

# Table des matières

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| Remerciement.....          | iii |
| Résumé .....               | iv  |
| Abstract .....             | iv  |
| Table des matières .....   | v   |
| Liste des figures.....     | ix  |
| Liste des tableaux .....   | xi  |
| Introduction générale..... | 1   |

## Chapitre I : Généralités sur les réseaux sans fils

|   |    |
|---|----|
| I.1      Introduction .....   | 4  |
| I.2      Catégories des réseaux sans fils .....                     | 4  |
| I.3      Les Réseaux personnels sans fil (WPAN).....                | 6  |
| I.3.1    Le Bluetooth.....  | 6  |
| I.3.1.1    Présentation de la technologie Bluetooth .....           | 6  |
| I.3.1.2    Intérêts et caractéristiques du Bluetooth.....           | 7  |
| I.3.1.3    Le principe de fonctionnement du Bluetooth .....         | 7  |
| I.3.2    L'infrarouge.....  | 8  |
| I.3.2.1    Présentation de la technologie .....                     | 8  |
| I.3.2.2    Principe de fonctionnement de l'infrarouge .....         | 9  |
| I.3.3    Le ZigBee .....  | 10 |
| I.3.3.1    Présentation de la technologie .....                     | 10 |
| I.3.3.2    Le principe de fonctionnement de ZigBee .....            | 11 |
| I.4      Les réseaux locaux sans fil (WLAN) .....                   | 12 |
| I.4.1    Le Wi-Fi .....   | 12 |
| I.4.1.1    Présentation du Wi-Fi (802.11) .....                     | 12 |
| I.4.1.2    Les modes de fonctionnement de la norme IEEE 802.11..... | 13 |
| I.4.2    L'HiperLAN.....  | 13 |
| I.4.2.1    Présentation de L'HiperLAN .....                         | 13 |
| I.4.2.2    Le principe de fonctionnement de la norme HiperLAN.....  | 14 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| I.5     | Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN) ..... | 15 |
| I.5.1   | Catégories du WiMAX.....                         | 15 |
| I.5.2   | Fonctionnement du WiMAX.....                     | 16 |
| I.6     | Les réseaux étendus sans fil (WWAN).....         | 17 |
| I.6.1   | Le GSM .....                                     | 17 |
| I.6.1.1 | Présentation du GSM.....                         | 18 |
| I.6.1.2 | Principe de fonctionnement du GSM .....          | 18 |
| I.6.2   | Le GPRS.....                                     | 18 |
| I.6.2.1 | Présentation du GPRS .....                       | 18 |
| I.6.2.2 | Fonctionnement du GPRS.....                      | 19 |
| I.6.3   | L'UMTS .....                                     | 20 |
| I.6.3.1 | Présentation de la technologie .....             | 20 |
| I.6.3.2 | Le fonctionnement de l'UMTS .....                | 20 |
| I.7     | Conclusion :.....                                | 20 |

## **Chapitre II : La Technologie WiMAX : Évolution et Architecture**

|          |   |    |
|----------|---|----|
| II.1     | Introduction .....                              | 22 |
| II.2     | Généralités sur le réseau WiMAX.....            | 22 |
| II.2.1   | Le Forum WiMAX.....                             | 23 |
| II.2.2   | Objectif de WIMAX.....                          | 23 |
| II.3     | Normalisation et le standard IEEE802.16 .....   | 23 |
| II.3.1   | Caractéristiques de la norme IEEE 802.16 :..... | 23 |
| II.3.2   | L'évolution du standard IEEE802.16.....         | 24 |
| II.3.2.1 | IEEE 802.16-2001 .....                          | 24 |
| II.3.2.2 | IEEE 802.16c-2002 .....                         | 24 |
| II.3.2.3 | IEEE 802.16a-2003 .....                         | 24 |
| II.3.2.4 | IEEE 802.16-2004 .....                          | 24 |
| II.3.2.5 | IEEE 802.16e.....                               | 25 |
| II.4     | Les Bandes de fréquences supportées .....       | 26 |
| II.4.1   | La bande 10-66 GHz .....                        | 26 |
| II.4.2   | La bande 2-11 GHz .....                         | 26 |
| II.5     | Architecture du réseau WiMAX.....               | 26 |
| II.6     | Structure en couches.....                       | 27 |
| II.6.1   | La couche MAC .....                             | 28 |
| II.6.1.1 | La sous-couche CS (Convergence Sub-layer) ..... | 28 |

|          |                                   |    |
|----------|-----------------------------------|----|
| II.6.1.2 | La sous couche CPS .....          | 29 |
| II.6.1.3 | La sous couche SS .....           | 29 |
| II.6.2   | La couche physique .....          | 29 |
| II.6.2.1 | Types des couches physiques ..... | 31 |
| II.6.2.2 | Techniques de Duplexage.....      | 32 |
| II.6.3   | Topologies WiMAX .....            | 34 |
| II.6.3.1 | Le Mode PMP .....                 | 34 |
| II.6.3.2 | Le mode Mesh .....                | 34 |
| II.7     | Conclusion.....                   | 35 |

### **Chapitre III : Modèle de simulation (Chaine de communication)**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| III.1     | Introduction .....                       | 37 |
| III.2     | WirelessMan-OFDM.....                    | 38 |
| III.2.1   | Structure des symboles .....             | 38 |
| III.2.2   | La structure des trames .....            | 40 |
| III.3     | La chaine d'émission.....                | 41 |
| III.3.1   | Le codage du canal .....                 | 42 |
| III.3.1.1 | L'embrouillage .....                     | 43 |
| III.3.1.2 | Codage correcteur d'erreurs .....        | 43 |
| III.3.1.3 | L'entrelacement.....                     | 46 |
| III.3.2   | La modulation.....                       | 47 |
| III.3.3   | IFFT .....                               | 48 |
| III.4     | La chaine de réception.....              | 49 |
| III.4.1   | Démodulation OFDM.....                   | 49 |
| III.4.1.1 | FFT .....                                | 50 |
| III.4.1.2 | Désassemblage .....                      | 50 |
| III.4.1.3 | Estimation de canal et égalisation ..... | 50 |
| III.4.2   | Décodage de canal .....                  | 51 |
| III.4.2.1 | Désentrelacement .....                   | 52 |
| III.4.2.2 | Décodage correcteur d'erreurs .....      | 52 |
| III.5     | Le modèle du canal de propagation.....   | 52 |
| III.6     | Conclusion.....                          | 53 |

## **Chapitre IV : Simulation et résultats**

|        |  |    |
|--------|--|----|
| IV.1   | Introduction .....                                       | 54 |
| IV.2   | Le simulateur .....                                      | 54 |
| IV.3   | Représentations des courbes BER en fonction du SNR ..... | 55 |
| IV.3.1 | Les modulations .....                                    | 55 |
| IV.3.2 | Le codage .....  | 56 |
| IV.3.3 | Le préfixe cyclique .....                                | 59 |
| IV.3.4 | Les canaux SUI.....                                      | 61 |
| IV.3.5 | La bande passante.....                                   | 63 |
| IV.4   | Conclusion.....  | 66 |
|        | Conclusion générale .....                                | 67 |
|        | Bibliographie .....                                      | 66 |

# Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 : Les différentes catégories des réseaux sans fils.....                           | 5  |
| Figure I.2 : Diagramme topologique d'un réseau de type Maitre/Eslave.....                    | 7  |
| Figure I.3 : Diagramme topologique d'un réseau chainé de type Scatternet .....               | 8  |
| Figure I.4 : Transmission du signal dans un système infrarouge.....                          | 10 |
| Figure I.5 : Représentation de la topologie en étoile.....                                   | 11 |
| Figure I.6 : Représentation de la topologie point à point.....                               | 12 |
| Figure I.7 : Réseau 802.11 en mode infrastructure.....                                       | 13 |
| Figure I.8 : Réseau 802.11 en mode ad hoc.....   | 13 |
| Figure I.9 : L'accès au canal de la norme HiperLAN1.....                                     | 14 |
| Figure I.10 : Le principe de fonctionnement du WiMAX (réseau WMAN).....                      | 16 |
| Figure I.11 : domaine d'application du standard GPRS .....                                   | 18 |
| Figure II.1 : Les Différentes configurations du WiMAX.....                                   | 22 |
| Figure II.2 : Exemple d'un réseau WiMAX.....   | 27 |
| Figure II.3 : Structure en couche du standard IEEE802.16 [15].....                           | 27 |
| Figure II.4 : Modulation simple porteuse (à gauche) Modulation OFDM (à droite).....          | 30 |
| Figure II.5 : La Modulation OFDMA.....   | 31 |
| Figure II.6 : Principe de fonctionnement des modes TDD et FDD.....                           | 32 |
| Figure II.7 : Le duplexage FDD.....  | 32 |
| Figure II.8 : Le duplexage TDD.....  | 33 |
| Figure II.9 : Architecture PMP.....  | 34 |
| Figure II.10 : Architecture Mesh.....  | 35 |
| Figure III.1 : Principe de l'OFDM.....   | 38 |
| Figure III.2 : Représentation fréquentielle d'un symbole OFDM.....                           | 39 |
| Figure III.3 : Chaine d'émission [8].....  | 41 |
| Figure III.4. Le codage de canal selon la norme IEEE 802.16d.....                            | 41 |
| Figure III.5 : Principe de l'embrouillage.....   | 42 |
| Figure III.6 : Principe du code de Reed-Solomon.....   | 43 |
| Figure III.7:Processus de poinçonnage et de raccourcissement dans un code Reed-Solomon ..... | 44 |
| Figure III.8 : Principe du codeur Convolutif de taux $\frac{1}{2}$ [8].....                  | 44 |
| Figure III.9 : Constellations des modulations QPSK, 16QAM et 64QAM.....                      | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figure III.10 : La chaîne de réception.....  | 48 |
| Figure III.11 : Principe de l'égalisation.....   | 50 |
| Figure III.12 : Décodage de canal .....  | 50 |
| Figure IV.1 : BER en fonction du SNR pour différents profils sur un SUI-2, BP=5Mhz, CP=1/4.... | 55 |
| Figure IV.2 : Le BER en fonction du SNR de la modulation BPSK avec et sans codage .....        | 57 |
| Figure IV.3 : Le BER en fonction du SNR de la modulation QPSK avec et sans codage.....         | 57 |
| Figure IV.4 : Le BER en fonction du SNR de la modulation 16QAM avec et sans codage.....        | 58 |
| Figure IV.5 : Le BER en fonction du SNR de la modulation 64QAM avec et sans codage.....        | 58 |
| Figure IV.6 : Le BER en fonction du SNR de la modulation BPSK avec différents CP.....          | 59 |
| Figure IV.7 : Le BER en fonction du SNR de la modulation QPSK avec différents CP.....          | 59 |
| Figure IV.8 : Le BER en fonction du SNR de la modulation 16QAM avec différents CP.....         | 60 |
| Figure IV.9 : Le BER en fonction du SNR de la modulation 64QAM avec différents CP.....         | 60 |
| Figure IV.10 : BER en fonction du SNR pour BPSK sur différents modèle de canal.....            | 61 |
| Figure IV.11 : BER en fonction du SNR pour QPSK sur différents modèle de canal.....            | 62 |
| Figure IV.12 : BER en fonction du SNR pour 16QAM sur différents modèle de canal.....           | 62 |
| Figure IV.13 : BER en fonction du SNR pour 64QAM sur différents modèle de canal.....           | 63 |
| Figure IV.14 : BER en fonction du SNR pour BPSK sur différentes Bandes Passantes.....          | 64 |
| Figure IV.15 : BER en fonction du SNR pour QPSK sur différentes Bandes Passantes.....          | 64 |
| Figure IV.16 : BER en fonction du SNR pour 16QAM sur différentes Bandes Passantes.....         | 65 |
| Figure IV.17 : BER en fonction du SNR pour 64QAM sur différentes Bandes Passantes.....         | 65 |

# Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau I.1 : Les classes d'émetteurs du standard Bluetooth .....  | 7  |
| Tableau II.1 : Différentes normes du WiMAX [9] .....   | 25 |
| Tableau II.2 : Les différents types de la couche physique dans le WiMAX .....  | 29 |
| Tableau III.1 : Les schémas de codage et de modulation dans la norme IEEE 802.16d .....  | 45 |
| Tableau III.2 : Profondeur d'entrelacement pour chaque type de modulation.....   | 46 |
| Tableau III.3 : L'étalement des retards des canaux SUI en $\mu$ s .....  | 51 |
| Tableau III.4: Les puissances des trajets relatifs aux canaux SUI en Db .....  | 51 |
| Tableau IV.1 : Valeurs de SNR (dB) pour BER = <b>10<sup>-2</sup></b> et <b>10<sup>-3</sup></b> des différents profils .....                      | 56 |
| Tableau IV.2 : Valeurs de SNR (dB) pour BER = <b>10<sup>-2</sup></b> des différentes modulations<br>avec et sans codage.....                     | 56 |
| Tableau IV.3 : Valeurs de SNR (dB) pour BER = <b>10<sup>-3</sup></b> des préfixes cycliques pour<br>les différents profils des modulations ..... | 61 |
| Tableau IV.4 : Valeurs de SNR (dB) pour BER = <b>10<sup>-3</sup></b> des différents canaux pour toutes les<br>modulations .....                  | 63 |
| Tableau IV.5 : Valeurs de SNR (dB) pour BER = $10^{-2}$ des différents bandes passantes pour toutes les<br>modulations.....                      | 66 |

## Résumé

*Dans ce travail nous avons étudié l'évolution et la caractérisation du système WiMAX/IEEE 802.16 ainsi que son architecture. En plus nous avons présenté les différents blocs de sa couche physique qui utilise la technique OFDM et le mécanisme de correction d'erreur (FEC) qui comporte les codes correcteurs d'erreurs (code convolutif et Reed Solomon) ainsi que les modulations numériques. Sur le côté du récepteur, nous avons implémenté l'estimation du canal de transmission.*

*Ensuite ce système a été implémenté en utilisant MATLAB, afin de simuler ces fonctionnalités et d'obtenir des résultats pour évaluer ces performances.*

**Mots clés :** WiMAX, IEEE802.16, OFDM, FEC, la couche PHY, BER, SNR.

---

## Abstract

*In this work we have studied the evolution and characterization of WiMAX / IEEE 802.16 and its system architecture. In addition we presented the different blocks of the physical layer that uses the OFDM technique and the Forward Error Correction (FEC) mechanism, which contains the error correcting codes (convolutional and Reed-Solomon codes) and digital modulations. On the receiver side, we implemented the estimation of the transmission channel.*

*Then the system was implemented using MATLAB to simulate these features and get results to evaluate their performances.*

**Keywords :** WiMAX, IEEE802.16, OFDM, FEC, PHY Layer, BER, SNR.

---

## Introduction générale

Ces dernières années ont connu un essor sans précédent dans les nouvelles technologies de communications et ceci notamment grâce à la démocratisation de l'accès à Internet. L'accès à l'Internet est devenu vital, aussi nécessaire que l'eau et l'électricité. Dans ce contexte, l'utilisateur a pu bénéficier de l'accroissement du nombre et du type de terminaux et exige à présent que ses services soient accessibles n'importe où et n'importe quand. Les progrès technologiques dans le domaine des communications sans fil ont permis de faire face à l'explosion de la demande d'accès au haut débit et notamment dans les situations de mobilité. En effet, les instances de standardisation ont développé différentes alternatives pour la fourniture de l'accès au haut débit sans fil. Parmi les différentes technologies le WiMAX, qui est basé sur les standards IEEE 802.16x.

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

L'utilisation de WiMAX est très semblable à celle d'un modem ADSL, si ce n'est qu'au lieu d'un câble téléphonique on utilise la voie hertzienne. C'est pourquoi l'on parle de WDSL (Wireless DSL) pour décrire la solution WiMAX fixe. En ce qui concerne la version mobile, son utilisation est identique celle d'un ADSL mobile.

L'objectif de ce projet de fin d'études est d'étudier la couche physique du WiMAX/IEEE 802.16 en utilisant Matlab afin d'avoir une meilleure compréhension de la norme et de mesurer les performances de ce système. Cela implique d'étudier, grâce à la simulation, les différents types de modulations, codages et entrelacement en termes de taux d'erreur binaire (BER) pour différents modèles de références du canal.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres :

Dans *le premier chapitre* nous introduisons les différentes spécificités des réseaux sans fils possèdent des caractéristiques et des équipements propres qui diffèrent de ceux employés dans les réseaux traditionnels.

*Le deuxième chapitre* est consacré à la présentation de l'état de l'art sur la norme WiMAX, son évolution, à travers les autres versions antérieures. Nous nous intéressons tout particulièrement à la définition des différents aspects des couches Physique (PHY) et MAC du standard 802.16 et nous exposons les différentes topologies du système WiMAX.

Dans *le troisième chapitre*, nous traitons le modèle de simulation de la couche physique du standard WiMAX et le modèle du canal utilisé dans ce mémoire. Tout d'abord, Nous commençons par une présentation de la modulation OFDM. Ensuite, les spécifications de la couche PHY relative à la norme IEEE 802.16d seront étudiées. Cela permettra de définir et de comprendre l'ensemble des blocs nécessaires à la mise en place du système.

*Le quatrième chapitre* s'intéresse à la mise en place, la caractérisation et la modélisation du système WiMAX (IEEE 802.16d) à travers une simulation développée sous l'environnement Matlab®. Cette caractérisation consistera à évaluer les performances de ce système WiMAX et de définir ses éventuelles limitations en termes BER. Nous allons pu vérifier le potentiel de chaque bloc.

Finalement, nous concluons en résumant l'ensemble des travaux effectués et en apportant des ouvertures sur les travaux futurs.

## **Chapitre I :**

Généralités sur les réseaux sans fils

## I.1 Introduction

Le développement conjoint de l'internet et de l'informatique fait que les réseaux personnels sont aujourd'hui de plus en plus fréquents. Dès lors, il devenait possible de s'affranchir des contraintes d'un réseau filaire.

Dans ce premier chapitre, nous commencerons par présenter des généralités sur les réseaux sans fils ; on examinera les différents réseaux sans fils, depuis les réseaux étendus WWAN et les réseaux métropolitains WMAN, ainsi que les réseaux locaux WLAN et les réseaux personnels WPAN, en examinant chaque fois les différentes technologies disponibles.

Un réseau sans fil est un réseau de machines qui n'utilisent pas de câbles. C'est une technique qui permet aux particuliers, aux réseaux de télécommunications et aux entreprises de limiter l'utilisation de câbles entre diverses localisations.

Les réseaux sans fils ont recours à des ondes radioélectriques, il existe plusieurs technologies se distinguant d'une part par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions.

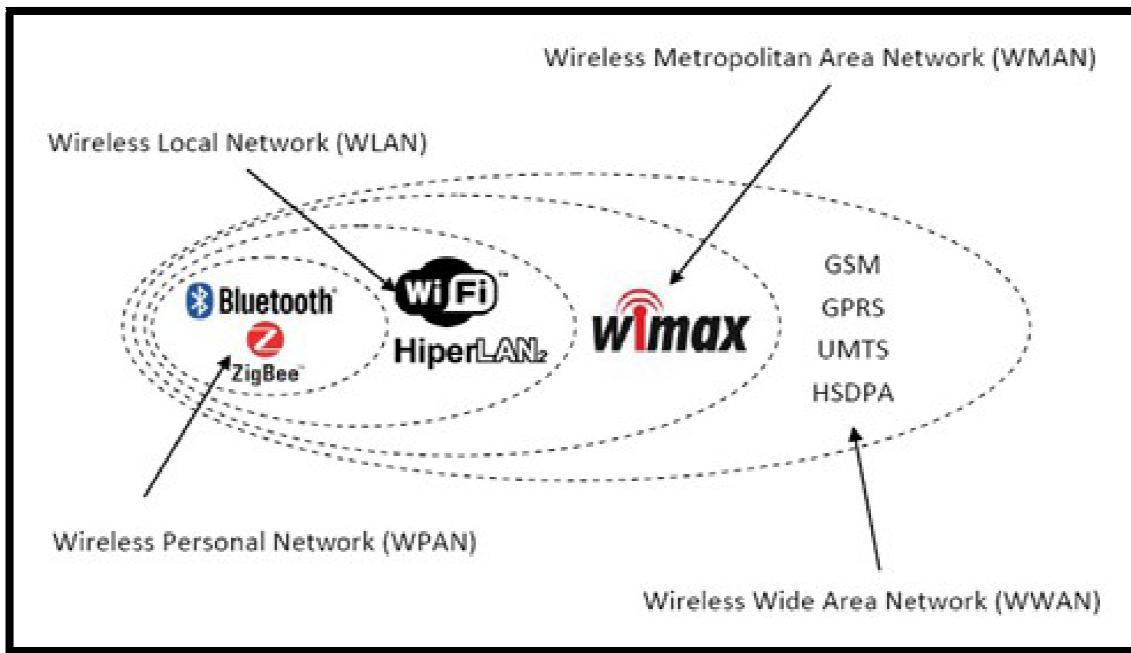
Grâce aux réseaux sans fils, un utilisateur a la possibilité de rester connecter tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus au moins étendu, notion généralement évoquée par le terme de mobilité ou d'itinérance.

Les réseaux sans fils permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus, l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes, comme c'est le cas avec les réseaux filaires, cela a valu un développement plus rapide de ce type de technologie.

## I.2 Catégories des réseaux sans fils

Les réseaux sans fils sont répartis en plusieurs catégories, selon le périmètre géographique offrant la connectivité appelée : « zone de couverture » (figure I.1).

- WWAN : [Wireless Wide Area Network], réseau étendu sans fil: également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fils les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont GSM (Global System for Mobile Communication. Groupe Spécial Mobile), GPRS (General Packet Radio Service) et UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).



**Figure I.1 : Les différentes catégories des réseaux sans fils.**

- **WMAN** : [Wireless Metropolitan Area Network], réseau métropolitain sans fil, connu sous le nom de boucle local radio (BLR). Les WMAN sont fondés sur la norme IEEE 802.16. La norme de réseau métropolitain sans fil la plus connue est le WIMAX, permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres.
- **WLAN** : [Wireless Local Area Network], réseau local sans fil, permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe plusieurs technologies concurrentes : le Wi-Fi ou IEEE 802.11 et HiperLAN2 (High Performance Radio LAN 2.0).
- **WPAN** : [Wireless Personal Area Network], réseau personnel sans fil, appelé également réseau individuel sans fil, concerne les réseaux sans fils d'une faible portée, de l'ordre de quelques dizaine de mètres. Ce type de réseau a recours aux technologies blue-tooth, HomeRF (Home Radio Frequency), ZigBee (IEEE 802.15.4), et infrarouge. [2]. Pour mettre en œuvre de tels réseaux, la principale technologie est IEEE 802.15.1 [3] ou Bluetooth fut proposée par Ericsson en 1994 et fournit un taux de transmission radio théorique de 1 Mbit/s pour une portée maximale d'une trentaine de mètres, est très peu gourmande en énergie ce qui la rend particulièrement

intéressante pour être intégrée dans de petits équipements autonomes sans fil comme les PDA. La technologie infrarouge ou IrDA est également utilisée dans ce type de réseaux. Cette technologie est cependant beaucoup plus sensible que Bluetooth aux perturbations lumineuses et nécessite une vision directe entre les éléments souhaitant communiquer ce qui la limite bien souvent à un usage de type télécommande.

Chacun de ces types de réseaux, et ses technologies apparentées vont être étudié en détail par la suite, du plus grand au plus petit en termes de distances couvertes.

### I.3 Les Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Le réseau personnel sans fil, noté WPAN pour Wireless Personal Area Network, concerne les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN [1].

#### I.3.1 Le Bluetooth

##### I.3.1.1 Présentation de la technologie Bluetooth

Le Bluetooth (déposé à l'IEEE, sous le nom de 802.15) constitue donc une technologie de réseau personnel ou PAN (Personal Area Network). C'est une technologie non protégée gérant les connexions sans fil de type onde radio utilisant la bande des 2,45 GHz, d'un débit de 1 Mbps, d'une portée de 10 m et offrant un balayage de 360°, tout en s'affranchissant des obstacles les plus courants. Cette technologie concurrence fortement IrDA.

Ce système radio à courte distance permet à la fois les échanges voix et données. En effet, un appareil Bluetooth peut fonctionner en mode commutation de paquets IP (sous forme de données avec un débit montant de 57,6 kbit/s et en descendant de 721 kbit/s : connexion asynchrone) ou commutation de circuit (sous forme de voix avec un débit de 64 kbit/s : connexion synchrone) et même les deux simultanément [4].

De plus la zone de réception du signal, extrêmement limité, constitue une sécurité plus importante que celle du Wireless Fidelity qui nécessite la mise en place de moyens plus importants de contrôle d'accès à l'information.

### **I.3.1.2    Intérêts et caractéristiques du Bluetooth**

L'objectif du Bluetooth est de permettre de transmettre des données ou de la voix entre des équipement possédant des circuits radio de faible cout, sur un rayon de l'ordre d'une dizaine de mètres à un peu moins d'une centaine de mètres et avec une faible consommation électrique. Ainsi, la technologie Bluetooth est principalement prévus pour relier entre eux des périphériques sans utiliser une liaison filaire.

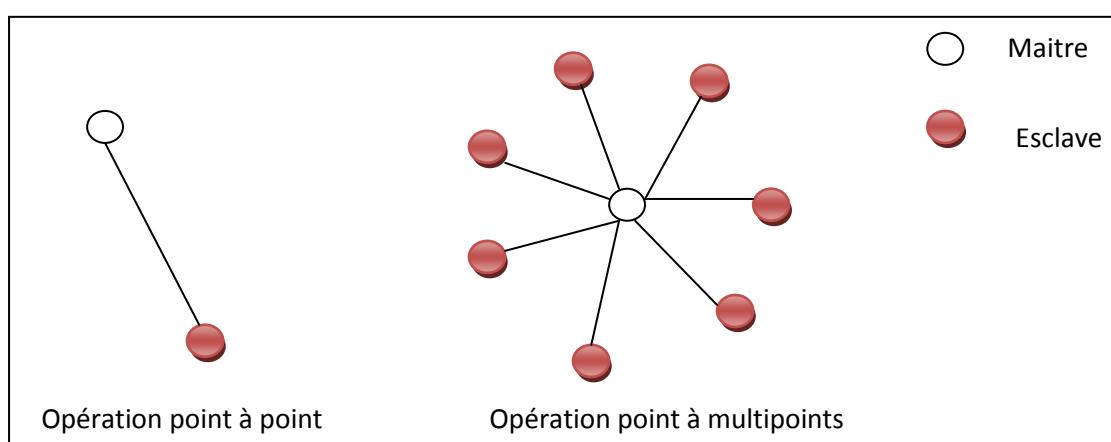
Le Bluetooth permet d'obtenir des débits de l'ordre de 1MBps correspondant à 1600 échanges par seconde en full-duplex, avec une portée d'une dizaine de mètres environnés avec un émetteur de classe II, et un peu moins d'une centaine de mètres avec un émetteur de classe I. Le standard Bluetooth définit en effet trois classes d'émetteurs proposant des portées différentes en fonction de leurs puissances d'émission (Tableau I.1).

| <b>Classes</b> | <b>Puissances (affaiblissement)</b> | <b>Portées</b> |
|----------------|-------------------------------------|----------------|
| I              | 100 mW (20 dbm)                     | 100 m          |
| II             | 2.5 mW (4 dbm)                      | 15-20 m        |
| III            | 1 mW (0 dbm)                        | 10 m           |

**Tableau I.1** : Les classes d'émetteurs du standard Bluetooth.

### **I.3.1.3 Le principe de fonctionnement du Bluetooth**

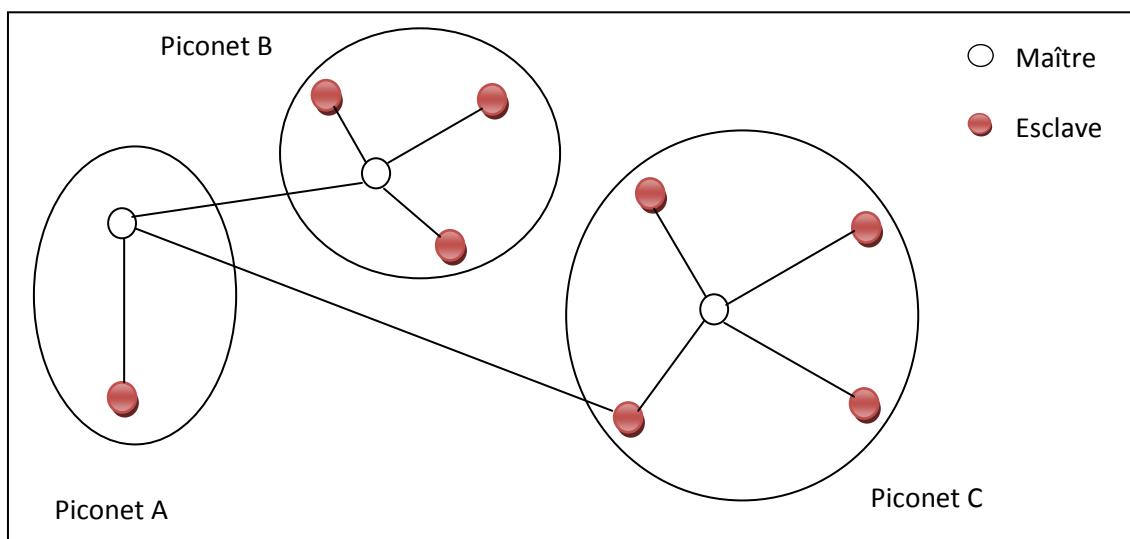
Le standard Bluetooth est basé sur un mode de fonctionnement Maitre/Eclave (Figure I.2). Ainsi on appelle pico-réseau (en anglais : piconet) le réseau formé par un périphérique, ou tous les périphériques présents dans son rayon de portée.



**Figure I.2 :** Diagramme topologique d'un réseau de type Maitre/Esclave.

Un réseau Bluetooth est capable de gérer aussi bien des connexions point-à-point que des connexions point-multi-points. Chaque piconet (c'est le nom donné à un réseau composé de plusieurs entités Bluetooth) possède une séquence de sauts de fréquences particulière et chaque participant d'un piconet est synchronisé sur la même séquence.

Le standard Bluetooth prévoit la possibilité de relier deux piconets entre eux afin de former un réseau élargi, appelé réseau chainé (en anglais Scatternet) grâce à certains périphériques faisant office de pont entre les deux piconets (Figure I.3).



**Figure I.3 :** Diagramme topologique d'un réseau chainé de type Scatternet.

Comme on le voit sur le diagramme ci-dessus, une unité peut être maître d'un piconet et esclave d'un autre piconet (c'est le cas du maître du piconet B, esclave du piconet A).

### I.3.2 L'infrarouge

#### I.3.2.1 Présentation de la technologie

Avant l'arrivée des technologies radio comme le Wi-Fi et le Bluetooth, il était malgré tout possible de transférer des données sans fil entre deux appareils, grâce à l'infrarouge.

L'IRDA est une technologie qui a été très utilisée dans les années 90 et début des années 2000, surtout sur les téléphones, les PDA et les PC portables. L'IRDA utilise un signal infrarouge, de la même façon que les télécommandes de télévision par exemple, pour effectuer des transferts entre deux périphériques. Le fonctionnement est simple : une lampe émet un rayonnement dans l'infrarouge (invisible pour les humains) avec une fréquence qui permet de travailler en binaire. L'infrarouge a plusieurs défauts : la portée est limitée (entre 5

et 1 mètre), il est nécessaire d'aligner les périphériques (dans un cône de 15° environ) et aucun obstacle ne doit séparer les deux appareils.

Actuellement, les usages informatiques ont presque totalement disparu, mais beaucoup de sociétés utilisent encore de l'infrarouge pour leurs télécommandes (l'infrarouge est omniprésent dans le monde audio/vidéo). La raison est simple : la technologie est bien maîtrisée, efficace et consomme peu.

### **I.3.2.2    *Principe de fonctionnement de l'infrarouge***

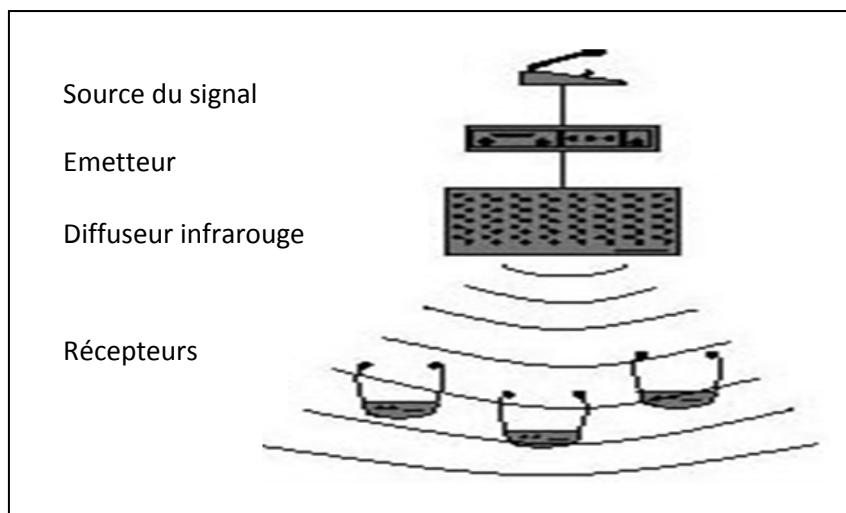
Un système infrarouge comprend trois éléments : l'émetteur, le diffuseur (parfois ces deux éléments sont combinés en une seule unité) et le récepteur. L'émetteur achemine le signal audio au diffuseur qui effectue sa conversion en rayonnement infrarouge. Le récepteur décode le signal infrarouge et restaure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

Les composantes optiques sont des éléments particulièrement critiques d'un système infrarouge: les diodes électroluminescentes de l'émetteur et la diode photosensible du récepteur. La modulation directe en amplitude de la luminosité des diodes IR ne permet pas d'obtenir une couverture suffisante et a l'inconvénient d'être sensible aux interférences lumineuses. Il est par ailleurs impossible de transmettre plusieurs canaux. Afin de pallier à ces inconvénients et d'obtenir une couverture importante, on utilise une modulation combinée amplitude/fréquence. Pour cela, le signal audio (BF) est converti sur des bandes de fréquences élevées (HF). Le rendement luminescent des diodes est alors modulé en amplitude par une ou plusieurs fréquences sous-porteuses (typiquement 2,3 MHz pour le canal unique à bande large; 2,3 et 2,8 MHz pour les systèmes à deux canaux). Chaque canal audio module son propre système d'ondes sous-porteuses.

Deux modes de transmission sont disponibles: bande large, pour un ou deux canaux audio haute fidélité; ou bande étroite, pour des systèmes allant jusqu'à 32 canaux avec une réponse en fréquences de 50 à 8000 Hz, offrant une qualité suffisante pour la transmission de la parole.

La technique de transmission par rayonnement infrarouge permet des liaisons sans fil entre un émetteur et un récepteur. L'exemple le plus populaire de liaison IR est la télécommande d'un téléviseur... La transmission infrarouge peut également être utilisée pour des applications audio. Elle constitue une alternative à la transmission par ondes radio (HF).

La transmission infrarouge implique que le récepteur reste à portée optique de l'émetteur alors que la transmission HF donne une totale liberté de mouvement dans un rayon d'action fonction de la puissance de l'émetteur (Figure I.4). Par contre, la transmission infrarouge offre l'avantage d'être très économique par rapport à la HF. Pour les applications de type centre de congrès, visite guidée, musée, expositions, etc., la technique de transmission infrarouge est la mieux adaptée. La technique infrarouge permet également la confidentialité des transmissions.



**Figure I.4 : Transmission du signal dans un système infrarouge.**

### I.3.3 Le ZigBee

#### I.3.3.1 Présentation de la technologie

La technologie ZigBee aussi connue sous la norme IEEE 802.15.4 permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être intégrée dans de petits appareils électroniques.

Le protocole ZigBee n'utilise que quatre couches sur les sept du modèle OSI. Il comprend une couche Physique (PHY) qui contient la fréquence radio (RF) de l'émetteur-récepteur ainsi que son mécanisme de contrôle de bas niveau, et une sous couche MAC (Medium Access Control) qui donne accès au canal physique pour tous les types de transfert. Les couches supérieures sont constituées d'une couche réseau NWK (Network Layer), qui fournit la conjuration du réseau, la manipulation et le routage des messages, et d'une couche application APL (Application Layer), qui est dotée de 2 sous couches APS (Application support sub-layer), qui lui est chargé de gérer la table de correspondance permettant d'associer les équipements entre eux et l'entité ZDO (ZigBee Device Object) qui est chargée de définir le rôle d'un objet dans le réseau et de sécuriser les relations entre les équipements.

Le protocole ZigBee prévoit deux types d'entités réseau :

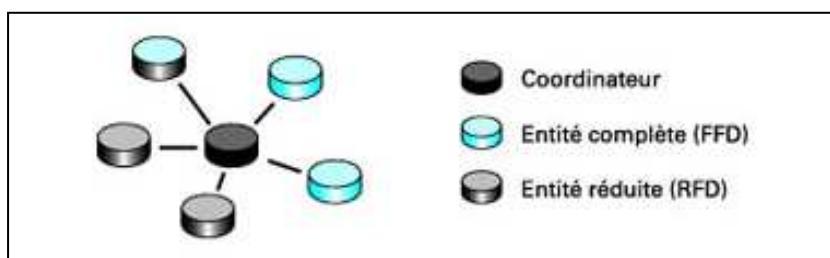
- **Les FFD** (Full Function Device) implémentent la totalité de la spécification. Ils ont trois rôles possibles : coordinateurs PAN (Personal Area Network), routeur ou dispositif terminal (End-Device).
- **Les RFD** (Reduce Function Device) sont des entités allégées dans un objectif de moindre consommation énergétique et de moindre utilisation mémoire pour le microcontrôleur. Ils sont généralement des nœuds terminaux du réseau (End-Device).

### I.3.3.2 Le principe de fonctionnement de ZigBee

Le réseau ZigBee est un réseau maillé sans fil. Chaque nœud (module) doit s'identifier avant de rejoindre le réseau. La norme IEEE 802.15.4 met en place deux topologies [1].

#### a) Topologie étoile :

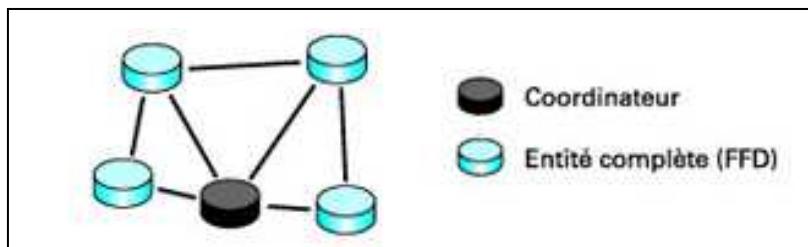
Dans cette configuration, la pièce maîtresse, celle par qui tous messages transitent, est le coordinateur (PAN coordinator). Il joue en quelque sorte le rôle de passerelle. Si un dispositif A souhaite dialoguer avec un dispositif B, la communication doit impérativement passer par le coordinateur. Dans cette topologie, les dispositifs sont très simples et n'embarquent qu'une couche simplifiée du protocole ZigBee. Le coordinateur est en général fixe et alimenté pour garantir le fonctionnement du réseau (Figure I.5).



**Figure I.5 :** Représentation de la topologie en étoile.

#### b) Topologie Point à Point

Les dispositifs sont capables de dialoguer directement entre eux s'ils sont à proximité ou bien d'utiliser le coordinateur pour contacter un dispositif à plus longue distance. Dans cette topologie, les dispositifs sont plus compliqués et intègrent entièrement le protocole ZigBee. Une mécanique de tables de liaison permet également à chaque dispositif de jouer le rôle de coordinateur, permettant à deux dispositifs éloignés de dialoguer par l'intermédiaire d'un élément à portée (figure I.6).



**Figure I.6 :** Représentation de la topologie point à point.

## I.4 Les réseaux locaux sans fil (WLAN)

Un réseau local sans fil WLAN (Wireless Local Area Network) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres, il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture, il existe plusieurs technologies concurrentes.

### I.4.1 Le Wi-Fi

#### I.4.1.1 Présentation du Wi-Fi (802.11)

La norme IEEE 802.11 est en réalité la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mbit/s. Des révisions ont été apportées à la norme originale à fin d'améliorer le débit ou de spécifier des détails de sécurité. Cette norme s'attache à définir les couches du modèles OSI pour une liaison sans fil utilisant des ondes électromagnétiques :

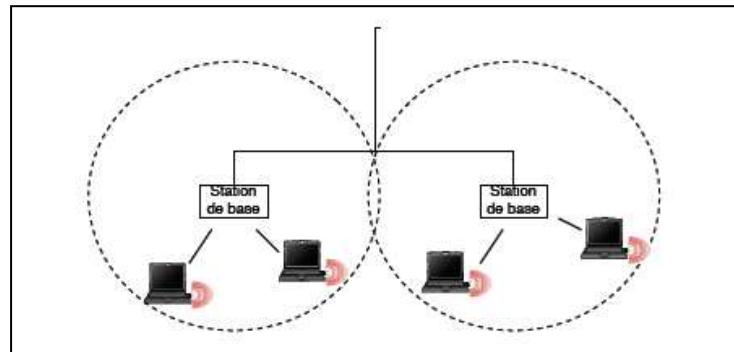
- La couche physique : proposant trois type de codage de l'information, définit la modulation des ondes radioélectriques et les caractéristiques de signalisation pour la transmission de données.
- La couche liaison de données : constitué de deux sous-couches, et définit l'interface entre le bus de la machine et la couche physique.

La technologie IEEE 802.11 permet de bâtir trois types principaux de réseaux, les réseaux domestiques, les ponts sans fil et les réseaux d'entreprise. Son principal attrait est donc de supprimer le câblage. En intérieur la portée radio du Wi-Fi est capable de traverser des murs en béton armé ou des étages (3 maximum) mais dans ces conditions, le débit est ralenti jusqu'à 1Mbps avant la perte du signal, et la portée peut descendre à 15mètres. La plupart du temps en intérieur on compte une portée de 25 mètres dans un environnement dense (de gros obstacles) et 60 mètres s'il n'y a que de petites cloisons à traverser.

#### I.4.1.2 Les modes de fonctionnement de la norme IEEE 802.11

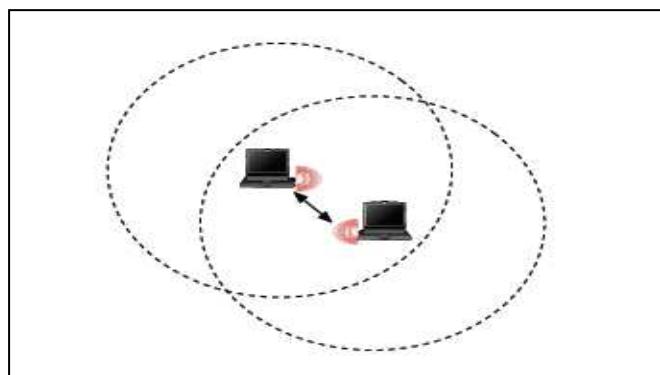
Cette norme cible deux contextes d'utilisation :

- a) **Le mode infrastructure** : (l'utilisation privilégiée de la norme 802.11) ou des stations de bases reliées entre elles par un réseau filaire assurent la couverture d'une certaine zone et prennent en charge les mobiles de leur voisinage (Figure I.7).



**Figure I.7 :** Réseau 802.11 en mode infrastructure.

- b) **Le mode appelé ad hoc** : qui consiste au fait simplement à autoriser les communications entre deux mobiles à portée l'un de l'autre sans interventions de stations ou d'autres mobiles extérieurs (figure I.8) [5].



**Figure I.8 :** Réseau 802.11 en mode ad hoc.

## I.4.2 L'HiperLAN

### I.4.2.1 Présentation de L'HiperLAN

High Performance Local Area Network type 1 (HiperLAN 1) est un standard de l'European Technical Standard Institute (ETSI). Il décrit le fonctionnement d'équipements travaillant dans la bande 5.15-5.30 GHz et permettant d'atteindre un débit de 23.5 Mbit/s sur une distance d'environ 50 mètres. L'architecture est totalement décentralisée, il n'y a pas de notion de point d'accès mais les nœuds HiperLAN 1 peuvent cependant avoir des rôles de passerelles. L'HiperLAN 2 est très différent dans son architecture de l'HiperLAN 1, est basé sur une centralisation poussée. Les points d'accès sont d'ailleurs indifféremment appelés Acces Point (AP) ou Central Controller (CC) sont généralement reliés entre eux par une

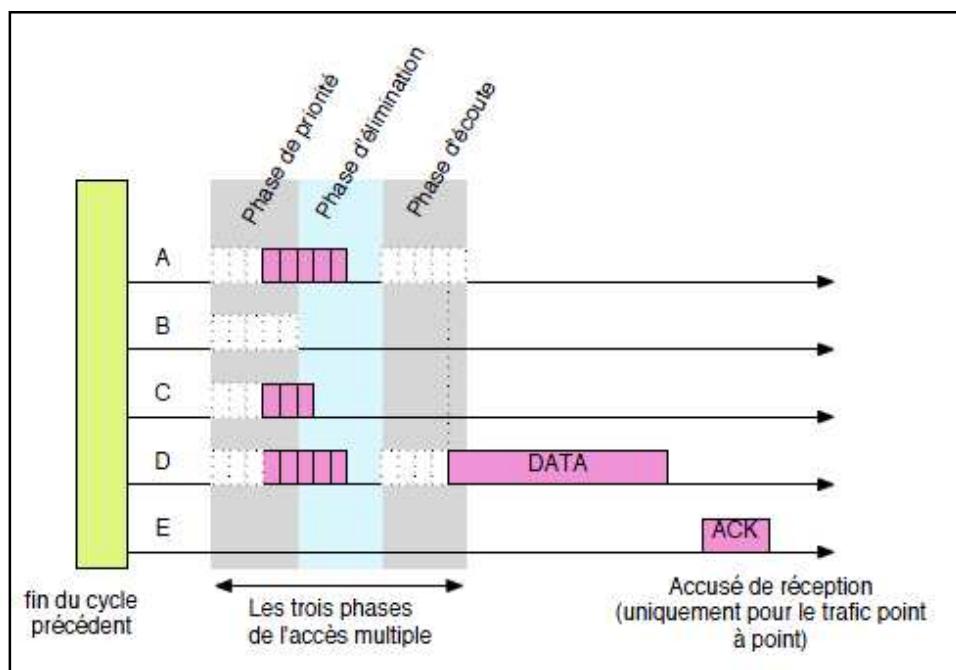
infrastructure filaire ou non filaire, les mobiles s'attachent ensuite à ces point d'accès pour accéder aux ressources du réseau.

#### I.4.2.2 Le principe de fonctionnement de la norme HiperLAN

Les fonctionnalités de l'HiperLAN 1 sont organisées en trois phases (Figure I.9):

- La phase de priorité : cette phase est divisée en cinq slots, au début d'un nouveau cycle de transmission, tous les nœuds qui veulent accéder au canal vont envoyer burst de signalement, l'idée est d'écouter le canal tant que notre priorité nous interdit d'émettre notre propre burst de signalement.
- La phase d'élimination : il se peut que plusieurs nœuds veuillent émettre en même temps des paquets de priorités identiques. Il faut donc le départager ; pour cela chaque nœud va poursuivre l'envoi de son burst de signalement pendant un nombre aléatoire de slots. Ce sera celui qui a tiré le plus grand nombre qui l'emportera.
- La phase d'écoute : si toutes fois il reste plusieurs nœuds en lice alors l'élimination va se terminer dans la troisième phase. Un nombre aléatoire de slots est choisi. C'est celui qui aura tiré le plus petit qui pourra transmettre.

Un mécanisme de routage multi-sauts est implanté. Les nœuds envoient des paquets *hello* qui leurs permettent de connaître leur voisinage. Ces informations de voisinage sont propagées dans tout le réseau et permettent ainsi à un nœud d'en reconstruire la topologie.



**Figure I.9 : L'accès au canal de la norme HiperLAN1.**

## I.5 Les réseaux métropolitains sans fils (WMAN)

Le réseau métropolitain sans fils (WMAN pour Wireless Metropolitan Area Network) est connu sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. La boucle locale radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication. Le MAN est constitué de plusieurs LAN d'une même entreprise reliés entre eux.

Le MAN est utilisé généralement dans les universités, les campus ou dans les villes. Le support physique d'interconnexion utilisé dans les MAN est habituellement la fibre optique. On parle ainsi de liaison point-multipoints pour désigner le mode de communication du WiMAX.

### I.5.1 Catégories du WiMAX

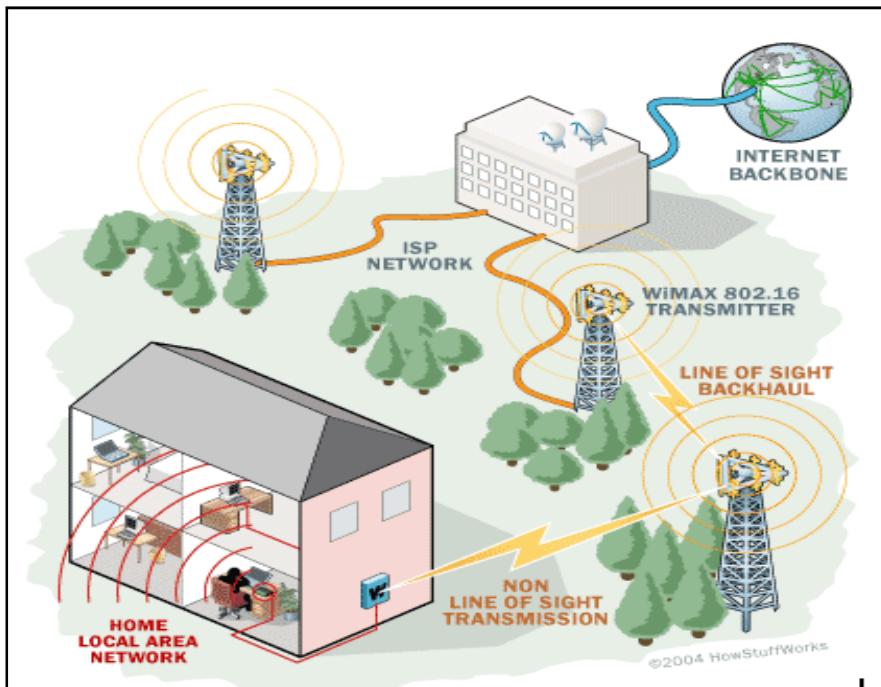
Les révisions du standard IEEE 802.16 se déclinent en deux catégories :

- a) **WiMAX fixe** : également appelé IEEE 802.16-2004, est prévu pour un usage fixe avec une antenne montée sur un toit, à la manière d'une antenne TV. Le WiMAX opère dans les bandes de fréquence 5.2 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire, ainsi que la bande libre des 5.8 GHz.
- b) **WiMAX mobile** : également baptisé IEEE 802.16e prévoit la possibilité de connecter des clients mobiles au réseau internet. Le WiMAX mobile ouvre ainsi la voie à la téléphonie mobile sur IP ou plus largement à des services mobiles haut débit.

### I.5.2 Fonctionnement du WiMAX

Un des objectifs du WiMAX est la fonction desserte, également appelée boucle locale ou encore connexion du dernier kilomètre. Il s'agira de connecter à Internet des utilisateurs qui ne peuvent bénéficier actuellement d'un accès haut débit faute de structure filaire.

En pratique, le WiMAX fonctionnera d'une façon semblable au Wifi mais avec une vitesse plus élevée, sur de plus grandes distances et pour un plus grand nombre d'utilisateurs. Le WiMAX pourrait permettre à certaines zones non encore desservies par certains fournisseurs d'accès Internet d'avoir un accès à Internet (Figure I.10).



**Figure I.10 : Le principe de fonctionnement du WiMAX (réseau WMAN).**

Un système WiMAX sera constitué de 2 parties principales.

- Tout d'abord une antenne WiMAX (station de base) qui peut-être comparée à une antenne GSM. Une seule antenne pourra fournir un accès théorique à une zone de 8000 km<sup>2</sup>.
- Un récepteur WiMAX : Le récepteur, muni d'une antenne, sera dans une petite boîte (similaire à un modem actuel que l'on place dans les ordinateurs portables). Il pourra également être directement intégré dans un ordinateur portable comme pour le Wifi sur les portables actuels. Une antenne WiMAX (station de base) pourra se connecter directement à Internet en utilisant une connexion câblée à haut débit. Elle pourra également se connecter à une autre antenne. Cette technique permettra, comme nous l'avons déjà mentionné ci-dessus, de fournir un accès même aux endroits les plus reculés. L'utilisateur se connectera à l'antenne via sa borne WiMAX ou sa puce intégrée. La transmission ne nécessitera pas d'être en ligne de vue (line of sight : LOS). En effet, l'utilisateur ne devra pas être en ligne directe pour être connecté à l'antenne.

## I.6 Les réseaux étendus sans fil (WWAN)

Vous vous servez probablement quotidiennement d'un réseau étendu sans fil ou WWAN (Wireless Wide Area Network), également nommé réseau cellulaire étendu. Il s'agit des

réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes :

- **GSM** (*Global System for Mobile Communication* ou Groupe Spécial Mobile) : Ce standard a été prévu initialement pour les applications de transport de la parole, de transmission de données à bas débits (9600 bits/s) autour des fréquences 935MHz-960MHz ou 890-915MHz. Cette norme a permis l'essor des communications mobiles d'aujourd'hui.
- **GPRS** (*General Packet Radio Service*) : Cette technologie est la première évolution de la norme GSM pour pouvoir atteindre des débits compatibles avec des applications à débits moyens de type multimédia.
- **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunication System*) : Cette norme UMTS a pour but de développer une meilleure couverture radio et d'augmenter le nombre d'abonnés par unité de surface et promouvoir l'acheminement des services 3ème Génération (3G). L'UMTS permet un débit théorique jusqu'à 2 Mbit/s.

## I.6.1 Le GSM

### I.6.1.1 Présentation du GSM

Le réseau GSM (Global System for Mobile communication) constitue au début du 20<sup>e</sup> siècle, le standard de téléphonie mobile le plus utilisé. La norme GSM autorise un débit maximal de 9.6kbps, ce qui permet de transmettre la voix ainsi que des données numériques de faible volume, par exemple des messages textes ou des messages multimédias.

Les réseaux cellulaires reposent sur l'utilisation d'un émetteur récepteur central au niveau de chaque cellule, appelé station de base (BTS : Base Transceiver Station). Plus le rayon d'une cellule est petit, plus la bande passante disponible est élevée. La carte SIM permet ainsi d'identifier chaque utilisateur, indépendamment du terminal utilisé lors de la communication avec une station de base. La communication entre une station mobile et la station de base se fait par l'intermédiaire d'un lien radio, généralement appelé interface air.

### I.6.1.2 Principe de fonctionnement du GSM

Les antennes-relais font surtout référence à l'univers de la téléphonie mobile. Alors que le téléphone classique permet de convertir la voix en champs de radiofréquences, ces antennes-là réceptionnent ce signal électromagnétique, pour le convertir en signal électrique.

On parle de téléphone cellulaire, car chaque antenne couvre une partie de territoire, représentant une cellule. Sans ces émetteurs-récepteurs, constitués par les antennes-relais, la téléphonie mobile n'existerait pas. Il existe 3 catégories d'antennes :

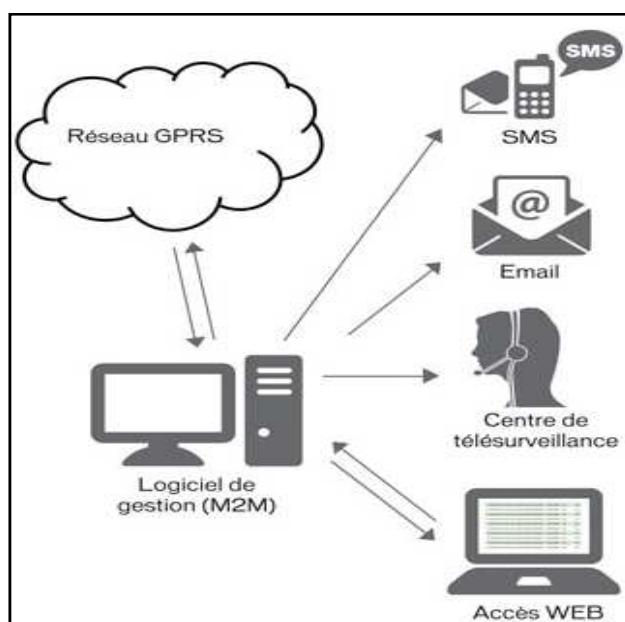
- Les antennes pico-cellulaires qui ont une couverture de quelques dizaines de mètres.
- Les antennes micro-cellulaires qui ont une couverture de quelques centaines de mètres.
- Les stations macro-cellulaires, qui sont les plus répandues. Elles sont généralement placées sur des pylônes ou des toits d'immeubles.

En milieu rural, ces antennes auront un champ de couverture de 10 à 30 km, (on limite le nombre de fréquences utilisatrices), tandis qu'en milieu urbain, la zone de couverture est limitée à 500 m et la puissance est partagée sur de nombreuses bandes de fréquences utilisatrices [6].

## I.6.2 Le GPRS

### I.6.2.1 Présentation du GPRS

Le standard GPRS vient de l'extension de la norme GSM à fin d'améliorer le débit. Le standard GPRS (Global Packet Radio Service), qui permet d'obtenir des débits théoriques de l'ordre de 114 kbit/s, plus proches de 40kbit/s dans la réalité. C'est donc une évolution de la norme GSM, ce qui le vaut parfois l'appellation de GSM++. Etant donné qu'il s'agit d'une norme de téléphonie de seconde génération permettant de faire la transition vers la troisième génération, on parle généralement de 2.5G pour classifier le standard GPRS. Ainsi le standard GPRS utilise l'architecture du réseau GSM pour le transport de la voix, et propose d'accéder à des réseaux de données (notamment internet) utilisant le protocole IP ou le protocole X25[6].



**Figure I.11 : domaine d'application du standard GPRS.**

### I.6.2.2 Fonctionnement du GPRS

L'usage attendu par le réseau GPRS est la possibilité de consulter de manière interactive des serveurs. Cela nécessite donc un débit plus important sur la voie descendante que sur la voie montante. On parle de mobile multi-slot : le terminal doit être en mesure de recevoir ou de transmettre des informations sur plusieurs intervalles de temps. Le coût engendré par ces contraintes techniques amène l'opérateur à proposer à ses abonnés des terminaux plus onéreux. L'opérateur propose généralement un terminal GSM-GPRS capable de gérer les communications voix et data à des débits acceptables.

Le réseau GPRS est totalement dépendant du bon fonctionnement des infrastructures du réseau GSM. Le réseau GSM constitue donc en effet une base pour la mise en place du réseau GPRS.

## I.6.3 L'UMTS

### I.6.3.1 Présentation de la technologie

Le réseau UMTS vient se combiner aux réseaux déjà existants. Les réseaux déjà existants GSM et GPRS apportent des fonctionnalités respectives de voix et de data ; le réseau UMTS apporte ensuite les fonctionnalités multimédias.

L'UMTS est ainsi une extension du GPRS et fonctionne également en mode paquet. La vitesse de transmission offerte par les réseaux UMTS atteint 2Mb/s. L'infrastructure UMTS permet l'élargissement des fréquences ainsi que la modification du codage des données. Mais les investissements en architecture réseau sont conséquentes puisque le mode de communication entre les terminaux 3G et les BTS est différent. Les modifications matérielles sont très importantes.

### I.6.3.2 Le fonctionnement de l'UMTS

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

L'UMTS délivrera un débit pouvant atteindre 2 Mbit/s, soit 200 fois plus que la technologie actuelle. Au-delà des simples communications voix, ce haut débit offrira aux

possesseurs de terminaux compatibles une large gamme de services : la réception et l'émission de données, mais aussi de contenus multimédias (vidéo, visioconférence...). Les applications de l'UMTS devraient être nombreuses et participer à la convergence de la téléphonie et de l'informatique [6].

## I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons examiné différentes spécificités des réseaux sans fils possèdent des caractéristiques et des équipements propres qui diffèrent de ceux employés dans les réseaux traditionnels.

Les connexions sans fils permettent de connecter différents appareils sans câble. La liaison peut-être soit de type hertzien, soit par lumière infrarouge. L'infrastructure sans fil peut être bâtie à de très bas coûts en comparaison aux alternatives câblées traditionnelles, Mais on ne construit pas des réseaux sans fil uniquement pour économiser. En fournissant plus facilement et à moindre coût l'accès à Internet à votre communauté locale, celle-ci profitera directement de ce qu'Internet a à offrir. Le temps et l'effort ménagés pour donner accès au réseau global d'information se traduisent en source de richesse à l'échelle locale car plus de travail peut être accompli en moins de temps et avec moins d'efforts Mais même sans accès à Internet, les réseaux de communauté sans fil ont une valeur énorme. Ils permettent aux personnes de collaborer dans des projets, peu importe la distance qui les sépare.

Dans le chapitre suivant on va s'approfondir sur l'étude des réseaux métropolitains en particulier, l'étude du standard WiMAX.

## **Chapitre II :**

**La Technologie WiMAX :  
Évolution et Architecture**

## II.1 Introduction

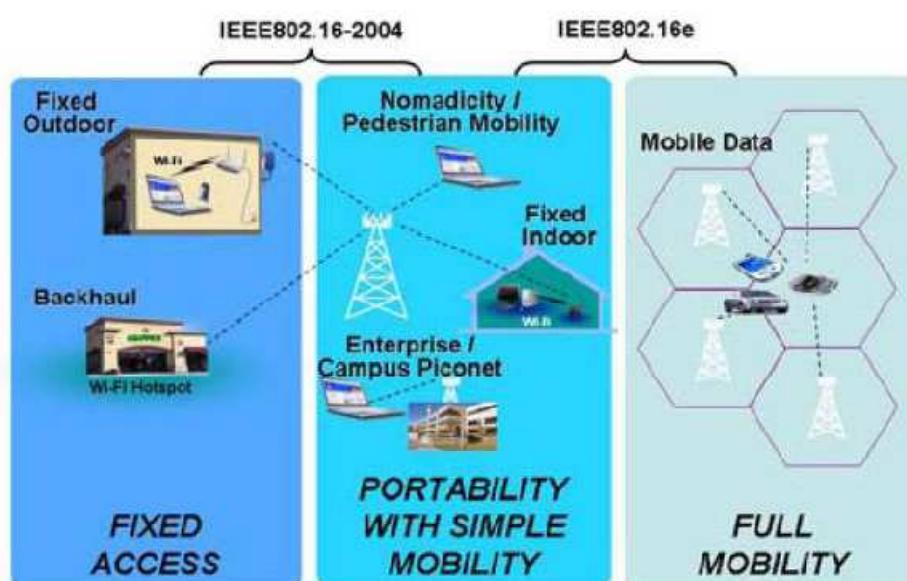
WIMAX ou *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, est une nouvelle technologie émergente dans le domaine de communication qui est basé sur le standard IEEE802.16 [7]. Cette technologie est également le nom d'un forum regroupant les grands acteurs des technologies de l'information et de la communication (les industriels, les opérateurs, les équipementiers et les fournisseurs), dont l'objectif est de certifier la compatibilité et l'interopérabilité des produits WiMAX [8].

La norme 802.16 est porteuse beaucoup de promesses : avec une grande couverture, une grande efficacité spectrale et un débit important, le WIMAX représente une vraie alternative des systèmes nécessitant des connections câblées, comme le DSL (Digital Subscriber Line) par exemple [7].

Ce chapitre présente une introduction de la norme 802.16 ou WIMAX ainsi que ses origines et ses normes. Nous allons présenter aussi l'architecture du ce type de réseau et ses couches protocolaires MAC et physique (PHY).

## II.2 Généralités sur le réseau WiMAX

Le réseau WiMAX est basé sur différentes version de la norme 802.16 et existe dans deux configurations fixe et mobile. La configuration fixe est utilisée pour concurrencer les technologies d'accès DSL. La configuration mobile peut concurrencer les hot spots du WiFi comme elle peut également concurrencer les réseaux cellulaires. Ainsi le WiMAX est considéré comme une technologie B3G (Beyond 3G) (**Figure II.1**) [9].



**Figure II.1 :** Les Différentes configurations du WiMAX

## II.2.1 Le Forum WiMAX

C'est un consortium créé en 2003, sous l'impulsion d'Intel pour assurer l'interopérabilité et la compatibilité entre les différents équipements exploitant les normes WMAN les plus en vue : IEEE 802.16 et ETSI *HyperMan*.

C'est un forum ouvert constitué essentiellement d'équipementiers et d'opérateurs télécoms qui est assimilable à la WiFi Alliance pour le protocole 802.11 [8].

## II.2.2 Objectif de WIMAX

Le standard IEEE802.16 vise à offrir un moyen de communication sans-fil à la fois innovant, rapide à déployer et à bas coût. En plus de cela, il entretient une interopérabilité complète avec l'ensemble des produits existants chez tous les constructeurs respectant les normes de l'IEEE. De par ses fonctionnalités, ce type de standard est un outil puissant facilitant la compétition des fournisseurs d'accès à l'internet sans-fil en fournissant une alternative performante aux méthodes d'accès filaires.

Par ailleurs, le standard est implicitement destiné à étendre le marché des solutions d'accès sans-fil en prenant en compte, dans son principe même, le caractère mobile des données multimédia ainsi que de leurs usagers. Ainsi, le standard IEEE802.16 cherche principalement à combler l'écart existant entre les solutions de communication sans-fil haut débit et celles de bien plus faible débit, mais qui assurent une gestion efficace de la mobilité [10].

## II.3 Normalisation et le standard IEEE802.16

### II.3.1 Caractéristiques de la norme IEEE 802.16 :

Les principales caractéristiques de la norme originale étaient:

- Une porteuse < 11 GHz.
- La technique de modulation utilisée est l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).
- Un débit minimum de l'ordre de 10 Mbit/s avec une espérance d'atteindre les 100 Mbit/s.
- Une distance de couverture jusqu'à 20 km.

## II.3.2 L'évolution du standard IEEE802.16

Pour permettre une meilleure compréhension de la norme, son évolution, à travers les autres versions antérieures, est présentée dans la suite.

### II.3.2.1 IEEE 802.16-2001

Cette première version du standard définit un ensemble de caractéristiques relatives aux couches PHY et MAC dans le but de mettre en place des réseaux d'accès fixes à haut débit. Au niveau de la couche physique, une modulation mono porteuse est utilisée sur la bande de fréquence de 10 à 66 GHz.

### II.3.2.2 IEEE 802.16c-2002

En Décembre 2002, l'*IEEE Standards Board* a certifié la version IEEE 802.16c. Dans cette version, des profils de système travaillant sur la bande 10-66GHz ont été ajoutés et plusieurs erreurs de l'ancienne version rectifiées.

### II.3.2.3 IEEE 802.16a-2003

Cette version est l'amélioration de la norme IEEE 802.16-2001. Elle permet d'augmenter la capacité de la couche MAC à gérer plusieurs paramètres au niveau de la couche physique. Elle a été approuvée en Janvier 2003 par le groupe de travail IEEE 802.16. Cette version rallonge la bande de travail au niveau de la couche physique pour inclure la bande de fréquences de 2-11GHz. Cela permet d'accroître la largeur de la bande et donc la couverture du réseau.

### II.3.2.4 IEEE 802.16-2004

L'ensemble de toutes les rectifications apportées aux normes IEEE 802.16-2001, 802.16a-2003 et 802.16c-2002 ont été regroupées pour créer la norme IEEE 802.16-2004. Au début, cette version a été annoncée comme une révision des anciennes normes et a été baptisée 802.16REVd, mais elle a été rapidement changée en version complète avec la qualification 802.16- 2004 (ou 802.16d).

La version 802.16d définit une couche MAC commune et 5 couches physiques, chacune étant spécifique à une bande de fréquence ou à un type d'application. Les 5 couches physiques sont nommées WirelessMan-SC, WirelessMan-SCa, WirelessMan-OFDM, WirelessMan-OFDMA et WirelessMan-Human. Afin de garantir une certaine compatibilité entre les équipements, le consortium WiMAX Forum préconise des profils à utiliser. Le

consortium préconise l'utilisation de l'interface WirelessMan-OFDM pour les applications fixes et nomades et l'interface WirelessMan- OFDMA pour les applications mobiles. Chacun de ces profils supporte le mode de duplexage temporel (TDD) et fréquentiel (FDD). Les industriels favorisent le mode TDD, qui est plus simple à mettre en œuvre (utilisation d'une seule fréquence pour l'émission et la réception), et qui permet d'utiliser la réciprocité du canal pour les systèmes intelligents. La norme prévoit également l'utilisation de systèmes multi-antennes (MIMO (Multi Input Multi output), AAS (*Adaptative Antennas System*))

### **II.3.2.5 IEEE 802.16e**

Cette norme utilise la bande de fréquence allant de 2 à 6 GHz, elle permet en pratique de se connecter en haut débits en se déplaçant à moins de 122 Km/h, le tout avec des débits montants et descendants de 30 Mbit/s, en revanche la portée de celui-ci serait réduite à environ 3,5 Km, il faudrait donc passer d'un réseau à l'autre afin de ne pas subir de déconnection. Le WiMAX mobile serait une véritable alternative pour les réseaux de transports.

Cette technologie offre aussi la possibilité d'établir des réseaux temporaires, ceci pouvant se voir utile en cas d'urgence. Cette norme est totalement compatible avec le WiMAX fixe puisqu'elle offre une interopérabilité entre les plates-formes fixes 802.16a et les plates-formes mobiles 802.16<sup>e</sup> [8].

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

| Standard   | Description   | Publié           | Statut          |
|--|---|------------------|-----------------|
| IEEE std 802.16-2001                                   | définit des réseaux métropolitains sans fil utilisant des fréquences supérieures à 10 GHz (jusqu'à 66 GHz)                                | 8 avril 2002     | obsolet         |
| IEEE std 802.16c-2002                                  | définit les options possibles pour les réseaux utilisant les fréquences entre 10 et 66 GHz.   | 15 janvier 2003  |                 |
| IEEE std 802.16a-2003                                  | amendement au standard 802.16 pour les fréquences entre 2 et 11 GHz.  | 1er avril 2003   |                 |
| IEEE std 802.16-2004 (également désigné 802.16d)       | il s'agit de l'actualisation (la révision) des standards de base 802.16, 802.16a et 802.16c.  | 1er octobre 2004 | obsolet/ actifs |
| IEEE 802.16e (également désigné IEEE std 802.16e-2005) | apporte les possibilités d'utilisation en situation mobile du standard, jusqu'à 122 km/h.   | 7 décembre 2005  | actif           |
| IEEE 802.16f   | Spécifie la MIB (Management Information Base), pour les couches MAC (Media Access Control) et PHY (Physical)                              | 22 janvier 2006  |                 |
| IEEE 802.16m   | Débits en nomade ou stationnaire jusqu'à 1 Gbit/s et 100 Mbit/s en mobile grande vitesse. Convergence des technologies WiMAX, Wi-Fi et 4G | -                | En cours        |

**Tableau II.1 : Différentes normes du WiMAX [9]**

## II.4 Les Bandes de fréquences supportées

### II.4.1 La bande 10-66 GHz

Dans cette bande de fréquences, en raison de la longueur d'onde courte, la propagation par visibilité directe "LOS" (Line of Sight) est nécessaire et par conséquent l'effet de propagation multi-trajets est négligé. Dans cette bande de fréquence la norme permet de fournir des débits jusqu'à 120 Mbit/s. La disponibilité abondante de la bande passante est également une autre raison pour utiliser cette gamme de fréquences.

Contrairement aux gammes de fréquences inférieures, où les bandes de fréquences sont souvent moins de 100MHz de large, la plupart des bandes de fréquences supérieures à 20 GHz peuvent fournir plusieurs centaines de mégahertz de bande passante. En outre, les canaux à l'intérieur de ces bandes sont en général 25 ou 28 MHz de large [8].

### II.4.2 La bande 2-11 GHz

Dans cette bande de fréquences, les deux bandes "sous licence" et "exempté de licence" sont pris en compte. Des fonctionnalités physiques ont été ajoutées afin d'opérer dans l'environnement "NLOS" (Non Line of Sight) et d'atténuer l'effet de propagation multi-trajets. Le mécanisme d'adressages physique et MAC comme la sélection dynamique de fréquence (DFS (Dynamic Frequency Selection)) sert à détecter et éviter les interférences.

Bien que la prestation de services dans cette bande de fréquences dépende fortement des objectifs de conception, les vendeurs citent généralement les taux de transfert de données globales allant jusqu'à 70Mb/s dans un canal de 14 MHz [8].

## II.5 Architecture du réseau WiMAX

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

La figure II.2 représente un exemple d'architecture générale d'un réseau d'accès à large bande:

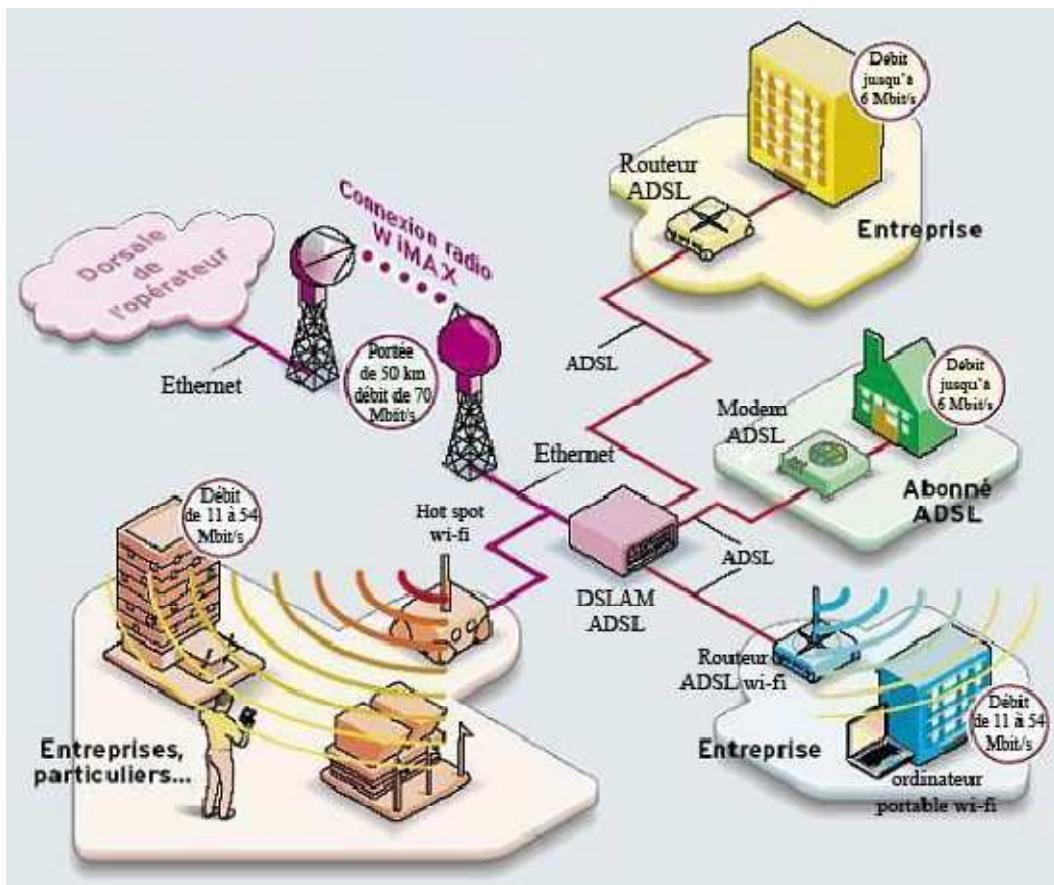


Figure II.2 : Exemple d'un réseau WiMAX.

Il s'agissait au départ dans la version 802.16a et 802.16d de liaisons point à multipoints qui offrent la possibilité de se déplacer dans un secteur donné. Des extensions sont étudiées en particulier à partir de la naissance de 802.16e pour permettre de se déplacer entre secteurs ou entre stations de base. Ceci correspond à des applications nomades (on est mobile, mais lors de la transmission de données on est fixe) ou mobiles (on est mobile aussi en cas de transmission de données) [8].

## II.6 Structure en couches

Comme avec toutes les normes IEEE 802.x, les protocoles définis concernent les deux couches les plus basses du modèle OSI (couche physique et Liaison de donnée). La couche liaison de données étant divisée en deux sous couches : MAC (Media Access Control) et LLC (Logical Link Control).

L'architecture de couches et de protocoles définie dans le WiMAX/802.16 est montrée dans la figure II.3. On peut voir que la norme 802.16 définit seulement la couche physique et la couche MAC. La couche MAC elle-même divisée en trois sous couches : CS (sous couche

de convergence), CPS (sous couche des parties communes du MAC) et SS (sous couche de sécurité) [10].

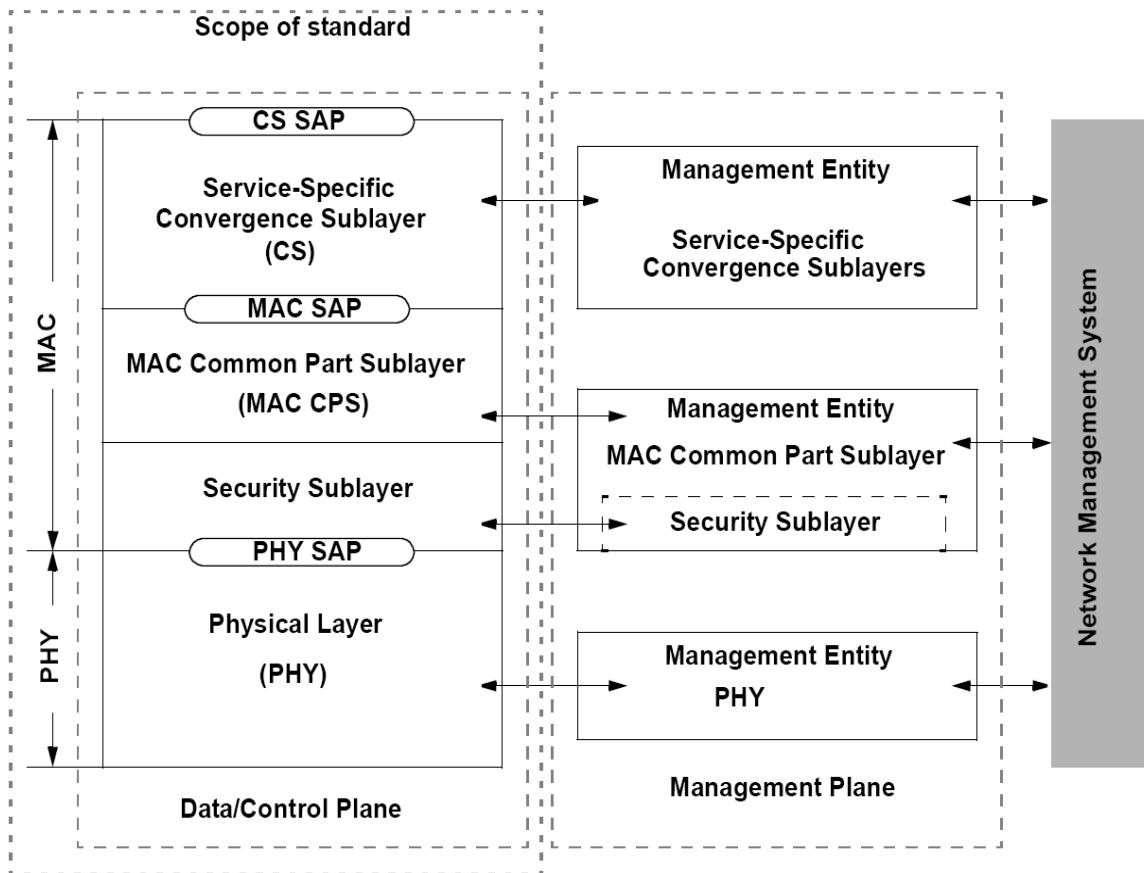


Figure II.3 : Structure en couche du standard IEEE802.16 [15]

## II.6.1 La couche MAC

La couche MAC est composée essentiellement de 3 sous-couches : la sous-couche CS (Convergence Sub-layer) communique avec les couches supérieures, la sous-couche CPS (Common Part Sub-layer) définit les fonctionnalités de bases d'une couche MAC, ainsi que la sous-couche de sécurité (Security Sub-layer).

### II.6.1.1 La sous-couche CS (Convergence Sub-layer)

La CS est destinée pour faire la correspondance de service entre les connexions MAC. Elle définit deux service de convergence de sous couches de convergence:

- Pour les réseaux ATM : définie pour les services ATM,
- Pour les réseaux à base de paquets : il est utilisé pour faire la correspondance des services par paquets, tels que IPv4, IPv6, Ethernet ou les VLAN.

### II.6.1.2 La sous couche CPS

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

### II.6.1.3 La sous couche SS

Cette couche représente l'interface entre la couche MAC et la couche PHYSIQUE. Elle fournit la sécurité à travers le réseau sans fil à large bande en cryptant la connexion entre la station de base et l'abonné au service. De plus, elle est utilisée pour l'authentification et l'échange de clefs de sécurité [7].

## II.6.2 La couche physique

Comme toutes les technologies utilisant la voie hertzienne le WiMAX est soumis aux interférences du milieu dans lequel les ondes se propagent. Plusieurs techniques permettent d'atténuer la perturbation du signal par le bruit environnant. Ces techniques ont évolué avec les versions du WiMAX. On a ainsi plusieurs types de couche physique, résumé dans le tableau suivant [9].

| Désignation       | Fréquence | LoS/NLoS | Options             | Duplexage |
|-------------------|-----------|----------|---------------------|-----------|
| WirelessMAN-SC    | 10-66Ghz  | LoS      |                     | TDD,FDD   |
| WirelessMAN-SCa   | 2,5-11Ghz | NLoS     | AAS, ARQ, STC       | TDD,FDD   |
| WirelessMAN-OFDM  | 2,5-11Ghz | NLoS     | AAS, ARQ, STC, mesh | TDD,FDD   |
| WirelessMAN-OFDMA | 2,5-11Ghz | NLoS     | AAS, ARQ, STC       | TDD,FDD   |
| Wireless-HUMAN    | 2,5-11Ghz | NLoS     | ARQ, STC, Mesh      | TDD       |

#### Les options :

AAS : Antennes adaptives

ARQ : AutomaticRetransmission Request

STC : Schéma de diversité

Mesh:Topologies Mesh

#### Le duplexage :

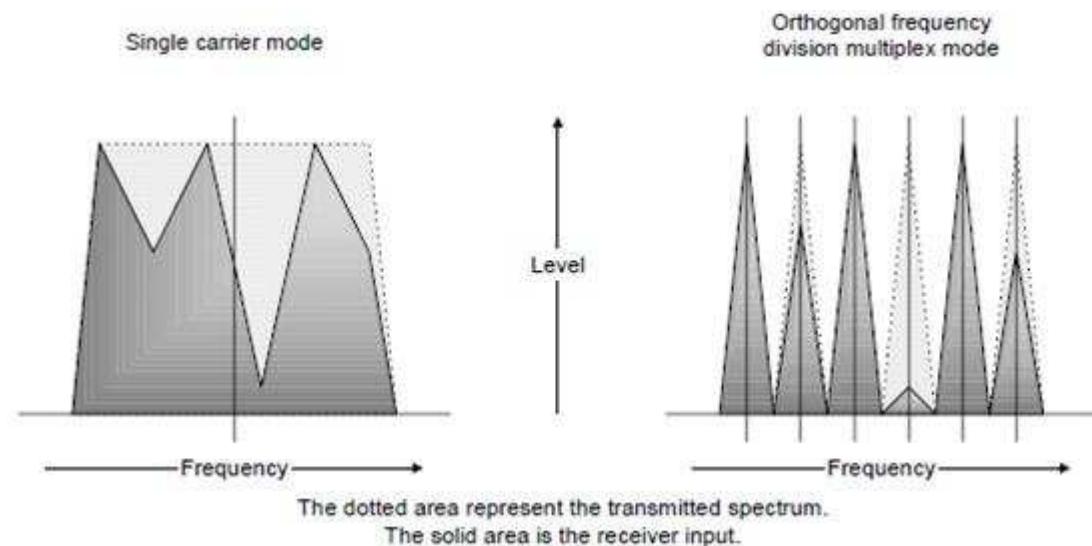
TDD : Time Division Duplex

FDD :FrequencyDivision Duplex

**Tableau II.2 : Les différents types de la couche physique dans le WiMAX .**

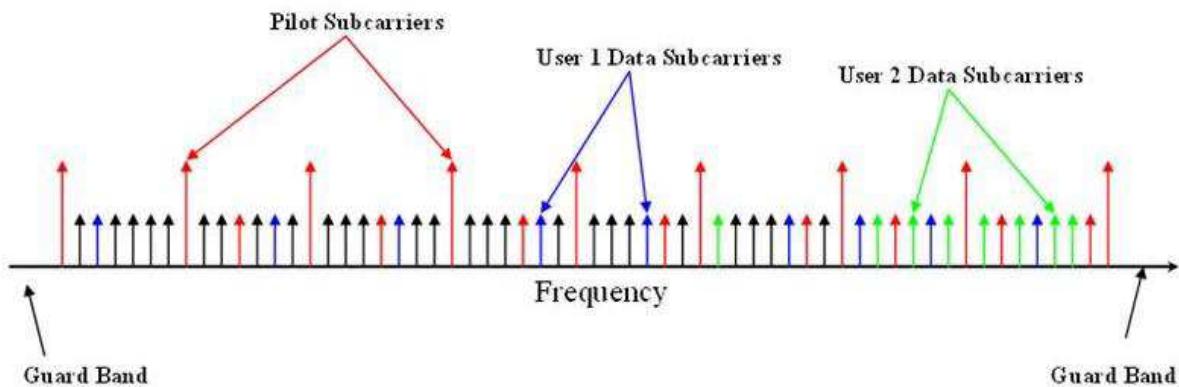
La couche physique a été implémentée pour répondre au cas où les stations communiqueraien (NLOS), dans le cas des environnements urbains avec la présence d'obstacles entre deux stations. Pour répondre à ces spécificités, trois types d'interface de transmission ont été définies :

- **SC (Single Carrier)** : Elle définit une transmission sur un seul canal de fréquence.
- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** : Le principe de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est la transmission sur plusieurs fréquences orthogonales. Ce principe va diminuer la perception des interférences notamment en NLOS (Non Line Of Sight). La modulation OFDM permet de moduler en fréquence jusqu'à 256 sous porteuses, l'accès multiple dans cette couche physique s'effectue en TDMA [7].



**Figure II.4** : Modulation simple porteuse (à gauche) Modulation OFDM (à droite)

- **OFDMA** : L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiples Acces) reprend le principe de l'OFDM. Dans cette version il est désormais possible d'utiliser jusqu'à 2048 sous porteuses qui cette fois ci, à la différence de l'OFDM, sont attribuées de manière dynamique. En effet si un utilisateur a besoin de trois fois plus de bande passante qu'un autre utilisateur alors la modulation lui allouera 3 emplacements alors que l'utilisateur normal n'en aura qu'un seul (Figure II.5) [9].



**Figure II.5 : La Modulation OFDMA**

#### II.6.2.1 Types des couches physiques

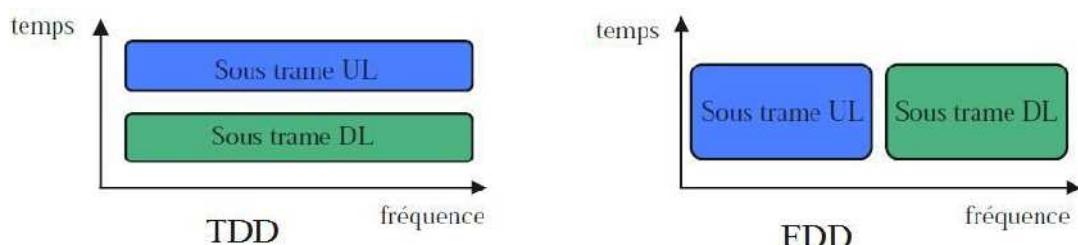
Le standard WiMAX définit cinq (5) couches physiques, chacune étant spécifique à une bande de fréquence ou à un type d'application [8].

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

OFDM, OFDMA) peut être utilisée, mais avec certaines contraintes spécifiées à cette interface. Seulement le duplexage TDD est utilisé.

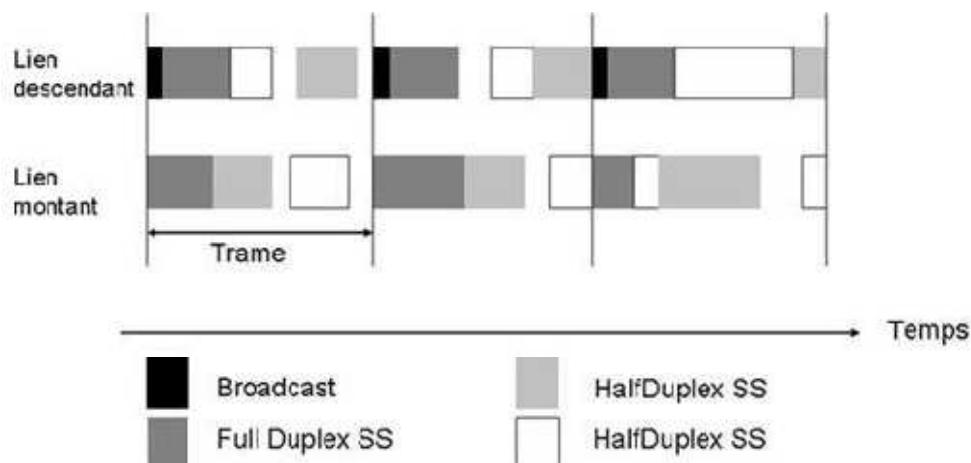
### II.6.2.2 Techniques de Duplexage

La transmission de signaux WiMAX se fait sous forme de trames. Deux modes de duplexage sont possibles : fréquentiel (FDD ou Frequency Division Duplexing) dans lequel les liens montants et descendants fonctionnent sur différents canaux (50 à 100 MHz) et temporel (TDD ou Time Division Duplexing) dans lequel les liens montants et descendants partagent un canal; mais ne transmettent pas simultanément (Figure II.6). Cependant, le mode TDD est préféré au mode FDD [8].



**Figure II.6 :** Principe de fonctionnement des modes TDD et FDD

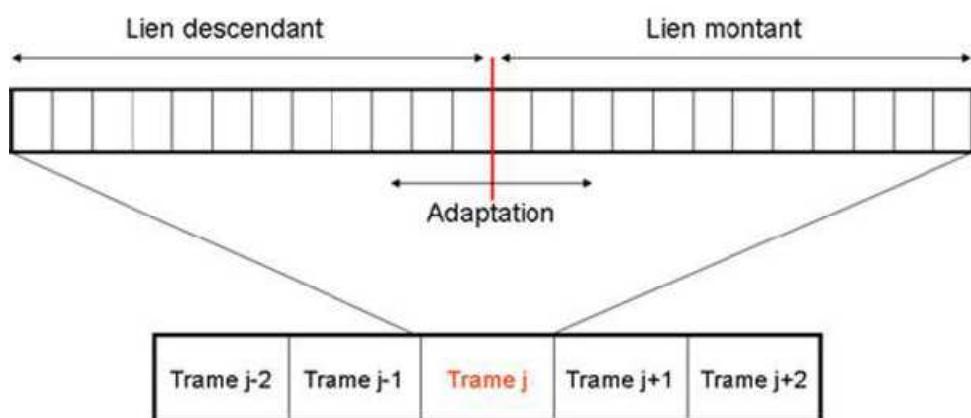
- a) **Le duplexage FDD (Frequency Division Duplex)** : Le FDD est un duplexage fréquentiel. La voie montante et descendante utilisent les mêmes intervalles de temps mais avec des fréquences séparées (Figure II.7). Le WiMAX utilise le HFDD (Half-Duplex FDD). Le HFDD mixe les liens pour offrir tour à tour du full et du Half Duplex [9].



**Figure II.7 :** Le duplexage FDD

Une Station cliente (SS ou Subscriber Station) utilisant le mode full-duplex est capable d'écouter continuellement la voie descendante tandis qu'une SS fonctionnant en mode Half-Duplex ne peut pas écouter la voie descendante pendant qu'elle transmet des données sur la voie montante [8].

- b) **Duplexage TDD (Time Division Duplex)** : Multiplexage temporel dans les deux sens de transmission sur une seule fréquence. Les voies montantes et descendantes utilisent à tour de rôle la même fréquence [9].



**Figure II.8 : Le duplexage TDD**

Comme le montre la figure II.8, en mode TDD, la trame est divisée en deux sous-trames : sous-trame lien descendant et sous-trame lien montant. La durée d'une trame est fixe (comprise entre 2 et 20 ms) mais le ratio entre la voie montant et descendante est adaptatif en fonction du débit ou du trafic. La trame est divisée en un certain nombre de slots physiques (un slot correspond à 4 symboles de modulation) ce qui permet de partitionner la bande facilement [8 ].

Des temps de transitions sont nécessaires pour permettre aux équipements de passer du mode d'émission au mode de réception et inversement. Ces temps sont respectivement TTG (Transmit Transition Gap) et RTG (Receive Transition Gap) et ne sont pas forcément d'égale durée. La durée de ces temps de transits est fixée en nombre entier de slot physiques et est inférieur à 100 µs.

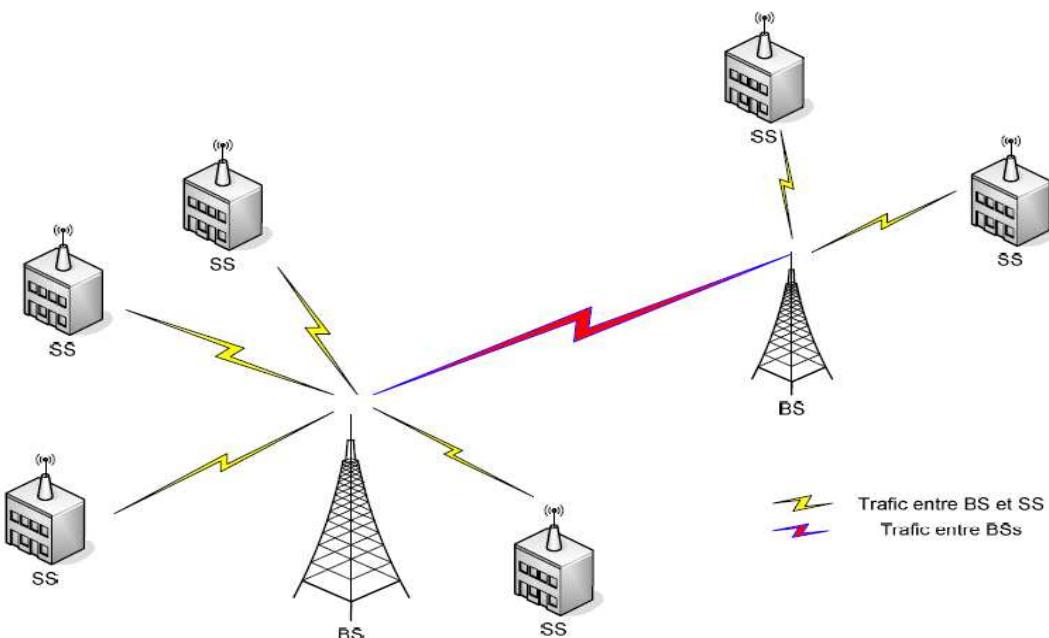
Les modes FDD et TDD supportent tous les deux, une adaptation du profil de "burst" dans lequel les options de codage et de modulation peuvent être assignées dynamiquement aux rafales de "burst". Cette adaptation dynamique est fonction des conditions d'émission-réception radio [8].

## II.6.3 Topologies WiMAX

Le 802.16 définit deux modes de topologie possible : Le mode PMP (Point to Multi Point) et le mode MESH. Nous détaillons ces deux modes dans ce qui suit :

### II.6.3.1 Le Mode PMP

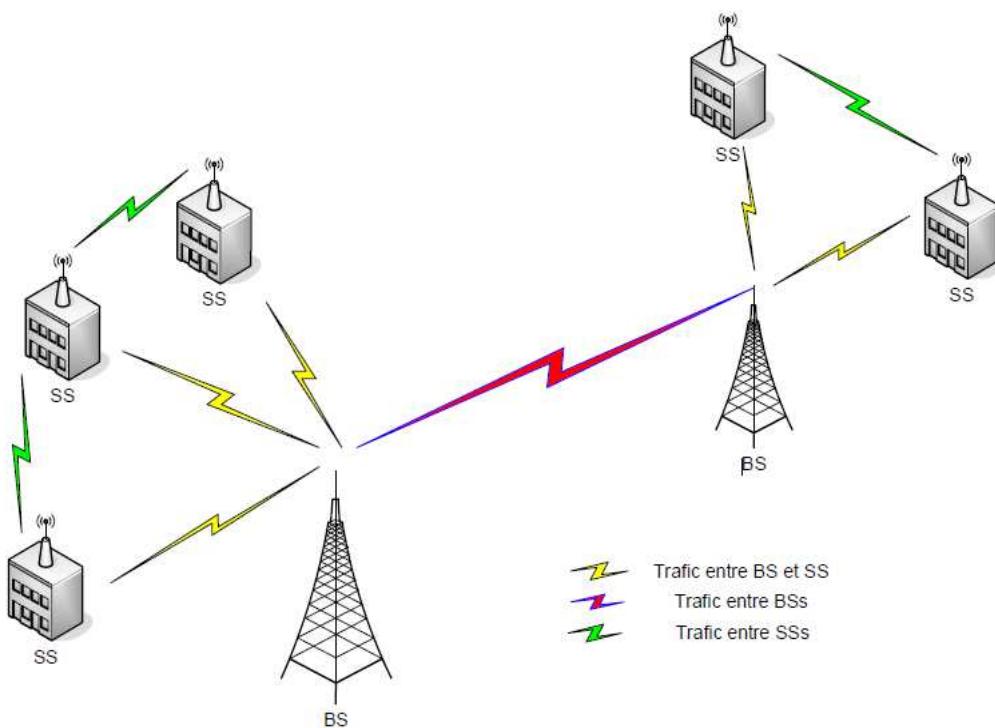
Il s'agit du mode de communication de base pour le 802.16. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une transmission d'un point central vers plusieurs points dans le réseau, ce concept est présenté dans la Figure II.9. Dans cette configuration, le lien descendant DL (Down Link), depuis la BS (Base Station) vers l'utilisateur SS (Subscriber Station) fonctionne en mode PMP : la BS est l'élément qui contrôle les transmissions dans sa zone de couverture sans coordination avec les autres stations (BS ou SS) [11].



**Figure II.9 : Architecture PMP**

### II.6.3.2 Le mode Mesh

La différence majeure entre le mode PMP et le mode Mesh (Figure II.10) est détaillée dans ce qui suit. En mode PMP, le trafic se fait uniquement depuis ou vers la BS, alors que dans le cas du Mesh, les SS peuvent communiquer directement entre elles sans passer par la BS.



**Figure II.10 : Architecture Mesh**

Pour assurer le bon fonctionnement de ces deux types de communications, un mécanisme d'ordonnancement est nécessaire. L'ordonnancement peut être distribué ou centralisé au niveau de la BS, on parle dans ce dernier cas de topologie Mesh BS, ou bien être une combinaison des deux. Contrairement au mode PMP, où la BS était la seule entité qui contrôle et initie les transmissions, dans le mode Mesh, le processus est géré de façon coordonnée entre les Mesh SS et la Mesh BS. En effet, les Mesh SS peuvent également transmettre au même titre que la Mesh BS. Dans le cas d'un ordonnancement centralisé, les ressources sont distribuées d'une manière centralisée. En effet, la Mesh BS doit gérer toutes les requêtes de ressources provenant des Mesh SS saut-par-saut, la Mesh BS gère les requêtes du premier saut et puis du second etc. La Mesh BS détermine les ressources requises pour chaque lien, en Up Link ou en Down Link. Elle transmet ensuite l'information à tous les nœuds [11].

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art de la technologie WiMAX, nous avons défini les différents aspects des couches Physique (PHY) et MAC du standard 802.16. Finalement, nous avons discuté les topologies WiMAX.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la structure du modèle qu'on a développé pour faire des simulations du système WiMAX.

## **Chapitre III :**

Modèle de simulation  
(Chaine de communication)

### III.1 Introduction

Au cours des précédents chapitres, les principales notions nécessaires pour mener à bien notre étude ont été présentées et détaillées. Les différentes versions du standard IEEE 802.16 ont également été présentées. Parmi ces versions, nous nous sommes intéressés notamment à la norme IEEE 802.16d qui fait l'objet de ces travaux de thèse. La structure des trames relatives à cette norme ont également été détaillées.

Dans ce chapitre et le suivant, un système de communications numériques basé sur les spécifications de la norme IEEE 802.16d sera caractérisé à travers des simulations réalisées sur Matlab®.

Tout d'abord, les spécifications de la couche PHY WirelessMan-OFDM relative à la norme utilisée seront étudiées. Cela permettra de définir et de comprendre l'ensemble des blocs nécessaires à la mise en place du système.

Notons que la norme IEEE 802.16d ne fournit aucune recommandation concernant les algorithmes et les techniques régissant la réception des signaux WiMAX. Les blocs constituant la chaîne de réception seront donc choisis pour garantir de bonnes performances avec une complexité moindre.

La caractérisation de ce système se fera, ensuite, à travers une évaluation de ses performances dans différents canaux (AWGN, Rice et Rayleigh, etc...). Ainsi, l'efficacité des algorithmes implémentés pourra être vérifiée.

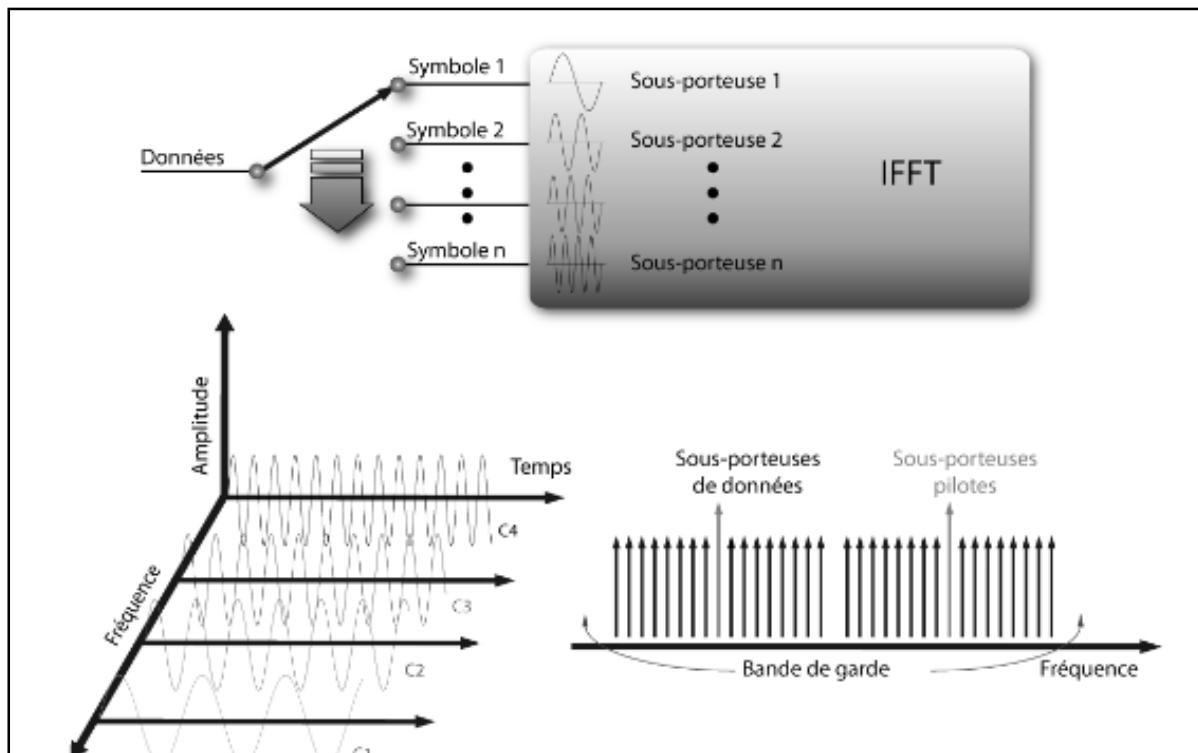
### III.2 WirelessMan-OFDM

#### III.2.1 Structure des symboles

Comme nous l'avons expliqué au chapitre précédent, l'OFDM est une technique de transmission du signal qui consiste à utiliser de multiples sous-porteuses orthogonales pour transmettre les symboles utiles et donc de s'affranchir en partie des problèmes liés à la propagation des ondes et ainsi améliorer l'efficacité du spectre du signal (Figure III.1) [1].

Cette technique apparaît alors comme une solution pour les canaux qui présentent des échos importants (canaux multi-trajets) comme les canaux radio sans-fil. Un canal multi-trajet présente, en effet, une réponse fréquentielle qui n'est pas constante sur toute la bande passante mais qui possède suivant les fréquences des gains et des déphasages dus aux échos et autres réflexions liées à l'environnement entre l'émetteur et le récepteur. Un débit important implique

une bande passante étendue, de ce fait, il y a plus de chance que cette bande couvre une partie du spectre comportant des perturbations. Le canal est alors dit "sélectif" en fréquence. Pour contrer cela, l'idée est de repartir l'information sur un grand nombre de porteuses, créant ainsi des sous canaux très étroits pour lesquels la réponse fréquentielle du canal peut-être considérée comme non sélective (plate) [12].



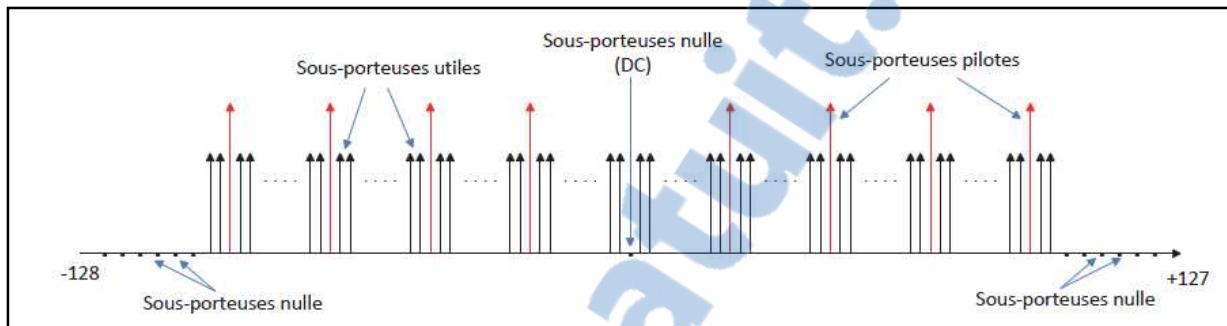
**Figure III.1 : Principe de l'OFDM**

Ainsi, pour ces sous canaux, le canal est non sélectif en fréquence, et s'il y a une perturbation, seulement une partie de l'information sera perdue et pourra même être récupérée au moyen d'un codage correcteur d'erreur. On parle alors d'OFDM encode (COFDM). L'idée est d'utiliser un codage qui consiste à lier des éléments d'information suffisamment éloignés statistiquement en temps et en fréquence [12].

Dans le domaine fréquentiel, le nombre total de sous-porteuses utilisées est noté  $N_{FFT}$ . Celles-ci sont réparties de la façon suivante :

- des sous-porteuses utiles : pour transmettre les données ( $N_u$ ).
- des sous-porteuses pilotes : pour obtenir les informations sur le canal ( $N_p$ ).
- des sous-porteuses à valeurs nulles (pas de signal transmis) : utilisées pour les intervalles de garde et le DC.

La couche PHY WirelessMan-OFDM relative à la norme 802.16, stipule l'utilisation de 256 sous-porteuses ( $N_{FFT}$ ). Cependant 200 sous-porteuses sont réellement utilisées, les 56 autres servant pour les intervalles de garde afin d'éviter les recouvrements entre canaux adjacents (porteuses non utilisées). Parmi les sous-porteuses utilisées, 8 sont des sous-porteuses pilotes ( $N_p$ ) et les 192 autres ( $N_u$ ) sont réellement utilisées pour la transmission des données (Figure III.2) [8].



**Figure III.2 :** Représentation fréquentielle d'un symbole OFDM

La durée du préfixe cyclique est une valeur paramétrable (un ratio du temps symbolique OFDM) qui peut prendre les valeurs suivantes :  $G = 1/4 ; 1/8 ; 1/16 ; 1/32$ . Plus le canal présentera un nombre de trajets importants et espacés dans le temps, plus le préfixe cyclique devra être grand. L'augmentation de la durée du préfixe cyclique se fait au détriment du débit réel de la transmission. Dans la bande licenciée, les canaux peuvent avoir les largeurs de bande passante ( $BW$ ) suivantes : 1,75MHz ; 3MHz, 5MHz ; 7MHz et 14MHz. Le facteur d'échantillonnage est généralement de 8/7. Typiquement pour un canal de 7MHz, cela correspond à une fréquence d'échantillonnage de 8MHz.

Ainsi la durée d'un symbole n'est pas la même suivant la largeur du canal et la longueur du CP mais est comprise entre  $16,5\mu s$  ( $BW = 14MHz$  et  $G=1/32$ ) et  $160\mu s$  ( $BW = 1,75MHz$  et  $G=1/4$ ) [1].

### III.2.2 La structure des trames

La couche PHY dans le standard est également en charge de l'attribution de *slots* ainsi que de la formation des trames. Un *slot* est le quantum de ressource temps/fréquence, il s'agit de la plus petite partie de ressource qu'il puisse être allouée à une station. Un *slot* est constitué de 1, 2 ou 3 symboles OFDM dans un sous-canal donné. Une salve d'émission est constituée

d'un ou plusieurs *slots* temps fréquence contigus (en temps ou en fréquence) qui définissent alors une région de données.

Cette couche physique supporte les deux modes de duplex FDD et TDD, cependant il semble que le TDD tende à s'imposer car, utilise plus fréquemment, ses mécanismes n'en sont que mieux déterminés. Les deux modes de duplex utilisent des salves de transmission suivant des mécanismes de fonctionnement qui vont être détaillés. Quel que soit le mode de duplex, WiMAX utilise la technique de multiplexage par division de temps afin de garantir le succès pour la réception des *slots*. Ainsi, chaque trame est divisée en deux sous-trames, une pour la partie montante et l'autre pour la partie descendante. Dans chacune de ces sous-trames sont alors alloués conformément à une cartographie précise, les *slots* temporels pour chacun des nœuds ayant manifesté un besoin de bande passante [12].

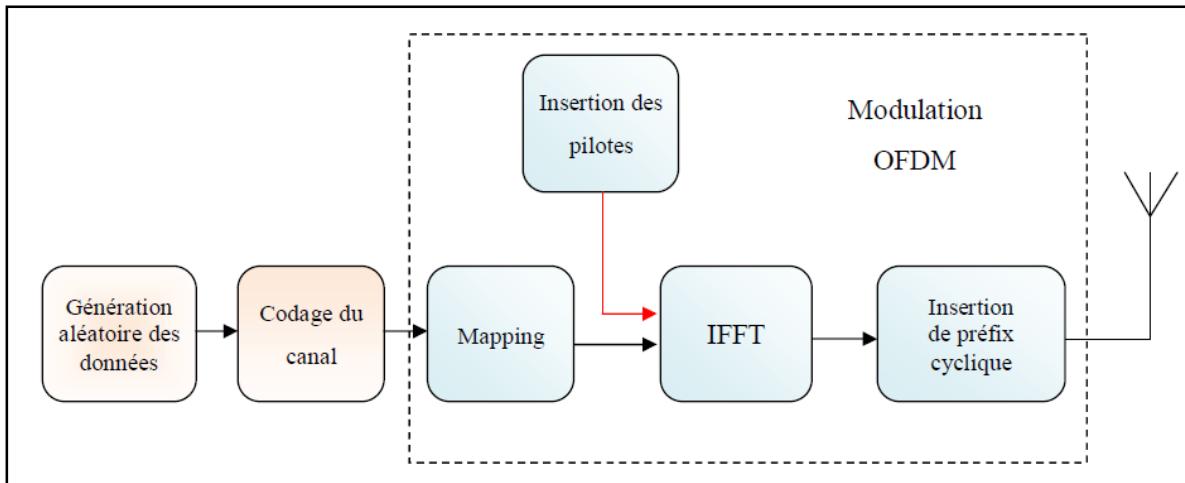
Dans la sous-trame descendante chaque burst correspond à un profil (type de modulation et codage utilisé). L'ordonnancement des bursts dans la trame se fait de la modulation la plus robuste vers la moins robuste, ainsi l'ordre de transmission des bursts est le suivant : QPSK, 16QAM, 64QAM. La modulation BPSK est également utilisée mais seulement pour les sous porteuses pilotes qui sont transmises avec une puissance supérieure de 3 dB par rapport aux autres sous-porteuses afin de faciliter leurs détections [1].

La partie montante est constituée d'une partie de maintenance et de contention pour la demande de bande passante suivie des accès multiples des nœuds vers la station de base. Une portion sert également de canal d'adaptation permettant aux stations désirant entrer sur le réseau d'ajuster leur puissance et de se synchroniser en temps et en fréquences. Chaque salve est précédée d'un préambule permettant la synchronisation du récepteur (BS) avec l'émetteur (SS).

Les trames WiMAX permettent ainsi d'obtenir une variété importante de salves montantes ou descendantes qui peuvent varier suivant les besoins de l'utilisateur, la charge du réseau, les conditions de propagation et la qualité de service mise en place. La longueur de ces trames est également variable de 2 à 20 ms dans le standard de l'IEEE, cependant le système de profil WiMAX ne prévoit pour l'instant que les trames de 5 ms [12].

### III.3 La chaîne d'émission

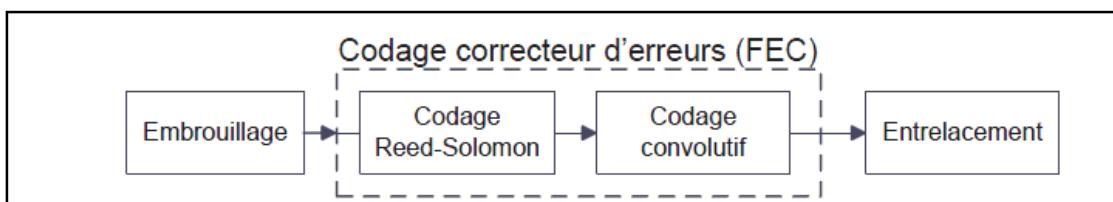
L'élément d'entrée de notre chaîne est un train binaire qui peut correspondre soit à des données spécifiques à émettre ou bien à des données générées aléatoirement (Figure III.3).



**Figure III.3 : Chaine d'émission [8].**

### III.3.1 Le codage du canal

Le codage de canal, introduit à l'émission avant le modulateur OFDM, permet de prévenir les données contre les erreurs en les arrangeant différemment et en introduisant de la redondance. Selon la norme IEEE 802.16d, le processus de ce codage est la concaténation d'une fonction d'embrouillage, de codage correcteur d'erreurs et d'entrelacement comme montre la figure III.4 [8].



**Figure III.4. Le codage de canal selon la norme IEEE 802.16d.**

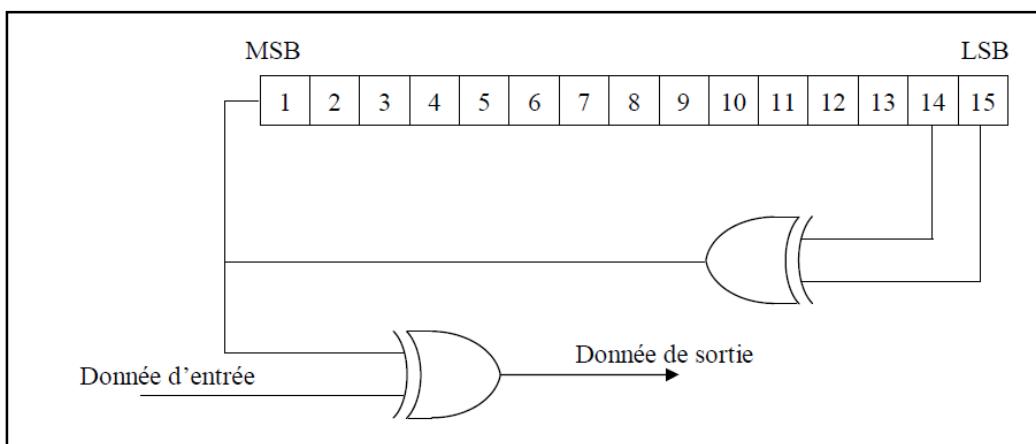
Ce processus de codage est flexible grâce au poinçonnage du signal qui permet de mettre en place différents taux de codage. Cela garantit aux abonnés une protection optimale contre les erreurs en fonction du degré de perturbations qu'amène le canal de propagation. En effet, l'abonné transmet les informations relatives au canal à la BS qui choisit un taux de codage approprié et l'applique aux données en voie descendante.

Ainsi, un utilisateur se trouvant, à un instant donné, dans un environnement riche en éléments perturbateurs se verra attribué une meilleure correction d'erreurs qu'un autre se trouvant dans de meilleures conditions de propagation. Dans la suite, chacun des blocs de codage sera présenté et son fonctionnement détaillé [1].

### III.3.1.1 L'embrouillage

Les modulations employées pour transmettre un signal sans fil fonctionnent à une condition : le signal émis doit pouvoir être considéré comme aléatoire. Or, le signal, du fait notamment des en-têtes présents sur le réseau de manière récurrente, n'est pas réellement aléatoire. Il faut donc "mélanger" les bits présents dans une trame afin de leur donner un aspect aléatoire. C'est le rôle de l'embrouilleur. L'émetteur va donc utiliser un code d'embrouillage et le récepteur, lui, va appliquer le code inverse afin de retrouver la trame originale [13].

L'embrouilleur a pour but d'éliminer les longues séquences de '0' ou de '1' que peut contenir la séquence d'entrée. Cela créerait une raie DC à forte énergie qui perturbera le fonctionnement des amplificateurs utilisés dans le système. Un signal connu qui possède cette caractéristique est le bruit qui par nature est aléatoire et donc une énergie uniformément répartie (Figure III.5).



**Figure III.5 :** Principe de l'embrouillage.

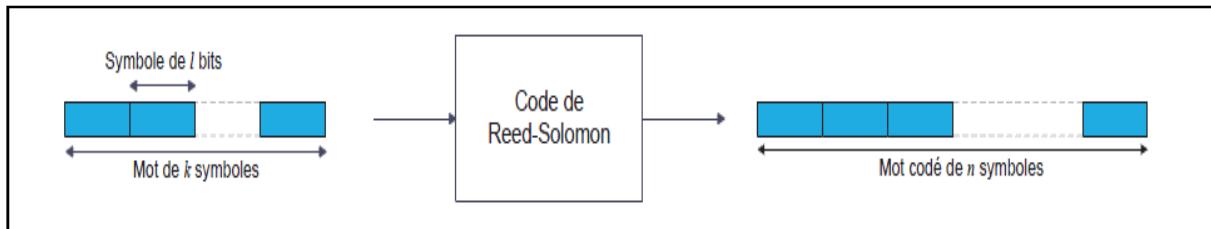
### III.3.1.2 Codage correcteur d'erreurs

Le codage correcteur d'erreurs (en anglais FEC pour Forward Error Correction) consiste en un code en blocs de type Reed-Solomon suivi d'un code convolutif.

#### a) Codage Reed-Solomon :

Le code de Reed-Solomon, noté RS ( $n, k, t$ ), est un code en bloc cyclique permettant la détection et la correction d'erreurs arrivant par paquets. Ce code transforme un mot de  $k$  symboles de  $l$  bits en un mot de  $n$  symboles de  $l$  bits en ajoutant  $2t = (n-k)$  symboles de redondance (Figure III.6) [1,8]. Ainsi  $n, k$  et  $t$  peuvent être définies de la manière suivante :

- $n$  : le nombre de symboles après codage.
- $k$  : le nombre de symboles avant codage.
- $t$  : le nombre de symboles pouvant être corrigés.



**Figure III.6 :** Principe du code de Reed-Solomon.

Le rendement du code (le taux de codage) est défini par  $r = k/n$ . Ainsi à débit binaire constant, la bande de transmission augmente du facteur  $1/r$ .

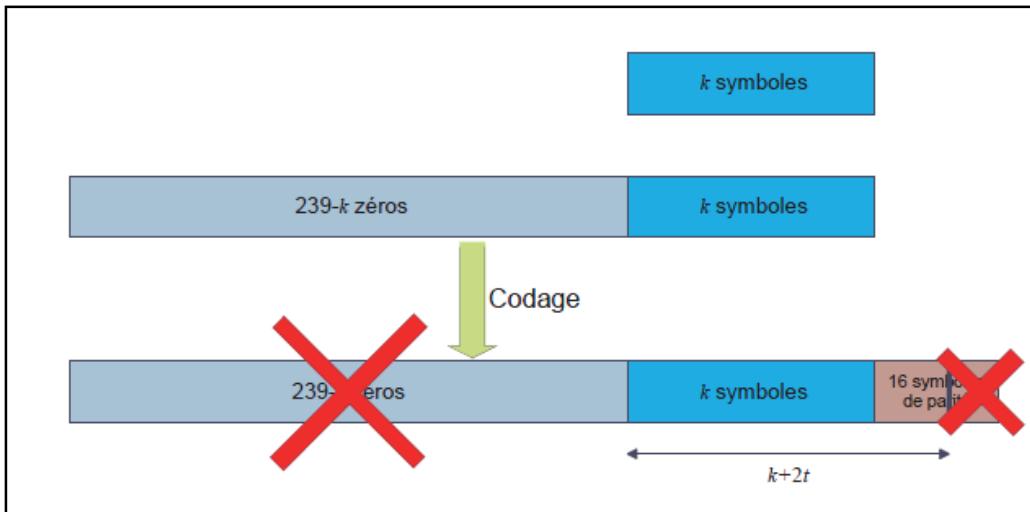
La norme stipule que le code RS utilisé doit être dérivé du code RS( $n = 255$ ,  $k = 239$ ,  $t = 8$ ) utilisant un corps de Galois à  $2^8$  éléments noté GF( $2^8$ ) [1 ,8]. Pour générer ce code, deux polynômes sont utilisés :

- Un polynôme dit primitif permettant de générer les symboles codés. Il s'écrit  $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
- Un polynôme dit générateur de code permettant de calculer les symboles de parité. Il s'écrit  $g(x) = (x+10) (x+11) (x+12) \dots (x+12t-1)$  avec 1 l'élément primitif du corps de Galois.

Pour que ce code puisse traiter des paquets de tailles différentes et avoir des capacités ajustables de correction, il doit être raccourci et poinçonné.

Quand un paquet est raccourci à  $k$  symboles, un préfixe de  $239-k$  symboles nuls est ajouté au paquet et une fois le processus de codage terminé, ces symboles codés sont supprimés.

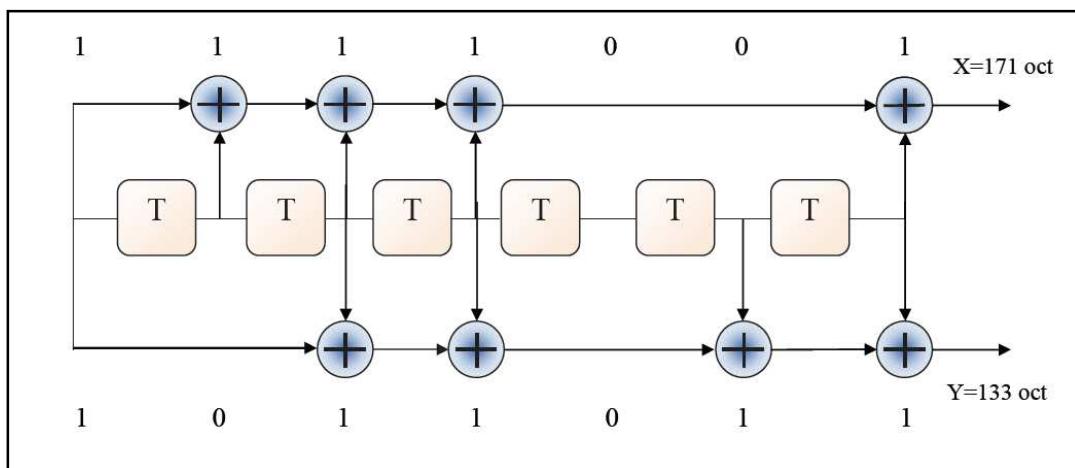
Quand la fonction de poinçonnage est appliquée sur un mot du code pour corriger  $t$  symboles, seuls les  $2t$  symboles de parité parmi les 16 sont utilisés. Ce fonctionnement est illustré dans la figure ci-dessous [1] :



**Figure III.7 :** Processus de poinçonnage et de raccourcissement dans un code Reed-Solomon

### b) Codage Convolutif :

Après le bloc de codage RS, les données traversent le bloc de codage Convolutif (Figure III.8). Les codes convolutifs forment une classe extrêmement souple et efficace de codes correcteurs d'erreur, et ont les mêmes caractéristiques que les codes en bloc sauf qu'ils s'appliquent à des séquences infinies de symboles d'information et génèrent des séquences infinies de symboles de code.



**Figure III.8 :** Principe du codeur Convolutif de taux  $\frac{1}{2}$  [8]

Les polynômes génératrices utilisés pour les deux sorties X et Y du codeur sont :

$$G1 = 171\text{oct} \text{ pour } X$$

$$G2 = 133\text{oct} \text{ pour } Y$$

Chaque bloc en sortie du codeur RS doit être codé par un codeur convolutif garantissant un taux de codage de  $1/2$  et ayant une longueur de contrainte 7. Afin d'augmenter les débits et

réduire la redondance du code, un module de poinçonnage est utilisé. Le poinçonnage consiste à ne transmettre que certains bits en sortie du codeur [8].

Dans le cas d'un rendement 3/4, pour 3 bits se présentant à l'entrée du codeur, 4 seulement seront transmis au lieu des 6 bits habituels. Notons que les 2 bits écartés font partie des bits redondants et non pas des données. Les taux de codage possibles sont 1/2, 2/3, 3/4 et 5/6 [8].

Le profil d'un burst est formé par l'association d'une des modulations disponibles et un codage correcteur d'erreurs avec un certain taux. Le tableau suivant résume les différentes configurations pouvant être affectées aux bursts.

| Modulation | Taux de codage | Code RS (octets) | Code CC |
|------------|----------------|------------------|---------|
| BPSK       | 1/2            | (12,12,0)        | 1/2     |
| QPSK       | 1/2            | (32,24,4)        | 2/3     |
| QPSK       | 3/4            | (40,36,2)        | 5/6     |
| 16QAM      | 1/2            | (64,48,8)        | 2/3     |
| 16QAM      | 3/4            | (80,72,4)        | 5/6     |
| 64QAM      | 2/3            | (108,96,6)       | 3/4     |
| 64QAM      | 3/4            | (120,108,6)      | 5/6     |

**Tableau III.1 : Les schémas de codage et de modulation dans la norme IEEE 802.16d**

### III.3.1.3 L'entrelacement

L'entrelacement est né du constat qu'une perturbation n'est en général pas ponctuelle dans le temps mais a tendance à affecter un certain nombre de bits consécutifs transmis (burst d'erreurs). De ce fait, si plusieurs bits consécutifs sont affectés par la perturbation, le code généré par le codeur ne sera plus suffisant pour retrouver le message de départ. Il faut donc disperser les bits consécutifs afin d'éviter qu'ils soient soumis à une même perturbation. C'est là le rôle de l'entrelaceur. Cet entrelaceur peut être implémenté de manière logicielle ou matérielle [13].

La plupart des codes correcteurs d'erreurs sans voie de retour ne peuvent être utilisés avec des paquets d'erreurs. Donc la technique d'entrelacement par bloc qui fonctionne sur un bloc entier de bits en même temps, permet de répartir de façon aléatoire les erreurs en paquet.

A l'émetteur, les bits codés sont permuts d'une certaine manière permettant, que les bits adjacents soient séparés par plusieurs bits non erronés après l'entrelacement. Au récepteur, une permutation inverse est faite avant le décodage. Ceci est appelé le désentrelacement.

L'inconvénient de l'entrelacement est que le décodeur doit attendre le remplissage du désentrelaceur. Ceci cause un délai proportionnel à la taille de l'entrelacement. Deux types

d'entrelacement par bloc existent, l'entrelacement par bit et entrelacement par symbole [14]. La profondeur d'entrelacement pour chaque type de modulation est montrée ci-dessous :

| Type de modulation | profondeur de l'entrelaceur |
|--------------------|-----------------------------|
| BPSK               | 48 bits                     |
| QPSK               | 96 bits                     |
| 16QAM              | 192 bits                    |
| 64QAM              | 288 bits                    |

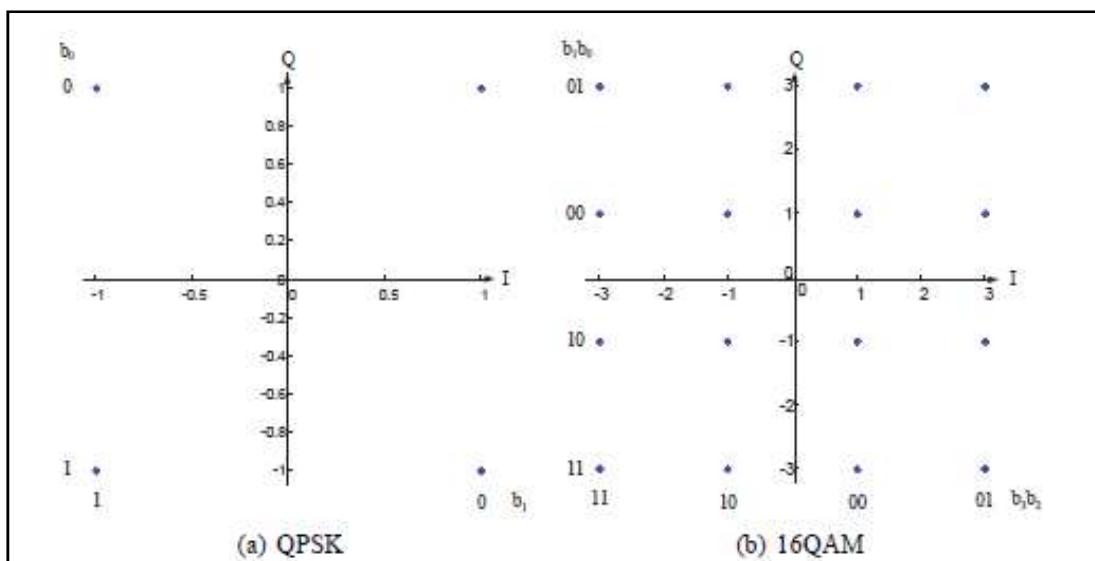
**Tableau III.2 : Profondeur d'entrelacement pour chaque type de modulation**

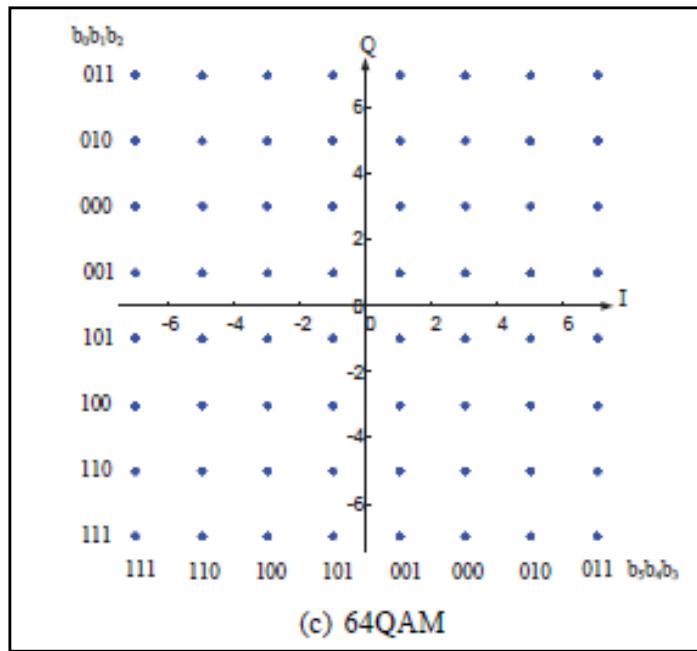
Les données reçues par l'entrelaceur sont permutées à deux reprises. La première permutation répartit les bits codés adjacents sur des sous-porteuses non-adjacentes. La seconde répartit les bits codés de telle façon qu'ils soient affectés, alternativement, à des points plus ou moins significatives de la constellation utilisée dans le but d'éviter des suites de '0' ou de '1' [1].

### III.3.2 La modulation

Le choix du type de la modulation numérique dépend en général de deux conditions essentielles. La première est de limiter la bande passante requise pour transmettre un message à une vitesse donnée. La deuxième est reliée à la possibilité de transmettre un signal par voie hertzienne ou de partager un canal de communication [14].

Après l'entrelacement des données binaires, les données rentrent en série au bloc de modulation. La norme IEEE 802.16d définit l'utilisation de plusieurs modulations : BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM. La modulation BPSK est utilisée uniquement pour les symboles pilotes [1]. Les constellations de ces modulations sont décrites sur la figure suivante :





**Figure III.9 :** Constellations des modulations QPSK, 16QAM et 64QAM

### III.3.3 IFFT

Une fois les symboles OFDM assemblés, ils passent par le bloc de conversion de série à parallèle qui permet de les mettre sous une forme adéquate pour passer dans le bloc IFFT. Ce bloc assure la modulation OFDM.

Il applique une IFFT permettant de passer du domaine fréquentiel au domaine temporel. Après cela, les symboles OFDM sont reconvertis en série. [8]

$$S_n = \frac{1}{\sqrt{N_{FFT}}} \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} C_k \cdot e^{j2\pi k \frac{n}{N_{FFT}}} \quad n = 0, \dots, N_{FFT} - 1 \quad (\text{III.1})$$

Où

- $k$  l'indice de sous-porteuse (domaine fréquentiel)
- $C_k$  le symbole modulé sur la sous-porteuse  $k$
- $N_{FFT}$  la taille de la FFT

Après avoir passé le bloc IFFT, un préfixe cyclique est inséré avant chaque symbole. Une partie de chaque symbole OFDM est recopiée au début de ce même symbole.

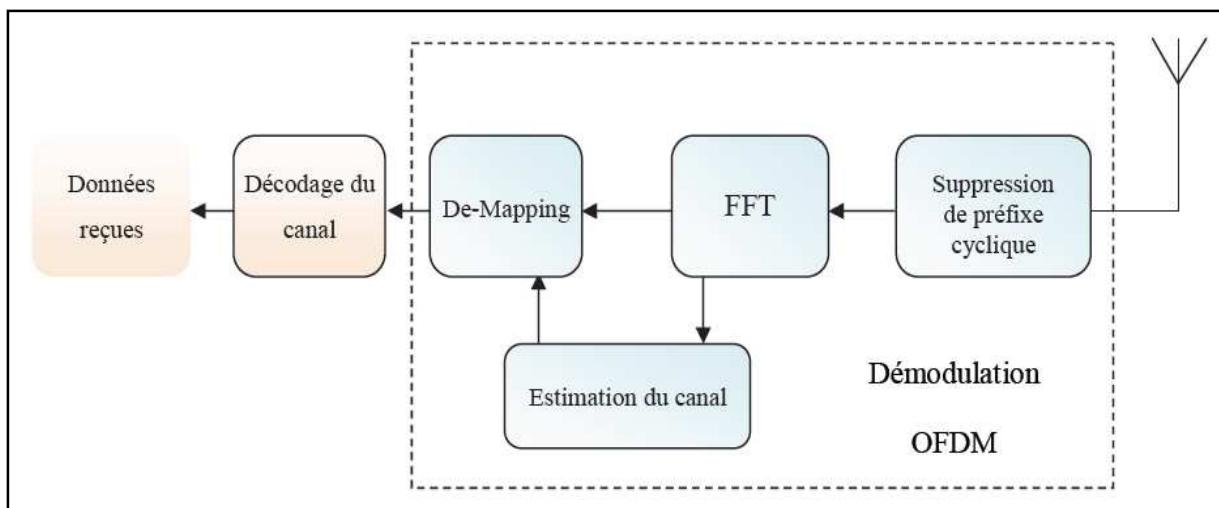
Dans notre cas, nous choisirons un CP de longueur 1/4 ce qui correspondra à 64 symboles à recopier de la partie utile du symbole [8].

### III.4 La chaîne de réception

La chaîne de réception comprend des blocs garantissant les fonctions duales à celles effectuées en émission : le bloc de démodulation et le bloc de décodage.

Le bloc de démodulation a pour tâche d'associer les informations d'amplitude et de phase à un groupe de bits. Il s'agit de l'opération inverse de la modulation.

L'opération de décodage suit les règles précédemment citées (permutations, décodeur Viterbi pour le codage convolutionnel, décodage RS) [1].



**Figure III.10 :** La chaîne de réception.

#### III.4.1 Démodulation OFDM

La démodulation permet d'estimer les données binaires envoyées préalablement à partir des symboles complexes reçus et affectés par le canal et le bruit. L'estimation se fait à l'aide du critère de la distance Euclidienne minimale. Cette méthode estime les symboles émis en calculant les distances Euclidiennes entre chaque symbole reçu et tous les points de la constellation. Le point de la constellation qui forme la plus petite distance Euclidienne avec le symbole reçu est retenue comme étant l'estimation du symbole émis. Ainsi dans cette étape on parviendra à La suppression de préfixe cyclique qui consiste à supprimer la copie de la fin du symbole qui était ajoutée à l'émission pour éliminer les interférences entre symboles [1].

##### III.4.1.1 FFT

A la sortie du bloc de la suppression de préfixe cyclique, les données sont remises en parallèle puis passées dans le bloc FFT.

Contrairement à l'IFFT, cette fonction permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel [7].

$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N_{FFT}}} \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} y_n e^{-j2\pi k \frac{n}{N_{FFT}}} \quad (\text{III.2})$$

Où

- $k$  l'indice de sous-porteuse (domaine fréquentiel).
- $y_n$  le symbole reçu à l'instant  $n.T_s$ .
- $N_{FFT}$  la taille de la FFT.

### III.4.1.2 Désassemblage

Ce processus permet d'extraire les données utiles ainsi que les pilotes des symboles OFDM. Les données présentes sur les porteuses nulles sont relevées pour servir à l'estimation de la variance du bruit.

### III.4.1.3 Estimation de canal et égalisation

A la réception, pour le pilote sur le canal  $n$ , on va lire :  $Y_n = H_n X_n + B$ ,  $X_n$  étant le symbole connu émis,  $Y_n$  le symbole reçu,  $H_n$  le coefficient d'atténuation du canal et  $B$  le bruit.

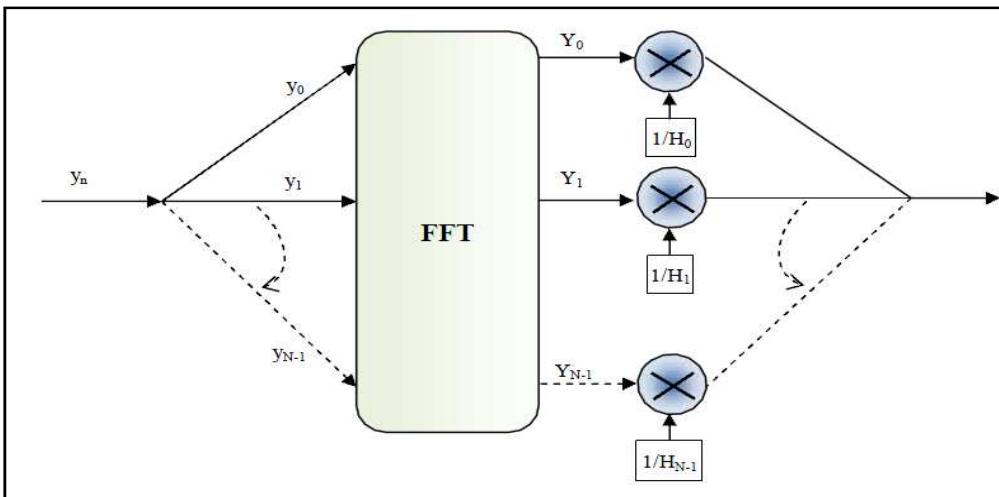
Pour estimer le coefficient du canal  $n$ , il suffit de calculer (en complexe) :

$$H_n = \frac{Y_n}{X_n} \quad (\text{III.3})$$

Pour chaque pilote, on va obtenir une estimation du canal. Par interpolation, on va déduire les coefficients d'atténuation  $H_i$  pour les valeurs entre les pilotes. Une fois que l'on a obtenu tous les  $H_i$ , il suffit de corriger les valeurs  $Y_i$  à la sortie de FFT.

Le SNR n'est pas amélioré, car le bruit est amplifié en même temps que le signal. En cas de zéro sur une porteuse, la correction n'a plus un grand sens [8].

La figure suivante montre les diagrammes de constellation des données avant et après l'égaliseur.

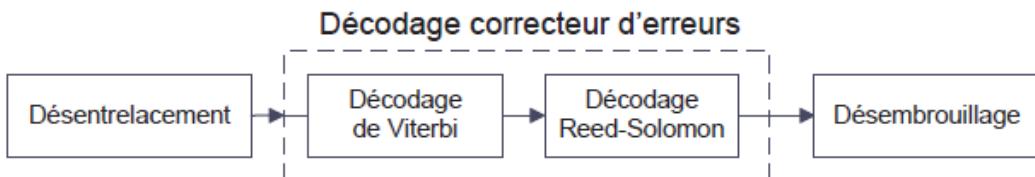


**Figure III.11 :** Principe de l'égalisation.

### III.4.2 Décodage de canal

La fonction de décodage permet de détecter et de corriger les erreurs qui se produisent lors d'une transmission des données.

Elle comporte les fonctions de désentrelacement, de décodage correcteur d'erreurs et de désembrouillage (Figure III.12) [1].



**Figure III.12 :** Décodage de canal

#### III.4.2.1 Désentrelacement

La fonction de désentrelacement permet de remettre les bits dans l'ordre qu'ils avaient juste avant la fonction d'entrelacement. Cette fonction comporte, également, deux permutations. Pour un bloc de bits reçus de taille  $N_{cbps}$  soit  $j$  l'indice d'un bit reçu avant la première permutation,  $m_j$  l'indice du même bit avant la seconde permutation et après la première permutation et  $k_j$  son indice après la seconde permutation [1].

#### III.4.2.2 Décodage correcteur d'erreurs

##### a) Décodage de Viterbi :

Le décodage de Viterbi est la fonction duale au codage convolutif appliquée à l'émission. Il se base sur un diagramme de treillis et sur le principe du maximum de vraisemblance pour

chercher le chemin optimal entre le symbole reçu à un instant  $t$  et l'état du codeur lui correspondant au même instant.

*b) Décodage de Reed-Solomon :*

Le décodeur RS inverse l'effet du processus de codage effectué à l'émission. En effet, ce décodeur accepte un paquet de taille  $n$  en l'entrée pour en ressortir un autre de taille  $k$ . De même que le codeur RS,  $n = 255$  et  $k = 239$  [1].

*c) Désembrouillage :*

A l'aide du même mécanisme que la fonction d'embrouillage, le processus de désembrouillage permet de remettre les bits dans l'ordre dans lequel ils se sont présentés à l'entrée du système. A la sortie de ce bloc, le TEB est calculé en comparant les bits résultants aux bits initialement émis.

### III.5 Le modèle du canal de propagation

Trois éléments forment, principalement, les systèmes de communications sans fil : l'émetteur, le récepteur et le support de propagation de l'onde électromagnétique. Ce support est désigné par le terme "Canal de Propagation". Ce canal peut être présenté sous la forme d'un ensemble de phénomènes contribuant à la dégradation de la qualité du signal lors de son transport entre l'émetteur et le récepteur.

L'effet de ces phénomènes peut, plus ou moins, s'accentuer en fonction de la nature de l'environnement dans lequel sont placés l'émetteur et le récepteur ainsi que des positions respectives de ces derniers [12].

Les canaux utilisés sont choisis parmi un ensemble connu sous le nom : "canaux SUI" (Stanford University Interim). Ces canaux ont été établis à partir d'une vaste campagne de mesures lancée par l'opérateur AT&T sur le sol américain. Ils ont été désignés par le groupe de travail IEEE802.16 comme modèles pour simuler et tester des liaisons fixes d'accès sans-fil [12].

Les vecteurs des retards et des puissances relatifs à ces canaux sont regroupés dans les Tableaux III.3 et III.4.

| Modèle de canal | Trajet 1 | Trajet 2 | Trajet 3 | Retard RMS |
|-----------------|----------|----------|----------|------------|
| SUI-1           | 0        | 0.4      | 0.9      | 0.111      |
| SUI-2           | 0        | 0.4      | 1.1      | 0.202      |
| SUI-3           | 0        | 0.4      | 0.9      | 0.264      |
| SUI-4           | 0        | 1.5      | 4        | 1.257      |
| SUI-5           | 0        | 4        | 10       | 2.842      |
| SUI-6           | 0        | 14       | 20       | 5.240      |

**Tableau III.3 :** L'étalement des retards des canaux SUI en  $\mu$ s

| Modèle de canal | Trajet 1 | Trajet 2 | Trajet 3 |
|-----------------|----------|----------|----------|
| SUI-1           | 0        | -15      | -20      |
| SUI-2           | 0        | -12      | -15      |
| SUI-3           | 0        | -5       | -10      |
| SUI-4           | 0        | -4       | -8       |
| SUI-5           | 0        | -5       | -10      |
| SUI-6           | 0        | -10      | -14      |

**Tableau III.4:** Les puissances des trajets relatifs aux canaux SUI en dB

## III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la structure d'un simulateur du modèle de l'IEEE 802.16d. Il peut être utilisé pour étudier les performances qui résultent d'un grand nombre de variations de paramètres du système. Ces variations sont destinées à améliorer ou à optimiser les performances dans un cadre donné.

Cette étude nous a menées à la réalisation de plusieurs simulateurs respectant la norme en question, tout en supposant une synchronisation idéale.

Dans le chapitre qui va suivre nous allons procéder à la simulation sur les performances de la couche physique du WiMAX ou le standard IEEE 802.16.

## **Chapitre IV :**

Simulation et résultats

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons vous présenter les résultats de la simulation, nous commenterons ainsi les différents aboutissements de notre travail. Ainsi on députera la rédaction de ce chapitre par une brève présentation du simulateur, et par la suite nous vous exposerons les différents graphes et figures qui ont résulté de notre partie pratique.

## IV.2 Le simulateur

Le but du simulateur réalisé est d'évaluer et de valider les performances du système WiMAX dans différents modèles de canaux à travers la caractérisation du BER (Bit Error Rate) en fonction du SNR (Signal to Noise Ratio).

Le BER est calculé, pour un SNR donné, à partir de l'équation suivante :

$$BER = \frac{N_e}{N} \quad (\text{IV.1})$$

Avec  $N$  le nombre de bits envoyés et  $N_e$  le nombre de bits erronées à la réception. Pour pouvoir tracer les courbes  $BER=f(SNR)$ , on varie le SNR dans un intervalle  $[SNR_{min}, SNR_{max}]$  défini selon le scénario simulé. Nous avons développé ce simulateur en utilisant l'approche modulaire. Chaque bloc de l'émetteur, du récepteur et du canal (comme on a vu dans le chapitre III) est écrit dans un fichier Matlab (\*.m) séparé. Le programme principal appelle ces blocs de la même manière du fonctionnement du système de communication. Il y a un seul fichier qui contient également tous les paramètres d'initialisation. Le flux de données d'entrée est généré aléatoirement et enregistré dans un fichier (\*.mat).

Les paramètres qui peuvent être définies au moment d'initialisation sont ;

- le nombre de symboles OFDM simulés,
- la longueur du CP,
- le profil de modulation,
- taux de codage,
- la plage des valeurs SNR et les modèles SUI du canal pour la simulation.

Les variables de sortie sont disponibles dans l'espace de travail Matlab tandis que les résultats graphiques sont représentés dans des fichiers (\*.fig) qui facilitent leur manipulation. Avant d'entamer la série de simulations, il était indispensable de vérifier si tous les algorithmes ont été correctement implémentés. Pour cela, un canal idéal a été utilisé. Le

traitement à la réception d'une séquence transmise à travers ce canal a révélé un *BER* nul. Ce résultat valide que les blocs de l'émetteur et du récepteur ont été implémentés convenablement.

### IV.3 Représentations des courbes BER en fonction du SNR

Dans cette partie nous allons vous exposer les différentes courbes résultantes de notre travail de simulation pour tous les types de modulation et de codage comme ils sont spécifiés dans la norme WiMAX.

#### IV.3.1 Les modulations

Nous commençons donc par la représentation graphique du taux d'erreur binaire (BER) pour différents modèles de références de modulations ; on observe dans la Figure IV.1 que les profils faibles débit offre une meilleure performance avec petites valeurs de SNR.

Maintenant on choisit les différents profils de modulation en gardant le même préfixe cyclique la même bande passante, et le même type du canal, ainsi si nous fixons une valeur de BER donnée (par exemple à  $10^{-2}$ ) on obtiendra différentes valeurs du SNR qu'on détaillera dans le tableau IV.1.

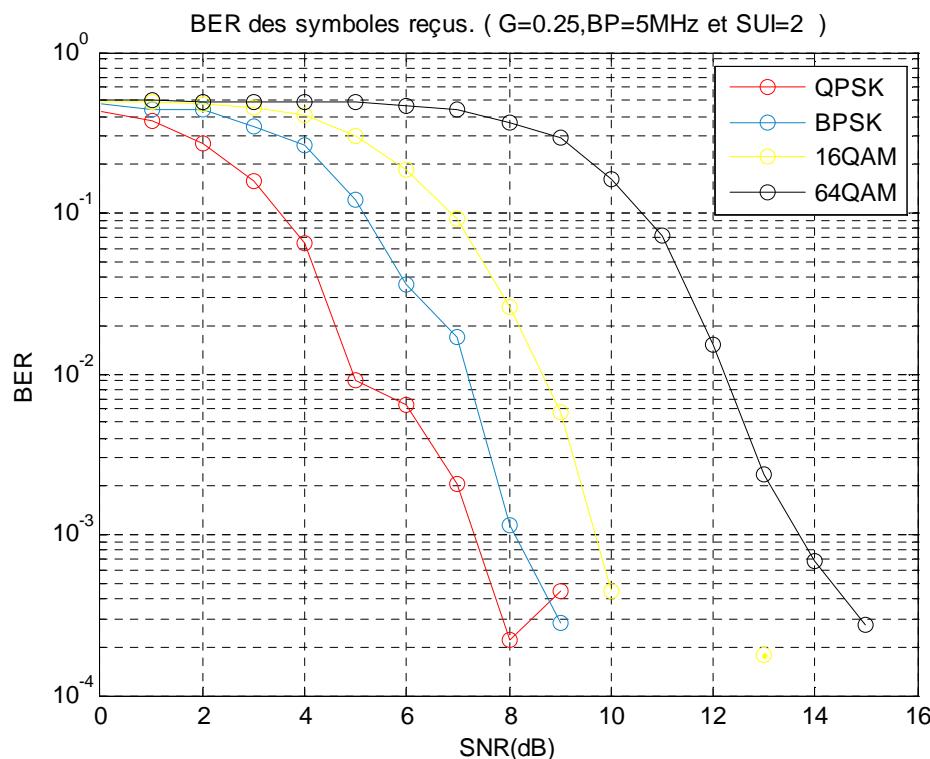


Figure IV.1 : BER en fonction du SNR pour différents profils sur un SUI-2, BP=5Mhz, CP=1/4

| (BER)     | BPSK     | QPSK     | 16QAM    | 64QAM     |
|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| $10^{-2}$ | 7.5 (dB) | 5 (dB)   | 8.5 (dB) | 12 (dB)   |
| $10^{-3}$ | 8 (dB)   | 7.5 (dB) | 9.8 (dB) | 13.8 (dB) |

**Tableau IV.1 :** Valeurs de SNR (dB) pour  $BER = 10^{-2}$  et  $10^{-3}$  des différents profils.

Les résultats de ce tableau nous font voir laquelle de ces différentes modulations est la plus performante en rapport signal/bruit. On déduira de ces chiffres obtenus que le profil QPSK a le meilleur signal contenu des rapports Signal/Bruit obtenu à la réception d'un signal pour une transmission numérique, la modulation permettra une transmission correcte avec un débit élevé. Bien qu'ils ne présentent généralement pas d'efficacité spectrale des systèmes, comme le QPSK où les états sont beaucoup plus séparés peuvent présenter une tolérance au bruit bien supérieur avant la dégradation des symboles.

Donc on constate une dégradation des performances quand le nombre d'états de la constellation utilisée augmente. Ceci résulte de la diminution de la distance euclidienne entre les différents états pour des constellations de taille croissante.

### IV.3.2 Le codage

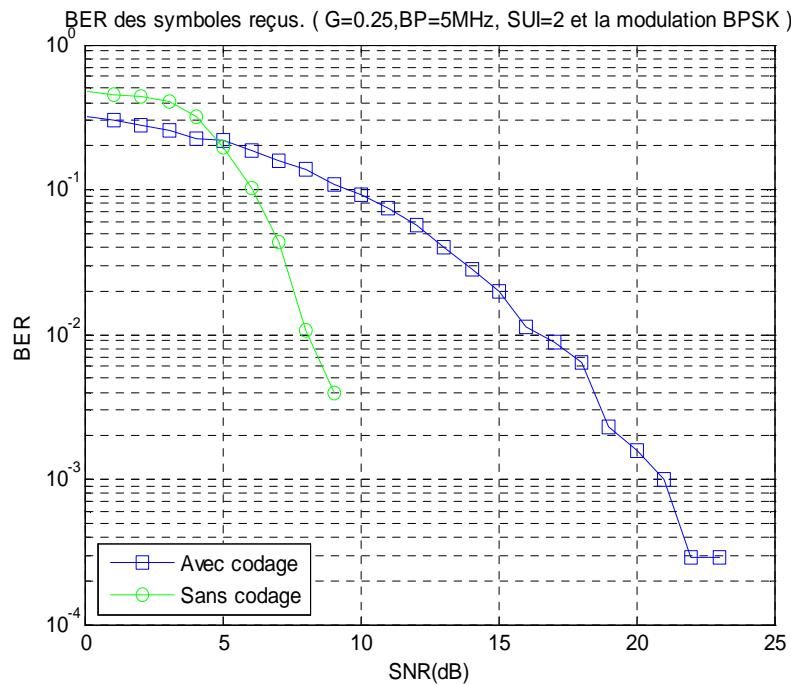
Dans cette section on va simuler la couche physique d'un système IEEE 802.16 avec et sans le codage. Pour savoir combien ce codage a une influence sur l'amélioration de performances. Pour obtenir des valeurs du SNR (dB) par rapport au BER, on a choisi pour cette simulation le modèle de canal SUI-2, une bande passante de 5MHz et un préfixe cyclique de 1/4 et on fait varier les différentes profiles modulations avec codage et sans codage comme présenter dans les figures IV.2, figure IV.3, figure IV.4 et figure IV.5 respectivement pour les modulation BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM.

Le tableau IV.2 récapitule les différentes valeurs de SNR à un BER fixe de  $10^{-2}$  en fonctions des différents profils de modulation (avec et sans codage).

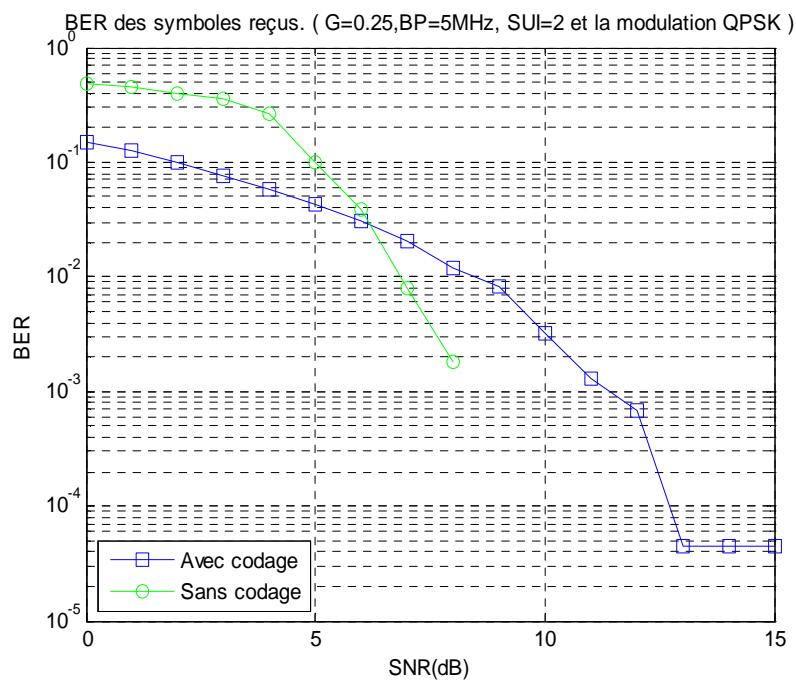
|             | BPSK     | QPSK   | 16QAM    | 64QAM     |
|-------------|----------|--------|----------|-----------|
| Avec codage | 16 (dB)  | 9 (dB) | 11 (dB)  | 14 (dB)   |
| Sans codage | 7.2 (dB) | 7 (dB) | 9.5 (dB) | 13.5 (dB) |

**Tableau IV.2 :** Valeurs de SNR (dB) pour  $BER = 10^{-2}$  des différentes modulations avec et sans codage.

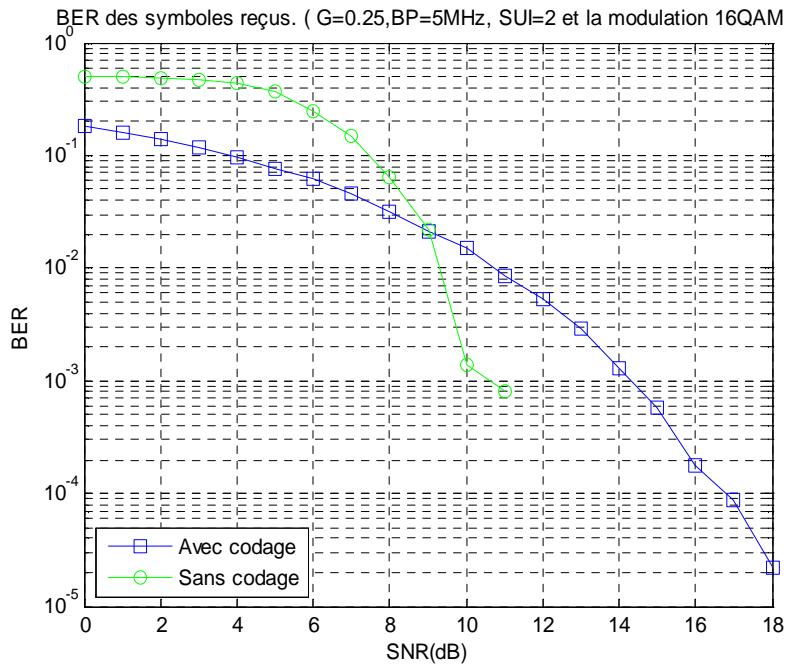
Dans ce tableau nous remarquerons qu'un système de transmission utilisant un codeur de canal présente des performances meilleures qu'un système sans codeur de canal.



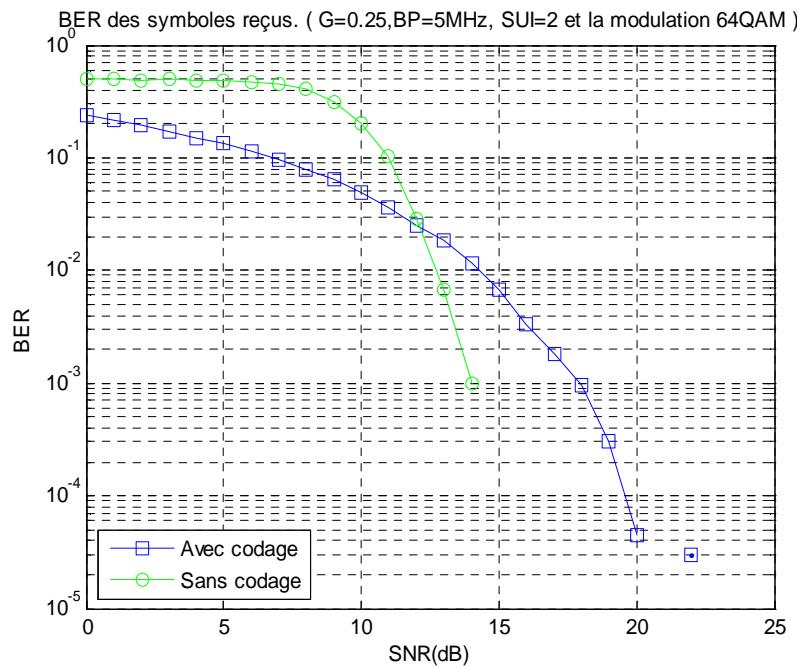
**Figure IV.2 :** Le BER en fonction du SNR de la modulation BPSK avec et sans codage



**Figure IV.3 :** Le BER en fonction du SNR de la modulation QPSK avec et sans codage.



**Figure IV.4 :** Le BER en fonction du SNR de la modulation 16QAM avec et sans codage.



**Figure IV.5 :** Le BER en fonction du SNR de la modulation 64QAM avec et sans codage.

Les figures ci-dessus montrent qu'on peut atteindre un BER égale à  $10^{-2}$  pour des faibles valeurs du SNR dans le cas de l'utilisation du codage du canal. En effet, nous remarquons qu'à partir des niveaux de SNR le codage de canal permet d'améliorer significativement les performances de notre système WiMAX.

### IV.3.3 Le préfixe cyclique

Comme on l'a cité dans le chapitre précédent, le préfixe cyclique permet principalement d'éliminer les interférences qui pourraient provoquer des erreurs à la réception, on ajoute ainsi le préfixe à l'émission après l'IFFT. Il est enlevé à la réception avant la FFT.

Dans cette partie de la simulation nous allons tester tous les éléments sur différents préfixes cycliques. Les figures de IV.6 à IV.9 représentent les différents préfixes cycliques pour tous les profils de modulation.

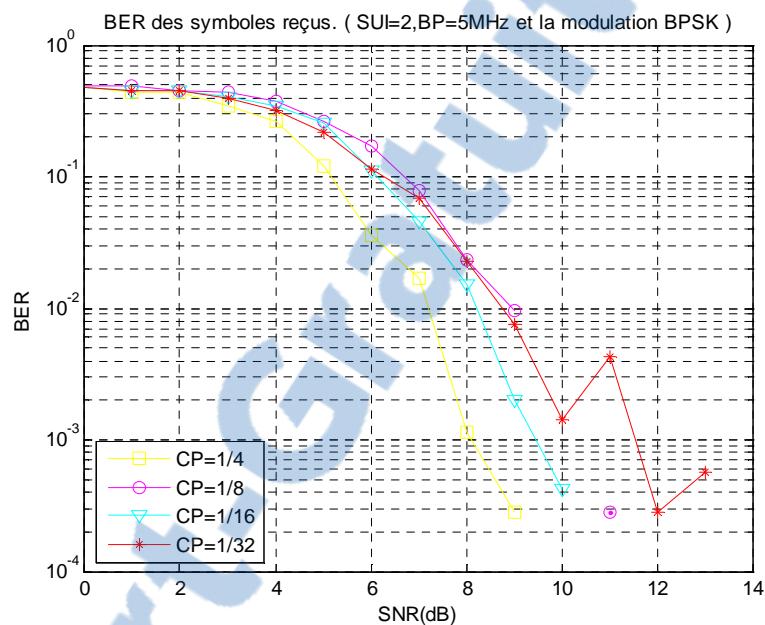


Figure IV.6 : Le BER en fonction du SNR de la modulation BPSK avec différents CP.

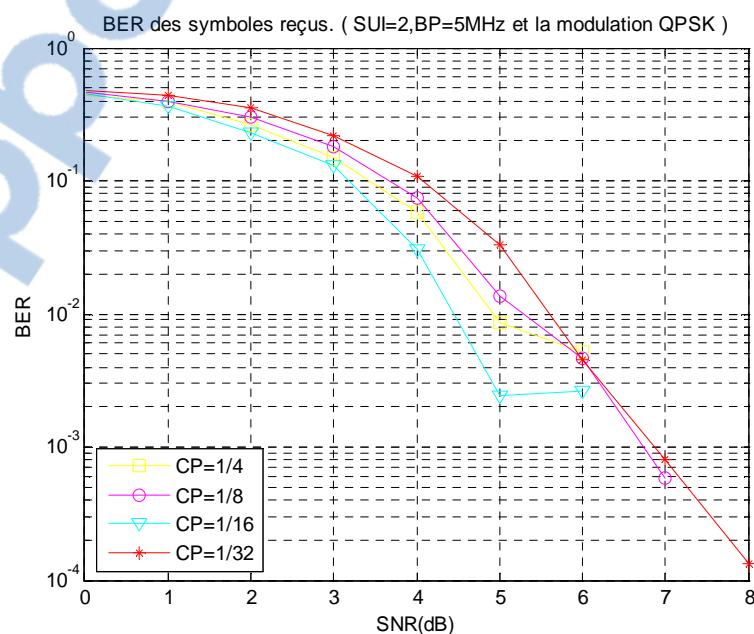
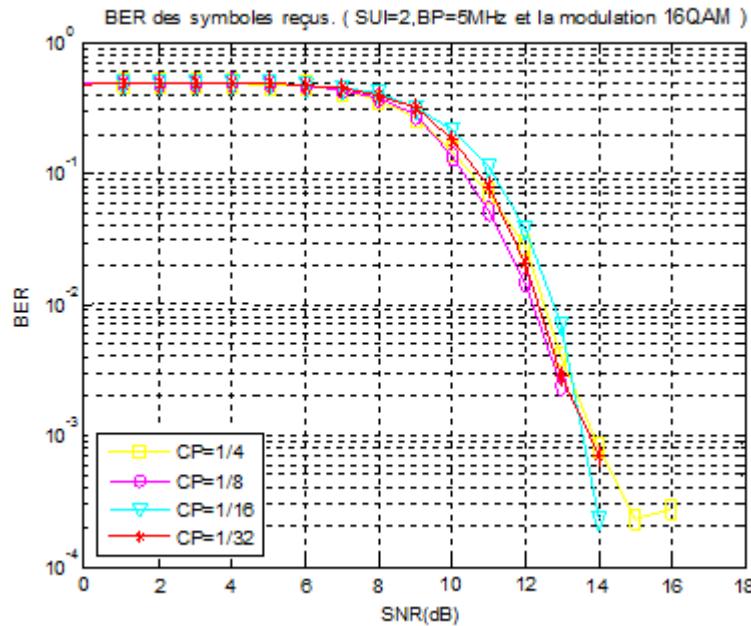
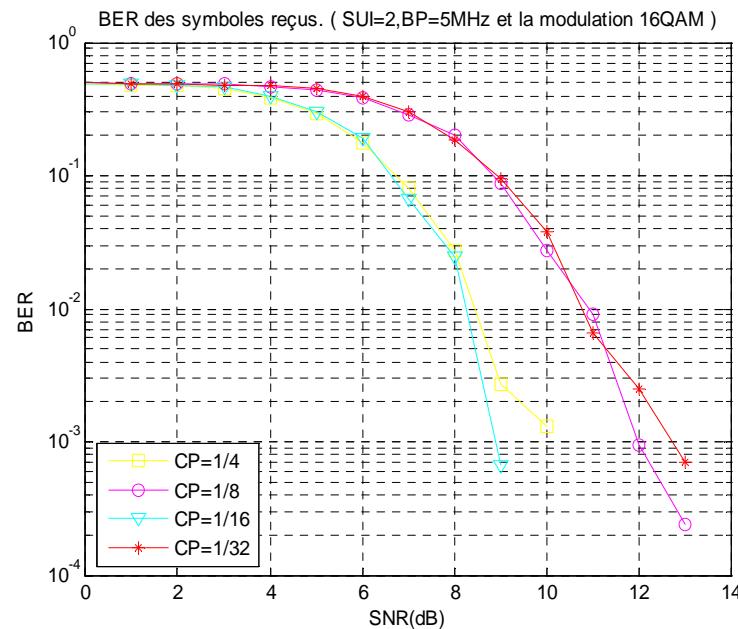


Figure IV.7 : Le BER en fonction du SNR de la modulation QPSK avec différents CP.



**Figure IV.8 :** Le BER en fonction du SNR de la modulation 16QAM avec différents CP.



**Figure IV.9 :** Le BER en fonction du SNR de la modulation 64QAM avec différents CP.

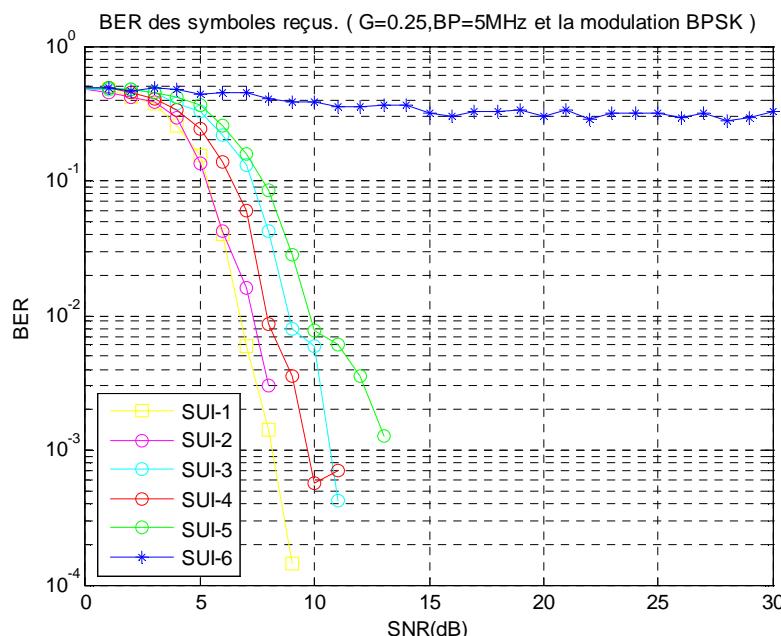
On élabore alors un tableau des différents résultats en fixant le BER à une valeur fixe de  $10^{-3}$  (Tableau IV.3). On observera de ces résultats que les performances de notre système en termes de BER sont améliorées à cause de l'augmentation de préfixe cyclique, aussi le préfixe cyclique qui affiche un plus bon signal/bruit change d'une modulation à l'autre (CP=1/4 pour BPSK, CP=1/16 pour QPSK et 64QAM, CP=1/8 pour 16QAM).

|                | BPSK      | QPSK     | 16QAM   | 64QAM     |
|----------------|-----------|----------|---------|-----------|
| <b>CP=1/4</b>  | 8(dB)     | 6 (dB)   | 10 (dB) | 14 (dB)   |
| <b>CP=1/8</b>  | 10.5 (dB) | 6.8 (dB) | 12 (dB) | 13 (dB)   |
| <b>CP=1/16</b> | 9.5 (dB)  | 6 (dB)   | 9 (dB)  | 13.8 (dB) |
| <b>CP=1/32</b> | 11.5 (dB) | 7(dB)    | 13 (dB) | 13.9 (dB) |

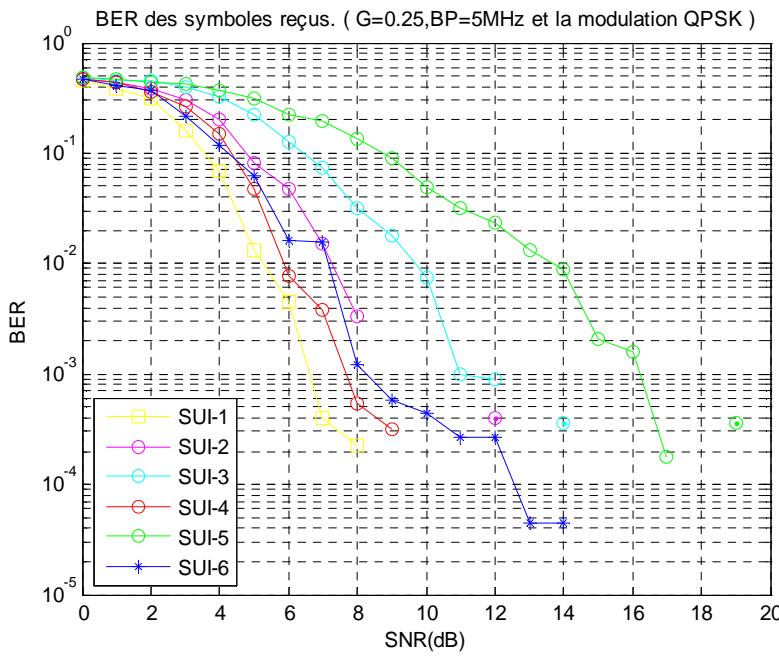
**Tableau IV.3 :** Valeurs de SNR (dB) pour  $\text{BER} = 10^{-3}$  des préfixes cycliques pour les différents profils des modulations.

#### IV.3.4 Les canaux SUI

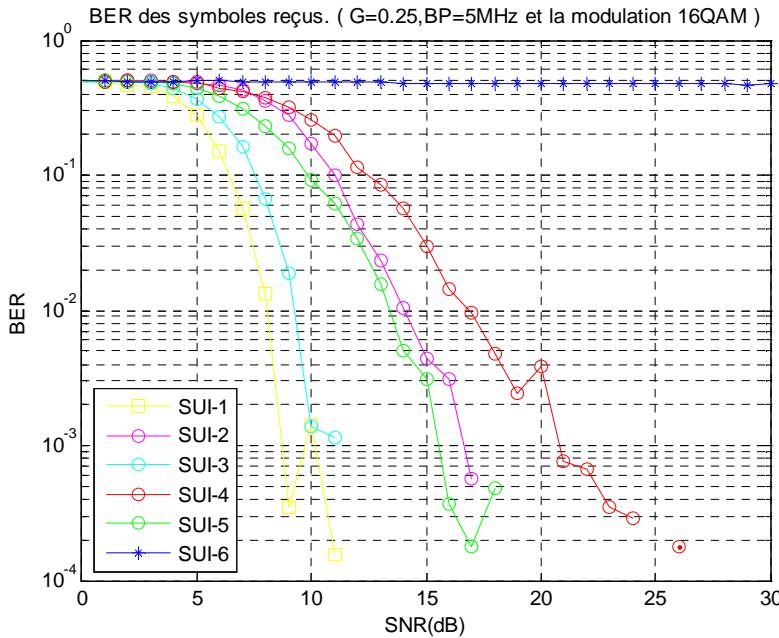
Le transfert de l'information nécessite une source de données, traduites dans un système compréhensible par l'émetteur et le récepteur (codage, format, compression préalablement définis). Le canal proprement dit représente le lien ou le support de transport de l'information entre les 2 entités communicantes, mais il comprend aussi les dispositifs en entrée et en sortie du support de transmission qui vont aider à l'émission, à la réception et à l'extraction correcte des données numériques. Pour envoyer le signal à travers le canal, la source a besoin d'un système d'adaptation. On va alors mettre en épreuve le rapport signal/bruit pour voir les performances des canaux comme le montre les figure IV.10, IV.11, IV.12, et IV.13. Pour une valeur du BER fixe de l'ordre  $10^{-3}$ , le tableau IV.4 montre la comparaison de SNR entre les différents profiles des modulations pour les 6 modèles des canaux SUI.



**Figure IV.10 :** BER en fonction du SNR pour BPSK sur différents modèle de canal



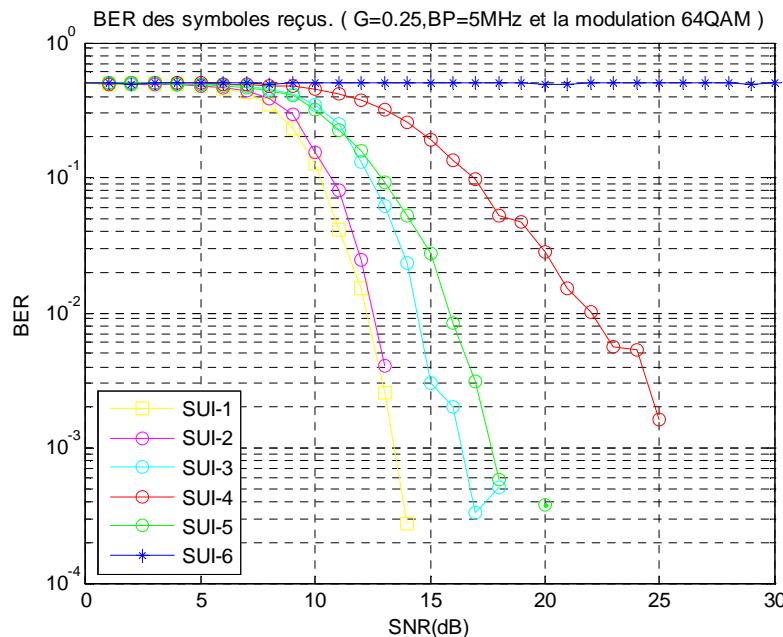
**Figure IV.11 :** BER en fonction du SNR pour QPSK sur différents modèles de canal



**Figure IV.12 :** BER en fonction du SNR pour 16QAM sur différents modèles de canal

On peut voir sur le Tableau IV.4 que la propagation des données à travers les modèles (SUI-1 à SUI-6) ont des rendements et des performances différents. Cette différence entre ces modèles est due aux paramètres des puissances et aux retards des trajets, l'effet Doppler est relativement petit donc il n'a aucune influence. On peut voir sur les figures IV.10, IV.11 et IV.13 (pour les modulations BPSK, QPSK et 64QAM) que la propagation des données a travers le modèle SUI-6 à un faible rendement par rapport aux autres modèles. Tous les trois premiers modèles (SUI-1, SUI-2 et SUI-3) ont la même valeur de retard. Alors, dans ce cas, la

puissance des trajets domine la dégradation de performances entre les différents modèles. Le SUI-1 a une valeur de puissance plus haute (le SUI-1 présente les meilleures performances pour tous les profils de modulation) au contraire le SUI-2 a une valeur plus basse. Néanmoins, le bruit n'est pas la seule source de perturbations, la fonction de transfert du canal introduit une distorsion au signal lors de sa propagation.



**Figure IV.13 :** BER en fonction du SNR pour 64QAM sur différents modèles de canal.

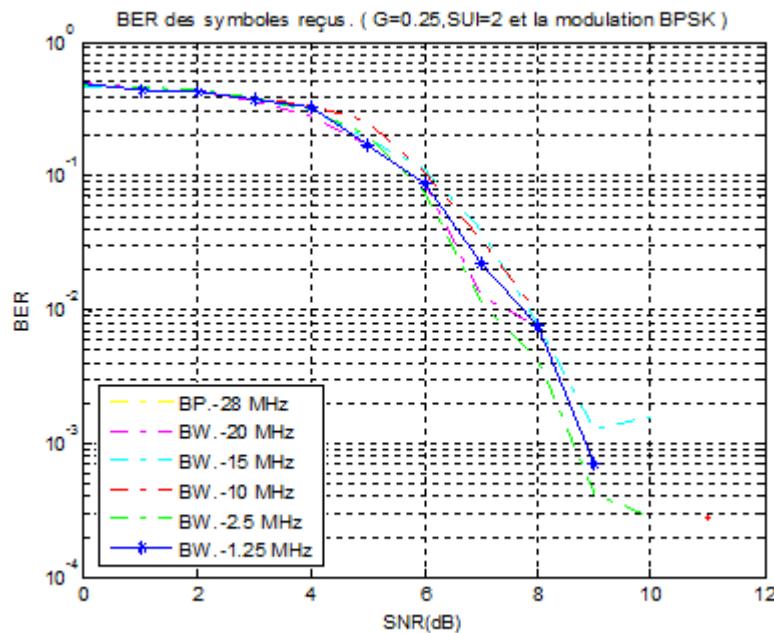
|              | BPSK     | QPSK      | 16QAM     | 64QAM     |
|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>SUI-1</b> | 8 (dB)   | 6.2 (dB)  | 8 (dB)    | 14 (dB)   |
| <b>SUI-2</b> | 0 (dB)   | 0 (dB)    | 16.5 (dB) | 0 (dB)    |
| <b>SUI-3</b> | 11(dB)   | 12 (dB)   | 11 (dB)   | 16.5 (dB) |
| <b>SUI-4</b> | 9.5 (dB) | 7.8 (dB)  | 21 (dB)   | 25 (dB)   |
| <b>SUI-5</b> | 13 (dB)  | 16.3 (dB) | 15.3 (dB) | 18 (dB)   |
| <b>SUI-6</b> | 0 (dB)   | 8 (dB)    | 0 (dB)    | 0 (dB)    |

**Tableau IV.4 :** Valeurs de SNR (dB) pour  $BER = 10^{-3}$  des différents canaux pour toutes les modulations.

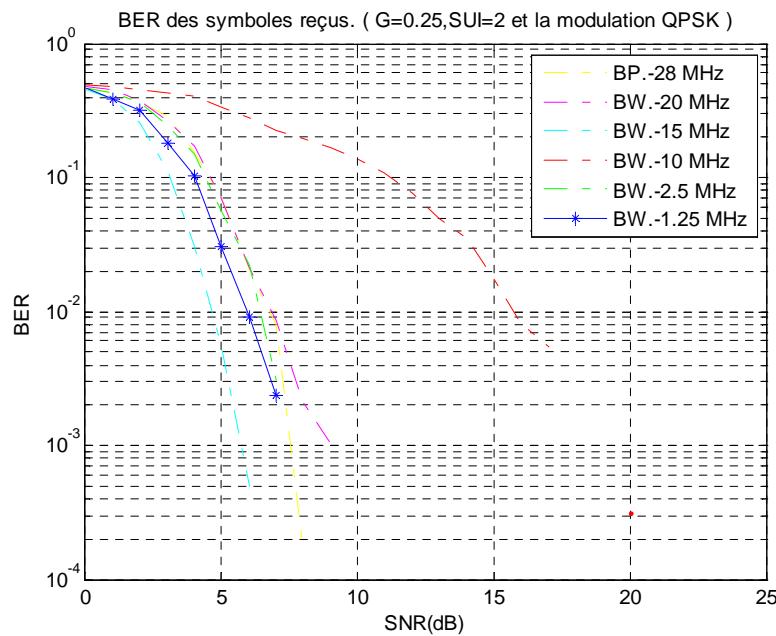
### IV.3.5 La bande passante

Le temps nécessaire à l'acquisition du signal dépend de l'intensité du gradient de lecture et donc de la bande passante de réception correspondante : une bande passante de réception large correspond à un gradient de lecture élevé et un temps de lecture du signal faible.

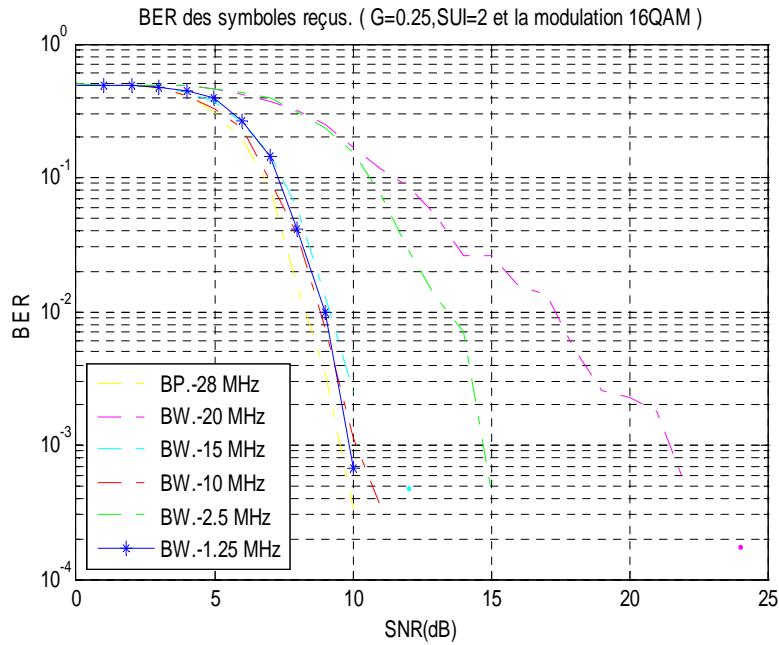
Les résultats de simulation de BER en fonction de SNR des différents profiles de modulation sont représentées par les Figures IV.14, IV.15, IV.16 et IV.17 pour les valeurs des bandes passantes supportées par le système WiMAX (28 MHz, 20 MHz, 15 MHz, 10 MHz, 2.5 MHz et 1.25 MHz).



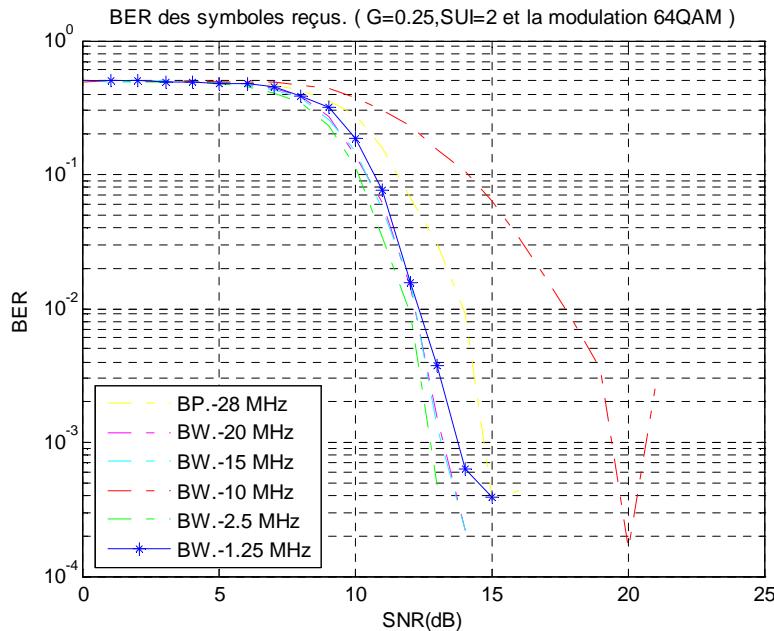
**Figure IV.14 :** BER en fonction du SNR pour BPSK sur différentes Bandes Passantes.



**Figure IV.15 :** BER en fonction du SNR pour QPSK sur différentes Bandes Passantes.



**Figure IV.16 :** BER en fonction du SNR pour 16QAM sur différentes Bandes Passantes.



**Figure IV.17 :** BER en fonction du SNR pour 64QAM sur différentes Bandes Passantes.

Le tableau IV.5 représente les valeurs du SNR requises pour atteindre un niveau du BER égale à  $10^{-3}$  pour tous les profiles de modulation.

On observe dans le tableau suivant que le bruit a un niveau plus au moins constant quelles que soient les fréquences (bruit "blanc") : plus l'enregistrement du signal comprend une gamme de fréquence large (bande passante de réception large), plus la proportion de bruit est élevée, et le rapport signal/bruit devient faible.

|                      | BPSK | QPSK | 16QAM | 64QAM |
|----------------------|------|------|-------|-------|
| <b>BW-28 (Mhz)</b>   | 7.8  | 7.5  | 8     | 14    |
| <b>BW-20 (Mhz)</b>   | 8    | 7.8  | 17    | 12    |
| <b>BW-15 (Mhz)</b>   | 8.1  | 5    | 8.5   | 12.3  |
| <b>BW-10 (Mhz)</b>   | 7.6  | 15.5 | 8.3   | 18.5  |
| <b>BW-2.5 (Mhz)</b>  | 8    | 6.6  | 13.5  | 11.8  |
| <b>BW-1.25 (Mhz)</b> | -    | 6    | 9     | 13.5  |

**Tableau IV.5 :** Valeurs de SNR (dB) pour  $BER = 10^{-2}$  des différents bandes passantes pour toutes les modulations.

#### IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé le modèle de la norme IEEE 802.16d. Nous avons pu vérifier le potentiel de chaque bloc en termes de taux d'erreurs bit (BER). Les résultats sont satisfaisants. En premier lieu nous avons relevés les courbes de BER en fonction du SNR pour plusieurs profils de modulation (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM), on a constaté une dégradation des performances quand le nombre d'états de la constellation utilisée augmente. La suite des simulations avait pour but d'évaluer les performances, avec et sans codage de canal, nous avons montré qu'un système de transmission utilisant un codeur de canal présente des performances meilleures qu'un système sans codeur de canal. Ensuite, nous avons présenté l'influence de préfixe cyclique sur les performances de notre système et sur plusieurs modèles du canal de transmission sans fil. En fin, l'impact de la largeur de la bande passante sur le BER en fonction du rapport signal/bruit.

## Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est la mise en œuvre de la couche physique du standard IEEE802.16 utilisant Matlab, afin d'évaluer les performances de ce niveau physique sous le modèle de référence du canal.

Dans le premier chapitre nous avons détaillé l'évolution des réseaux sans fils, Mais même sans accès à Internet, les réseaux de communauté sans fil ont une valeur énorme. Ils permettent aux personnes de collaborer dans des projets, peu importe la distance qui les sépare.

Par la suite nous avons entamé le second chapitre où nous avons présenté l'état de l'art de la technologie WiMAX, nous avons défini les différents aspects des couches Physique (PHY) et MAC du standard 802.16. Finalement, nous avons discuté les topologies WiMAX.

Aussi dans le chapitre trois, nous avons développé la structure d'un simulateur du modèle de l'IEEE 802.16d. Cette étude nous a menées à la réalisation de plusieurs simulateurs respectant la norme en question, tout en supposant une synchronisation idéale.

Enfin au dernier chapitre nous avons simulé le modèle de la norme IEEE 802.16d. Nous avons pu vérifier le potentiel de chaque bloc en termes de taux d'erreurs bit (BER). Les résultats sont satisfaisants.

Le modèle mis en œuvre nécessite encore quelques améliorations. La norme IEEE 802.16 est livrée avec de nombreuses fonctions optionnelles qui peuvent être implémentés pour améliorer encore les performances.

## Bibliographie

- [1] Adil BELHOUJI, « *Études théoriques et expérimentales de systèmes de transmissions MIMO-OFDM ; Mesures actives en environnements réels et maîtrisés dans un contexte WiMAX* », Thèse de Doctorat, Université de Limoges, École Doctorale Science – Technologie – Santé, 2009.
  
- [2] Fabrice LEMAINQUE, « *Tout sur les réseaux sans fils* », édition Dunod, ISBN: 978-2100525690, 246 pages, 2009.
  
- [3] Emmanuel CONCHON, « *Définition et mise en œuvre d'une solution émulation de réseaux sans fil* », Thèse de doctorat, École doctorale : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
  
- [4] Michel VONGVILAY, Gabriel NGUYEN NGOC, Grégory WOLOWIEC, « *Le Bluetooth* », Exposé NT Réseaux, 3<sup>ème</sup> Année Informatique & réseaux, École supérieure d'Ingénieurs Paris-Est Marne-la-Vallée 2005.
  
- [5] Dominique DHORTAUT, « *Étude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad-hoc : de la simulation `a l'expérimentation.* », Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliqués de Lyon, 2003.
  
- [6] Francine KRIEF, « *Les systèmes embarqués communicants : mobilité, sécurité, autonomie* », Hermès Science Publications, Série réseaux et télécoms, ISBN: 978-2746218734, Lavoisier librairie (Ed.), 2008.
  
- [7] Selmen BENSAID, Meriem FERJANI, « *Développement d'un outil de planification d'un réseau WiMAX* », Rapport de Projet de Fin d'Étude pour l'obtention du diplôme de Master en Télécommunications, Université Virtuelle de Tunis, Juillet 2011.
  
- [8] Mohamed Aissa KALACHE, Billel KALACHE, « *Évaluation des performances de la couche physique de la technologie WiMAX/IEEE 802.16* », Projet de Fin d'Étude pour

l'obtention du diplôme de Master en Systèmes de Télécommunications, Université Dr. Yahia Farès de Médéa, 2010/2011.

- [9] Amina Nadjet SEDJELMACI, « *Extension de la QoS du WiFi vers le WiMAX* », Thèse de Magister SIC, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, Faculté de Technologie, Département d'Informatique, 2010-2011.
- [10] Thierry PEYRE, « *Évaluation de performances sur le standard IEEE802.16e WiMAX* », Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2008.
- [11] Alaeddine ABDALLAH, « *Mécanismes Cross-Layer pour le streaming vidéo dans les réseaux WiMAX* », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, École Doctorale de Mathématiques et d'Informatique, 2010.
- [12] Nicolas FOURTY, « *Contribution à l'ingénierie du réseau sans fil WiMAX pour des applications audio d'aide au handicap et aux personnes âgées* », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse II, École Doctorale Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, 2008.
- [13] William LEVEUGLE, « *Des possibilités d'évolution vers le sans fil des réseaux audionumériques pour la sonorisation - Cas des Wireless LAN* », Rapport de Projet de Fin d'Étude, École nationale supérieure (ENS) Louis-Lumière, France, 2012.
- [14] Dib ROGER, « *Conception et validation d'un simulateur de système OFDM pour les réseaux intérieurs sans fil* », Mémoire de maîtrise électronique, Université de Québec, École de Technologie Supérieure, 2003.
- [15] IEEE Std 802.16, “*IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*”, October 2004.