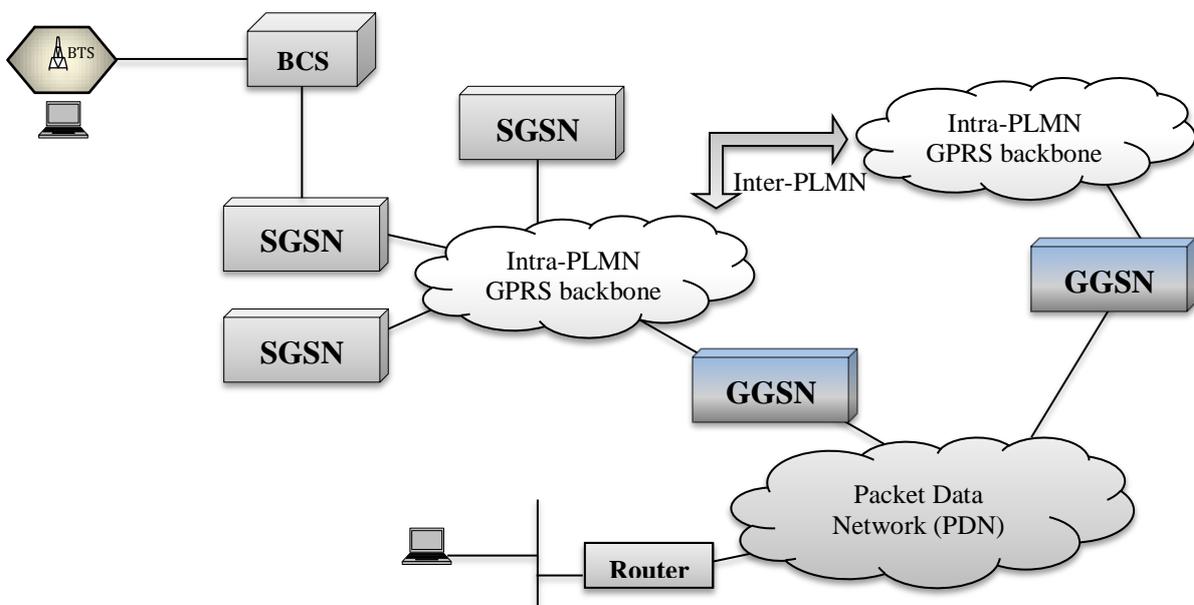


Figure 1.13 : L'architecture d'un réseau GPRS

Le *GPRS* utilise la même infrastructure que le *GSM* mais avec un double réseau, celui du *GSM*, c'est-à-dire d'un réseau à commutation de circuits, et celui d'un réseau à transfert de données (figure 1.13).

Quand l'utilisateur téléphone, l'information transite par le réseau de type circuit téléphonique, et si l'utilisateur émet des paquets, ces derniers sont acheminés par le réseau de type paquet en utilisant une technique de relais de trames.

Le terminal intègre les composants nécessaires au traitement de la parole téléphonique pour la numériser de façon plus ou moins compressée et se complète d'un modem, qui émet les paquets de l'utilisateur vers le réseau paquet. La traversée de l'interface radio utilise les slots du *TDMA* qui ne sont pas utilisés par la parole téléphonique.

L'architecture du *GPRS* est illustrée à la figure 1.13. Cette architecture est composée de divers types de nœuds :

- Les *SGSN (Serving GPRS Support Node)*, qui sont des routeurs connectés à un ou plusieurs BSS.
- Les *GGSN (Gateway GPRS Support Node)*, qui sont des routeurs acheminant le trafic vers des réseaux de données GPRS ou externes.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux cellulaires en donnant un aperçu général, ainsi qu'un exemple très populaire et très connu de ces réseaux.

Nous avons commencé cette thèse par détailler la structure générale du réseau. Maintenant, nous allons nous occuper à une des interfaces les plus importantes, l'interface air qui permet l'échange de l'information.

Le transfert d'information entre un terminal portable et une station de base se fait au moyen d'ondes électromagnétiques qui se propagent d'une antenne d'émission à une antenne de réception. C'est ce que nous allons expliquer dans le chapitre suivant.

Chapitre II

La propagation des ondes

Introduction

Les systèmes de communication hertziens tels que nous les connaissons, comme la radio, la télévision, le téléphone portable, les réseaux sans fil, utilisent le rayonnement électromagnétique des ondes pour transmettre des informations d'une antenne émettrice à une ou plusieurs antennes réceptrices distantes.

La propagation des signaux (ondes électromagnétiques) dépend essentiellement de deux paramètres fondamentaux qui sont la longueur d'onde et les propriétés du milieu (en termes géographiques et électromagnétiques).

Le tableau 2.1 donne une liste non exhaustive des principales utilisations des fréquences inférieures à 10 GHz [12].

Dans ce chapitre, Nous rappelons d'abord les ondes électromagnétiques. Ensuite, nous présentons les antennes en expliquant quelques caractéristiques comme le gain et la directivité et en énumérant les différents types d'antennes pour une station de base.

Nous proposons ensuite une partie sur la propagation des ondes qui explique les modes de propagation dans l'espace, et les effets qui peuvent influe sur le signal ou son trajet au cours de son voyage.

Utilisations	Bandes de fréquences
Radiodiffusion en ondes longues et moyennes	130 kHz à 1,6 MHz
Radiodiffusion en ondes courtes	Plusieurs bandes
Radioamateurs	Plusieurs bandes
C.B. (bande des citoyens)	27 MHz
Radiodiffusion en fréquence modulée	88 → 108 MHz
Services d'urgence (police, pompiers, ambulances) et réseaux privés (Touring Secours, flottes de véhicules, ...)	70 → 170 MHz
Réseau ASTRID (Police fédérale et Polices locales, services d'urgence,...)	400 MHz
Emetteurs TV	50 → 840 MHz
GSM 900	900 MHz
DCS 1800	1800 MHz
Téléphones sans fil (normes CT1 et CT2)	900 MHz
Téléphones sans fil (norme DECT)	1900 MHz
Fours à micro-ondes	2400 MHz
UMTS	1900 → 2300 MHz
Militaires	Plusieurs bandes

Tableau 2.1 : Applications des fréquences les plus connues

II.1- Rappel sur les ondes électromagnétiques

Depuis leur découverte à la fin du 19^{ème} siècle, les ondes électromagnétiques ont été utilisées pour leur capacité de transmettre des signaux (sons, images, données,...) à distance. Leur application dans le domaine des télécommunications s'est surtout développée après la Seconde Guerre mondiale.

Définition :

Une onde EM est constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{H} . Dans le vide, ces deux champs (figure 2.1.a), perpendiculaire l'un à l'autre et perpendiculaires à la direction de propagation, produisent une onde électromagnétique « OEM » qui se déplace à la vitesse de la lumière « $C = 3 \cdot 10^8$ m/s »

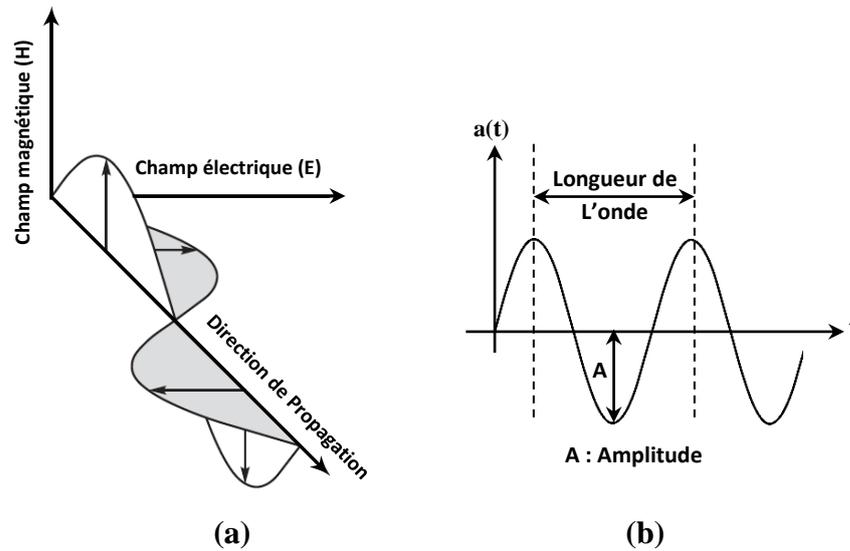


Figure 2.1 : Onde Electromagnétique OEM

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur fréquence, leur amplitude et leur phase (figure 2.1.b), ainsi que par leur puissance de rayonnement qui est d'autant plus forte que les intensités des champs électrique et magnétique sont grandes.

II.2- Les Antennes

Le signal qui est transmis par l'antenne de transmission (*BTS / MS*) et reçues par l'antenne de réception (*MS / BTS*) est exposé à une variété de structures artificielles, passe à travers différents types de terrain, et affecté par différents enivnements de propagation.

Le marché des télécommunications sans fils connaît un essor considérable depuis les récents progrès réalisés dans le domaine des antennes.

II.2.1- Principe :

Une antenne d'émission est un conducteur qui transforme une énergie électrique en énergie de rayonnement électromagnétique (figure 2.2). Une antenne de réception traduit un rayonnement électromagnétique en courant électrique induit.

Le support de l'information est l'onde électromagnétique émise par l'antenne de l'émetteur. Pour produire cette onde électromagnétique, on applique à l'antenne une tension sinusoïdale de fréquence égale à celle de l'onde que l'on veut créer.

En l'absence de modulation, c'est à dire d'information à transmettre, l'onde et la tension qui lui a donné naissance possèdent une amplitude et une fréquence constantes. Cette onde que l'on doit

transmettre est souvent nommée porteuse. Pour que les messages transmis puissent être codés correctement, la fréquence f_c de la porteuse doit être très supérieure à celle de l'information f_m à transmettre.

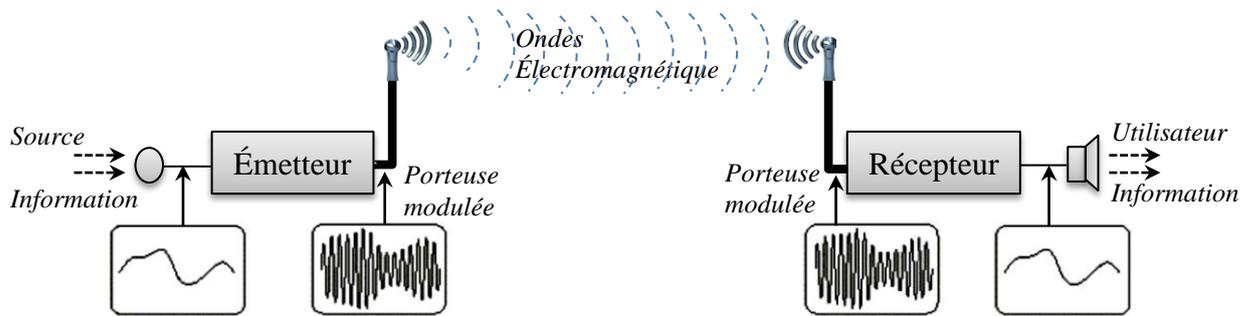
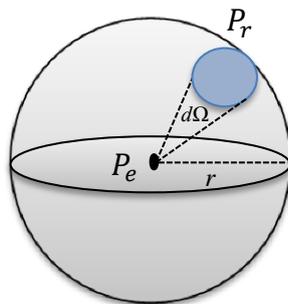


Figure 2.2 : Principe de transmission

Et comme les informations à transmettre sont souvent des signaux complexes composés de fréquences différentes, la fréquence de la porteuse doit être très grande devant la plus grande des fréquences à transmettre « on prend généralement un facteur de 100 entre f_c et f_m ».

Compte tenu de l'ordre de grandeur relatif à des fréquences de l'information à transmettre et de la porteuse, cette dernière est dite *HF* (*haute fréquence*) et le signal de donnée *BF* (*basse fréquence*). Cette porteuse achemine l'information *BF* à des portées considérables, l'un de ses paramètres (amplitude, fréquence, phase) doit être varié au rythme du signal *BF* (signal modulant). Le signal ainsi obtenu est dit signal modulé.



$$S = 4 \pi r^2$$

$$d\Omega = \frac{1}{r^2} dS = \sin \theta d\theta d\varphi$$

Figure 2.3 : Antenne isotrope

II.2.2- Antenne isotrope:

Si un émetteur est équipé d'une antenne isotrope (modèle théorique qui sert de référence pour le calcul du gain des antennes) le flux de puissance d'une sphère de centre E et de rayon r est uniformément réparti à la traversée de cette sphère (figure 2.3) [13], où La surface de cette sphère est:

$$S = 4 \pi r^2$$

II.2.3- Caractéristiques des antennes :

II.2.3.1- Puissance de rayonnement d'une onde: P_r

Une source d'ondes S de puissance de rayonnement P_e émet uniformément dans toutes les directions de l'espace (isotrope), à une distance « r » une densité de puissance P_r (L'énergie P_r décroît avec la distance r) égale à :

$$P_r = \frac{P_e}{4 \pi r^2}$$

Soit P_e la puissance rayonnée totale (l'antenne est isotrope), la densité stérique dans n'importe quelle direction donnée s'exprime :

$$U(\theta, \varphi) = \frac{P_e}{4\pi}$$

II.2.3.2- Directivité

On dit qu'une antenne est directive quand elle concentre l'énergie qu'elle rayonne dans une direction de l'espace (figure 2.4).

La directivité $D(\theta, \varphi)$ d'une antenne dans une direction (θ, φ) , est le rapport de l'intensité du rayonnement dans la direction donnée de l'antenne à l'intensité du rayonnement en moyenne sur toutes les directions [15].

Si D la directivité de l'antenne, U l'intensité du rayonnement de l'antenne, U_{iso} est l'intensité de rayonnement d'une source isotrope, et P_r est la puissance totale rayonnée.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{iso}(\theta, \varphi)} = \frac{U(\theta, \varphi)}{\frac{P_e}{4\pi}}$$

Pour l'antenne isotrope, $D = 1$ quelle que soit la direction,

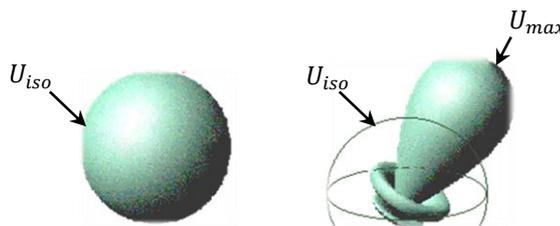


Figure 2.4 : Signification de la directivité

II.2.3.3- Gain

Le gain d'une antenne est la quantité d'énergie reçue ou émise dans une direction par rapport à la quantité d'énergie reçue ou émise d'une antenne de référence (souvent une antenne isotrope, mais il y a d'autres).

On améliore le gain d'une antenne en concentrant l'énergie rayonnée dans un lobe principal, ce qui résulte une antenne directive est aussi une antenne à gain.

Le gain d'une antenne G et sa surface équivalente S sont liés par la relation :

$$G = \frac{4 \pi S}{\lambda^2} \dots \dots (*)$$

Où λ est la longueur d'onde.

Si l'antenne de l'émetteur présente dans la direction du récepteur un gain absolu G_e , la densité du flux de puissance dans cette direction vaut [13] :

$$P_{r1} = \frac{G_e P_e}{4 \pi r^2} \quad \text{Watts / m}^2$$

Le produit $G_e \cdot P_e$ est appelé *puissance apparente rayonnée* [13] (lorsque l'antenne est isotrope on aura : La Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente $PIRE = G_e \cdot P_e$), Valeur très utile pour les définitions de normes

L'antenne de réception, de surface équivalente S_r , prélève sur l'onde reçue la puissance P_r qui est la puissance reçue à l'entrée du récepteur :

$$P_{r2} = S_r \frac{G_e P_e}{4 \pi r^2} \quad (\text{Puissance par rapport à la surface } S_r)$$

Le rapport des puissances $\frac{P_r}{P_e}$ peut alors s'exprimer par la relation (en utilisant la relation * pour substituer S_r) :

$$\frac{P_r}{P_e} = G_e \cdot G_r \frac{\lambda^2}{16 \pi^2 r^2}$$

G_e et G_r Sont respectivement les gains d'antennes à l'émission et à la réception, λ est la longueur d'onde transmise, r est la distance séparant l'émetteur et le récepteur.

Si on néglige l'influence des obstacles, difficile à évaluer, on peut calculer la puissance reçue P_r à l'entrée du récepteur grâce à la formule de Friis :

$$P_r = G_e \cdot G_r \cdot P_e \frac{\lambda^2}{16 \pi^2 r^2}$$

L'affaiblissement de puissance A , dit affaiblissement en espace libre, peut encore s'écrire sous la forme suivante :

$$A = \left(\frac{4 \pi r}{\lambda} \right)^2$$
$$A(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4 \pi r}{\lambda} \right) = 22 + 20 \log \left(\frac{r}{\lambda} \right)$$

La puissance reçue peut aussi s'exprimer sous la forme après la conversion aux décibels :

$$P_r = P_e + G_e + G_r - A$$

Dans ce cas, nous cherchons l'atténuation maximale permmissible :

$$A = P_e + G_e + G_r - P_r$$

Et puisque l'atténuation est liée à la longueur d'onde et à la distance par la relation :

$$A = P_e + G_e + G_r - P_r$$

$$A = 36 + 10 + 10 - (-60) = 116 \text{ dB} \quad (\text{en utilisant certaines mesures})$$

$$116 = A(\text{dB}) = 22 + 20 \log \left(\frac{r}{\lambda} \right) \rightarrow \lambda = 0.5 \text{ m et } r = 25 \text{ km par exemple}$$

II.2.4- Les différents types d'antennes pour station de base:

Le choix d'une antenne se fait donc tout d'abord en fonction de la forme et de la taille de la cellule à couvrir afin d'en optimiser la couverture [15]:

- **Les antennes omnidirectionnelles** : celle-ci présentent des gains relativement faibles (on atteint difficilement 10 dB) et sont placées au centre de la cellule. L'énergie rayonnée est équi-répartie dans l'espace, il n'y a pas de direction privilégiée.
- **Les antennes sectorielles (directives)** : les secteurs couverts peuvent être variables, classiquement 60° ou 90°. Le gain obtenu est plus important que celui d'une antenne omnidirectionnelle, l'utilisation de quatre antennes d'ouverture 90° ou encore de six antennes d'ouverture 60° permet de retrouver une couverture omnidirectionnelle.
On peut citer : Antenne panneau, Antenne patch, Antenne parabolique ...

II.3- La propagation des ondes

La propagation est un phénomène électromagnétique dans lequel l'énergie voyage dans des ondes à travers un milieu donné, ce milieu peut être l'air, l'eau, fibre optique ... [11].

Ce phénomène est similaire à celui observé lorsqu'on jette un caillou dans un étang, ce qui produit des ondulations qui se propagent en s'éloignant du point d'impact.

II.3.1- L'atmosphère :

L'atmosphère qui nous entoure est généralement divisée en cinq couches : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère. Du point de vue des ondes électromagnétiques et de leurs propriétés électriques, la mésosphère et la thermosphère sont regroupées sous le nom d'ionosphère. L'ionosphère s'étend sur environ 60 km à 800 km de la surface de la Terre. Les énergies solaires et cosmiques (ultraviolets, rayon α , β et γ) ionisent les molécules d'air de cette couche, cette ionisation étant plus importante le jour que la nuit.

On distingue dans l'ionosphère trois couches D, E et F [13] (figure 2.5). Ces couches absorbent, réfléchissent ou encore laisse passer les signaux radio selon l'heure, la saison et les conditions de propagation. Voici la description des quatre couches contenues dans l'ionosphère :

Paramètres	Couche D	Couche E	Couche F
Altitude (Km)	60 à 80	80 à 140	140 à 800
Indice de Réfraction	0,99 (à 70 km)	0,95 (à 120 km)	0,31 (à 300 km)

Tableau 2.2 : les couches de l'ionosphère

Couche D :

La première couche de l'ionosphère, située à une altitude varie entre 60 et 80 km, présente le jour dû au rayon solaire et disparaît la nuit. Elle atténue et réfléchit les signaux de basses fréquences (30 à 300KHz) et laisse passer les fréquences supérieures.

Couche E :

Seconde couche de l'ionosphère située à une altitude entre 80 et 140 km, présente le jour et elle disparaît la nuit. Elle atténue et réfléchit les signaux de moyennes fréquences (300 KHz à 3 MHz) et laisse passer les fréquences supérieures, cette couche peut réfléchir les signaux de hautes fréquences.

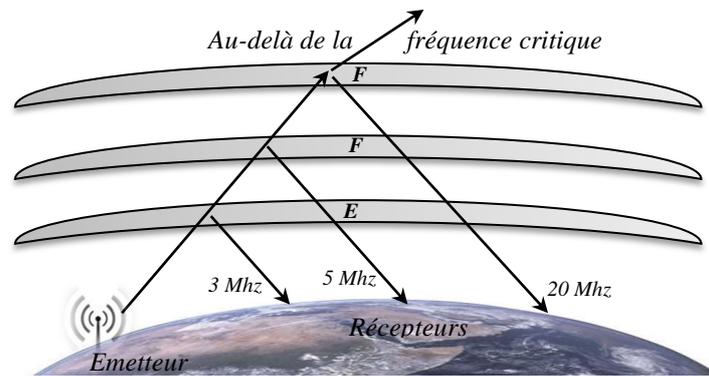


Figure 2.5 : Couches atmosphériques mises en jeu en fonction de la fréquence d'émission

Couche F :

La couche F est tout le temps présente avec la particularité de se dédoubler la journée pour former deux sous-couches F1 et F2 à des altitudes respectivement plus basses (environ 140) et plus hautes (environ 400 km) que l'altitude moyenne diurne. Comme pour la couche E, la couche F réfléchit les ondes de hautes fréquences dont les fréquences sont inférieures à une fréquence appelée fréquence critique. Au-delà de cette fréquence et suivant leurs incidences, les ondes sont transparentes pour la couche ionosphérique, elles ne sont pas renvoyées vers la Terre (figure 2.5).

II.3.2- Modes de propagation

La propagation des ondes radio entre une antenne émettrice et une antenne réceptrice peut être effectuée de plusieurs façons suivant sa fréquence : au moyen de la surface terrestre (ondes de sol), de réflexions naturelles ou artificielles (ondes réfractées), et directe [13] :

II.3.2.1- Propagation directe :

Il consiste en une propagation directe d'une antenne à l'autre en ligne de vue "propagation en ligne de vue". Il est le phénomène le plus répandu et surtout pour les communications de type micro-ondes commerciales.

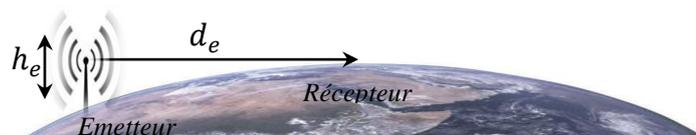


Figure 2.6 : propagation en ligne de vue

Cette propagation d'ondes, utilisée à partir des très hautes fréquences (VHF) (figure 2.6), permet un voyage sur une portée limitée puisque la surface de la terre n'étant pas plane.

II.3.2.2- Propagation par ondes de sol

Les ondes de surface sont des ondes qui se propagent le long du sol, ses ondes de sol (figure 2.7) suivent la courbure de la Terre et leurs portées (à puissance émise constante) dépendent essentiellement de trois paramètres :

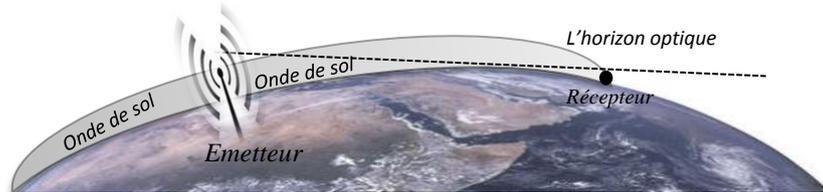


Figure 2.7 : Propagation par ondes de sol

- de la nature du sol, en particulier de sa conductivité, puisque la terre n'est pas un conducteur électrique parfait, les ondes de sol sont atténuées rapidement pendant qu'elles suivent la surface de la terre,
- de la fréquence,
- de la puissance émise.

II.3.2.3- Réflexions ionosphériques

Cela se produit lorsque l'onde est émise du sol vers l'espace, et suivant la fréquence des ondes émises, elles sont réfléchies par une couche de l'ionosphère en direction de la Terre (figure 2.5). Les couches ionosphériques agissent comme des miroirs ce qui permet d'atteindre des distances importantes.

L'onde se trouve donc à faire des sauts comme un ballon rebondissant sur le sol en avançant. Ces sauts peuvent s'étaler sur une distance de quelques centaines de kilomètres jusqu'à quelques milliers de kilomètres.

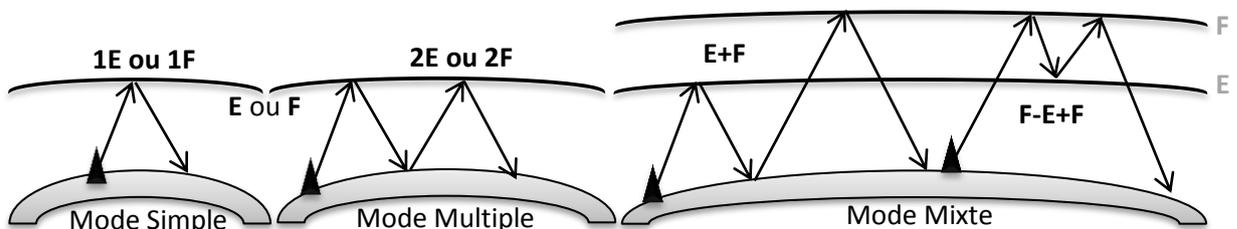


Figure 2.8 : Modes de réflexions ionosphériques

Plusieurs modes de réflexions sont possibles (figure 2.8) [14] :

- Simple : une réflexion d'un seul rebond sur la couche E ou la couche F,

- Multiple : quand le circuit comporte 2 ou plusieurs rebonds sur la même couche E ou F, on peut avoir les multiples « 2E ou 2F, 3F, 4F... »,
- Mixte : Lorsque la propagation du signal fait appel à la couche E d'abord puis à la couche F (ou le contraire).

II.3.2.4- Propagation E - sporadique

En certaines périodes de l'année, se forment au niveau de la couche E des nuages fortement ionisés, capables de réfléchir les ondes de fréquences beaucoup plus élevées que ne le fait habituellement la couche E. Ce phénomène se produit lorsque l'onde incidente dans l'ionosphère se retrouve emprisonné dans la couche E, par conséquent entre les couches D et F, et qu'elle est alors transporté sur une grande distance.

II.3.3- Bandes de fréquences

Les fréquences radio sont divisées en bandes, à chaque bande de fréquence correspond un mode de propagation destinée à des applications spécifiques [13] :

- **Bande VLF (Very Low Frequency) : 3 à 30 kHz**

Pour cette bande de fréquence, les ondes se propagent entre la surface de la Terre et l'ionosphère où la propagation des ondes correspond à des ondes de surface. Des distances de plusieurs milliers de kilomètres peuvent être atteintes. Ces ondes de très basses fréquences peuvent être réfléchies le jour par les couches D et E de l'ionosphère et peuvent se propager dans l'eau à quelques dizaines de mètres (utilisée dans les applications militaires sous-marines).

- **Bande LF (Low Frequency) : 30 à 300 kHz**

Les ondes LF se propagent essentiellement en onde de surface, guidées par la surface de la Terre. Elles peuvent être réfléchies la nuit, leur portée atteint quelques milliers de kilomètres.

- **Bande MF (Medium Frequency) : 300 kHz à 3 MHz**

Les ondes MF se propagent essentiellement en ondes de surface mais sont plus atténuées que les ondes LF. De ce fait leur portée est de l'ordre de la centaine de kilomètres, ces ondes utilisent aussi les réflexions ionosphériques sur les couches basses.

- **Bande HF (High Frequency) : 3 à 30 MHz**

Les ondes HF se propagent essentiellement par réflexions ionosphériques qui peuvent être multiples. De ce fait leur portée peut atteindre quelques milliers de kilomètres.

- **Bande VHF (Very High Frequency) : 30 à 300 MHz**

Les ondes VHF se propagent en trajet direct entre un émetteur et un récepteur, sans utiliser ni les réflexions ionosphériques, car la couche est transparente pour ces fréquences, ni les ondes de surface, car elles sont absorbées à ces fréquences.

- **Bande UHF (Ultra High Frequency) : 300 MHz à 3 GHz**

Les ondes UHF se propagent comme les ondes VHF, cette bande est largement utilisée pour toutes les communications de type mobiles et télévisuelles.

- **Bande SHF (Super High Frequency) : 3 à 30 GHz**

Les ondes SHF se propagent en vue directe, ces ondes sont aussi appelées hyperfréquences. Cette bande est utilisée essentiellement pour les communications mobiles et satellitaires.

- **Bande EHF (Extremely High Frequency)**

Les ondes EHF se propagent en vue directe, ces ondes sont essentiellement utilisées pour des applications de radioastronomie, de télédiffusion satellitaire et radio amateur.

II.3.4- Effets sur la propagation du signal

La propagation de l'onde radio dans l'espace libre dépend fortement de la fréquence du signal et des obstacles dans son chemin (figure 2.9), il y a quelques effets principaux sur le comportement de signal :

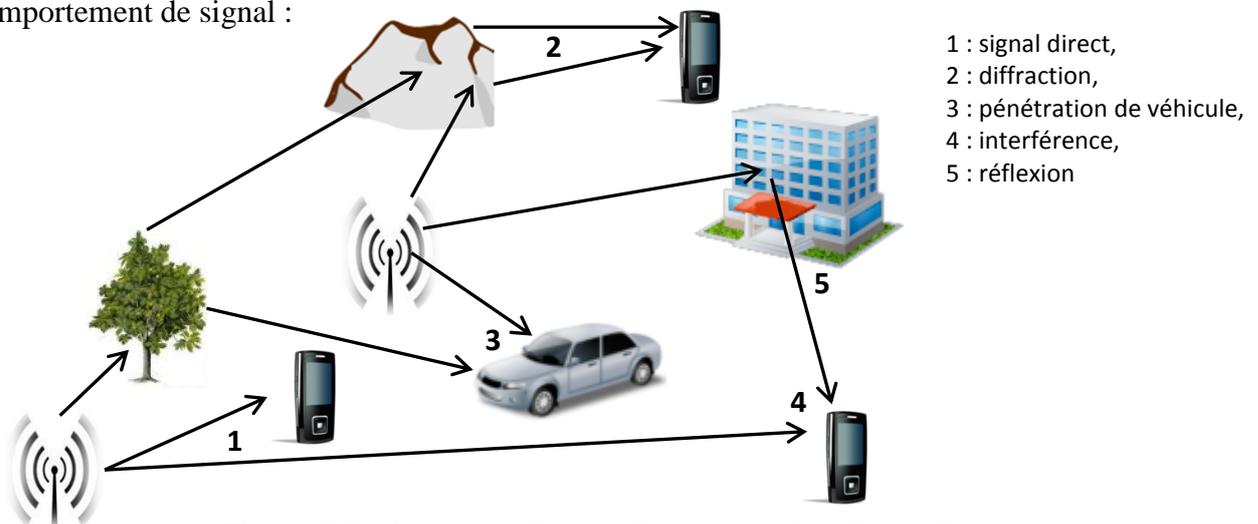


Figure 2.9 : facteurs affectant la propagation des ondes

II.3.4.1- L'absorption :

L'absorption décrit comment un signal est absorbé par des objets. Quand une onde radio heurte des matériaux, elle peut être absorbée. Elles peuvent être absorbées aussi par des bâtiments, des arbres, ou des collines ... etc. Plus la quantité d'absorption d'ondes est grande, moins géographiquement la région est couverte [11].

L'absorption peut être compensée par les manières suivantes:

- En utilisant des antennes à gain élevé,
- En utilisant des puissances plus élevée, afin de couvrir la même région géographique,
- En diminuant les distances entre les stations de base

II.3.4.2- Les réflexions :

De la même manière que les ondes de lumières peuvent être reflétées par un miroir, les ondes radio peuvent également être reflétées (figure 2.10). Quand un signal est reflété il y a normalement une certaine perte du signal, par l'absorption ou en raison d'une partie du signal passant dans le milieu. Des surfaces telles que la mer fournissent une bonne réflexion, tandis que d'autres comme les surfaces de désert sont les pauvres réflecteurs [4].

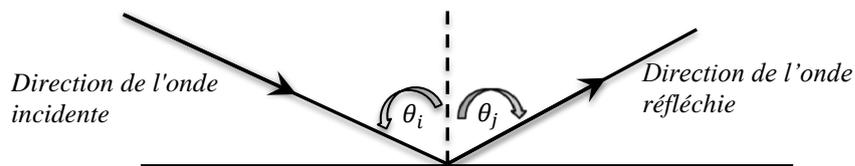


Figure 2.10 : La réflexion d'une onde électromagnétique

Une réflexion s'accompagne souvent de diffusion quand la surface réfléchissante n'est pas parfaitement plane et lisse.

II.3.4.3- Les réfractions :

La réfraction des ondes radio est très similaire à celle de la lumière aussi, elle se produit pendant que l'onde traverse des milieux où l'indice de réfraction n'est pas le même. Pour les rayons lumineux on peut l'expliquer par le phénomène optique du bâton qui paraît cassé quand on le plonge dans un seau d'eau [4] (figure 2.11).

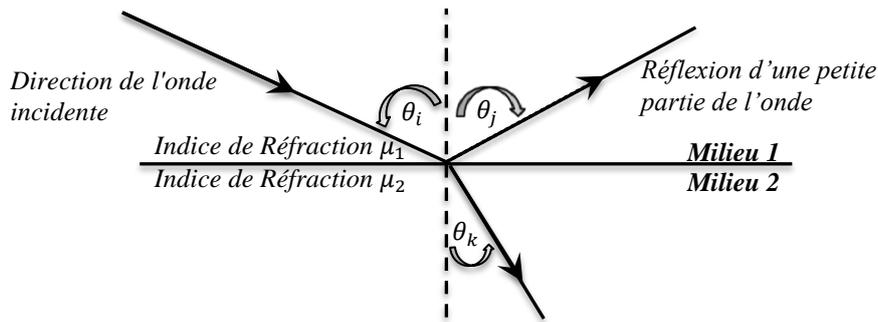


Figure 2.11 : La réfraction d'une onde électromagnétique entre deux milieux avec indices de réfraction différents

L'angle de réfraction θ_k dépend de l'angle d'incidence θ_i mais aussi de l'indice de réfraction μ_1 du milieu correspondant au milieu 1 et de l'indice de réfraction μ_2 . La formule qui lie les uns et les autres est :

$$\mu_1 \sin \theta_i = \mu_2 \sin \theta_k$$

II.3.4.4- Les Difractions

La diffraction est un autre phénomène qui affecte les ondes radio, on le constate que quand les signaux rencontrent un obstacle, et ils tendent à voyager autour de lui (figure 2.12).

Ceci veut dire qu'un point de diffraction peut être considéré comme une deuxième source d'ondes, qui introduit une zone d'ombre immédiatement derrière l'obstacle (shadow zone). Le signal se diffractera autour de l'obstacle et commencera à remplir le vide, en permettant de ce fait la réception derrière l'obstacle malgré qu'il ne soit pas en vue directe de l'émetteur.

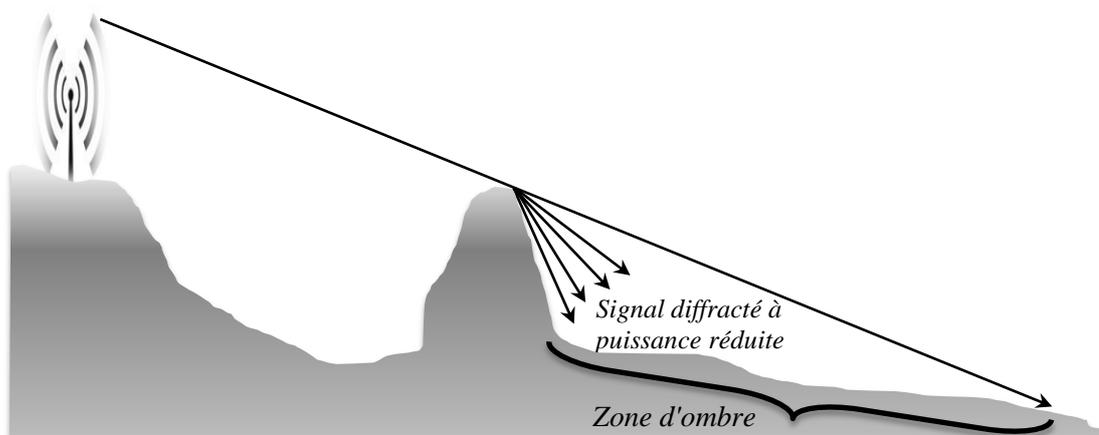


Figure 2.12 : La diffraction d'un signal autour d'un obstacle

On constate également que les signaux de basse fréquence se diffractent plus visiblement que les signaux de haute fréquence [4].

II.3.4.5- Phénomène multi-trajet

L'onde radio transmise ne voyage presque jamais dans un chemin direct de l'antenne d'émission vers l'antenne de réception. Donc, le signal reçu par l'antenne de réception est la somme de tous les composants du signal transmis par l'antenne de transmission (les signaux directs et indirects), ces signaux arrivent avec différentes phases.

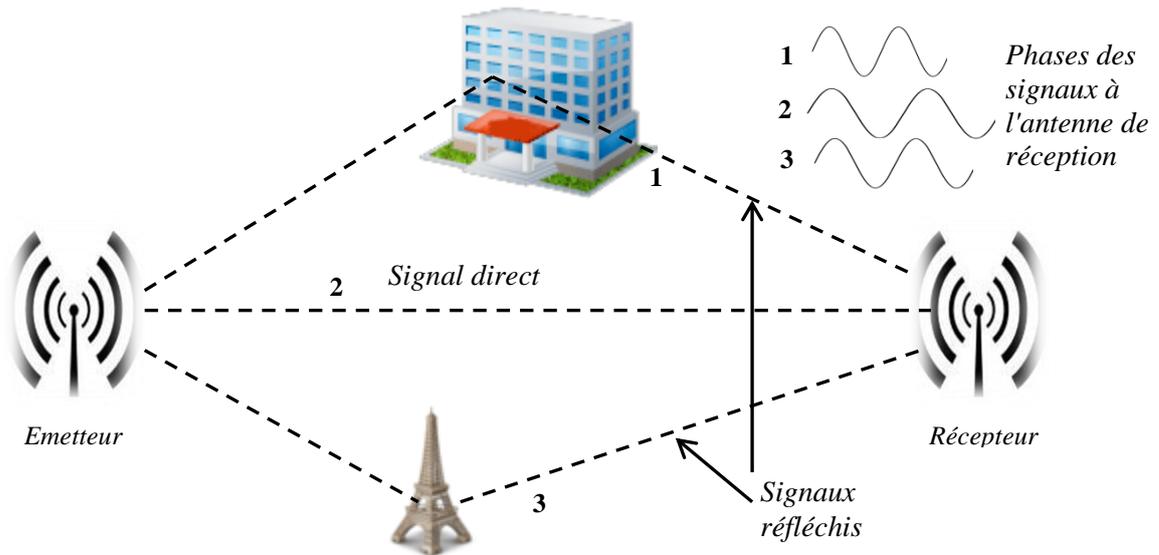


Figure 2.13 : exemple de réception d'un signal multi-trajets

Les signaux multi-trajets se résultent à cause de la réflexion aux mers, véhicules, bâtiments, ou n'importe quoi sur leur chemin à l'antenne de réception.

II.3.4.6- Zone de silence et Zone d'interférences

En fonction des propagations par ondes de sol et par réflexions ionosphériques, il existe des zones géographiques (skip zone), où aucune information ne peut être reçue (figure 2.14).

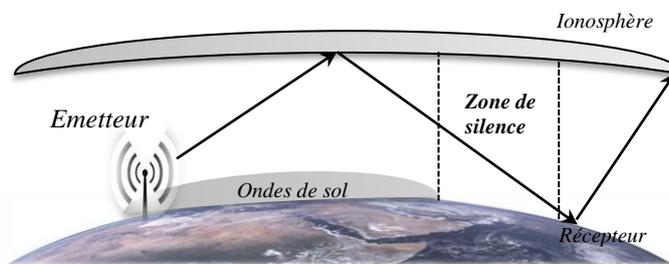


Figure 2.14 : Zone de silence

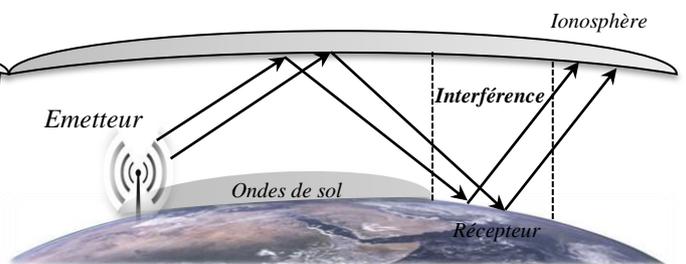


Figure 2.15 : Zone d'interférence

Et lorsque les deux ondes (sol et réflexion ionosphérique) se retrouvent au même endroit, elles interfèrent (figure 2.15).

Conclusion

Nous avons présenté un bref chapitre sur le transfert de l'information dans l'air. Où nous avons commencé par présenter les antennes, ensuite les caractéristiques essentielles de la propagation dans les différents environnements.

Dans le chapitre suivant, nous allons mettre l'accent sur les différents standards radios qui organisent l'interface air et partagent la ressource disponible.

Chapitre III

Les Standards Radios

Introduction

Le système proposé doit assurer la convergence et la circulation de trois flux de trafic sur la même architecture : service de téléphonie mobile, accès à l'internet et la vidéo en continu (streaming).

L'objectif de ce chapitre est d'introduire le standard et les techniques utilisées pour organiser l'interface air dans la conception de notre réseau. Nous commençons par explorer les principaux standards disponibles puis nous détaillons le standard choisi et ses techniques qui le rendre capable de satisfaire nos besoins.

III.1- Modèle OSI de l'ISO

Afin de réduire la complexité de conception d'un réseau l'Organisation Internationale de Normalisation (*ISO : International Organization for Standardization*) a fourni une base commune pour décrire les systèmes de communication en introduisant un modèle d'interconnexion de systèmes appelé *OSI (Open Systems Interconnection)* [22]. L'organisation en couche est le concept le plus important du modèle OSI, chaque couche représente un module indépendant qui contient un ensemble de fonctions (le fonctionnement de chaque couche repose sur l'utilisation des services de la couche inférieure pour fournir des services à la couche supérieur). Les données sont traitées successivement couche par couche.

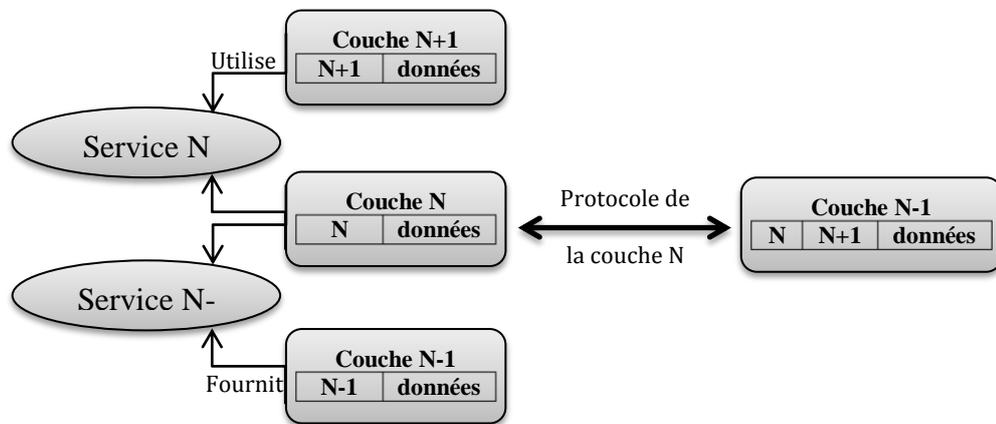


Figure 3.1 : Les communications entre couches dans le modèle OSI

La communication entre couches adjacentes utilise la notion d'encapsulation des données où chaque couche ajoute un en-tête à l'émission qui sera retiré à la réception (extraction de la donnée).

Le modèle de référence *OSI* contient 7 couches, l'organisation et la fonctionnalité de chaque couche sont représentées dans la figure suivante :

7- Application	Sert de point d'accès aux services réseaux pour l'utilisateur
6- Présentation	Réalise des fonctions sur la présentation des données (syntaxe, compactage, ...etc.)
5- Session	Organise et synchronise les échanges entre les applications
4- Transport	Assure la transmission de données de bout en bout
3- Réseau	Permet d'acheminer les paquets via le réseau (routage et adressage)
2- Liaison de données	Chargée de relier deux nœuds de réseau sur une liaison physique
1- Physique	Définit la façon dont les données sont physiquement transferts

Figure 3.2 : Modèle OSI

III.2- Les interfaces radio dans l'IEEE 802

Le monde des télécommunications sans fil s'évolue de façon rapide, et les technologies en cours de recherche ou de développement promettent d'offrir plus de services à plus d'utilisateurs en moins de temps.

Dans le cadre de notre thèse il nous faut une technologie récente capable de satisfaire nos besoins en termes des services offerts, le débit et la qualité de service (*QOS*). Dans le paragraphe suivant nous essayons brièvement de récapituler les caractéristiques des 3 standards dominants. L'*IEEE 802.15*, pour les petits réseaux personnels d'une dizaine de mètres de portée, *IEEE 802.11* ou *Wi-Fi*, pour les réseaux *WLAN* (Wireless Local Area Network), *IEEE 802.16* ou *WiMAX*, pour les réseaux *WMAN* (Wireless Metropolitan Area Network):

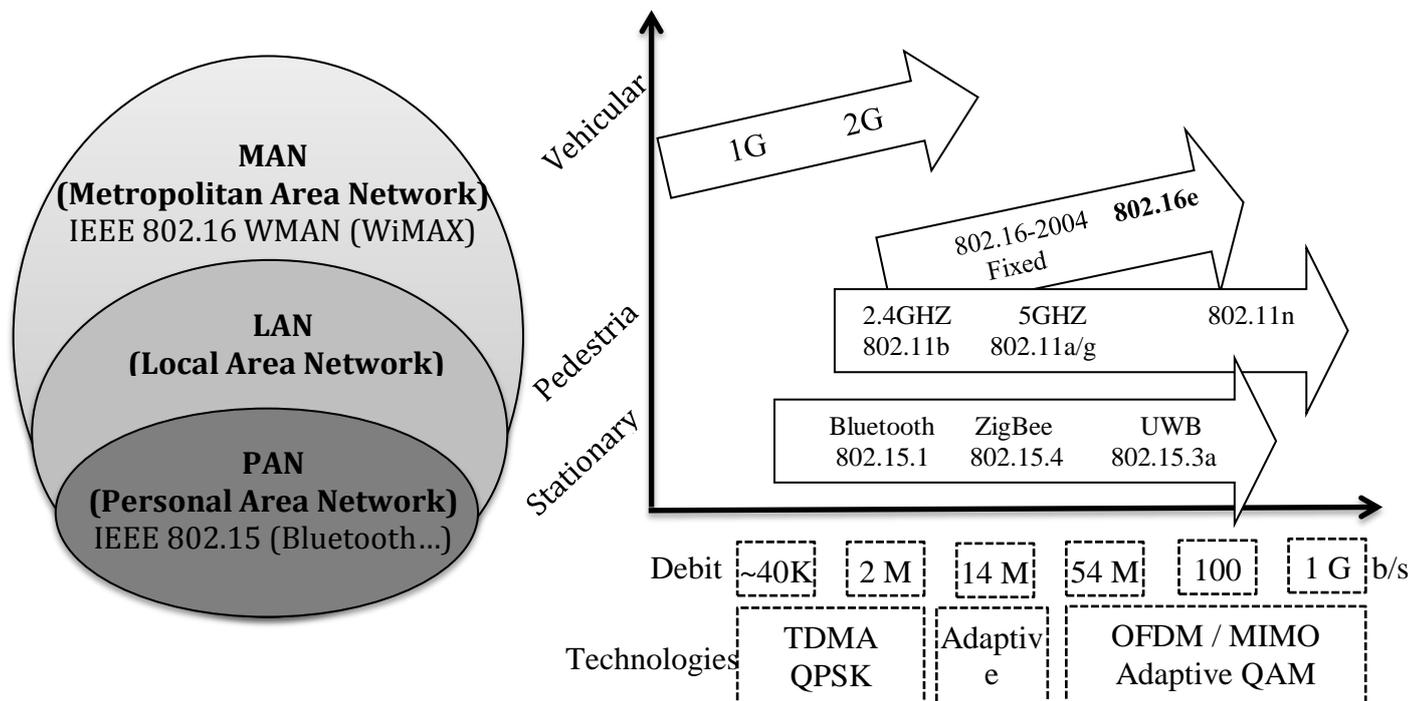


Figure 3.3 : Types des interfaces radio

III.2.1- Le standard IEEE 802.11 :

Les spécifications de ce standard couvrent les deux couches : Physiques, Liaison de données et application du modèle *OSI*. Dans la couche physique, 4 modes de transmissions sont définis :

- *FHSS* (Frequency Hopping Spread Spectrum),
- *DSSS* (Direct Sequence Spread Spectrum),
- *IR* (Infrarouge),
- *OFDM* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Le *FHSS* et le *DSSS* utilisent la bande 2.4 GHz, l'infrarouge n'est utilisé que dans les cas où les distances entre les différentes stations sont faibles tandis que la quatrième couche physique a été

définie dans la bande 5.2 GHz. Ce dernier type de couches physiques offre des débits compris entre 6 et 54 Mbit/s grâce au codage *OFDM*.

Pour qu'un signal soit reçu correctement, sa portée ne peut pas dépasser 150 m dans un environnement de bureau, 600 m sans obstacle et 1,5 km avec des antennes extérieures. En pratique, les stations ont une portée maximale de 50 m.

Les normes *802.11a*, *802.11b* et *802.11g*, appelées «normes physiques» correspondent à des révisions du standard 802.11 et proposent des modes de fonctionnement, ce qui permet d'obtenir des différents débits en fonction de la portée.

- **La norme *802.11a*** : permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbps, soit cinq fois plus que le *802.11b*, pour une portée d'environ une trentaine de mètres seulement. La norme *802.11a* s'appuie sur un codage de type *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) en utilisant 8 canaux sur la bande de fréquence 5 GHz.

Débit théorique (en intérieur) Portée

54 Mbits/s	10 m
48 Mbits/s	17 m
36 Mbits/s	25 m
24 Mbits/s	30 m
12 Mbits/s	50 m
6 Mbits/s	70 m

- **La norme *802.11b*** : permet d'obtenir un débit théorique de 11 Mbps, pour une portée d'environ cinquantaine de mètres en intérieur et jusqu'à 200 mètres en extérieur (et même au-delà avec des antennes directionnelles), les équipements *802.11a* ne sont donc pas compatibles avec les équipements *802.11b*.

Débit théorique Portée(en intérieur) Portée (à l'extérieur)

11 Mbits/s	50 m	200 m
5,5 Mbits/s	75 m	300 m
2 Mbits/s	100 m	400 m
1 Mbit/s	150 m	500 m

- **La norme *802.11g*** : permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbps pour des portées équivalentes à celles de la norme *802.11b*. D'autre part, la norme utilise la bande de fréquence 2,4GHz avec un codage *OFDM*, et elle est compatible avec les matériels *802.11b*, à l'exception de certains anciens matériels.

Débit théorique Portée(en intérieur) Portée (à l'extérieur)

54 Mbits/s	27 m	75 m
48 Mbits/s	29 m	100 m
36 Mbits/s	30 m	120 m
24 Mbit/s	42 m	140 m
18 Mbit/s	55 m	180 m
12 Mbit/s	64 m	250 m
9 Mbit/s	75 m	350 m
6 Mbit/s	90 m	400 m

III.2.2- Le standard IEEE 802.15 :

Dans le groupe *IEEE 802.15*, trois sous-groupes normalisent des gammes de produits en parallèle :

- **IEEE 802.15.1** : la plus connu, prend en charge la norme Bluetooth, et aujourd'hui elle est largement commercialisée. La version 3.0 utilise l'interface radio décrite dans *IEEE 802.15.3*, ce qui procure à Bluetooth une nouvelle jeunesse, avec un débit de 480 Mbit/s.
- **IEEE 802.15.3** : définit la norme *UWB* (Ultra-Wide Band), qui met en œuvre une technologie très spéciale, caractérisée par l'émission à une puissance extrêmement faible, sous le bruit ambiant, mais sur pratiquement l'ensemble du spectre radio (entre 3,1 et 10,6 GHz). Le débit est de 480 Mbit/s sur une portée de 3 m et décroît à environ 120 Mbit/s sur une dizaine de mètres.
- **IEEE 802.15.4** : s'occupe de la norme *ZigBee*, qui a pour objectif de promouvoir une puce offrant un débit relativement faible mais surtout à un coût très bas. *ZigBee* est avant tout normalisé pour le passage des commandes plutôt que des données.

III.2.3- Le standard IEEE 802.16 :

L'*IEEE* a mis en place le groupe de travail *802.16* pour proposer des standards de réseaux métropolitains. Ce groupe a préoccupé d'abord de la bande du spectre hertzien et a proposé l'utilisation de certaines bandes, comprises entre 2 et 11 GHz dont les fréquences ne sont pas trop directives, et des plages situées entre 11 et 66 GHz dont les fréquences sont hyper directives et demandent une visibilité directe des antennes.

Les 4 révisions les plus importantes du standards *802.16* sont :

- **IEEE 802.16** : Finalisé en décembre 2001, il concerne les bandes comprises entre 10 et 66 GHz, avec une vision directe entre les deux antennes pour des applications point à point.
- **IEEE 802.16a** : Finalisé en janvier 2003, il complète le précédent pour la bande entre 2 et 11 GHz. Ce standard s'adapte à des environnements multipoint et tient compte des impératifs des applications multimédias pour les acheminer.
- **IEEE 802.16-2004** : Révise et corrige quelques erreurs détectées dans les standards *802.16* et *802.16a* et apporte des améliorations. C'est le standard que suivent les produits *WiMAX fixe*.
- **IEEE 802.16e** : Le standard est sorti en décembre 2005, dans le but de permettre la mise en place des liaisons *ADSL* vers les mobiles. Les changements intercellulaires ou handovers sont pris en charge par le système en donnant naissance au *WiMAX mobile* qui fonctionne sur une bande avec licence située en dessous des 6 GHz.

III.3- Motivation du standard choisi «IEEE 802.16»

Notre conception dans le chapitre suivant va sûrement suivre un standard, et il est clairement que *l'IEEE 802.16 (WiMAX)* un standard nouveau conçu dans l'objectif de fournir un accès à haut débit, en tenant compte les besoins des utilisateurs et des applications en terme de qualité de service (*QoS*), mobilité et de sécurité.

L'IEEE 802.16 est généralement comparé avec les réseaux de *3G* et *Wifi*, et contrairement aux *3G*, ce standard permet de sélectionner la bande de transmission à partir de 1.25 GHz jusqu'à 20 GHz, ce qui donne une flexibilité importante au déploiement. *Wimax* et *wifi* utilisent la technique *OFDM* tandis que les réseaux de *3G* utilisent *CDMA*.

Mais *WiMAX* n'est pas juste une version moderne et amélioré de *Wifi*, il offre une bande passante suffisante pour plusieurs canaux simultanés de voix *IP*, de vidéo et de flux internet. Aucune borne *WIFI* ne peut atteindre les rayons d'actions nécessaire pour des réseaux de taille urbain (*MAN* : Metropolitan Area Network), soit plusieurs kilomètres.

Théoriquement, le rayon d'une cellule peut atteindre 50 km avec un débit de 75 Mbps [28] (grâce à la technique de modulation *OFDM*, et la technique *MIMO*, seront détaillés plus tard), mais pratiquement on trouve surement des débits inférieurs.

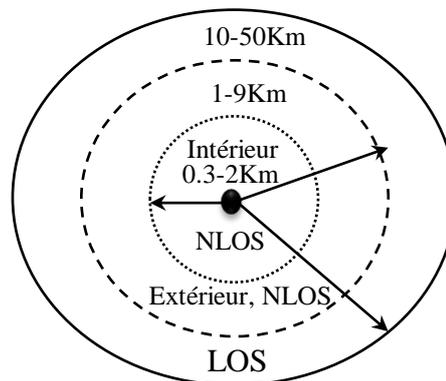


Figure 3.4 : la portée de l'IEEE 802.16 (selon le type de l'antenne)

En fait, les distances maximales admissibles sont de l'ordre de 10 et 30 km [3], avec un débit qui peut atteindre 46 Mbps sur la voie descendante et 7 Mbps sur la voie montante [29] (ces valeurs sont aussi variables selon certaines conditions), mais restent toujours intéressent comme débit ou portée.

C'est la dernière mouture du standard qui nous intéresse « *IEEE 802.16 2005* », elle couvre aussi les terminaux mobiles et définit des mécanismes évolués de gestion des handovers.

Cette stabilisation a permis à un assez grand nombre d'équipements de faire leur entrée sur ce secteur et de mettre sur le marché les premiers produits *WiMAX* en 2007.

III.4- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):

Les origines de multiplex à division de fréquences orthogonales connu sous le nom *OFDM* (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) remontent à plusieurs années avant, mais c'est au 1966 qu'un article [34] expliqua le concept de L'*OFDM* en proposant d'envoyer un signal série de façon parallèle sur des sous-porteuse orthogonales. Un autre article [35] en 1971 propose d'utiliser une transformé de Fourier discrète inverse (*IDFT*) pour la modulation et une transformé de Fourier discrète (*DFT*) pour la démodulation.

A nos jours cette modulation est utilisée dans de nombreuses normes, *DAB* (Digital audio broadcasting), *DVB* (Digital Video Broadcasting), Hiperlan/2, *IEEE 802.11*, *IEEE802.16* ...

Le principe de l'*OFDM* consiste à diviser sur un grand nombre de porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre (figure 3.5). Pour que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre les mêmes informations sur une plage de fréquences plus réduite, l'*OFDM* utilise des porteuses orthogonales.

III.4.1- Multi-Porteuse et notion d'orthogonalité :

La grande opportunité de l'*OFDM* par rapport aux techniques classiques de modulation est que cette dernière autorise un fort recouvrement spectral entre les sous-porteuses, ce qui permet d'augmenter sensiblement leur nombre.

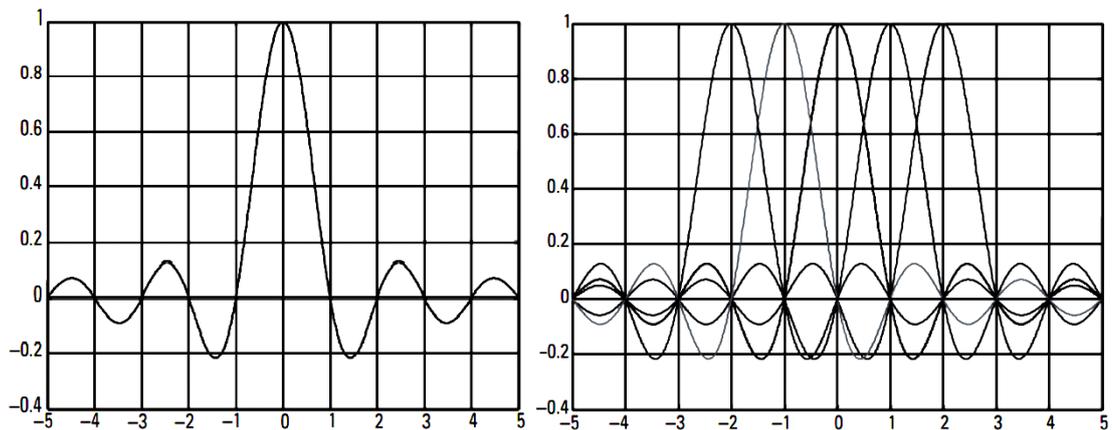


Figure 3.5 :Sous-porteuses OFDM

Cependant, pour que ce recouvrement n'ait pas d'effet néfaste, les sous-porteuses doivent respecter une contrainte d'orthogonalité, à la fois dans les deux domaines temporel et fréquentiel, où elles sont alignées de telle sorte que les valeurs nulles du spectre d'une sous-porteuse coïncident avec les valeurs non nulles de fréquence des sous-porteuses adjacentes, ce qui entraîne un chevauchement spectral partiel et grâce à cette contrainte que les sous-porteuses peuvent se chevaucher sans interférer entre elles.

Mathématiquement l'orthogonalité entre deux fonctions $f(t)$ et $g(t)$ dans l'intervalle $[a, b]$ est définie par la relation (des contraintes sur les deux fonctions doivent être vérifiées):

$$\int_a^b f(t).g(t) = 0$$

Physiquement les sous-porteuses de l'*OFDM* sont orthogonales deux à deux (chacune avec la précédente) et ces ondes sous-porteuses peuvent être faites orthogonales si l'espacement entre les

sous-porteuses est un multiple de $\frac{1}{T}$ [24], (pratiquement un espacement rigoureusement régulier de $f_u = \frac{1}{T_u}$ entre les sous-porteuses, où T_u est la période utile du symbole).

Puisque il s'agit d'une forme de *MFR* (Multiplex par répartition en fréquence) on compare les deux techniques *FDMA* (voir chapitre 1) et l'*OFDM* [24] (la figure 3.6) :

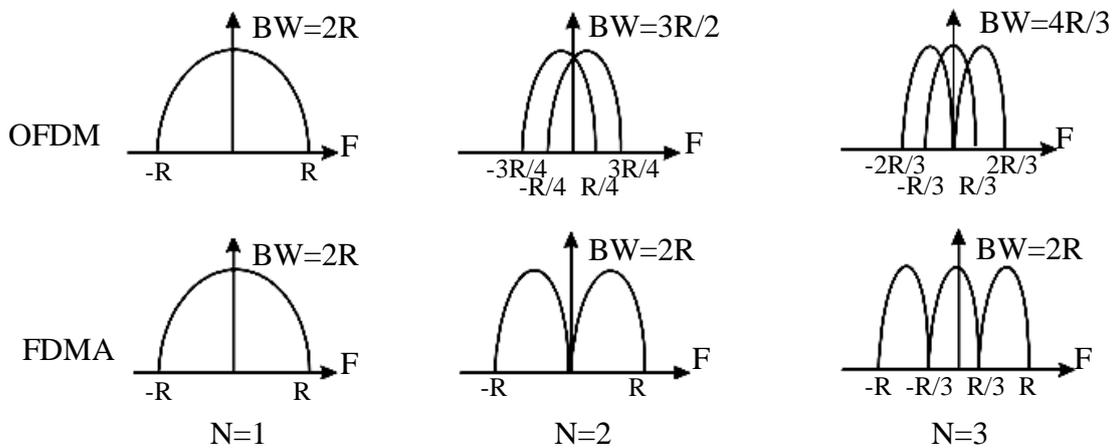


Figure 3.6 : Comparaison de l'OFDM avec l'FDMA

Et comme gain total la figure 3.7 illustre la bande passante qu'on peut profiter pour modéliser d'autres séries de sous-porteuses [31] :

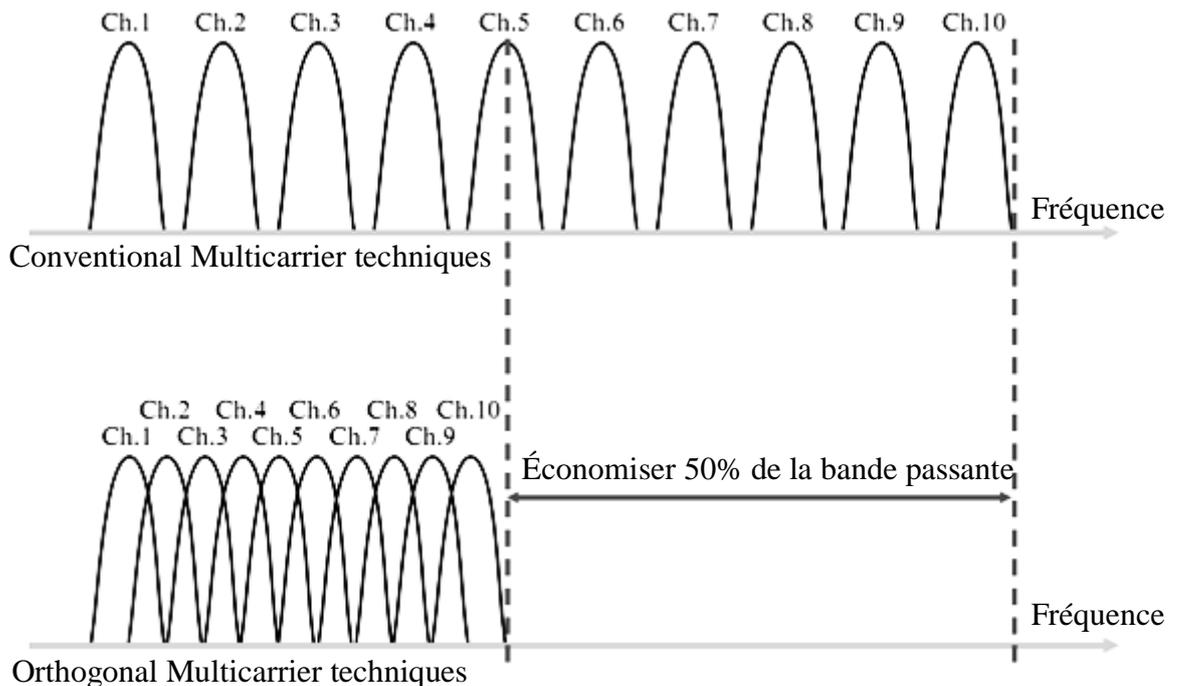


Figure 3.7 : le gain de la technique OFDM en termes de la bande passante

Donc si le signal *OFDM* est un simple multiplexage en fréquence, la $k^{ième}$ sous porteuse peut s'écrire sous la forme :

$$\varphi_k(t) = e^{jk\omega_u t}$$

$$\text{avec } \omega_u = 2\pi/T_u$$

Et les porteuses doivent satisfaire la condition [26] :

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \varphi_k(t)\varphi_1(t)dt = \begin{cases} 0, & \text{si } k \neq 1 \\ T_u, & \text{si } k=1 \end{cases}$$

$\varphi_k(t)$: Forment une base orthogonale de l'espace temps-fréquence

III.4.2- Multi-trajet

La probabilité de recevoir uniquement une onde directe provenant d'un émetteur est très faible, c'est ce qu'on a expliqué dans le chapitre 2. Des effets sur la propagation du signal engendre le phénomène de multi trajet (figure 2.13 – chapitre 2), parmi ces effets qui caractérise le canal radio on trouve :

- La réflexion du signal sur un obstacle (figure 2.10),
- La réfraction du signal lorsque celui-ci traverse un milieu d'indice différent de celui d'où il provient (figure 2.11),
- La diffraction due à un obstacle (figure 2.12).

On va donc recevoir le signal émis par l'émetteur ainsi qu'une multitude de signaux atténués et retardés provenant des différents échos, ces signaux sur plusieurs trajets qui représentent en réalité la même information arrivent avec un délai entre eux. Donc au récepteur, on aura des symboles affectés par d'autres symboles en retards.

Si on prend le symbole transmis n comme exemple, le récepteur s'efforcera de démoduler les données contenues dans ce symbole en examinant toutes les informations reçues (directement ou avec un retard) par rapport à ce symbole n .

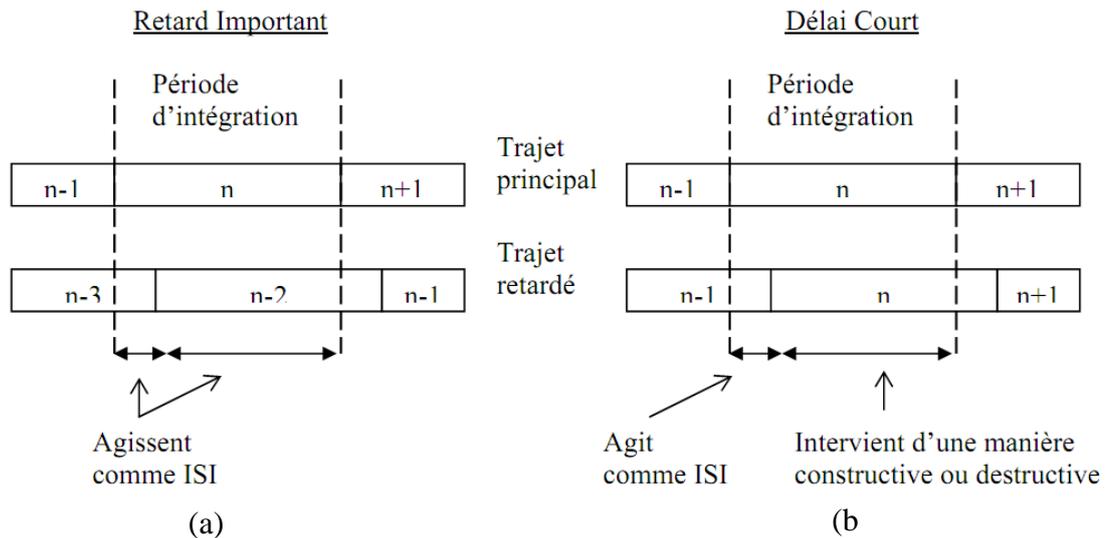


Figure 3.8 : Les interférences inter symboles (ISI)

- Lorsque le retard relatif est supérieur à une période de symbole (figure 3.8.a), le signal provenant du second trajet agit uniquement comme un brouillage, puisqu'il n'achemine que des informations appartenant à un ou plusieurs symbole(s) précédent(s). Un tel brouillage inter symbole (*ISI*) implique que le signal retardé ne peut avoir qu'un niveau très faible car ce dernier a subi trop d'atténuation.
- Lorsque le retard relatif est inférieur à une période de symbole (figure 3.8.b), seule une partie du signal transmis sur ce trajet agit comme un brouillage, puisqu'elle n'achemine que des informations appartenant au symbole précédent. Le reste achemine des informations du symbole utile, donc, peut s'ajouter de manière constructive ou destructive aux informations du trajet principal.

L'ajout d'un temps de garde T_g permet si on le choisit soigneusement d'éliminer les ISI qui subsistent malgré l'orthogonalité des sous-porteuses, dans ce cas la durée T_u pendant laquelle est émise l'information forme avec le temps de garde T_g (qui se place entre deux périodes utiles) la période du symbole T_s :

$$T_s = T_u + T_g$$

Pour que l'intervalle de garde soit efficace, sa durée doit être au moins égale à l'écho non négligeable le plus long (celui qui a le retard maximal).

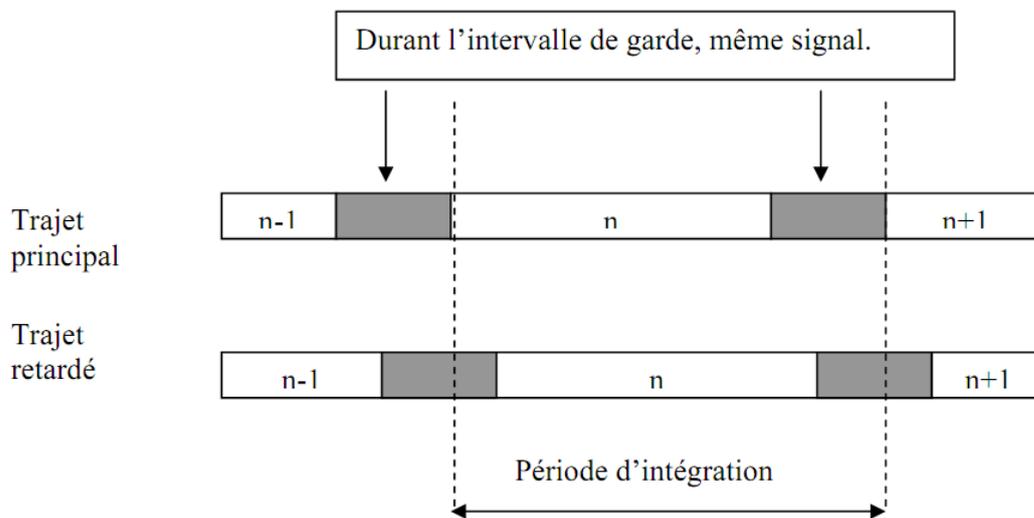


Figure 3.9 : L'intégration de l'intervalle de garde dans le signal

Le temps de garde pendant lequel on n'émet rien est plus généralement une copie de la fin de trame *OFDM* (figure 3.9), ce temps ne devrait pas représenter une trop grande partie de T_s , pour ne pas sacrifier trop de capacités en données et donc de rendement spectral.

D'autre part, la propagation du signal engendre plusieurs désagréments, par exemple dans le cas d'une réception mobile où il y a un déplacement au niveau du récepteur, les ondes peuvent avoir un décalage variable de phase dans le temps, ce qui engendre des variations permanentes dans l'amplitude du signal. Cette variation temporelle des phases et de l'amplitude des signaux (appelée l'effet Doppler) dépend de la vitesse du déplacement de récepteur.

Un autre désagrément, résultat aussi de les effets de la propagation, c'est que le transfert peut comporter des creux dans la réception (l'instant où le signal est faible ou nul) à cause des évanouissements (fading) et des autres effets. Donc si la bande contient une partie du spectre comportant des creux, il y a une perte totale de l'information pour la fréquence correspondante, le canal est dit alors sélectif en fréquence. Là se présente l'avantage *OFDM* d'utiliser un grand nombre de sous-porteuses, on se retrouve donc dans deux types de pertes :

- Si la perte est partielle : on essaye de recouvrir l'information perdu en utilisant les autres trajets qui circulent la même information, c'est-à-dire avec délai de retard court (figure 3.8.b),
- Sinon, la plus parts des systèmes envoi la même information sur plusieurs sous-porteuses. Le canal donc est non sélectif en fréquence pour L'*OFDM*, et s'il y a un creux, il n'affectera que certaines fréquences qui pourront être récupérées à partir des autres fréquences.

III.4.3- Schéma d'un système de transmission OFDM [23] [24] [26] [27] :

Le schéma suivant comporte les 3 composants du système : l'émetteur, le récepteur et le canal le quel à travers se fait la transmission :

Au niveau de l'émetteur :

- La génération de Bits (trafic ou l'information à transmettre),
- Conversion série-parallèle : puisque les données à transmettre sont sous forme d'une série de bits, convertir cette dernière en une forme parallèle permet le traitement de plusieurs bits simultanément, et par conséquent transmettre un nombre important d'information par un seul symbole *OFDM* (le nombre de bits transmis à chaque symbole dépend de schémas de modulations utilisées et nombre de sous-porteuse N),
- *Mapping* : le résultat de la conversion série est un ensemble de blocs de R bits, l'étape *Mapping* construit des symboles, tous dépend de type de la modulation,
- *IFFT* (inverse fast Fourier transform) : l'ensemble de la modulation prend une forme identique à une *IFFT* (Inverse Fast Fourier Transform), pratiquement il existe des réalisations efficaces de la transformées de Fourier rapide *FFT*. Cette étape a comme but de convertir ce signal reçu de l'étape *Mapping* (domaine fréquentiel) au domaine temporel (une conversion *IFFT* à chaque sous-porteuse),
- Insertion de l'intervalle de garde : appelé aussi préfixe cyclique quand il est constitué des derniers échantillons du symbole,
- *DAC* (Digital to Analog Conversion): le signal reçu est converti en forme analogue appropriée à la transmission radio par l'antenne.

A travers le Canal :

- Les bruits,
- Les effets de propagation,
- Multi-trajets.

Au niveau de récepteur : Afin de recevoir le message, le récepteur effectue l'opération inverse de l'émetteur, il exécute :

- *ADC* (Analog to Digital Conversion): operation inverse de *DAC*,
- Suppression des intervalles de gardes,
- un *FFT* sur le signal reçu afin d'obtenir sa représentation dans le domaine de fréquence.
- *DeMapping* : l'opération inverse de *Mapping* qui permet de récupérer les blocs parallèles de bits,
- Conversion parallèle-série, pour avoir à nouveau la suite de bits.

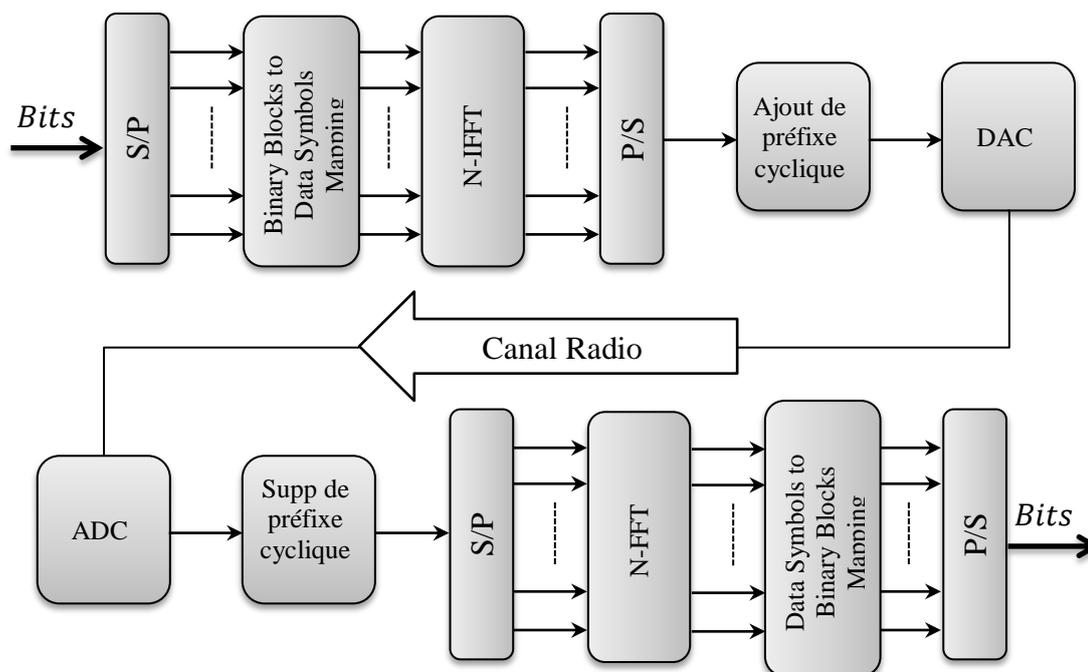


Figure 3.10 : Schéma d'un système OFDM

III.5-MIMO (Multiple Input Multiple Output) :

La technologie *MIMO* n'est pas nouvelle, mais elle n'a pas arrivé sur le marché qu'en cette fin de la première décennie des années 2000 du fait d'une implémentation très complexe [3]. L'objectif de cette technologie est de paralléliser le transport de flux de données en plusieurs antennes différents tout en gardant la même fréquence. Donc, dans ce cas plusieurs antennes sont connectées à l'émetteur, lesquelles ils émettent des flux différents sur la même fréquence.

L'idée est de profiter des propriétés de *multi-trajets* que l'on trouve dans les environnements avec obstacles où les signaux arrivent à des instants différents au récepteur (il faut un récepteur assez puissant, capable de déchiffrer les suites binaires qui arrivent à des instants différents). Il

faut noter que la technique *MIMO* n'est satisfaisant que dans des ensembles perturbés avec des obstacles et qu'il faut éviter de l'utiliser en dehors de ça.

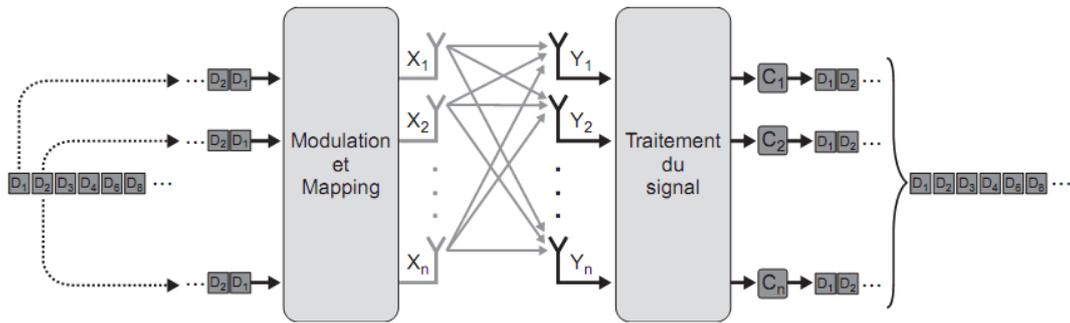


Figure 3.11 : La technique MIMO avec augmentation de la qualité

Le schéma de fonctionnement de *MIMO* est illustré à la figure 3.11, en supposant n émetteurs et n récepteurs (*MIMO* peut fonctionner avec une seule antenne de réception, mais avec le risque de ne pas récupérer tous les signaux). Dans cette figure, la même suite binaire est émise sur l'ensemble des antennes. L'objectif est d'augmenter la qualité de la transmission puisque le récepteur reçoit plusieurs fois la même suite de bits et choisit la valeur la plus fortement reçue.

La diversité exprime qu'au lieu d'augmenter la qualité en augmentant le nombre de fois où le même bit est transmis, on peut augmenter le débit en transmettant des éléments binaires distincts. Cette deuxième solution est illustrée à la figure 3.12.

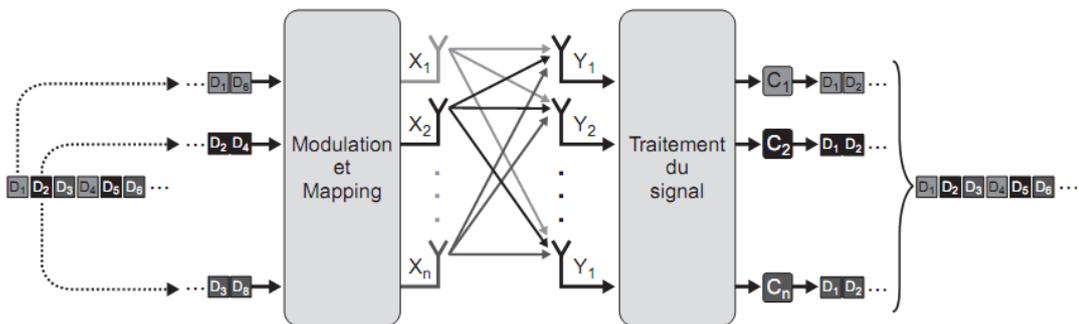


Figure 3.12 : La technique MIMO avec augmentation de débit

III.6- Techniques de duplexage TDD et FDD

Un Frame *OFDM* supporte les deux techniques *TDD* (time division duplex) et *FDD* (frequency division duplex) [30] :

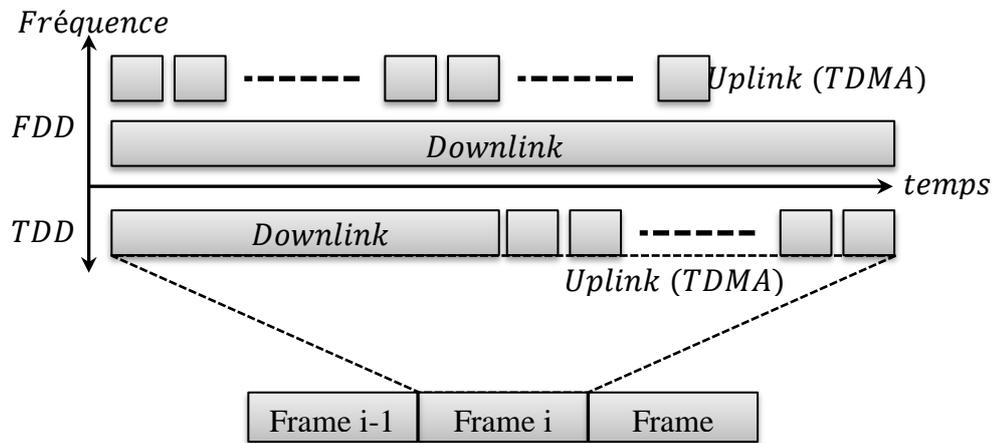


Figure 3.13 : Techniques de duplexages TDD et FDD

- *TDD* est une technique dans laquelle le système transmet et reçoit dans le même canal de fréquence, en assignant des tranches de temps (time slot) pour le mode transmission et des tranches de temps pour le mode réception.
- *FDD* exige deux fréquences différents, une servie pour la transmission et l'autre pour la réception.

III.7- Accès Multiple sur OFDM

Dans le cas d'un système comportant plusieurs usagers, il faut une technique bien précise pour pouvoir allouer à chacun d'eux ses ressources radio utiles :

III.7.1- OFDM-TDMA :

On suppose que la durée de chaque intervalle de temps dans la technique *TDMA* (chapitre 1) soit égale à la durée d'un symbole *OFDM*, chaque utilisateur a un intervalle de temps durant lequel toutes les sous-porteuses lui sont allouées (figure 3.14).

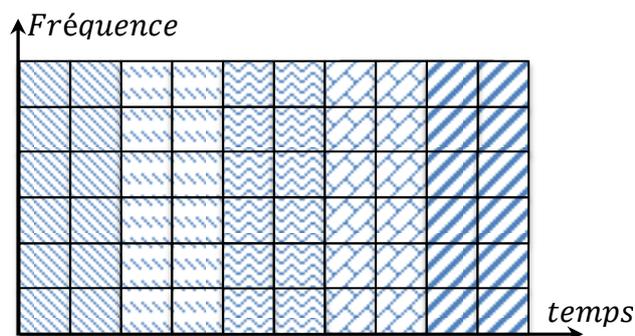


Figure 3.14 : OFDM-TDMA

L'avantage de ce type d'accès multiple est la réduction de la consommation d'énergie au niveau de récepteur qui ne fonctionne qu'à des instants bien déterminés.

III.7.2- OFDM-FDMA (OFDMA) :

Chaque utilisateur alloue un sous-ensemble des sous-porteuses. Au début les sous-porteuses allouées étaient adjacents (figure 3.15) mais dans le cas d'existence d'un creux dans le canal de transmission, les dommages apportés sur les sous-porteuses adjacentes seront considérables, ce qui rend le recouvrement de l'information perdu très difficile voire impossible, et par suite, le bloc tout entier sera mal reçu.

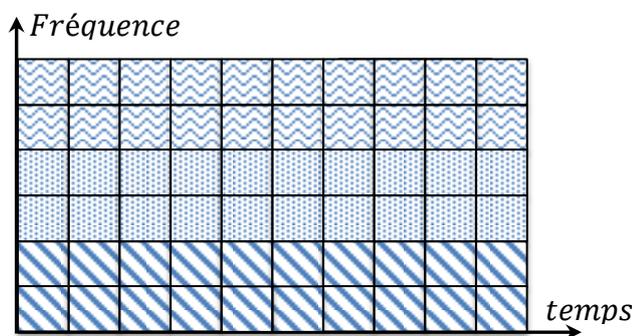


Figure 3.15 : OFDM-FDMA

Pour remédier à ce problème les données codées ne devraient pas être simplement affectées aux sous-porteuses mais il faut bien les entrelacer d'abord.

III.7.3- SOFDM (Scalable OFDMA) :

La variante d'*OFDMA* la plus utilisée maintenant est l'*SOFDMA* où il est possible d'y associer temporellement un découpage dans le temps en affectant les sous-bandes à des stations différentes.

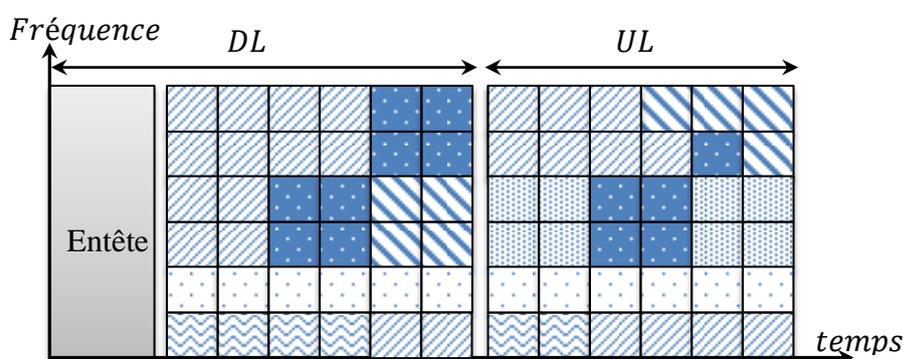


Figure 3.16 : SOFDM

Comme l'illustre la figure 3.16, il est ainsi possible de partager de façon beaucoup plus fine le canal radio et de donner à chaque station le débit exact dont elle a besoin.

III.8- Les couches de l'IEEE 802.16

Ce standard décrit les spécifications des deux couches les plus basses du Modèle *OSI* (figure 3.17) : la couche Physique (*PHY*) et la couche Liaison de données (*MAC*). Dans ce standard, la couche *MAC* est désignée à supporter l'architecture *PMP* (*Point to Multi-Point*) avec une BS (Base Station) qui contrôle un ensemble de SSs (Subscriber Stations) lui sont connectées. La figure suivante montre le modèle référence des couches couvertes par l'*IEEE 802.16* [28] [33].

III.8.1- La couche MAC :

Comme montré la figure 3.17, la couche Mac est divisée en 3 sous-couches :

- **Service Specific Convergence Sublayer** (CS ou service spécifique de convergence) transcrit des unités externes de données en unités de services *MAC*. Deux spécifications sont disponibles pour cette couche : une sous-couche de convergence *ATM* qui est définie pour les services *ATM*, et une sous-couche de paquets supportant des services par paquets tels que IP, Ethernet ou Virtual LAN.

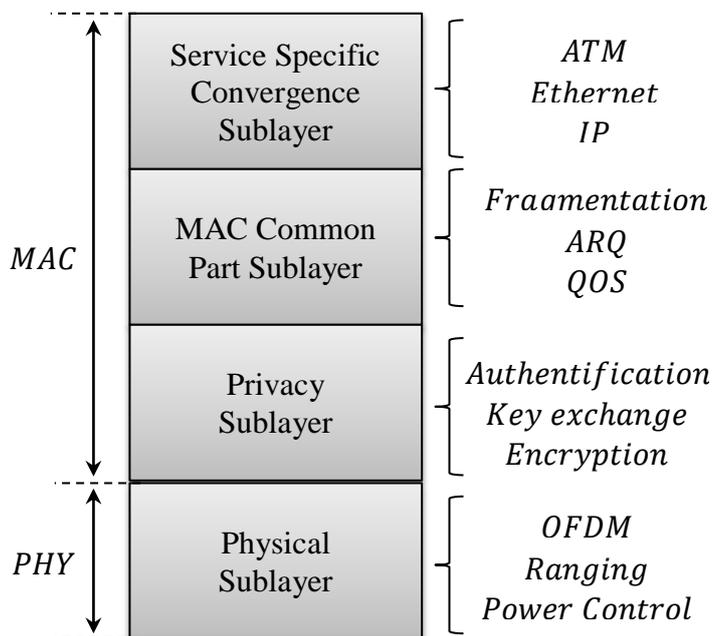


Figure 3.17 : modèle référence des couches de l'IEEE 802.16

- **MAC Common Part Sublayer** (*MAC CPS* ou couche commune) qui s'occupe de l'établissement et la maintenance des connexions. Cette couche forme le noyau de la couche *MAC*, elle contient les fonctions clés de la couche *MAC*.

- **Privacy Sublayer** (couche de protection) est la couche de sécurité, elle s'occupe du cryptage des données et de l'échange des clefs entre les différentes stations. Cette couche possède un protocole d'encapsulation pour encrypter les paquets et un protocole de management de clefs (*PKM* ou Privacy Key Management) pour permettre une distribution sécurisée de celles-ci.

Ce standard garanti une sécurité robuste grâce au modèle de cryptage *AES* (Advanced Encryption Standard), et offre aussi un système d'authentification flexible qui repose sur plusieurs pièces d'identité : mot de passe, des certificats digitaux et des cartes intelligentes.

III.8.2- La couche PHY :

Le standard que nous allons suivre repose sur les caractéristiques suivantes [29] :

	Bande de fréquence	L'architecture MAC	Schéma de transmission	Applications
802.16e-2005	Fixe: 2-11 GHz Mobile: 2-6 GHz	PMP	OFDM avec 256, SOFDM avec 128, 256, 512, 1024, 2048	NLOS fixe, NLOS mobile
(Décembre 2005)	Modulation	Duplexage	Les canaux	débit
	QPSK, 16 QAM, 64 QAM.	TDD et FDD	1.25, 1.75, 3.5, 5, 7, 8.75, 10, 14, 15	1-75 Mbps

Tableau 3.1 : Les caractéristiques de l'IEEE 802.16e-2005 [32]

- La couche physique *d'IEEE 802.16e* est basée sur l'*OFDM* (orthogonal frequency division multiplexing). Le schéma qui offre une bonne résistance au multi-trajet et permet la transmission dans les conditions *NLOS*.
- La couche *PHY* permet une utilisation adaptative de la bande passante. Des mécanismes flexibles de réutilisation des fréquences, et des planifications sont proposés avec le standard.
- *L'IEEE 802.16e* utilise également une technique d'adaptation du codage à la qualité de la communication. Cette adaptation est illustrée à la figure 3.18.

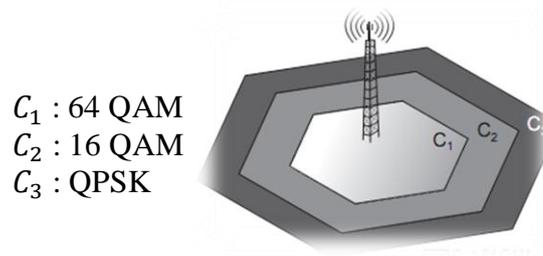


Figure 3.18 : Adaptation du codage à la qualité de communication

Dans cette figure, le codage utilisé lorsque le client est assez près de l'antenne est le 64QAM, qui permet de faire passer 6 bits à chaque symbole [1]. Si le client s'éloigne et que la qualité du signal se dégrade, ce qui est observé par le nombre de retransmissions, le codage passe au 16QAM et le transport à 4 bits par symbole. Si le client est assez éloigné de l'antenne, une nouvelle dégradation implique le passage en QPSK et à l'émission de seulement 2 bits simultanément.

- L'IEEE 802.16e support les deux duplexages FDD (Frequency Division Duplexing) et TDD (Time Division Duplexing).
- L'IEEE 802.16e mobile utilise OFDMA (et plus précisément sa variante SOFDMA) comme une technique d'accès multiple, qui permet aux différents utilisateurs d'allouer des différents sous-porteuses OFDM. Comme discuté au-dessus, SOFDMA améliore sensiblement les capacités du système.
- Supporte des antennes très complexes et intelligentes, où MIMO la technologie qui a fait vraiment une différence entre les anciens et nouveaux débits et a amélioré l'efficacité du système.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le standard IEEE 802.16e, un standard d'actualité qui a prouvé ses performances récemment dans l'ingénierie des réseaux de nouvelle génération.

Il repose comme nous avons expliqué sur un ensemble de nouvelles technologies comme la technique d'accès SOFDM et l'antenne intelligente et complexe MIMO.

La conception de notre réseau dans le chapitre suivant utilise un matériel basés sur *L'IEEE 802.16e* et compatible avec tout une nouvelle génération des équipements qui supportent ce standard.

Chapitre IV

La conception de réseau

Introduction

Avant de commencer une conception d'un réseau il faut d'abord faire une étude qui repose sur le choix et la validation de la ressource radio, les caractéristiques du terrain, et de l'environnement de propagation (l'exploitation d'une ressource radio nécessite une licence).

Le résultat de cette étude appelée dimensionnement et la planification du réseau est utilisé pour placer les équipements (Stations de base) et pour décider de la portée en fonction de terrain et de l'environnement de propagation, mais ce que nous allons traiter dans ce document est l'étape qui suit cette étude, c'est-à-dire on ne s'intéresse pas comment installer les stations de base ou leur positionnements mais de ce qui rend l'ensemble de ces stations de base un réseau capable de satisfaire nos besoins (il existe plusieurs outils mènent à une bonne étude de dimensionnement et de planification).

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'architecture de chaque niveau de ce réseau en expliquant les différents équipements qui composent le système. Ces équipements reposent bien sur le standard *IEEE 802.16* détaillé dans le chapitre précédent.

Ensuite, une partie pour expliquer comment le trafic se circule dans notre réseau, où le réseau doit être capable de satisfaire nos besoins par supporter les 3 types de trafic en question.

IV.1-L'architecture du réseau

La cellule est l'unité structurelle et fonctionnelle de base du réseau, donc on commence par expliquer et schématiser une cellule puis on passe à plusieurs cellule jusqu'on couvre tous le réseau:

IV.1.1- L'architecture d'une cellule

Il est clairement que la conception de notre réseau va suivre le standard *IEEE 802.16e* (*Mobile Wimax*) pour couvrir les deux couches les plus basses dans le modèle *OSI*, ce standard basé sur la variante *SOFDMA* de l'*OFDMA* nous amène très loin en nous permettant de profiter à des débits très élevés pour répondre aux besoins de nos applications qui ne cessent jamais de réclamer plus de débit et même plus de qualité.

IV.1.1.1- Composants de la cellule :

Le schéma suivant illustre les principaux composants de notre cellule (figure 4.1). On trouve 2 concepts qui couvrent l'ensemble des équipements nécessaire :

- Les terminaux *WiMax* (fixes et mobiles),
- Access Services Network (*ASN*),

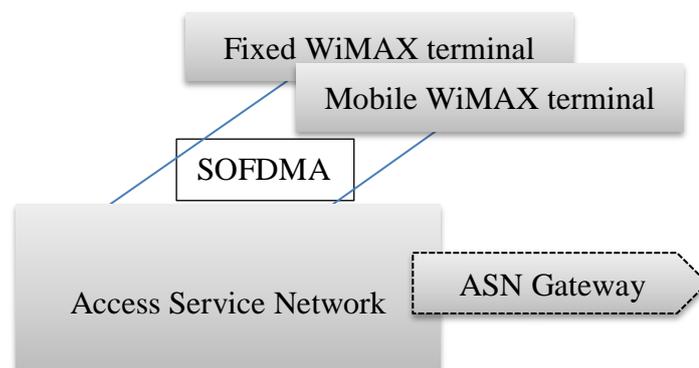


Figure 4.1 : Les principaux composants d'une cellule

- **Les terminaux WiMax (fixes et mobiles) :** comme dans tous type de réseau c'est le moyen qui permet la liaison de l'utilisateur à la station de base pour accéder aux sévices fournis par l'opérateur à travers le réseau, la seul différence entre cet équipement et les équipement classiques utilisés dans les réseaux *GSM* ou les réseau de 3ieme génération (*CDMA*) est que cet équipement doit être compatible avec la norme *IEEE 802.16*. Cet équipement tire de sa compatibilité avec le standard un autre ensemble de fonctionnalités,

comme, la gestion de la ressource radio, gestion de la mobilité, gestion de Handover, gestion de la puissance, mécanismes de l'authentification et de la *QOS*.

- **ASN (Access service network):** le rôle de ce concept est de relier l'abonné aux réseaux *IP* en utilisant l'interface air *SOFDMA*. Ce module est principalement composé de deux parties : une station de base et une *ASNGW (ASN Gateway)* (dans les règles générales de conception des réseaux, une *ASN* peut avoir plusieurs *ASNGW*, mais dans notre cas on va utiliser une seule *ASNGW*, voir plus loin dans le chapitre).

Station de base : c'est le point d'interconnexion qui utilise l'interface air *SOFDMA* pour relier l'abonné, mais aussi c'est avec cette station de base que les terminaux gèrent et coordonnent les fonctionnalités tirées du standard *IEEE 802.16* (ressource radio, mobilité ...).

ASNGW (ASN Gateway) : c'est l'interface de l'*ASN* de la cellule qui assure une liaison avec l'extérieur. Grâce à cette interface on peut avoir une liaison avec les autres cellules (pour la téléphonie par exemple). On peut avoir aussi :

Une autre liaison avec le corps qui nous permet de profiter de services fournis par le réseau ou l'opérateur (comme *TV*, vidéo, météo,...).

Une liaison avec le corps qui assure la sécurité (les authentifications, les autorisations, sauvegarde des clés des encryptions,...).

Et une liaison avec le corps qui permet aux utilisateurs de réseau d'accéder aux autres réseaux pour profiter de plus de services et rester en contact avec d'autres personnes (ces réseaux peuvent être de même type c'est à dire utilisent aussi les paquets *IP*, ou de type différent c'est-à-dire les réseaux qui utilisent une autre unité de transfert comme *ATM* par exemple. Le corps dans ce cas joue un rôle d'adaptateur pour remédier le problème de compatibilité).

IV.1.1.2- Modèle de la cellule :

Le réseau utilise un modèle de cellule performant proposé par le standard utilisé, c'est de sectoriser la cellule en plusieurs secteurs pour avoir plus d'efficacité.

Chaque secteur peut être considéré comme une nouvelle cellule utilisant un ensemble différent de canaux et une antenne directionnelle. Comme montré dans la figure 4.2, la configuration utilisée comporte 3 secteurs dans chaque cellule (il existe d'autres configurations possibles).

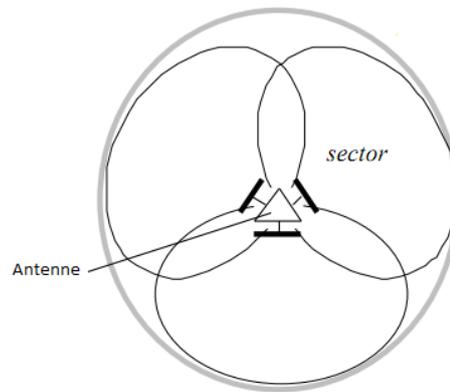


Figure 4.2 : une cellule tri-sectorisée

La sectorisation nous permet de concentrer l'énergie émise sur une zone bien définie, ce qui permet de maîtriser la couverture radio et de limiter l'émission hors de la zone de service. Un autre avantage très important de la sectorisation c'est la multiplication de nombre de cellules ce qui permet à une multiplication aussi du nombre d'utilisateurs qui profitent de la station de base (voir chapitre 1).

Donc, l'idée est d'utiliser 3 antennes, chacun couvre une ouverture de 120° . Le facteur de réutilisation de fréquence égale à 3 où chaque secteur manipule un ensemble de sous-porteuses. Ce type de conception est appelé 1x3x3 ce qui veut dire 1 fréquence, 3 secteurs, 3 groupes de sous-porteuses.

Chaque antenne de chaque secteur utilise la technique MIMO (figure 4.3), et dans notre cas on utilise le type (2X1) où on a deux émetteurs et un récepteur au niveau de chaque antenne.

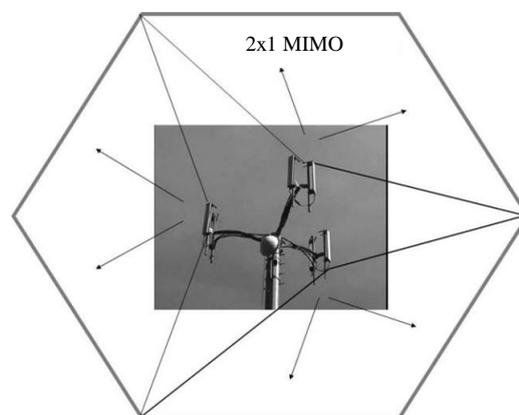


Figure 4.3 : Modèle de l'architecture d'une cellule

IV.1.1.3- IP-BTS :

Les fonctionnalités de la station de base dans notre réseau sont beaucoup plus que les fonctionnalités des stations de base vues dans le chapitre 1. Cette station de base joue le rôle de la *BTS*, d'une *BSC* et même d'un mini *MSC* ensemble. Dans le modèle *OSI* elle est capable de fournir les fonctionnalités des 3 premières couches.

Parmi les avantages les plus importants c'est que notre réseau appartient à la gamme des réseaux les plus répandus et les plus distribués dans le monde, c'est la gamme des réseaux IP, donc le facteur de compatibilité est très élevé. Et c'est très important que ce facteur soit bon par ce que notre réseau ne sera pas isolé, il est connecté à l'internet et à d'autres réseaux (et même de futures réseaux).

Les réseaux *IP* sont des réseaux qui transportent des paquets *IP* d'une machine terminale à une autre (l'unité de base à transférer au niveau de la couche 3 du modèle *OSI* est le *paquet IP*).

IV.1.2- L'architecture de plusieurs cellules

Notre système suit la même architecture cellulaire présentée au chapitre 1, sois en ce qui concerne la forme des cellules ou techniques de réutilisation de fréquence ($K=3$), un exemple de positionnement des cellules est illustré dans la figure 4.4. Les critères de conception d'un réseau qui utilise OFDMA sont les mêmes utilisés dans les réseaux GSM (au niveau cellulaire).

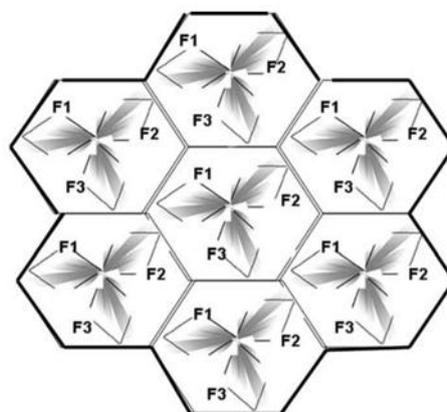


Figure 4.4 : Modèle d'une architecture multicellulaire

L'ensemble de cellules qu'on va présenter est la structure la plus compatible avec une ville (par ce que la nature de la ville nous permet de placer plusieurs cellules adjacentes de façon continue, et ce n'est pas le cas dans plusieurs autres applications), mais on peut l'adapter pour la plus parts

des applications qui demandent une communication à haut débit. Dans ce qui suit, on appelle l'ensemble cellulaire appartenant à une ville par *sous-réseau*.

IV.1.3- Routage entre les cellules

La notion cellulaire permet aux utilisateurs des différentes cellules de communiquer entre eux grâce à un mécanisme de routage, le routage appartient en pratique à une couche supérieure dans le modèle *OSI* (couche 3), mais il a sa propre influence sur la conception physique.

IV.1.3.1- Station de base :

On dit qu'une station de base supporte un routage si elle permet aux utilisateurs de son périmètre de communiquer avec d'autres utilisateurs au périmètre d'une autre station de base.

Dans ce cas l'architecture de notre station de base est la suivante :

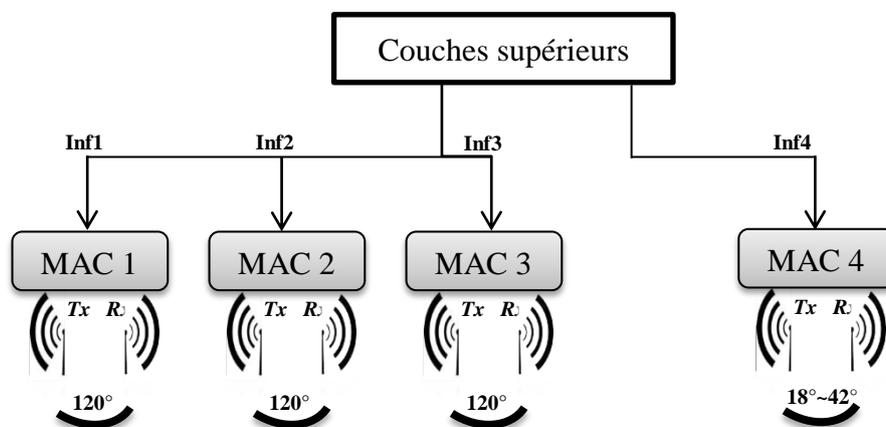


Figure 4.5 : Les différentes interfaces d'une station de base

Les 3 première interfaces *Inf1*, *Inf2* et *Inf3* sont utilisé pour la couverture de 120° d'angle chacune, où comme on a déjà expliqué chaque interface repose sur le standard *IEEE 802.16*. La dernière interface dans la figure repose sur le mécanisme *OFDM* aussi (point to point *OFDM*), mais pour une liaison point à point afin de communiquer avec l'interface *Inf4* de l'autre station de base.

IV.1.3.2- Pont (bridge)

Agit au niveau de la couche liaison de données où l'un de ses principaux usages est de relier deux stations de base.

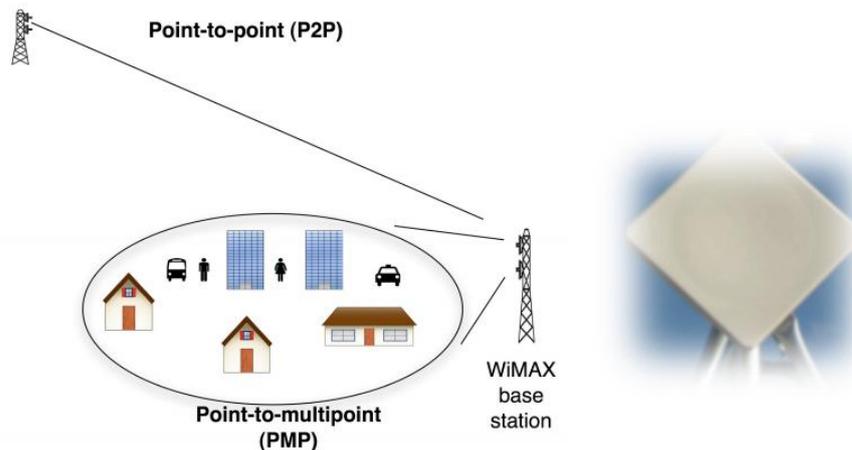


Figure 4.6 : mécanisme point to point (un pont ou bridge)

Des flux de données circulent partout dans la cellule, si la destination (ou l'adresse *IP*) du paquet se trouve à l'intérieur de la même cellule (même station de base), dans ce cas cette station joue le rôle d'un routeur local où elle retransmet le paquet reçu au terminal en question.

Mais si la destination du paquet ne se trouve pas à l'intérieur de la cellule, c'est-à-dire à l'extérieur dans la même ville ou une ville éloignée, le paquet sera juste placé dans l'*ASNGW* (*ASN Gateway*) à la sortie de la cellule où il s'occupe de le retransmettre à travers le pont vers des stations (des routeurs) capables de l'orienter vers sa destination finale.

IV.1.3.3- Routeur

Dans une ville où il existe un ensemble de cellules adjacentes et afin de répondre aux destinations de tous les paquets sortants de différentes cellules à travers les ponts et qui sollicitent une orientation, nous plaçons un routeur dans la ville (il est mieux au milieu).

La fonction principale de ce routeur est de recevoir les paquets des différentes cellules, lire la destination du paquet puis le retransmettre à la cellule sollicitée à travers les ponts qui existent entre chaque cellule de la ville et ce routeur.

Si la destination est à l'intérieur de la ville, l'orientation et le fait de mettre ce paquet à la file d'attente des paquets qui seront envoyé à cette cellule, sinon (la destination n'est pas à l'intérieur de la ville) le paquet sera placé dans une file d'attente dans un module appelé Gateway qui joue le même rôle de *ASNGW* de la cellule, mais cette fois pour l'envoyer à l'extérieur de la ville.

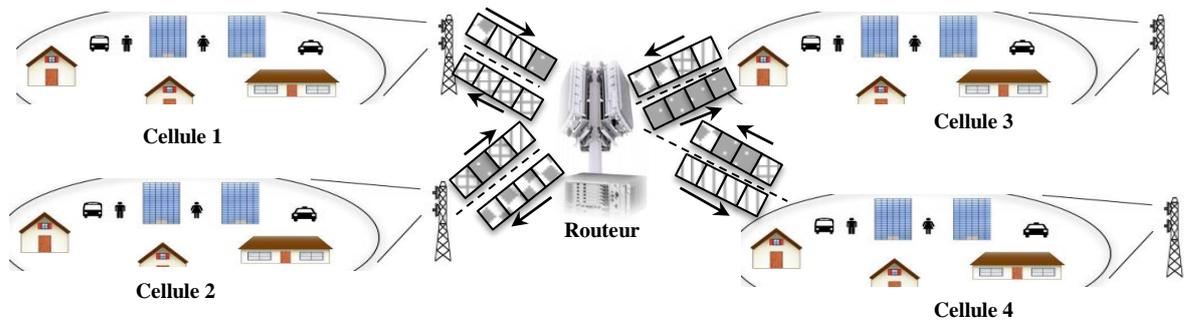


Figure 4.7 : Positionnement du routeur entre les cellules

La figure 4.7 montre comment le routeur se relie avec les différentes cellules en utilisant des ponts. Le routeur donc, est composé de plusieurs interfaces ponts (de type *Inf4* de la figure 4.5), le nombre de ces interfaces est le même que le nombre de cellules à relier dans ce sous réseau.

IV.1.4- L'interconnexion des sous-réseaux

Notre but n'est de faire une conception pour une entreprise, et dépasse même une ville. Donc une fois terminé la conception d'un sous-réseau pour une ville il faut interconnecter les villes pour rendre le réseau national et passer le pays à une nouvelle génération des communications à haut débit qui est un critère très important pour mesurer le développement des pays.

Pour cela on prend comme étude de cas « l'Algérie » qui est devenu récemment un pays prêt à investir dans le domaine de communication et récupérer le grand écart avec même des pays voisins.

A ce stade on pose 3 propositions pour interconnecter les sous-réseaux :

- Utiliser des ponts,
- Utiliser un accès satellitaire,
- Utiliser la fibre optique.

IV.1.4.1- Utiliser des ponts :

L'idée est de placer des ponts point-to-point en mode *LOS* jusqu'à atteindre la ville en question (figure 4.8a). L'avantage de cette idée est la simplicité de monter un tel système, puisque il faut juste faire une étude sur le terrain et placer les équipements (ponts) en respectant les critères de cette étude.

3 inconvénients major nous poussent à rejeter cette solution (au moins pour le moment) : le premier inconvénient et que certains terrains et certains environnements de propagation peuvent gêner l'étude (on sait que dans le bilan de la liaison plusieurs mesures et équations doivent être vérifiés, voir chapitre 2, tous qui concerne la puissance d'antenne d'émission, la puissance d'antenne de réception, gain d'antenne d'émission, gain d'antenne de réception, Path loss et l'atténuation en raison de la pluie, ...).

Le deuxième inconvénient et que la portée maximale d'un pont en préservant un débit élevé ne dépasse pas les 50 kms théoriquement (environ de 20 à 30 km pratiquement). Donc on doit placer un pont chaque 25 kms ce qui rend l'étude plus difficile et le système plus couteux. Cette solution peut être bonne pour des utilisations spéciales (entre deux villes, entre deux entreprises,...) ou même dans les pays à petite surface comme la Tunisie ou Portugal, mais ce qui est sûr, n'est pas un réseau national en Algérie. Un troisième inconvénient très important et décisif on l'expliquera un peu loin avec la troisième solution (fibre optique).

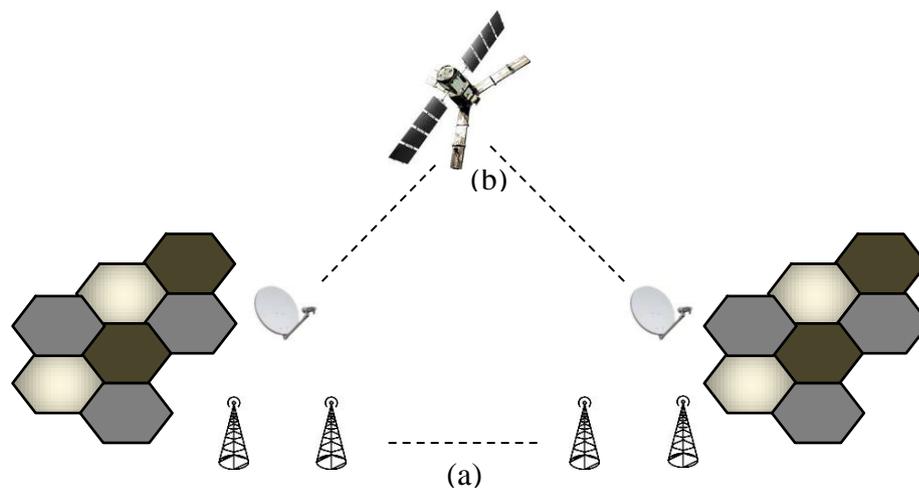


Figure 4.8 : interconnexion des sous-réseaux

IV.1.4.2- Utiliser un accès satellitaire

Le type du réseau satellitaire disponible en Algérie est le réseau VSAT (Very Small Aperture Terminal), désigne une technique de commutation par satellite bidirectionnelle qui utilise des antennes paraboliques dont le diamètre est inférieur à 3 mètres.

Les avantages de cette solution sont :

- Cette technique de communication nécessite peu de moyen au sol, donc une installation simple (l'installation d'une station VSAT pour un site comme dans notre réseau ne dépasse pas les quelques heures),
- L'indépendance au niveau de la distance, donc chaque site est directement liée aux autres sites via le satellite (architecture maillée) ou même en passant par une station Hub.
- Possibilité d'ajouter des nœuds facilement,

Malheureusement, c'est une solution efficace beaucoup plus pour la diffusion de données (TV, vidéo) à cause du débit relativement faible dans la voie montante qui ne dépasse pas dans la plus part des cas 2 Mbps (dans la diffusion le débit important se trouve sur la voie descendante). Ce débit est loin d'être suffisant pour relier deux villes qui nécessitent au moins une dizaine de Mbps. L'opérateur peut allouer plusieurs canaux de 2 Mbps, mais 5 ou même 10 canaux ne sont pas aussi suffisants, et n'est pas n'importe quel opérateur peut allouer plus de canaux, parce que le coût du système devient considérablement élevé et les services ne seront plus à la portée d'un simple abonné.

IV.1.4.3- Utiliser la fibre optique

La fibre optique aujourd'hui est une technologie qui vise à remplacer le réseau cuivre pour bénéficier de plus de services, d'avantage de bande passante et obtenir une vitesse de transfert inégalé. Une fibre optique est un fil de verre très fin qui a la propriété de conduire la lumière, en permettant un transfert d'une grande quantité d'informations par ce signal lumineux codé entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres. Les fibres sont réunies dans un fourreau qui peut rassembler plusieurs centaines de fibres afin de permet actuellement un transfert de plusieurs centaines de Gbps.

La fibre optique a les avantages suivants :

- Perte de signal sur une grande distance bien plus faible que lors d'une transmission électrique dans un conducteur métallique,
- vitesses de transmission très élevées,

- insensibilité aux interférences extérieures (proximité d'un câble à haute tension par exemple),
- un avantage très important et il est le troisième inconvénient de la première solution : quand on installe une liaison point-to-point entre deux villes par exemple par un débit qui peut atteindre 50 Mbps dans les meilleurs des cas, ce débit sera utilisé entièrement par notre réseau. Par contre si on installe une infrastructure de fibres optiques avec un débit de plusieurs dizaines de Gbps, ce n'est pas seulement ce réseau qui profitera de cette liaison. Notre réseau dans ce cas, n'alloue pas plus de 1% en une liaison de 10 Gbps. Le reste sera utilisé par d'autres réseaux et d'autres applications en cours de développement ou arriveront dans le futur (une installation efficace à long terme) et renforce par un bon débit les réseaux et les applications déjà sur le terrain.

Mais l'inconvénient de cette solution c'est la transmission câblée des données, et faire passer un câble (surtout au milieu de la ville) c'est un souci pour n'importe quel opérateur.

On propose une solution pour remédier à ce problème :

On a réuni les cellules de la même ville à un seul routeur, et la liaison entre les cellules et ce routeur comme on déjà vue est faite en utilisant des ponts. Ce dernier nous évite de faire tous branchement câblé au milieu de la ville (les branchements entre les cellules et le routeur) et par conséquent, on n'a évité de creuser et de rendre les villes des chantiers à nouveau.

Maintenant pour interconnecter les villes, et puisque notre cas d'étude est l'Algérie, des investissements énormes pour réaliser plus de 65000 Kms de fibre optique, le projet terminé en 2010 a permis de relier 961 commune (APC) [38] rattachées par un backbone national de transmission à 2.5 Gbps, 10 Gbps et 80GB/s en cours de réalisation.

La figure 4.9 montre que le backbone national de la fibre optique en Algérie assure une connexion avec la plus part des wilayas.

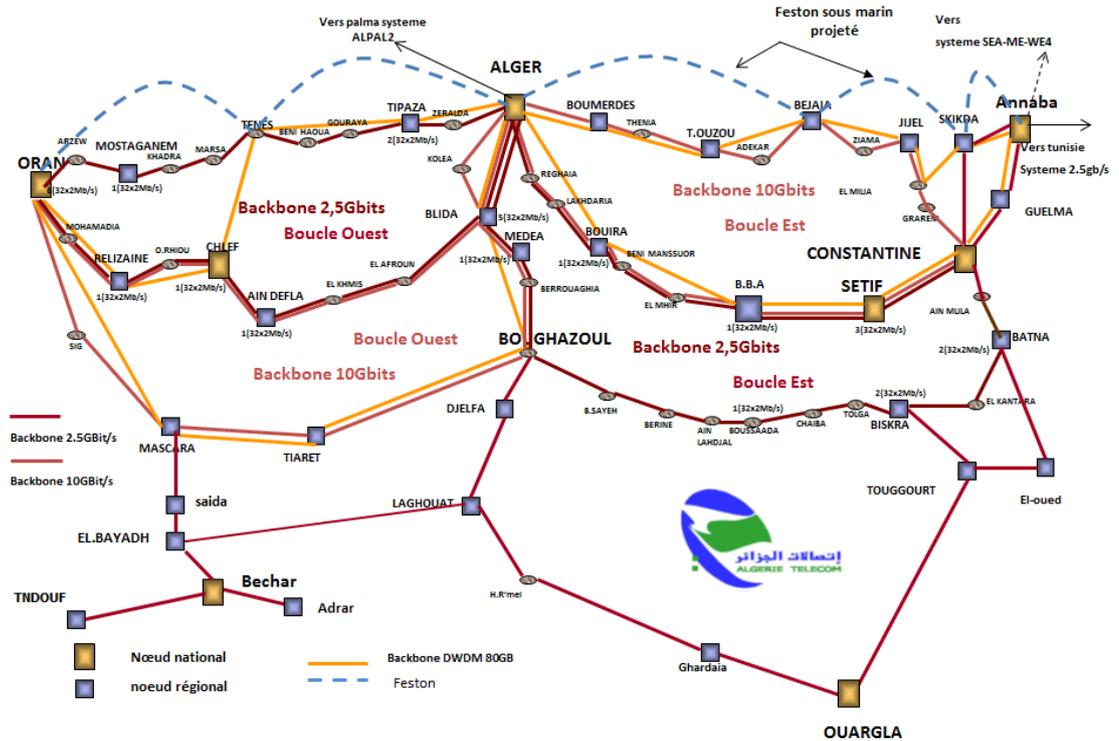


Figure 4.9 : réseau de fibres optiques en Algérie (Algérie Telecom)

Cette dernière solution (interconnexion par fibres optiques) est la solution implémentée dans la simulation de notre réseau pour relier les villes.

IV.1.5- Architecture globale du réseau :

Après l'interconnexion des villes par un réseau de fibres optique, et comme montré dans la figure 4.10, il existe 3 corps indépendants des villes :

- Un corps assure la gestion de réseau : gestion de la ressource radio, gestion de la mobilité et des handovers, gestion des puissances des antennes, authentification des utilisateurs, facturations,...
- Une Gateway pour permettre une liaison avec les autres réseaux, et l'accès à l'internet,
- Un corps pour fournir certains services par l'opérateur.

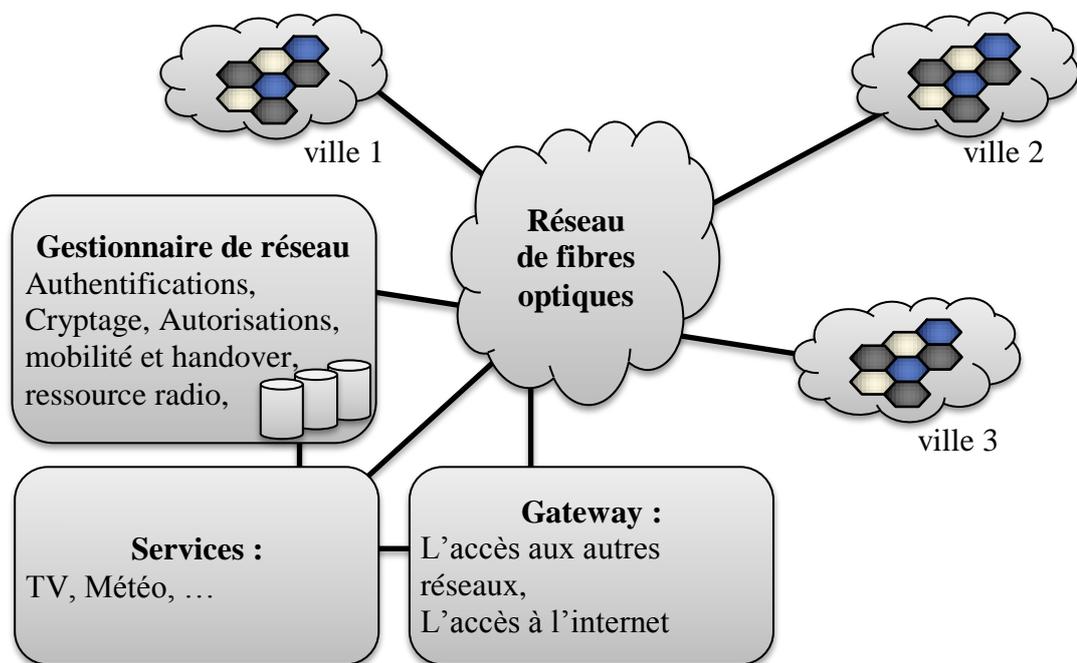


Figure 4.10 : Architecture du réseau

IV.2-Circulation du trafic dans le réseau

Un réseau, quel que soit sa topologie ou son architecture, doit être capable d'acheminer le trafic pour lequel il a été conçu.

IV.2.1- Le dialogue entre les équipements

Les stations de base (BS) ajustent en permanence les ressources d'accès dédiées à chaque SS (Subscriber Station) en fonction des besoins exprimés. En pratique, il faut différencier deux cas : les flux dans le sens réseau vers usager « Download Traffic » et les flux dans le sens usager vers réseau « Upload Traffic ».

Dans le sens Download, les choses sont relativement simples car c'est la BS qui diffuse les messages à tous les SS et ceux qui ne sont pas destinataires des messages sont bien entendu priés d'ignorer les paquets. Par contre, dans le sens Upload, les choses sont plus délicates : il faut, comme on a déjà expliqué dans l'accès multiple, éviter que tous les usagers prennent la parole simultanément.

Pour cela, le canal Upload (de l'utilisateur vers le réseau) est divisé dans le temps en intervalles PS (Physical Slots, qui est égale à la durée d'un symbole OFDM). Le SS fait la demande auprès de la station de base pour disposer d'un certain nombre de créneaux de temps.

La station de base BS établit alors une carte d'allocation de la bande passante qui est diffusée à toutes les stations utilisateurs SS (une mappe décrit comment le canal sera partagé entre plusieurs utilisateurs).

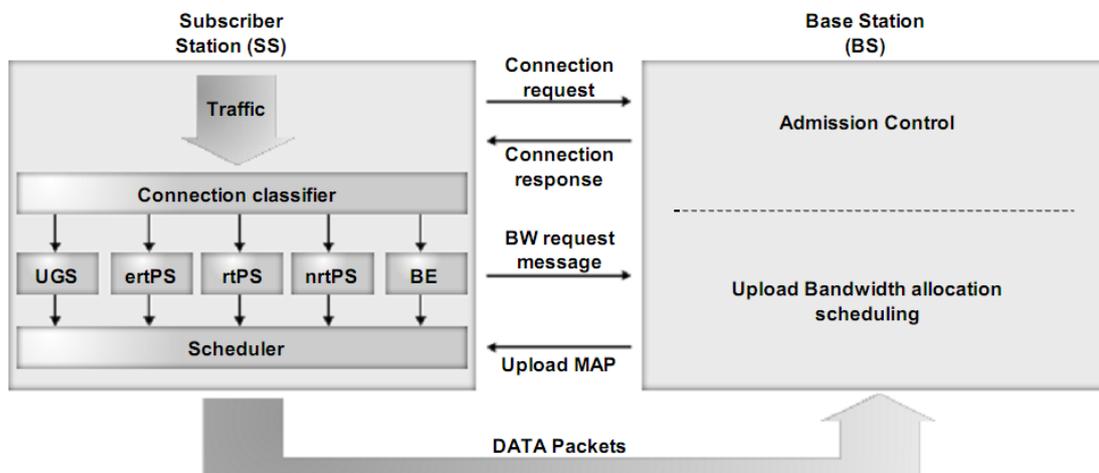


Figure 4.11 : Le dialogue entre BS et SS pour établir une connexion

Afin de gérer au mieux le trafic, l'*IEEE 802.16* cherche à prévoir au plus près les flux qu'il doit transporter (certains services doivent passer sans pertes, des utilisateurs plus prioritaires,...)

l'IEEE 802.16 et par conséquent notre réseau définit 4 classes de services :

- *UGS (Unsolicited Grant Service)*, la priorité la plus haute, a pour objectif de faire transiter des applications qui ont un débit constant en générant des paquets de longueur constante à des intervalles réguliers. Elle permet une allocation de tranches de telle sorte que chaque paquet puisse être émis sans attente. Mais, si une tranche de temps est réservée, elle ne peut être préemptée par une autre classe. Il y a donc possibilité de perte de la tranche si le client ne l'utilise pas. Cette classe correspond aux applications de téléphonie classique qui produisent un débit constant. Une autre classe a été ajoutée pour la *téléphonie IP* comme nous le verrons avec le *WiMAX mobile*,
- *rtPS (real-time Packet Service)*, correspond à la transmission d'applications de type vidéo. Cette classe prend en charge les applications qui produisent des trames de longueur variable à des intervalles réguliers.

- *nrtPS (non real-time Packet Service)*, correspond à des applications élastiques qui acceptent une variabilité du délai et dont les paquets ont des tailles variables, mais qui demandent un débit minimal. Cette classe de trafic est bien adaptée au transfert de fichiers et aux applications sans contraintes temporelles mais qui demandent malgré tout un débit minimal pour s'assurer d'être transmis après un temps correspondant à ce débit minimal. Les tranches de temps peuvent être volées par des classes de priorité supérieures si c'est nécessaire à la qualité de service de ces applications.
- *BE (Best Effort)*, ne demande aucune qualité de service particulière et aucun débit minimal (c'est-à-dire aucune garantie de bande passante ou de temps réelle). Les services associés sont bien entendu ceux qui ne demandent aucune garantie sur le trafic, comme le trafic des applications Web (trafic internet).

Dans *Wimax mobile*, une classe de trafic supplémentaire a été introduite pour prendre en charge la parole téléphonique compressée de débit variable. Il s'agit de l'*ertPS (enhanced real-time Packet Service)*. Cette classe correspond à la téléphonie dans laquelle une compression rend le débit variable ou dans laquelle les silences sont supprimés de telle sorte que le débit devienne également variable.

IV.2.2- Les applications :

Dans les utilisations destinées au grand public, ce réseau (grâce au standard *IEEE 802.16*) permet des offres comparables à l'*ADSL*, et surtout une bonne qualité de service. La *voix sur IP*, qui consomme relativement peu de bande passante, passe également sans problème sur ce réseau radio. En théorie, le réseau supporte toutes les applications *IP* à cause de la convergence des données vers un modèle tout-*IP (ALL-IP)*, pour la voix, la vidéo et les données à la fois, et donc, devient une évidence pour favoriser l'essor de ce réseau en Algérie.

Dans la partie suivante on va explorer 2 applications fondamentales (téléphonie et l'accès à l'internet) et une autre spéciale (vidéo-conférence) :

IV.2.2.1- La téléphonie :

Puisque notre système suit l'architecture *IP*, le type de la téléphonie implémenté sur ce type d'architecture est la *VoIP (Voice over Internet Protocol)*. La *VoIP* utilise l'*IP (Internet Protocol)*

pour transmettre la voix sous forme des paquets sur un réseau *IP*. Le processus consiste à numériser la voix, l'enlèvement des signaux de bruit indésirables, puis la compression du signal vocal en utilisant des algorithmes de compression. Après la compression, le flux de la voix est découpé en paquets en intégrant dans chaque paquet l'adresse de destination, le numéro de ce paquet, et des données pour vérifier les erreurs de transmission.

A l'arrivée d'un paquet, le numéro de séquence permet de rétablir l'ordre perdu pendant sa transmission puis l'application de l'algorithme de décompression pour récupérer les données de paquet.

Actuellement, les téléphones *WiMAX* (c'est-à-dire qui supporte le standard *IEEE 802.16*) sont déployés partout dans le monde, surtout de la part d'Intel, Samsung, Nokia et Motorola.

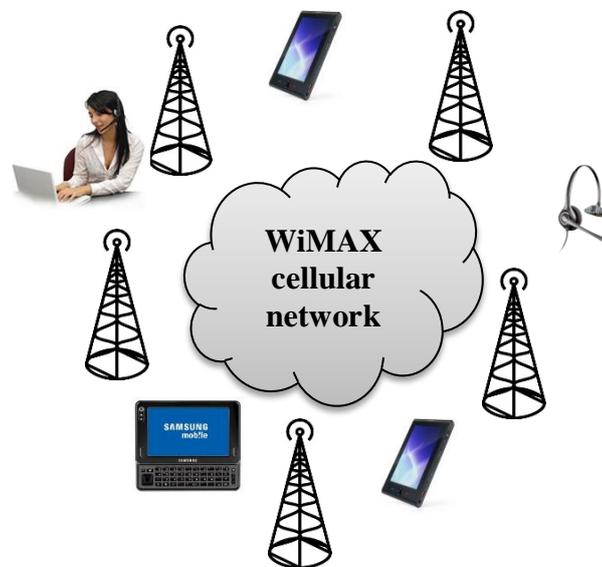


Figure 4.12 : La téléphonie

La longueur du trajet dans ce réseau est plus courte que dans les réseaux classiques, parce que si la destination se situe dans la même cellule, la station de base route elle-même ces paquets à sa destination terminale (sans passer par un switch régional comme dans le cas de GSM), sinon (la destination n'est pas à l'intérieur) la station de base transmette les paquets vers le routeur qui s'occupe de l'orienter.

IV.2.2.2- L'accès à l'internet :

L'objectif principal de ce réseau est de fournir une connexion internet à haut débit, son architecture *IP* le rend compatible 100 % avec le réseau internet.

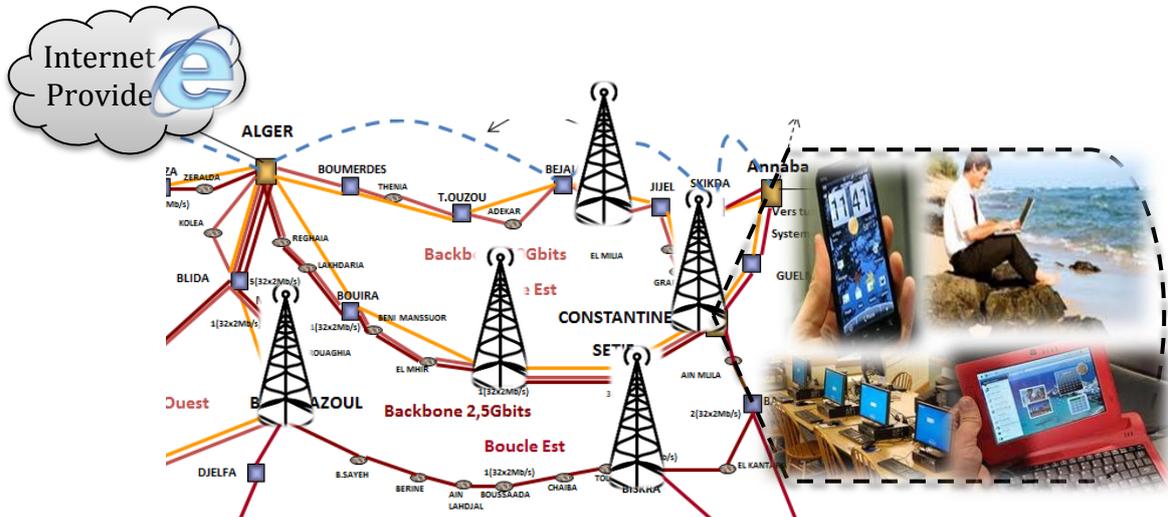


Figure 4.13 : L'accès à l'internet

Aujourd'hui, l'internet est connu dans le monde entier pour son pouvoir « magique » d'envoyer des courriers électroniques, des images et autres données critiques n'importe où dans le monde et par un tas d'équipement permet cet accès (ordinateurs de bureau, ordinateurs portables, téléphone mobile,...)

Le scénario d'une requête internet commence par envoyer cette requête à partir d'un équipement autorisé vers sa station de base. Cette station elle-même transféra cette requête vers le routeur de la ville (à travers le pont), qui est lui-même transféra la requête (à travers le réseau de fibres optique) au fournisseur de l'internet (situé à Alger dans notre cas) qui répond par ses moyens à la requête.

IV.2.2.3- Visioconférence :

On nomme visioconférence la combinaison de deux techniques : La visiophonie (permettant à une personne de voir et dialoguer avec une autre personne) et la conférence multipoints (permettant d'effectuer une réunion avec plus de deux personnes). Donc, le but est de faciliter le travail collaboratif et incitent les équipes distantes à œuvrer en synergie.

De nos jours, c'est une application qui présente ses avantages dans plusieurs domaines, parmi les applications dédiées, on cite:

- Télémédecine,
- Télé enseignement, formation en ligne,
- Visioconférence de presse,
- ...

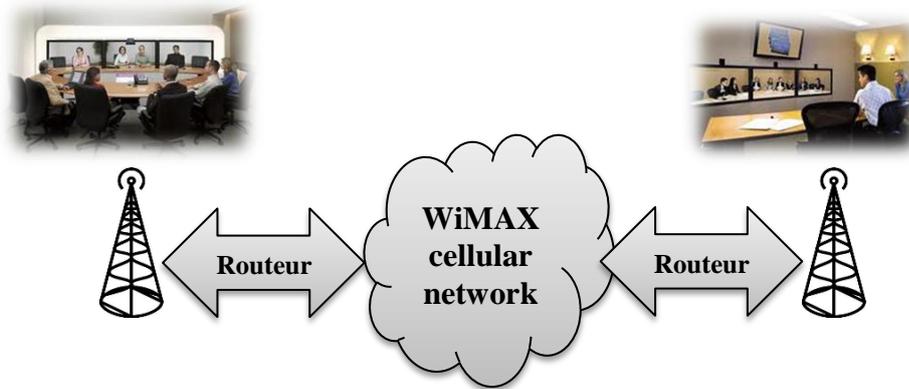


Figure 4.14 : La visioconférence

Le fonctionnement est le même qu'un appel téléphonique (*VoIP*) en ajoutant certain contraintes. La première contrainte est la quantité du trafic (les paquets à transférer) entre les extrémités, qui est dans cette application une quantité très importante. La deuxième contrainte est le multicast (nombre quelconque d'intervenants) où le paquet n'a pas une seul adresse de destination, mais plusieurs. Les routeurs dans ce cas doit supporter le multicast pour qu'il extrait les adresses et envoyer une copie de paquet dans chaque destination quand il est nécessaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle conception pour un réseau national en Algérie. Cette conception reposée sur un standard et des techniques d'actualité va surement mener notre pays à une nouvelle génération de communication, où on ne sera pas besoin d'aller à des endroits fixes (comme la maison, l'université,...) pour se connecter à l'internet, mais d'être tous le temps connecté.

Dans le chapitre suivant, nous utiliserons un simulateur réputé (OPNET) pour voir si notre réseau est capable de répondre à nos besoins et circule bien les trois types de trafics proposés.

Chapitre V

L'implémentation sous Opnet

Introduction

Simuler un réseau de télécommunications consiste à modéliser de façon conforme à la réalité le comportement des différents éléments constituant ce réseau par des outils informatiques afin de récolter des données statistiques. La simulation complète souvent la modélisation et permet de mieux étudier les détails de fonctionnement d'un système complexe.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter l'outil que nous avons utilisé pour simuler les différents composants du réseau. Puis nous détaillons les différents modèles de simulation qui sont l'implémentation et l'interprétation des modèles de conception présentés dans le chapitre précédent.

Ensuite, une analyse de l'état du réseau après l'insertion d'un trafic qui simule les 3 fonctions principales du réseau : la téléphonie, l'internet et la visio-conférence. Et en termine par une évaluation des résultats obtenus, surtout en les comparant avec les mesures recommandés par l'*ITU (Union internationale des télécommunications)*.

V.1- Présentation d'Opnet Modeler

OPNET modeler, proposé par la société *OPNET Technologies* [39] et imposé actuellement dans le monde de la recherche et de développement comme un outil pour la modélisation et la simulation des réseaux de télécommunication.

OPNET est un logiciel basé sur une approche de modélisation orientée objet et une simulation à événements discrets. Il utilise une interface graphique afin de permettre aux utilisateurs de modéliser et de simuler les réseaux facilement et intuitivement. *OPNET* dispose de codes sources totalement ouverts et peuvent être utilisés directement par les développeurs en les paramétrant ou en les adaptant aux besoins de chaque situation.

OPNET est basé sur des modélisations hiérarchiques, cette méthode correspond bien à la structure des réseaux actuels. Comme le montre la Figure 5.1, Il dispose de trois niveaux hiérarchiques imbriqués : le plan de réseau, le plan de nœud et le plan de processus.

- **Plan de réseau** : est le niveau le plus élevé de la hiérarchie d'*OPNET*. Il permet de décrire la topologie générale du réseau étudié. Le réseau est décrit sous forme d'un ensemble d'éléments de communication (routeurs, stations de travail, hub, etc...) qui sont appelés les nœuds et de liens entre eux. Les utilisateurs peuvent configurer le réseau en paramétrant les attributs associés aux nœuds et aux liens.
- **Plan de nœud** : permet de définir l'architecture des nœuds en traduisant les flux de données échangés entre des blocs fonctionnels appelés modules. Les modules peuvent représenter les applications, les couches de protocoles, les buffers, etc. Ils communiquent entre eux via des flux des paquets ou via des liens statistiques. La fonctionnalité de chaque module est ensuite spécifiée au niveau processus.
- **Plan de processus** : le comportement de module est spécifié au niveau de plan processus à l'aide d'une machine à états finis. Chaque état correspond à une activité décrite en code C/C++ supporté par une bibliothèque de fonctions préprogrammées. Les transitions entre les différents états sont déterminées par des conditions d'exécution, par exemple : si un événement se produit (l'arrivée d'un paquet) alors passe à l'état x .

Pour chaque niveau hiérarchique présenté ci-dessus, des éditeurs graphiques correspondants sont utilisés pour simplifier la modélisation. De plus, OPNET dispose beaucoup d'éditeurs et outils supplémentaires (éditeur de paquets, d'antennes, etc...) qui permettent facilement et efficacement de simuler et analyser un réseau étudié.

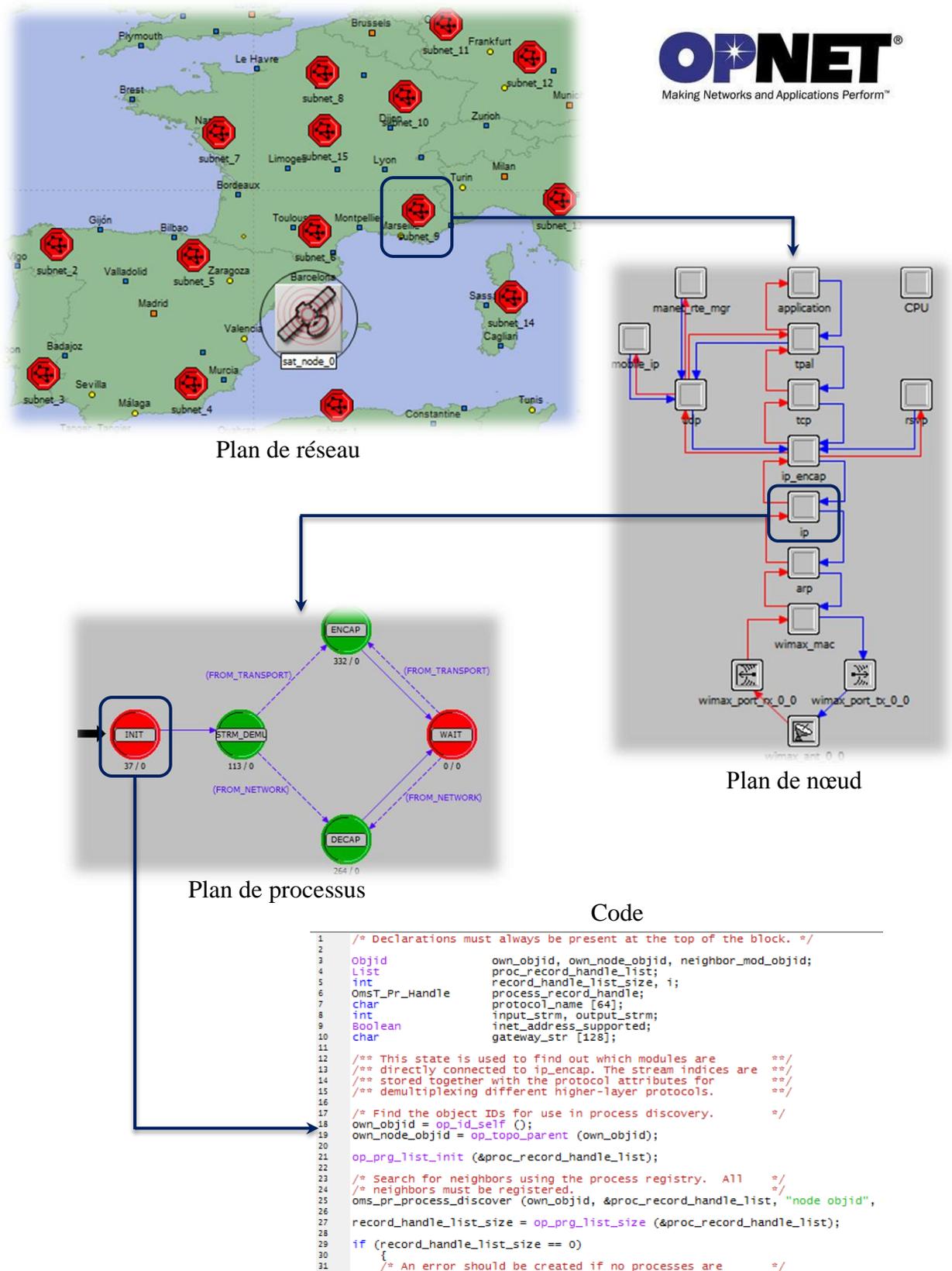


Figure 5.1 : Modélisation hiérarchique dans l'environnement Opnet

La modélisation et la simulation sous OPNET peuvent se faire de deux manières :

- en utilisant la palette pré-modélisée dans la bibliothèque d'OPNET,
- en programmant soi-même les composants suivant l'ordre hiérarchique.

Certainement, la première méthode est beaucoup plus rapide et facile que la deuxième car les programmations et les descriptions des éléments sont « transparentes » pour les utilisateurs. Par contre, dans le cas où des nouveaux algorithmes ou protocoles doivent être testés, la deuxième méthode devienne une étape indispensable.

V.2- Modèles de simulation

Dans cette partie, nous allons faire un descriptif de notre réseau implémenté sous Opnet. Le but est de créer un modèle simulant de manière satisfaisante le comportement de notre système tout en respectant les modèles décrits en chapitre 4.

V.2.1- Architecture globale du réseau :

La figure 5.2 montre une implémentation de notre système conçu au chapitre 4 (décrit dans la figure 4.10) et illustre les composants principaux de ce réseau.

Quelques villes sont suffisantes pour montrer comment le système se déroule, mais on peut ajouter des villes facilement s'il existe des liaisons de fibres optiques (le système est extensible).

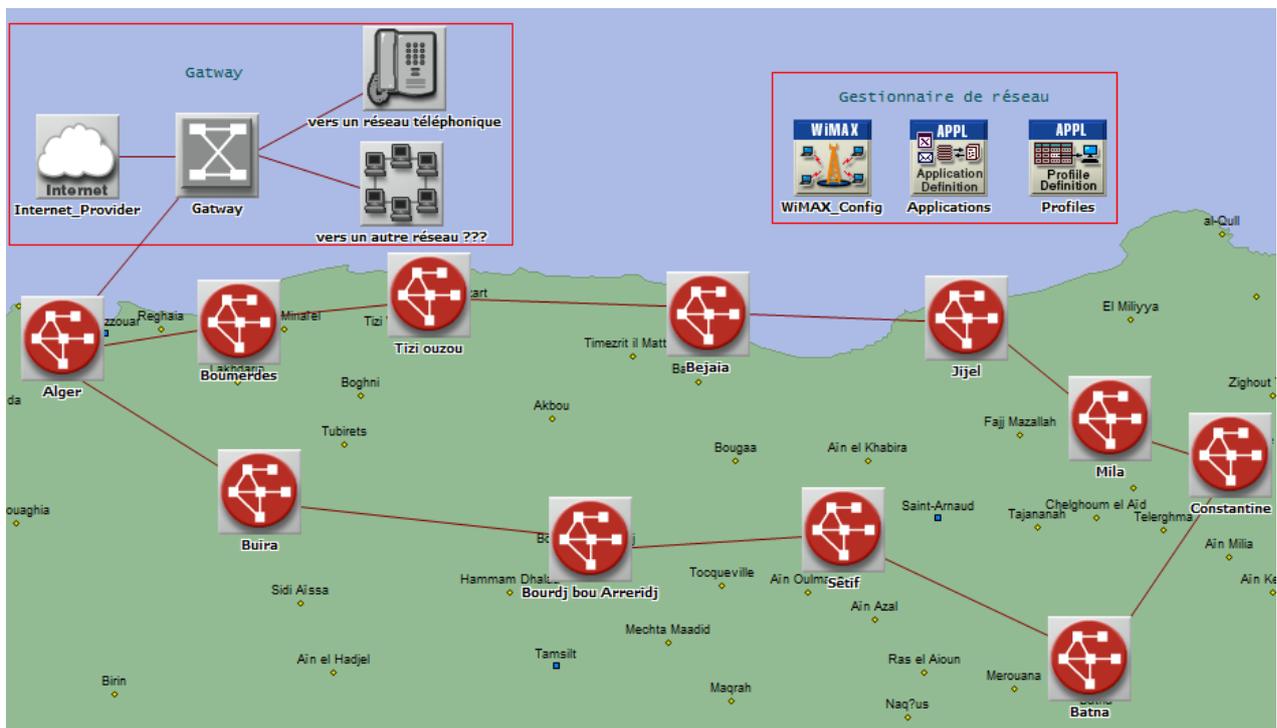


Figure 5.2 : L'implémentation du réseau sous Opnet

Comme illustré dans la figure, le modèle du réseau implémenté est composé d'un ensemble de villes interconnectées par un réseau de fibres optiques (les villes sont reliées selon le réseau d'Algérie Telecom, c'est-à-dire, deux villes ou plus sont reliées ensemble si et seulement si le lien existe réellement sur le terrain). La figure illustre aussi une unité de gestion de réseau et une unité de sortie Gateway.

V.2.2- Architecture d'un sous-réseau :

Cette partie détaille une ville (sous-réseau) de la figure précédente en montrant l'ensemble de ses composants. Comme montré dans la figure 5.3, le sous réseau suit exactement le modèle décrit dans la figure 4.7 du chapitre précédent où la zone géographique est partitionnée en cellules (de 1 km comme proposé par le standard IEEE 802.16), chaque cellule est contrôlée par une station de base. Les stations de base sont reliées à un routeur par des ponts afin de permettre un échange de données entre les cellules.

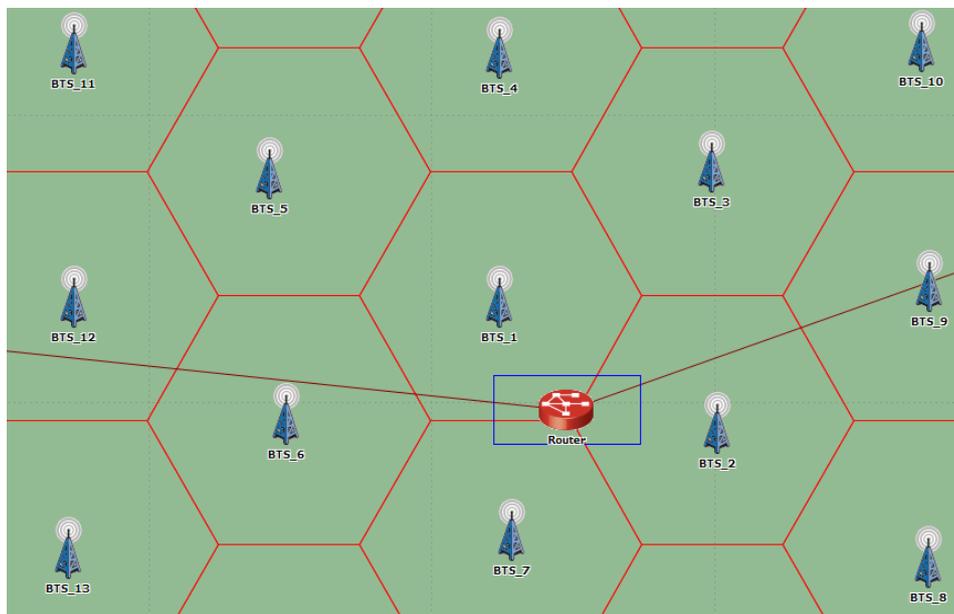


Figure 5.3 : L'architecture d'un sous-réseau

Ce routeur, comme montré la figure 5.4, est composé d'un noyau de routage simple et un nombre d'interfaces pont égale au nombre de stations de base disponibles.

Le routeur contient aussi des interfaces câblées de fibres optiques pour se relier avec les villes voisines.

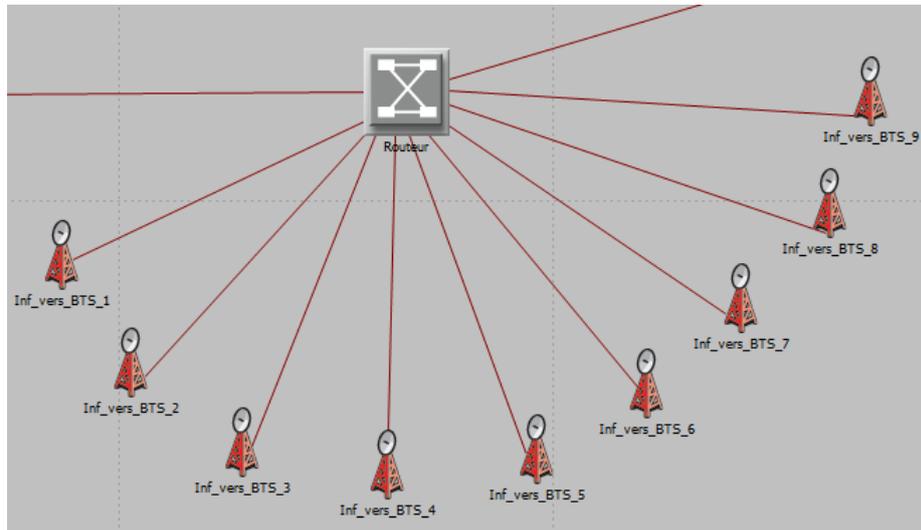


Figure 5.4 : L'architecture d'un routeur

V.2.3- Architecture d'une station de base :

La simulation de notre station de base suit exactement le standard *IEEE 802.16*, où *Opnet* supporte parfaitement ce standard.

La figure 5.5 montre les couches *PHY* et *MAC*, et aussi la couche *Uplayer* qui résume l'ensemble des autres couches du modèle OSI (ne font pas partie de notre étude).

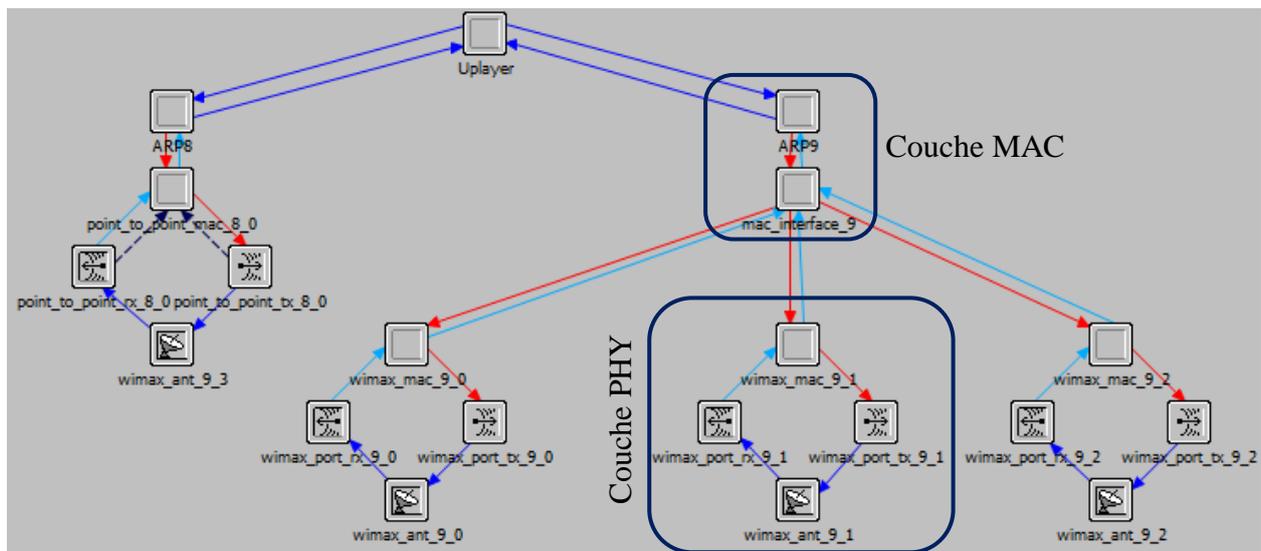


Figure 5.5 : les couches du standard IEEE 802.16 sous Opnet

Voici quelques caractéristiques respectées par le système :

Nom du profile	WirelessOFDMA
Durée de Frame (millisecondes)	5
Durée de symbole (microsecondes)	100.8
Nombre de sous-porteuses	4096
Technique de duplexage	TDD
Fréquence de base	5.8 GHz
Largeur de la bande	20 MHz
Mode	Avec mobilité et Handover
MIMO	2x1 (downlink only)
Modèles de propagations	multi-path and pathloss
Caractéristiques du réseau	Multi cellules, 3-Secteurs, connectivité IP
...	

Tableau 5.1 : quelques caractéristiques du système

V.3- Circulation du trafic

Opnet modélise à la fois les utilisateurs et le réseau, mais aussi un trafic qui se circule entre les utilisateurs. Le trafic est une quantité de données générée par un ensemble d'utilisateurs (ou applications) et consommée par un autre ensemble. Les générations et les consommations suivent des modèles probabilistes.

Le but donc ici, est d'avoir un trafic relativement important sans pour autant alourdir le système. On va profiter un des plus importants avantages d'*Opnet* : la disponibilité d'un ensemble de modèles prédéfinis de trafics qui simulent les différentes situations et les différentes applications (comme le trafic pour simuler un accès à l'internet ou le trafic nécessaire pour faire une communication téléphonique). Ces modèles sont même reconfigurables selon les besoins du concepteur.

Sous *Opnet*, il existe même des profils qui simulent le comportement complet d'un utilisateur :

- Profile Engineer : Web Browsing (light), Email (light), Telnet (light), File transfer (light)
- Researcher : Web Browsing (heavy), Email (light),
- E-Commerce Customer : Web Browsing (heavy)
- ...

V.3.1- La téléphonie :

Après avoir effectué la conception, il est nécessaire de mettre ce système sous évaluations afin de l'évaluer et de voir s'il répond aux normes et aux critères de qualité.

Dans une communication interactive, les paramètres temporels constituent le plus fondamental des facteurs, ces paramètres sont nécessaires pour assurer un confort d'utilisation raisonnable (le délai et la gigue) :

- **Débit** : il définit le volume d'informations (bits par unité de temps).
- **Le délai** : désigne le laps de temps entre le moment où l'émetteur prend la parole et celui où le destinataire écoute le message. Il inclut la somme des temps de conception du paquet au niveau de l'émetteur (numérisation, codage, compression, paquetsisation), le traitement du paquet au niveau du récepteur (décodage, décompression, réassemblage, conversion du signal numérique en un signal analogique) et l'acheminement du paquet de bout en bout dans le réseau (délai de propagation, de transmission et de commutation dans les nœuds, incluant le délai de séjour dans les files d'attente des commutateurs). Ce délai doit être aussi court que possible
- **Gigue** : La gigue est une variation des délais, un paramètre très important de la parole téléphonique. Prenons un exemple : si les délais de transit de tous les paquets transportant une conversation téléphonique sont égaux à 100 ms, la moyenne est également de 100 ms. Si maintenant le délai de transit d'un paquet sur deux est de 120 ms et d'un paquet sur deux est de 80 ms, la moyenne est toujours 100 ms mais la gigue a augmentée, elle est passée de 0 à 20 ms. Tant que la gigue reste acceptable, il est possible de resynchroniser les paquets, mais lorsque la gigue augmente trop et dépasse le temps maximum de la latence, l'application commence à se dégrader.

Le tableau suivant montre les mesures recommandées par l'*ITU* [36] :

Latency(Délai)	< 150 ms	> 150 ms & <300 ms	> 300 ms
Jitter(Gigue)	< 20 ms	> 20 ms & < 50 ms	> 50 ms
Performance	Excellent	Good	Poor

Tableau 5.2 : les valeurs recommandées par l'ITU

- **MOS** (Mean Opinion Score) est une appréciation subjective de la voix selon certains modèles définis par l'ITU (Ce n'est que depuis quelques années qu'un calcul mathématique de cette valeur a pu être réalisé) [2]. Elle établit un coefficient de qualité ascendant sur une échelle de 1 à 5.

MOS	1	2	3	4	5
Qualité	Mauvais	Médiocre	Assez bon	Bon	Excellent

Tableau 5.3 : la description du MOS par l'ITU

Les principaux standards de codage utilisés pour coder la voix dans les réseaux sont illustrés sur le tableau suivant :

Codage	Débit de la parole	Débit réel
G.711	64 Kbit/s	80 Kbit/s
G.723.1	5.6 Kbit/s	16.27 Kbit/s
G.723.1	6.4 Kbit/s	17.07 Kbit/s
G.729(A)	8 Kbit/s	24 Kbit/s

Tableau 5.4 : Comparaison des codages principaux

On voit bien que le codage G.711 est de loin le plus simple puisqu'il n'y a pas de compression. Cependant, il utilise beaucoup de bande passante et n'est donc pas bien adapté à notre réseau sans fil (Notre débit offert par les différentes technologies utilisées n'est pas consacré à la téléphonie. Donc on optimise le maximum notre bande tout en respectant la qualité de service).

Les codeurs les plus récents sont G.723.1, G.729 et G.729(A), mais on va utiliser dans notre système le codage G.729(A) qui consomme un débit de 8 Kbit/s (théorique), mais la qualité de la communication est meilleure. Il est destiné aux applications de téléphonie sans fil et des applications VoIP. Ce codec a été choisi pour compresser la voix dans l'UMTS (un réseau de 3^{ème} génération) [2].

Les résultats de simulation obtenus sont présentés sur les figures suivantes :

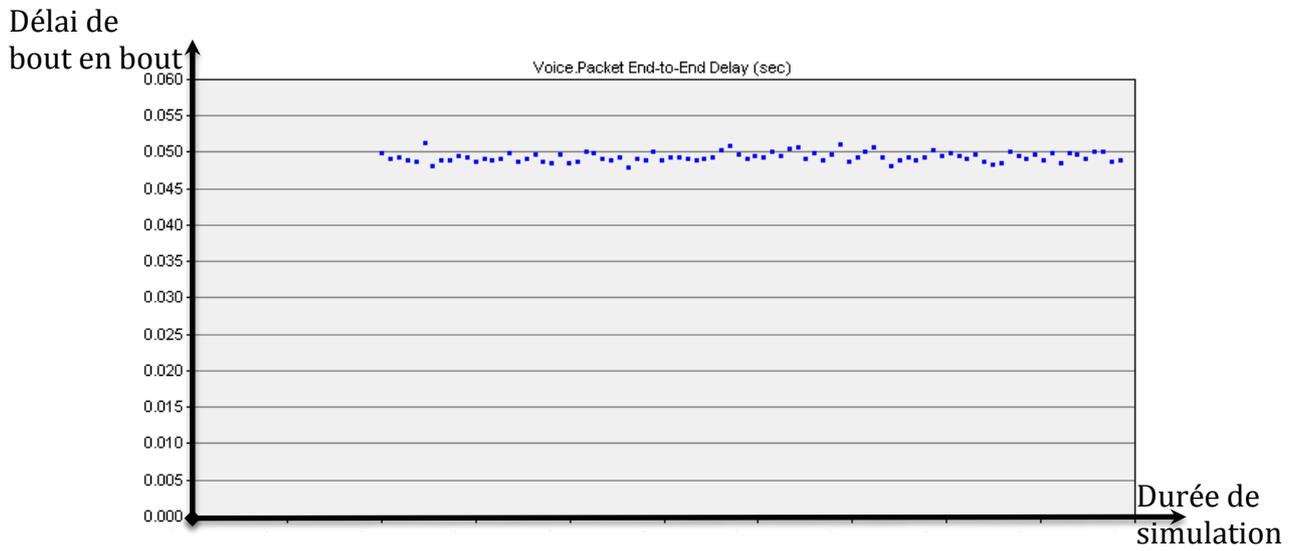


Figure 5.6 : délai (2 stations)

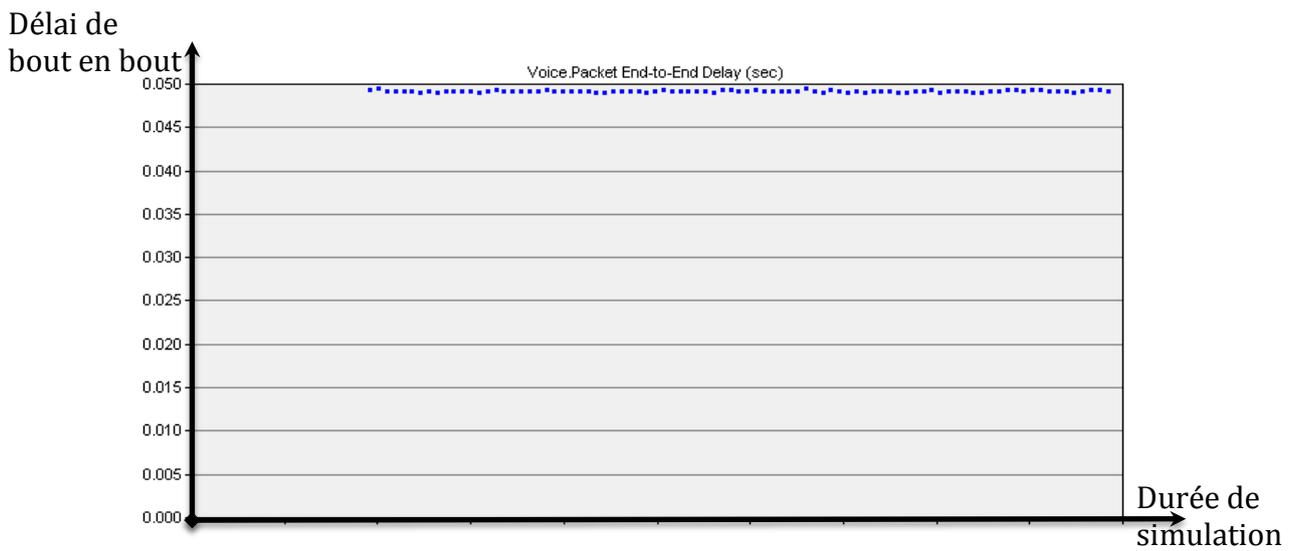


Figure 5.7 : délai (100 stations)

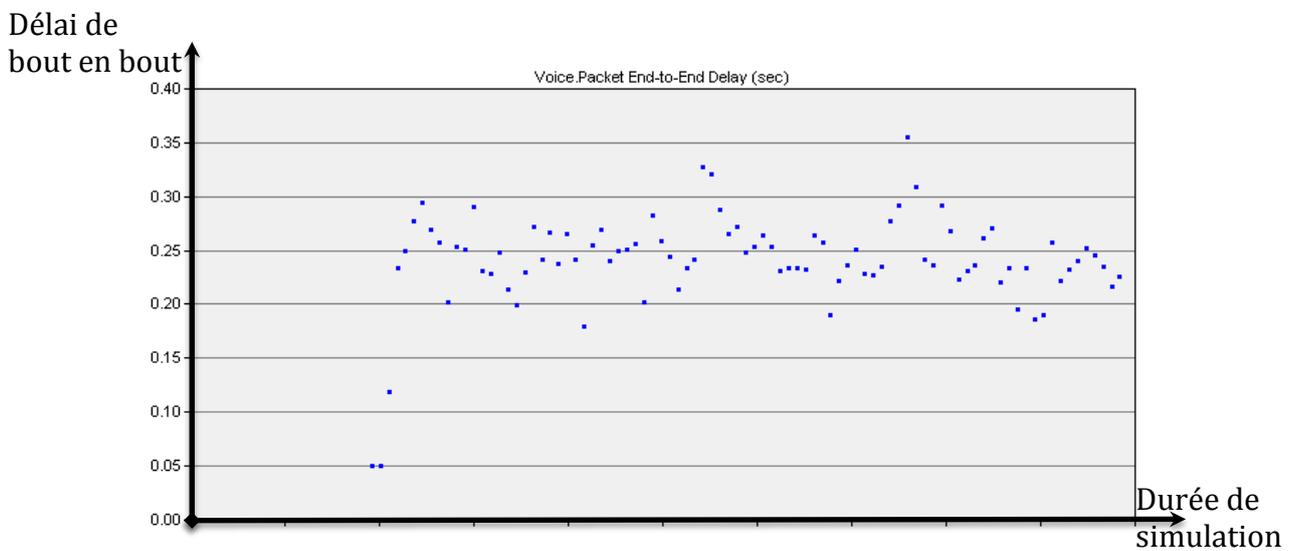


Figure 5.8 : délai (250 stations)

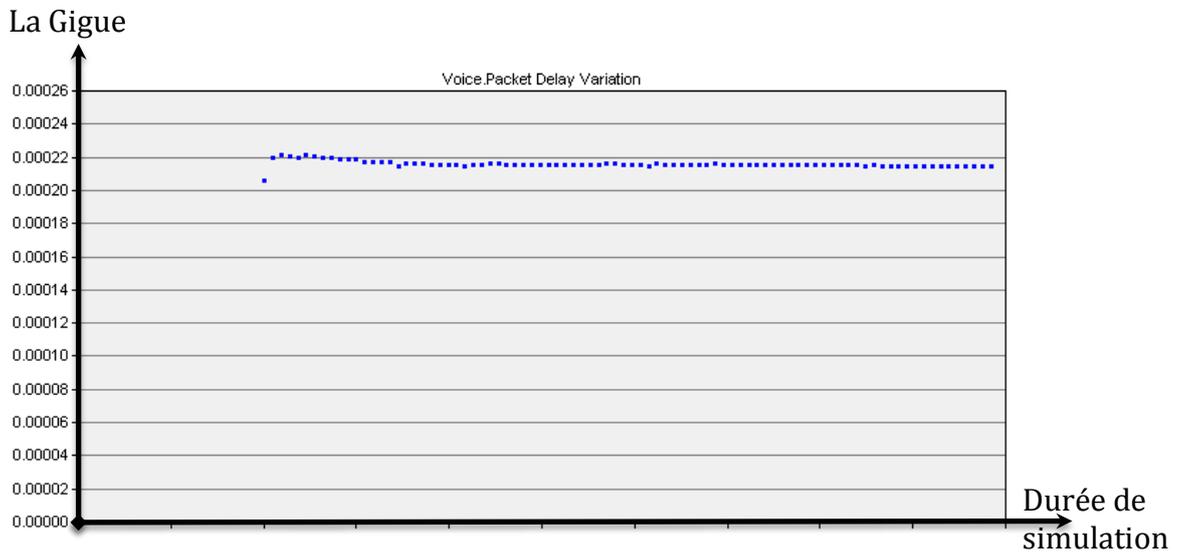


Figure 5.9 : gigue (2 stations)

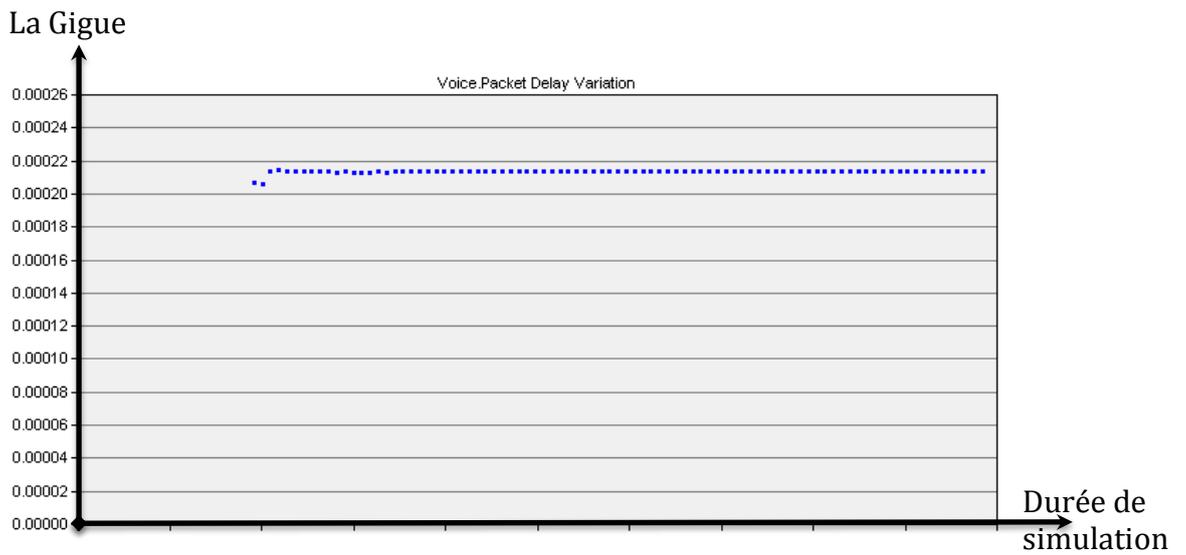


Figure 5.10 : gigue (100 stations)

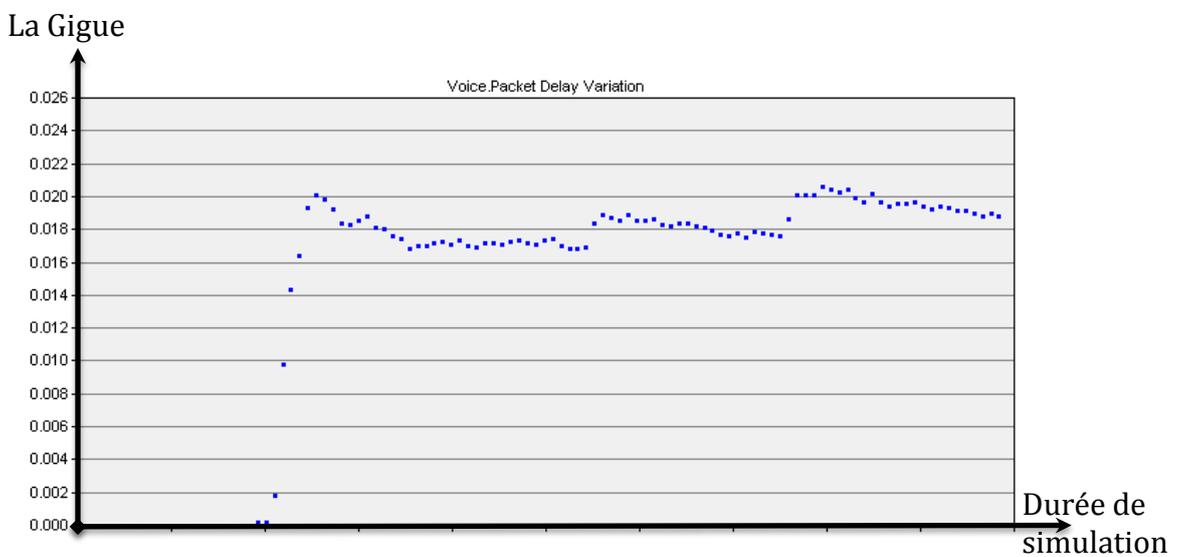


Figure 5.11 gigue (250 stations)

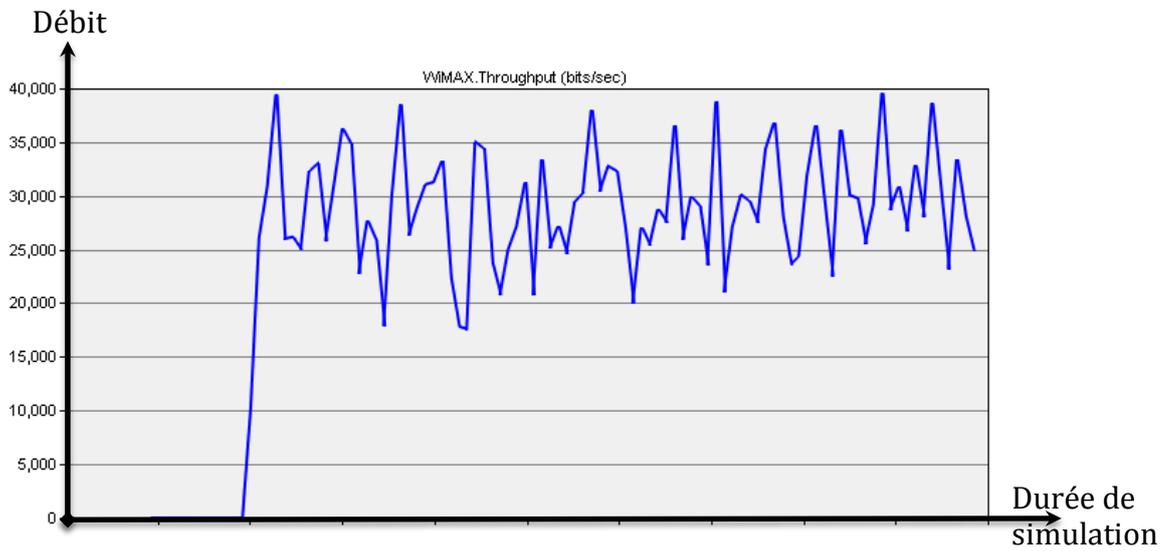


Figure 5.12 : débit (2 stations)

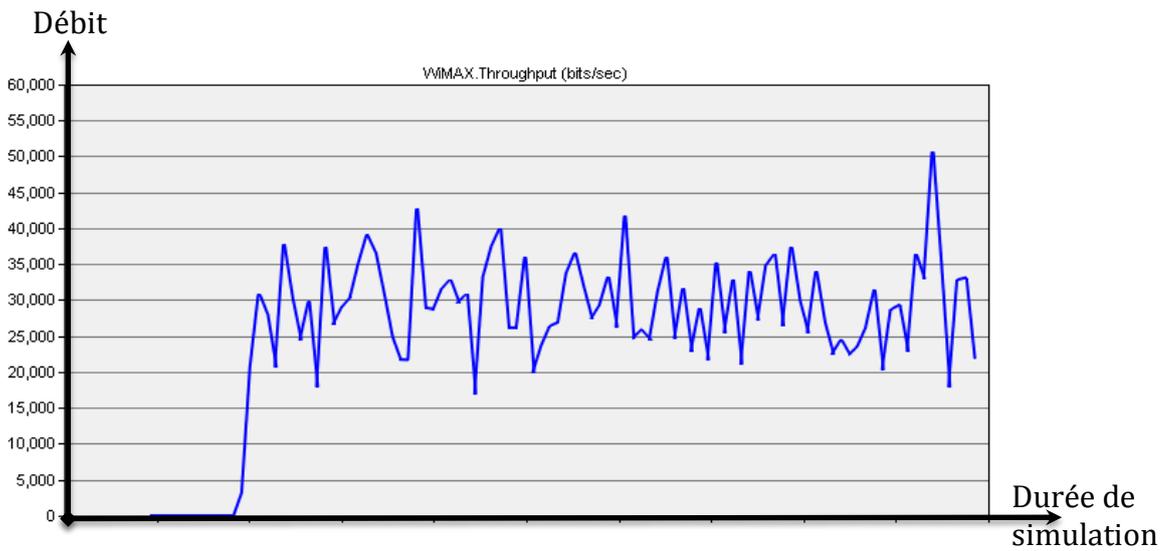


Figure 5.13 : débit (100 stations)

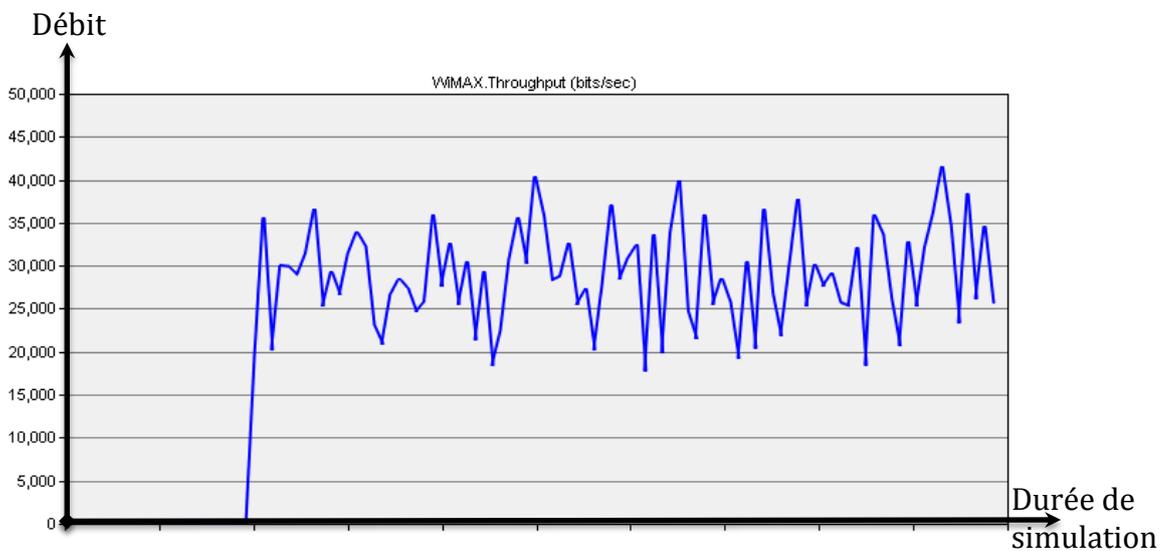


Figure 5.14 : débit (250 stations)

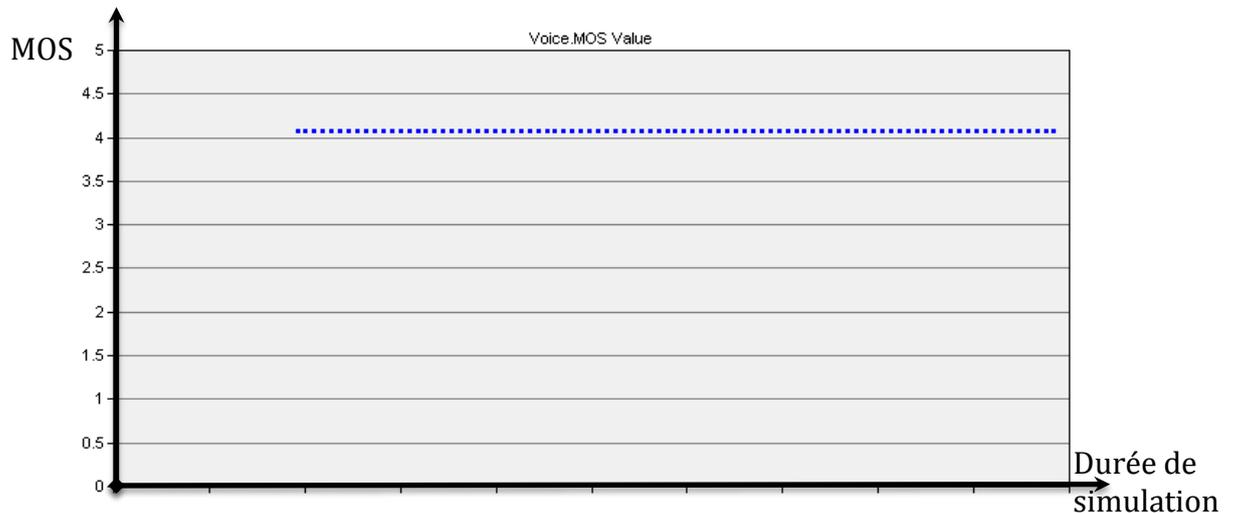


Figure 5.15 : MOS

Les courbes présentées sur les figures 5.6 jusqu'à 5.15 montrent les résultats de simulation obtenus en utilisant *Opnet* :

On commence par le *MOS* où on a obtenu une valeur de 4.1 pour tous les cas étudiés. Cette valeur assure que la parole circulée dans le réseau est de très bonne qualité (sur l'échelle au tableau 5.3).

Le délai de 50 ms obtenu appartient à la gamme des délais excellents recommandé par L'*ITU* (tableau 5.2), cette valeur de délai reste excellente avec 100 stations. Mais dès qu'on atteint 250 stations qui font des appels en même temps dans la même cellule, les performances commencent à se déstabiliser (figure 5.11) tout en préservant une qualité bonne, et se dégrader plus tard après avoir 300 stations qui téléphonent en même temps pendant une longue durée (les communications 'vers' ou 'à partir' de cette cellule se dégradent).

Le comportement de la gigue (et par conséquent les résultats de la gigue) suit le même comportement de délai puisque la gigue est une variation de délai. Donc, comme prévu une gigue excellente de 0.22 ms dans les conditions primaires, mais se dégrade qu'on aura plus de 250 stations vers [16 ms – 20 ms] qui reste aussi une gigue excellente (tableau 5.2).

Pour le débit, on a obtenu une moyenne de 28 à 30 kbits/s sachant que le débit utilisé réellement dans d'autres réseaux sur le même codage *G.729 (A)* est de 24 kbits/s pour assurer presque la même qualité de service (un *MOS* entre 3.9 et 4). Mais quand on dépasse un nombre de clients en même temps (250), la station de base commence à minimiser le débit réservé alloué auparavant à chaque station (c'est ce qui provoque la dégradation).

Ces courbes témoignent de l'efficacité de notre système par ce que la comparaison avec l'UMTS prouve que notre système est bien meilleur en assurant plus d'appels en même temps (l'UMTS assure 180 appels de bonne qualité et moins de 240 au bout de ses capacités)

En général, malgré les performances excellentes qui commencent à se diminuer après avoir 250 stations en interaction complète, les résultats restent satisfaisants et intéressants ce qui n'est pas garanti au-delà 300 stations. La cause de cette dégradation n'est pas seulement les réservations exigées par la téléphonie, mais aussi le traitement au niveau des couches supérieures, le buffering, les processeurs et le matériel utilisées,... qui nécessitent une étude spécialisée. Dans notre cas, on a pris des configurations par défaut utilisées par *Opnet*. L'amélioration de ces configurations par défaut influence sûrement la capacité totale du système.

V.3.2- L'internet:

L'internet n'est pas comme la téléphonie où il existe une réservation préalable de la bande passante pour assurer une bonne qualité de son, mais repose sur la classe «best effort» qui ne demande comme on a déjà dit aucune qualité de service particulière ni aucun débit minimal.

Pour l'internet on a un maximum de débit qu'on peut l'atteindre dans chaque cellule (qui est lui-même variable), ce débit peut être partagé avec 2 personnes comme il peut être partagé avec des milliers de personnes.

Les résultats de simulation obtenus pour ce type de trafic sont présentés sur les figures suivantes :

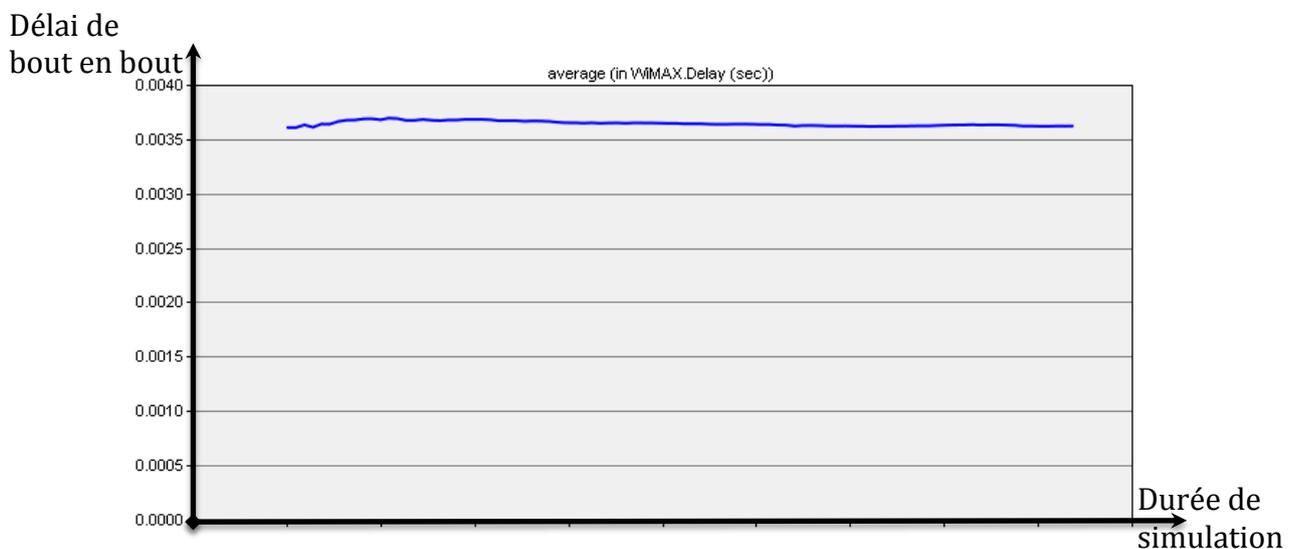


Figure 5.16 : délai (1 station)

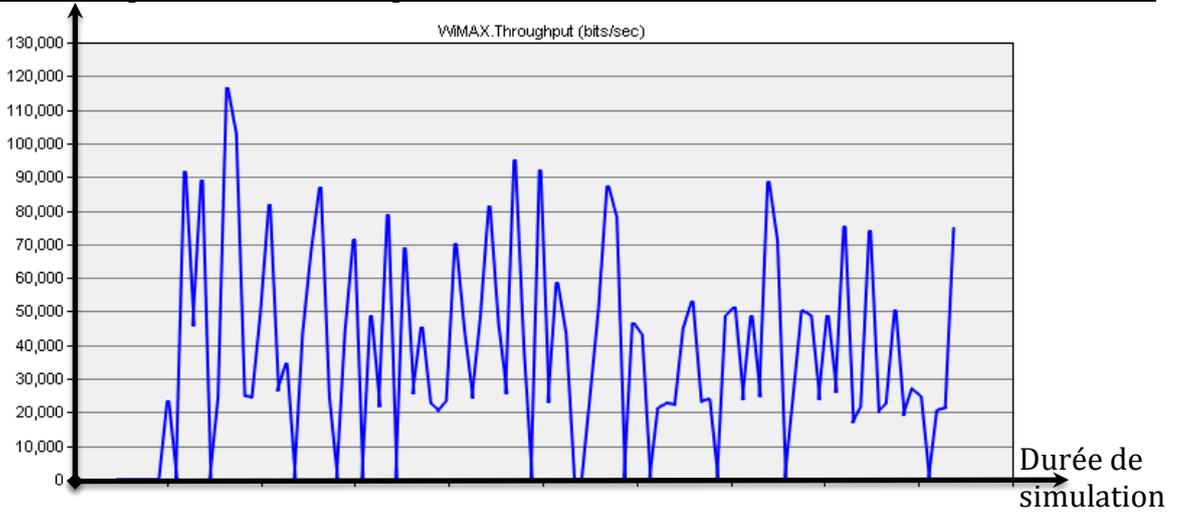


Figure 5.17 : débit (1 station)

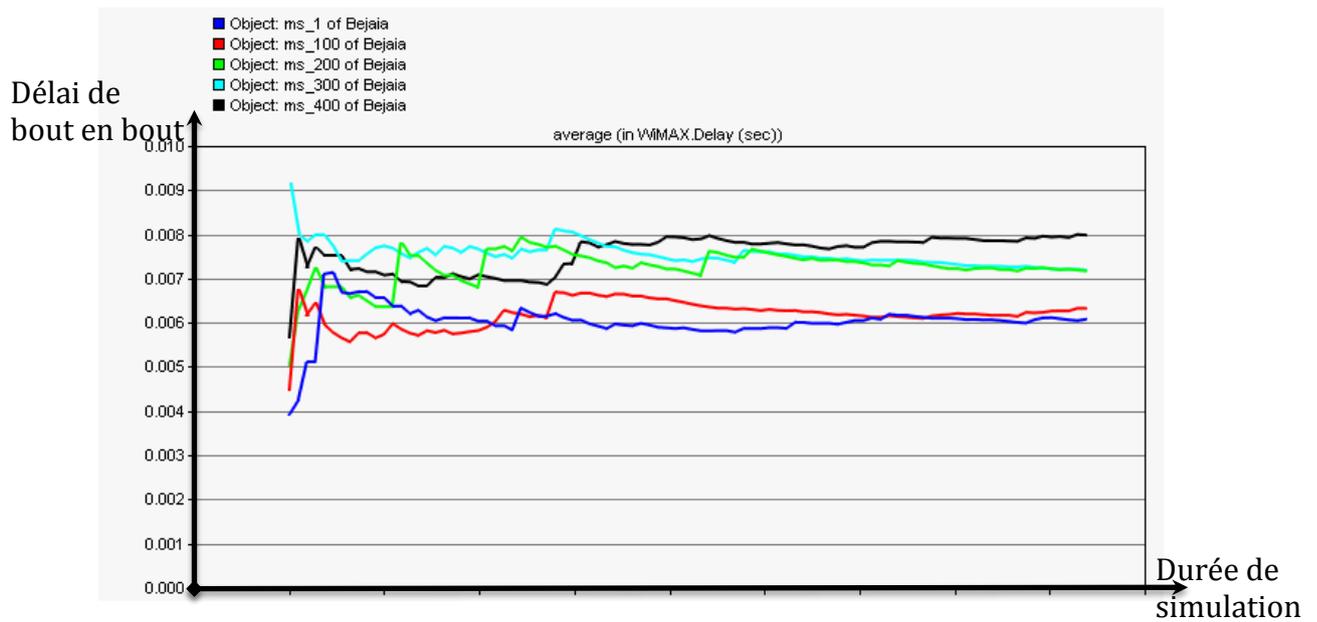


Figure 5.18 : délai (400 stations)

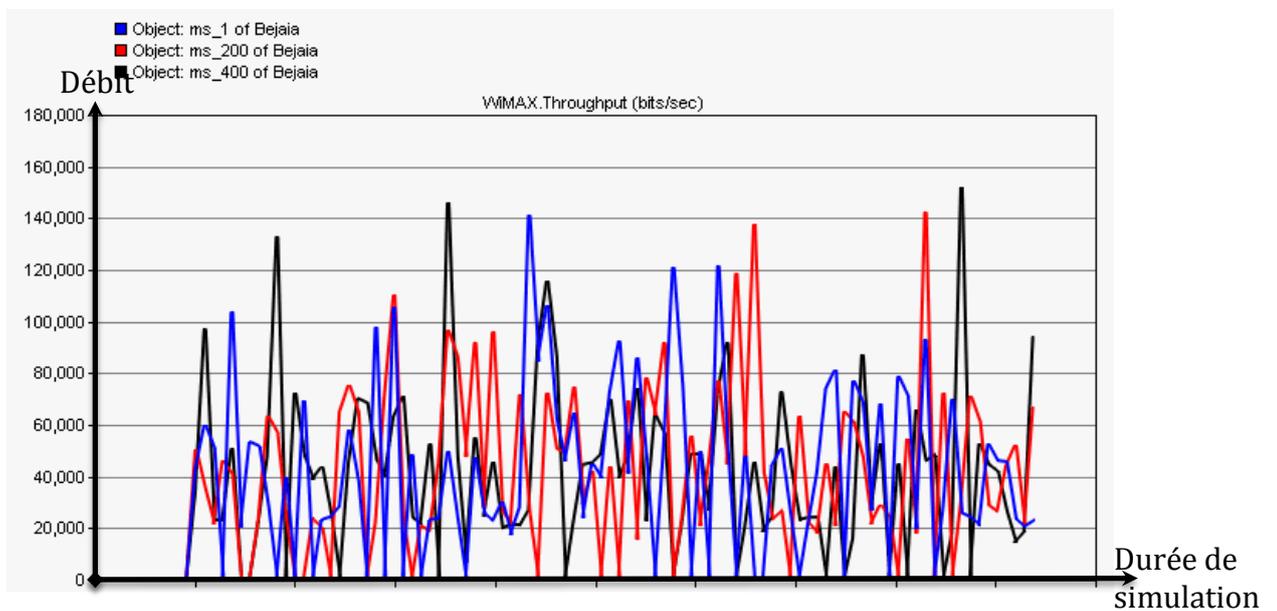


Figure 5.19 : débit (400 stations)

Les deux figures 5.16 et 5.18 montrent le délai (de bout en bout) de tous les paquets de données qui ont été reçues par la couche *MAC* et transmissent à la couche supérieure. Nous remarquons quand on circule un trafic qui simule le même comportement d'un trafic produit par un internaute que les délais obtenus sont extrêmement excellents, soit pour une seule station (environ de 3.5 ms) ou 400 stations (entre 6 ms et 8 ms).

Les deux figures 5.17 et 5.19 montrent la consommation du débit par une station et par différentes stations.

V.3.3- Vidéo conférence:

On présente dans cette partie une des applications spécialisée que notre réseau peut supporter. Dans ce scénario, nous insérons un trafic entre deux extrémités qui simule une vidéo conférence. Voici le résultat obtenu :

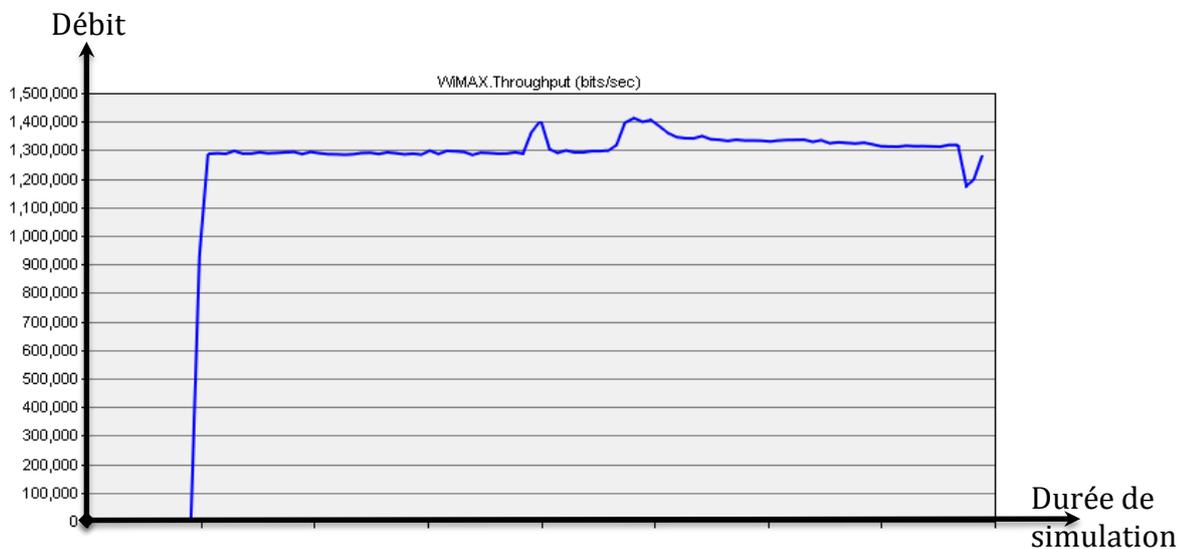


Figure 5.20 : débit (2 stations)

Nous remarquons que les vidéos conférences actuelles exigent un débit élevé qui dépasse 1.3 Mbit/s dans notre application, et même plus (environ de 3 Mbit/s pour les hautes qualités). Pour un réseau sans fil à usage générale, ce débit est très élevé, donc c'est fortement déconseillé de lancer plusieurs vidéos conférences en même temps dans la même cellule, par ce que certaines stations peuvent monopoliser le canal et empêcher d'autres utilisateurs de bénéficier les services de ce réseau.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé la simulation des modèles conçus au chapitre précédant pour prévoir la réaction des différents composants sur le terrain. Cette simulation nous permet de surveiller et analyser l'état de réseau avec 3 types de trafic : la téléphonie, l'internet et la Visio-conférence.

D'autre part, cette simulation nous a prouvé que le système sera très satisfaisant et répondra parfaitement à nos besoins et de ce que nous attendons de lui.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire, se situe dans le contexte de l'évolution des télécommunications en Algérie. Plus précisément il a été consacré à la conception d'un réseau et la caractérisation de ses modules.

L'objectif principal de ce travail de thèse était d'étudier, proposer une conception et de simuler un réseau appartient à la quatrième génération. Nous avons commencé par un chapitre qui résume la structure de base d'un réseau et les principaux contraintes et concepts nécessaire à cette conception.

Puis nous avons mis l'accent sur l'interface air en expliquant les différents modèles de propagations qui peuvent influencer le trajet du signal dans son voyage entre les stations mobiles et les stations de base.

Nous avons exploré ensuite les standards radios les plus utilisés pour couvrir les problèmes d'utilisation de l'interface air comme moyen de communication. Parmi ces standards il existe l'*IEEE 802.11*, l'*IEEE 802.15* et l'*IEEE 802.16*, chaque un peut avoir des avantages et des inconvénients selon l'environnement et le domaine d'application. En effet, nous avons choisi la norme 802.16 (Wimax) afin d'optimiser le lien radio où nous avons consacré une partie de ce document pour l'étude des principales caractéristiques de ce standard. Déployé sur une bande

flexible de 1.25 GHz à 20 GHz, WiMAX utilise plusieurs technologies lui permettant d'atteindre des portées de taille urbaine avec des excellents débits.

Parmi ces technologies, nous avons expliqué l'*OFDM* basée sur la notion d'orthogonalité qui autorise un fort recouvrement spectral entre les sous-porteuses, ce qui permet d'augmenter sensiblement leur nombre, et par conséquent, la quantité de données à envoyer.

Une autre technologie intégrée dans le standard *IEEE 802.16* appelée *MIMO*, complexe et n'est utilisée que récemment dans le domaine de télécommunication. Elle est basée sur l'idée d'envoyer et de recevoir par plusieurs antennes intelligentes sur le même canal et sans interférences. Cette idée permet aussi d'envoyer une grande quantité de données, à cause du parallélisme au niveau de la transmission.

Une partie de ce mémoire est consacré pour expliquer les différents modèles et couches de notre système, et il est composé d'un ensemble de sous réseaux dont chacun représente une ville, ces dernières sont interconnectées par un réseau de fibres optiques d'Algérie télécom construit récemment et couvre presque toute l'Algérie. A l'intérieur de la ville, le terrain est décomposé en cellules de 1 km comme proposé dans le standard, où chaque station de base s'occupe d'une cellule. La transmission de données entre les cellules et vers les villes externes est faite grâce un routeur, ce dernier est connecté avec les cellules de la même ville par des ponts point à point, et avec les routeurs des autres villes par le réseau de fibres optiques. Chaque station suit le standard *IEEE 802.16* et bénéficie de ses avantages.

Une autre partie explique la circulation du trafic dans notre système, où nous avons pris soin de 3 types de flux : la téléphonie, l'internet et la vidéo conférence. Un modèle de fonctionnement de chaque type est détaillé en précisant les différentes classes de priorités.

Grâce à l'ensemble d'outils de conception et de mesure *OPNET Modeler*, nous avons pu développer et valider le système. Une simulation des différents composants du réseau nous a permis d'avoir une collection de données et statistiques à analyser où notre système a prouvé qu'il est capable d'offrir des services de bonne qualité.

Perspectives

Le travail ouvre de nombreuses perspectives aussi bien au niveau proposition des systèmes de communication pour l'Algérie qu'au niveau amélioration de certains composants.

La première perspective consiste à proposer un système hybride au niveau interconnexion des villes où une intégration d'un système satellitaire peut soutenir la transmission en cas de pannes terriens ou situations d'urgences.

Une autre perspective concerne l'application des nouveaux protocoles développés pour les hautes couches du modèles OSI afin d'augmenter l'efficacité du système.

Bibliographie

- [1] IEEE Std 802.16, “ *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems* ”, Revision of IEEE Std 802.16-2004, May 2009
- [2] Laurent Ouakil et Guy Pujolle, “ *Téléphonie sur IP : SIP, H.323, MGCP, QoS et sécurité, Asterisk, VoWiFi, offre multiplay des FAI, Skype et autres softphones, architecture IMS...* ”, 2^{ème} édition, Eyrolles, Juin 2008
- [3] Guy Pujolle, “ *Les réseaux, Edition 2008* ”, 6^{ème} édition, Eyrolles, septembre 2007
- [4] Ian Poole, “ *Cellular communications explained : from basics to 3G* ”, first edition, Elsevier Ltd, March 2006
- [5] Ajay R. Mishra, “ *Cellular Technologies for Emerging Markets: 2G, 3G and Beyond* ”, first edition, John Wiley and Sons, June 2010
- [6] Shahid K. Siddiqui, “ *Roaming In Wireless Networks* ”, McGraw-Hill, 2006
- [7] J. Eberspächer, H.-J. Vögel, C. Bettstetter and C. Hartmann, “ *GSM – Architecture, Protocols and Services* ”, Third Edition, John Wiley and Sons, 2009
- [8] Ajay R Mishra, “ *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G* ”, John Wiley and Sons, 2007
- [9] Bernhard H. Walke, “ *Mobile Radio Networks : Networking, Protocols and Traffic Performance* ”, Second Edition, John Wiley and Sons, 2002
- [10] Zerihun Abate, “ *GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementation* ”, Artech House, 1998
- [11] Paul Bedell, “ *Wireless Crash Course, Wi-Fi and Wi-Max, Wireless IP, Smart Antennas, 3G and UMTS* ”, Second Edition, McGraw-Hill, 2005
- [12] W. Pirard, “ *Champs Electromagnétique et Téléphonie Mobile* ”, Institut Scientifique de Service Public, 2003
- [13] François De Dieuleveult et Olivier Romain, “ *Électronique Appliquée aux Hautes Fréquences, Principes et applications* ”, 2^{ème} édition, Dunod, 2008
- [14] <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM.html>, Un Manuel Internet des Radioamateurs

- [15] Zhi Ning Chen and Kwai-Man Luk, “ *Antennas for Base Stations in Wireless Communications* ”, McGraw-Hill, 2009
- [16] Opnet, “ *OPNET modeling concepts* ”, ver 14.5
- [17] Roger L. Freeman, “ *Radio System Design for Telecommunications* ”, Third Edition, John Wiley and Sons, 2007
- [18] Belhouji Adil, “ *Etudes théoriques et expérimentales de systèmes de transmissions MIMO-OFDM Mesures actives en environnements réels et maîtrisés dans un contexte WiMAX* ”, Université de Limoges, 2009
- [19] Mouhamadou Moctar, “ *Contribution au développement et à l’optimisation d’un démonstrateur d’antennes adaptatives Applications à des systèmes de communications sans fil haut débit: WiMax* ”, Université de Limoges, 2007
- [20] Amitabh Kumar, “ *Mobile Broadcasting with WiMAX: Principles, Technology, and Applications* ”, Focal Press, 2008
- [21] Bhavneet Sidhu, Hardeep Singh and Amit Chhabra, “ *Emerging Wireless Standards - WiFi, ZigBee and WiMAX* ”, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2007
- [22] Na TAO, “ *Etude des Performances et Optimisation d’un Réseau d’Accès par Satellite pour les Communications* ”, L’Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 2009
- [23] Krzysztof Wesolowski “ *Mobile Communication Systems* ”, John Wiley and Sons, 2002
- [24] Uma Shanker Jha and Ramjee Prasad, “ *OFDM Towards Fixed and Mobile Broadband Wireless Access* ”, Artech House, 2007
- [25] Ajay R Mishra, “ *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G* ”, John Wiley and Sons, 2004
- [26] Jawad Nakad, “ *Allocations de ressources radio dans un réseau local sans fil (WLAN) de type OFDM* ”, université Saint-Joseph et université Libanaise, 2003
- [27] P. Nicopolitidis, M. S. Obaidat, G. I. Papadimitriou and A. S. Pomportsis, “ *Wireless Networks* ”, John Wiley and Sons, 2003
- [28] Yan Zhang and Hsiao-Hwa Chen, “ *MOBILE WiMAX Toward Broadband Wireless Metropolitan Area Networks* ”, Auerbach, 2008
- [29] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed, “ *Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking* ”, Prentice Hall, 2007
- [30] Frank Ohrtman, “ *WiMAX Handbook : Building 802.16 Wireless Networks* ”, McGraw-Hill, 2005
- [31] Yan Zhang, “ *Wimax Network Planning and Optimization* ”, Auerbach, 2008

- [32] Ramjee Prasad and Fernando J. Velez, “ *WiMAX Networks, Techno-Economic Vision and Challenges* ”, Springer, 2010
- [33] Zerihun Abate, “ *WiMAX RF Systems Engineering* ”, Artech House, 2009
- [34] Adrien Renoult, Charly Poulliat, Marc Chenu-Tournier and Inbar Fijalkow, “ *On the performance of a multi-user multi-array COFDM system* ”, In proceeding of IEEE SPAWC, July 2004
- [35] H. Sari, Y. Levy, G. Karam, “ *An analysis of orthogonal frequency-division multiple access* ” in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, pages 1635-1639, November 1997
- [36] Muhammad Tayyab Ashraf, “ *ZRTP: A New Approach to Secure VoIP calls* ”, Canadian Journal on Network and Information Security Vol. 1, No. 6, August 2010
- [37] Martin Sauter, “ *Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together* ”, John Wiley and Sons, 2009
- [38] <http://www.algeriatelecom.dz/?p=chiffres>
- [39] www.opnet.com

Abstract

The applications of wireless communications never cease to grow and always ask more throughput, mobility and quality. That's why last years were marked by the rise of a revolution in computer networks and wireless systems. By combining the connectivity and mobility, new technologies are about to fundamentally change the information systems and infrastructures.

In this document, we propose a next generation network design for Algeria based on the IEEE 802.16 standard and its various technologies in order to minimize the number of antennas within the city and maximize coverage by connecting several cities together.

Keywords: Network, Cellular, IEEE 802.16, OFDM.

Résumé

Les applications de communications sans fil ne cessent jamais de se développer et demande à chaque fois plus de débit, de mobilité et même de qualité. C'est pourquoi, ces dernières années ont été marquées par la montée en puissance d'une véritable révolution des réseaux informatique et les systèmes sans fil. En alliant la connectivité et la mobilité, ces nouvelles technologies sont en passe de modifier en profondeur les systèmes d'information et leurs infrastructures.

Dans ce document, nous proposons un réseau de la prochaine génération pour l'Algérie basé sur le standard IEEE 802.16 et ses différentes technologies dans le but de minimiser le nombre d'antennes à l'intérieur de la ville et maximiser la couverture en reliant plusieurs villes ensemble.

Mots clés : Réseau, Cellule, IEEE 802.16, OFDM