



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE (GEE)



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER en Télécommunication



Option : Réseaux Mobile et Service (RMS)

Présenté par
Melle RESFA Ibtissem

THEME

Intégration de la technologie MIMO dans les réseaux Mesh sans fil

Soutenu en juin 2013 devant un jury composé de

Mr. KAMECHE. S

Président

M.C.B à l'Université de Tlemcen

Mr. ABDELMALEK. A

Examineur

M.C.B à l'Université de Tlemcen

Mr. MERZOUGUI. R

Examineur

M.C.B à l'Université de Tlemcen

Mr. ZERROUKI. H

Encadreur

M.A.A à l'Université de Tlemcen

Remerciement

*Au nom d'Allah le Très Miséricordieux, le Tout Miséricordieux,
à qu'on doit tout,*

On saisit cette occasion pour exprimer notre gratitude et nos vifs remerciements à Monsieur *ZERROUKI Hadj*, Maitre Assistant à l'université Abou-Bekr Belkaïd pour la confiance qu'il nous a accordé, chose qui nous a incités à multiplier nos efforts pour être à la hauteur de leur attente. Veuillez, Messieurs, trouver dans ce travail une reconnaissance sincère pour tout le savoir que vous nous aviez prodigué tout au long de notre cursus avec autant de dynamisme, de compétence et de rigueur. Pour la qualité de votre encadrement, votre rigueur, votre incroyable disponibilité, vos remarques fructueuses et vos directives précieuses.

On remercie également Monsieur *KAMECHE Samir*, Maitre de Conférences à l'Université Abou-Bekr Belkaïd-Tlemcen, de qui a accepté de juger ce travail et d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

On remercie sincèrement Monsieur *ABDELMALEK Abdelhafidh*, Maitre de Conférences à l'Université Abou-Bekr Belkaïd-Tlemcen, et Monsieur *MERZOUGUI Rachid*, Maitre de Conférences à l'Université Abou-Bekr Belkaïd-Tlemcen, d'avoir accepté de rapporter ce mémoire. Pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.

Dédicaces

A celle qui m'a appris à aimer la vie et respecter les autres :

Ma douce Maman

A celui qui m'a appris à toujours garder la tête haute et à ne jamais renoncer à mes rêves :

Mon père

A celle que j'aime et qui m'a soutenue tout au long de ce projet :

Ma sœur Amel

Mon frère Farid

A mon beau frère Mohamed

A ma chère tante Madjida, son mari Benhamou et leurs enfants

Mon chéri Mohamed

A mes meilleurs Amies: Amel, Radia

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

Je vous dis merci

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	ix
Introduction Générale.....	2

Chapitre I : Généralités sur les réseaux sans fil et les réseaux Mesh

I.1 Introduction.....	5
I.2 Qu'est-ce qu'un réseau sans fil ?.....	5
I.3 Classification des réseaux sans fil.....	6
I.3.1 Les WPAN (Wireless Personal Area Networks).....	6
I.3.1.1 Bluetooth.....	6
I.3.1.2 HomeRF	7
I.3.1.3 ZigBee	7
I.3.1.4 Liaisons infrarouges	8
I.3.2 Les WLAN (Wireless Local Area Networks).....	8
I.3.2.1 Le WiFi (IEEE802.11)	8
I.3.2.2 HiperLAN	10
I.3.3 Les WMAN (Wireless Métropolitain Area Networks)	10
I.3.3.1 Le WiMAX (IEEE802.16)	11
I.3.3.2 HiperMAN	12
I.3.4 Les WWAN (Wireless Wide Area Network).....	12
I.3.4.1 GSM (Global System for Mobile Communications).....	12
I.3.4.2 GPRS (General Packet Radio Service).....	13
I.3.4.3 EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)	13
I.3.4.4 L'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)	14
I.3.4.5 LTE (Long Term Evolution)	14
I.4 Les réseaux Mesh (WMNs)	14
I.4.1 Qu'est-ce qu'un WiFi-Mesh ?.....	15

I.4.2 Est-ce que c'est sécuritaire ?.....	15
I.4.3 Problèmes d'un réseau WiFi traditionnel.....	15
I.4.4 Réponses aux problèmes d'un réseau traditionnel.....	15
I.4.5 Topologie d'un réseau Mesh.....	16
I.4.5.1 Topologie maillée complète	16
I.4.5.2 Topologie maillée partielle	17
I.4.6 La différence entre « Mesh » et « Ad-hoc ».....	21
I.4.7 Architectures des réseaux sans fil maillés.....	22
I.4.7.1 Les WMNs basés sur une infrastructure	23
I.4.7.2 Les WMNs basés sur des clients	23
I.4.7.3 Les WMNs hybrides	24
I.5 Conclusion	24

Chapitre II : La technologie MIMO : Etude de la capacité

II.1 Introduction	27
II.2 Les systèmes MIMO.....	27
II.2.1 Principe du MIMO.....	27
II.2.2 Catégories des techniques du MIMO.....	28
II.3 Intérêt de la transmission sur plusieurs antennes.....	29
II.3.1 Limite de Shannon	29
II.3.2 Transmission en diversité spatiale à l'émission (MISO)	30
II.3.3 Transmission en diversité spatiale à la réception (SIMO)	31
II.3.4 Transmission en diversité spatiale en émission et réception (MIMO).....	31
II.4 Modèle de système MIMO	33
II.5 Capacité des canaux MIMO	35
II.5.1 Capacité du canal SISO	36
II.5.2 Capacité du canal SIMO	36
II.5.3 Capacité du canal MIMO.....	37
II.6 Conclusion	40

Chapitre III : Etude analytique de la capacité des réseaux Mesh en configuration MIMO

III.1 Introduction	43
--------------------------	----

III.2 Le Mode d'Accès	44
III.3 Le Modèle du Réseau	45
III.3.1 Topologie Chaine	45
III.3.2 Topologie en Grille	46
III.4 Problème de la configuration de transmission.....	47
III.5 Conclusion.....	51

Chapitre IV : Simulation de la capacité des réseaux Mesh en configuration MIMO

IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Méthodologie de simulation.....	53
IV.2.1 Logiciel de simulation.....	53
IV.2.2 Paramètres de simulation	53
IV.3 Résultats numériques et discussion.....	53
IV.3.1 La Topologie Chaine.....	53
IV.3.2 La Topologie Grille.....	60
IV.4 Conclusion	63
Conclusion Générale	66
Bibliographie.....	69

Introduction générale

Des chercheurs s'intéressent aux communications sans fil pour les défis qu'elles offrent. En effet, deux principaux aspects de la communication sans fil continuent à motiver et à passionner les chercheurs. Premièrement, le phénomène de l'évanouissement qui engendre des variations de la qualité du canal radio durant les transmissions des données. Ainsi, le canal peut être bon ou mauvais dépendamment du niveau de l'évanouissement qu'il subit. Nous pouvons ici faire l'analogie avec le monde de l'électricité où nous parlons de bon conducteur et de mauvais conducteur à la seule différence que dans le domaine de la communication sans fil, le même canal radio peut changer d'état avec le temps. Deuxièmement, contrairement aux communications filaires où une paire émetteur-récepteur peut être considéré comme un lien point à point isolé, dans le monde de la communication sans fil, les nœuds communiquent en diffusant les données par un média radio partagé. Par conséquent, le phénomène d'interférence peut exister entre les différents paires émetteur-récepteur. Quelles sont les techniques à employer afin de faire face à ces deux problèmes est une question centrale dans le domaine de la communication sans fil.

Une partie de la réponse est donnée par les réseaux sans fil maillés (WMNs). Ce type de réseau est généralement utilisé comme une dorsale sans fil. Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels où les stations de base communiquent par des liens filaires, dans les WMNs les stations de base appelées aussi routeurs Mesh utilisent des liens radio. Cette spécificité simplifie considérablement l'installation, la modification et la maintenance des WMNs et réduit le coût de celles-ci par rapport aux réseaux sans fil traditionnels.

Un autre but qui consiste à l'augmentation de l'efficacité spectrale du canal radio. Pour atteindre ce nouveau but, les systèmes de communication sans fil à antennes multiples appelés communément MIMO pour 'Multiple Input Multiple Output' sont nés. Grâce à ces antennes, les systèmes MIMO introduisent une nouvelle dimension spatiale qui s'ajoute à la dimension temporelle traditionnellement présente dans le traitement des signaux numériques. Cette nouvelle dimension donne aux systèmes MIMO la possibilité de tirer avantage du phénomène de l'évanouissement considéré habituellement comme un handicap pour les transmissions sans fil.

Pour cela, on s'intéresse dans ce projet de fin d'étude à l'utilisation de cette technique, moins coûteuse et plus fiable. L'intégration des systèmes MIMO dans le réseau sans-fil Mesh promet des performances fortes intéressantes.

Le premier objectif de ce travail est d'analyser la capacité théorique des réseaux Mesh sans-fil utilisant des systèmes MIMO. Nous allons analyser la capacité pour différentes topologies de réseaux Mesh et comparer leurs performances. Le second objectif est de formuler le problème de la configuration de transmission qui paraît un point à ne pas négliger dans le dimensionnement des réseaux Mesh et qui pourra aider dans la conception de nouvelles techniques de transmission dans le réseau. Ainsi, les contributions apportées par ce travail sont les suivantes:

1. Analyse de la Capacité des réseaux *Mesh* utilisant les systèmes MIMO.
2. Formulation du problème de la configuration de transmission.

Le reste du document est organisé comme suit:

Dans *le premier chapitre* nous introduisons les réseaux sans fil et les réseaux maillés. Nous détaillons les architectures des WMNs et décrivons les différences entre les WMNs et les réseaux sans fil traditionnels. Nous présentons aussi les améliorations apportées par les réseaux WMNs.

Le deuxième chapitre est consacré aux systèmes MIMO. Nous nous intéressons tout particulièrement à la notion de la capacité qui constitue la métrique principale pour l'évaluation des performances d'un système de communication sans fil. Nous exposons les résultats de la théorie d'information, notamment la relation de la capacité de Shannon. Par cette notion de capacité, nous montrons les améliorations en termes de performances apportées par les systèmes MIMO.

Dans *le troisième chapitre*, nous expliquons l'intégration de MIMO dans les réseaux Mesh ainsi que la méthodologie de calcul de la capacité du réseau. Nous présentons aussi le problème de la configuration de transmission dans un tel réseau.

Le quatrième chapitre présente les résultats numériques obtenus et nous discutons les performances du réseau selon les paramètres considérés dans chaque cas par des simulations. Ces dernières sont réalisées en utilisant le logiciel MATLAB® qui dispose d'une riche bibliothèque pour les calculs matriciels.

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

I.1 Introduction :

Un réseau est un ensemble des nœuds reliés entre eux par des liens ou canaux de communication dans le but d'échanger des informations. Selon le type des nœuds, on distingue : les réseaux de télécommunication dans lesquels les nœuds sont les stations mobiles (MS), les stations de base (BTS), les contrôleurs des stations de base (BSC), les commutateurs (MSC) ; et les réseaux informatiques dans lesquels les nœuds sont les ordinateurs, les imprimantes, les routeurs, les switches ou tout autre équipement informatique. Selon le type de canaux de communication, on distingue : les réseaux filaires qui utilisent un canal de transmission matériel (le câble coaxial, les paires torsadées, la fibre optique) et les réseaux sans fils [4].

Les réseaux sans fil maillés (Wireless Mesh Networks : WMNs) sont considérés de nos jours comme une nouvelle solution prometteuse pour supporter plusieurs applications, par exemple, le réseautage large bande sans fil à domicile, les systèmes de transport intelligents, la connectivité des zones rurales. Les WMNs intéressent particulièrement les fournisseurs d'accès à Internet pour garantir une connexion large bande sans fil robuste et fiable à un coût raisonnable [2].

Un réseau sans fil maillé (WMN) est composé de deux types de nœuds : les clients Mesh et les routeurs Mesh. Ces derniers construisent un réseau dorsal sans fil qu'un client Mesh peut utiliser pour accéder à Internet ou simplement pour communiquer avec d'autres clients. En outre, les routeurs Mesh établissent et maintiennent automatiquement la connectivité dans la dorsale, ce qui augmente la fiabilité et la robustesse du réseau [2].

Un autre point fort des réseaux sans fil maillés est l'utilisation de la communication sans fil multi-saut entre les routeurs Mesh (Multi-Hop Networking). Cette caractéristique améliore grandement la couverture radio du réseau [1].

I.2 Qu'est-ce qu'un réseau sans fil ?

Un réseau sans fil (Wireless Network en anglais) est un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire.

Grâce aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité".

Les réseaux sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes radio-électriques (radio et infrarouges) [4].

I.3 Classification des réseaux sans fil :

Il existe plusieurs normes de réseaux sans fils, en fonction de la fréquence, du débit et de la portée (distance) :

- Réseaux personnels sans fil WPAN (Wireless Personal Area Network).
- Réseaux locaux sans fil WLAN (Wireless Local Area Network).
- Réseaux métropolitains sans fil WMAN (Wireless Metropolitan Area Network).
- Réseaux étendus sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network) [4].

La classification des réseaux se fait en fonction de la taille (Figure I.1):

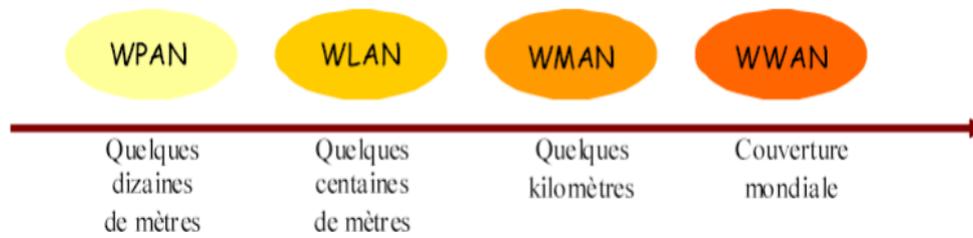


Figure I.1: Classification des réseaux sans fil suivant leur taille

I.3.1 Les WPAN (Wireless Personal Area Networks):

Le réseau personnel sans fil appelé également réseau individuel sans fil noté WPAN pour Wireless Personal Area Network) concerne les réseaux sans fil d'une faible portée, de l'ordre de quelques dizaines 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 [5].

I.3.1.1 Bluetooth :

Connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, est la principale technologie WPAN lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1 Mb/s pour une portée maximale d'une trentaine de mètres, possède l'avantage d'être très peu gourmande en énergie, ce qui la rend

particulièrement adaptée à une utilisation au sein de petits périphériques. Bluetooth est une technologie qui utilise la bande 2,4 GHz. Bluetooth définit trois classes d'émetteur proposant des portées différentes en fonction de leur puissance d'émission (Table I.1) [5] :

Classe	Puissance	Portée
I	100 mW	100 m
II	2.5 mW	15-20 m
III	1 mW	10 m

Table I.1: les classes du Bluetooth

1.3.1.2 HomeRF :

HomeRF (Home Radio Frequency), lancée en 1998 par le HomeRF Working Group (formé notamment par les constructeurs Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Siemens, Motorola et Microsoft). Le HomeRF propose un débit théorique de 10 Mb/s avec une portée d'environ 50 à 100 mètres sans amplificateur [5].

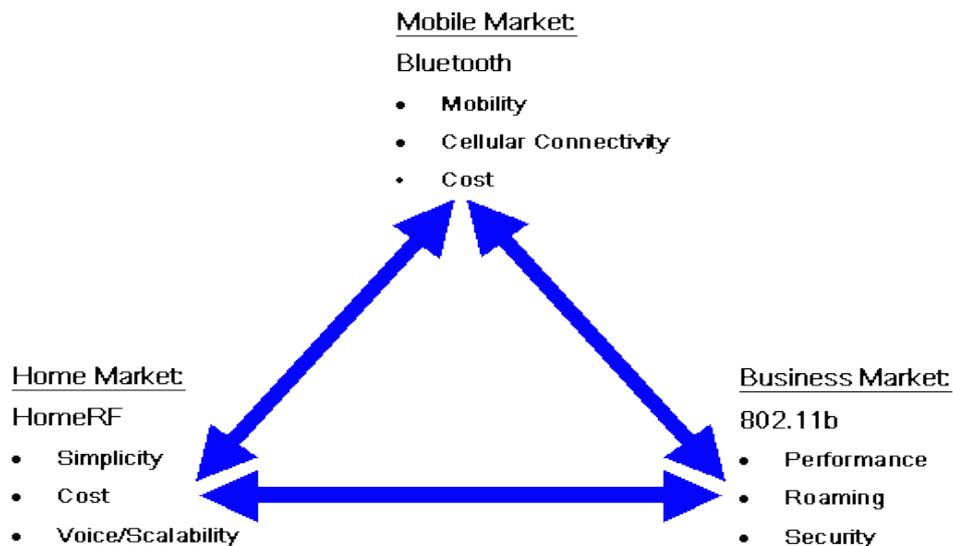


Figure I.2: Comparaison des caractéristiques HomeRF, Bluetooth et WiFi

1.3.1.3 ZigBee :

La technologie ZigBee est une technologie radio basée sur le standard IEEE802.15.4, permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans des petits appareils électroniques.

La technologie ZigBee, opérant sur la bande de fréquences des 2,4 GHz et sur 16 canaux, permet d'obtenir des débits pouvant atteindre 250 Kb/s avec une portée maximale de 100 mètres environ.

ZigBee a pour transporter les commandes essentiellement et non pas les données. Il existe deux versions de ZigBee :

- IEEE802.15.4 : qui permet de communiquer de 250Kb/s jusqu'à 100 mètres pour relier de maximum 250 appareils, à une bande de fréquence de 2.4Ghz
- IEEE802.15.4.a : qui est limité a 20Kb/s mais permet une portée de 75 mètres pour un maximum de 65000 appareils, à une bande de fréquence de 900GHz (USA) [6].

1.3.1.4 Liaisons infrarouges :

Les liaisons infrarouges permettent de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée pour la domotique (télécommandes,...) mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses. L'association irDA (infrared Data Association) formée en 1995 regroupe plus de 150 membres. L'infrarouge (IR) ne peut pas pénétrer les murs et autres obstacles, il ne permet qu'une connexion biunivoque (de type un à un) [5].

1.3.2 Les WLAN (Wireless Local Area Networks):

Un WLAN est un réseau qui permet de relier des ordinateurs portables, des machines de bureau, des PDA ou tous types de périphérique sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres en intérieur, généralement entre 20 et 50 mètres à plusieurs centaines de mètres en environnement ouvert. Un WLAN est constitué d'un point d'accès (AP : Access Point) équipé d'une antenne (ou plusieurs) et d'une interface réseau Ethernet (ou plusieurs) standard. Chaque point d'accès forme une zone de couverture radio appelée « cellule ». L'ensemble des cellules constitue le WLAN [4].

1.3.2.1 Le WiFi (IEEE802.11) :

Le WiFi (Wireless Fidelity), nom commercial pour la technologie de transmission radio IEEE802.11x utilisée par les WLAN. Le WiFi est une technologie permettant de créer des réseaux informatiques sans fil. Il s'agit d'une norme de l'IEEE802.11 [4]. Sa portée varie entre

quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres, ce qui en fait une technologie de premier choix pour le réseau domestique avec connexion internet. La table suivante regroupe les principales normes 802.11 et leur signification [7]:

Norme	Nom	Description
802.11a	WiFi 5	La norme 802.11a permet d'obtenir un haut débit dans un rayon de 10 mètres : 54 Mbit/s théoriques, 27 Mbit/s réels. La norme 802.11a spécifie 52 canaux de sous-porteuses radio dans la bande de fréquences des 5 GHz
802.11b	WiFi	La norme 802.11b est la norme la plus répandue en base installée actuellement. Elle propose un débit théorique de 11 Mbit/s (6 Mbit/s réels) avec une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres (en théorie) dans un environnement dégagé. La plage de fréquences utilisée est la bande des 2,4 GHz. La modulation utilisable est au choix : CCK, DBPSK ou DQPSK.
802.11n	WWiSE (<i>World-Wide Spectrum Efficiency</i>) ou TGn Sync	La norme 802.11n est disponible depuis le 11 septembre 2009. Le débit théorique atteint les 300 Mbit/s (débit réel de 100 Mbit/s dans un rayon de 100 mètres) grâce aux technologies MIMO et OFDM. Le 802.11n a été conçu pour pouvoir utiliser les fréquences 2,4 GHz ou 5 GHz.
802.11s	Réseau Mesh	La norme 802.11s est actuellement en cours d'élaboration. Le débit théorique atteint aujourd'hui 10 à 20 Mbit/s. Elle vise à implémenter la mobilité sur les réseaux de type Ad-Hoc. Tout point qui reçoit le signal est capable de le retransmettre. Elle constitue ainsi une toile au-dessus du réseau existant.

Table I.2: Les différentes normes IEEE 802.11 :

Les normes 802.11a, 802.11b et 802.11g, appelées «normes physiques» correspondent à des révisions du standard 802.11 et proposent des modes de fonctionnement, permettant d'obtenir différents débits en fonction de la portée (table I.3) [7].

Standard	Bande de fréquence	Débit	Portée
802.11a	5 GHz	54 Mbit/s	10 m
802.11b	2.4 GHz	11 Mbit/s	100 m
802.11g	2.4 GHz	54 Mbit/s	100 m

Table I.3: Portées et débits :

Un réseau WiFi peut fonctionner de deux manières différentes :

- **Le mode Infrastructure** : avec ce mode, tout est géré par un point d'accès, les données qu'un hôte émet lui sont transmises et lui seul les renvoie aux autres membres du réseau. Ce mode est le plus utilisé car il est bien plus fiable (figure I.3a).
- **Le mode Ad-Hoc** : avec ce mode, vous n'avez pas besoin de point d'accès pour gérer le réseau, chaque membre du réseau retransmet les informations qu'il reçoit aux autres membres du réseau. Il a l'avantage de ne pas coûter cher (aussi appelé d'ordinateur à ordinateur) (figure I.3b) [5].

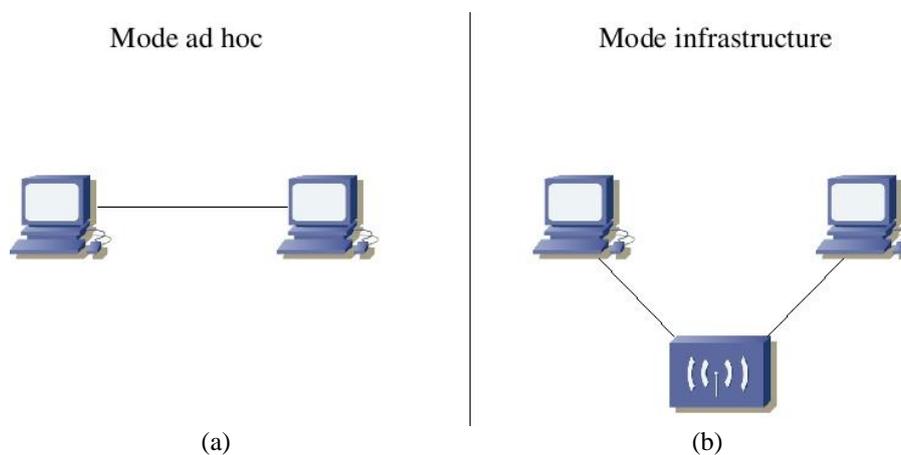


Figure I.3 : Modes de fonctionnement du WiFi :

I.3.2.2 HiperLAN :

HiperLAN (ou High performance radio LAN) est un standard européen de télécommunications créé par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) et développé par le groupe technique BRAN (Broadband Radio Access Networks). Ce standard est une alternative au groupe de normes Wi-Fi. L'HiperLAN est totalement ad hoc, il ne requiert aucune configuration, aucun contrôleur central. Opérant avec un débit théorique maximum de 23,5 Mb/s dans une bande passante dédiée comprise entre 5,1 GHz et 5,3 GHz, l'HiperLAN n'a jamais reçu de soutien de la part des leaders du marché des composants RLR [5].

I.3.3 Les WMAN (Wireless Métropolitain Area Networks):

Le réseau métropolitain sans fil 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 Km, ce qui destine principalement cette

technologie aux opérateurs de télécommunication. C'est dans cette catégorie que l'on classe le WiMAX [8].

I.3.3.1 Le WiMAX (IEEE802.16):

Le WiMAX signifie Worldwide Interoperability for Microwave Access. Il s'agit d'un ensemble de normes techniques basées sur le standard de transmission radio 802.16 permettant la transmission de données IP haut débit par voie hertzienne. Le débit théorique maximum supporté par le WiMAX est de 70 Mbits/s sur une distance théorique de plusieurs dizaines de kilomètres [4, 8].

Les révisions du standard IEEE 802.16 se déclinent en deux catégories (figure I.4):

- **WiMAX fixe** : également appelé *IEEE 802.16d* est prévu pour un usage fixe avec une antenne montée sur un toit, à la manière d'une antenne TV. Le WiMAX fixe opère dans les bandes de fréquence 2.5 GHz et 3.5 GHz, pour lesquelles une licence d'exploitation est nécessaire, ainsi que la bande libre des 5.8 GHz.
- **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 hauts débit [8, 5].

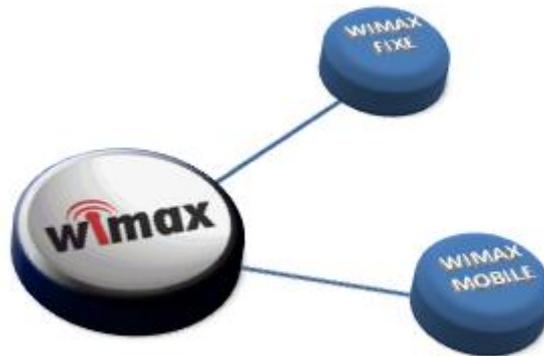


Figure I.4: Types de WiMAX :

Les différents standards WiMAX sont regroupés dans la table I.4 [8].

Standard	Spécification
IEEE std 802.16	Définit des réseaux métropolitains sans fil sur des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz.
IEEE std 802.16a	Définit des réseaux métropolitains sans fil sur des bandes de fréquences

	comprises entre 2 et 11 GHz.
IEEE 802.16b	Définit des réseaux métropolitains sans fil dans les bandes de fréquences comprises entre 10 et 60 GHz.
IEEE std 802.16c	Définit des options (profils) pour les réseaux métropolitains sans fil dans les bandes de fréquences libres.
IEEE 802.16d	Révision intégrant les standards 802.16, 802.16a et 802.16c.
IEEE std 802.16 ^e	Définit la possibilité d'utilisation de réseaux métropolitains sans fil avec des clients mobiles.
IEEE std 802.16f	Définit la possibilité d'utilisation de réseaux sans fil maillés (<i>Mesh network</i>).

Table I.4: Les normes WiMAX :

1.3.3.2 HiperMAN

HiperMAN (pour High performance radio Metropolitan Area Network) est l'évolution de la norme HiperLAN introduite par l'ETSI. Il permet d'avoir des liaisons à très haut débit du type point à multipoints avec une portée de 5 km [4].

1.3.4 Les WWAN (Wireless Wide Area Network):

Les réseaux étendus sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) sont également connus sous le nom de réseaux cellulaires mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes [9] :

- GSM (Global System for Mobile Communications),
- GPRS (General Packet Radio Service),
- EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution),
- UMTS (Universal Mobile Telecommunications System),
- LTE (Long Term Evolution),

1.3.4.1 GSM (Global System for Mobile Communications):

Global System for Mobile Communications (GSM) est une norme numérique de deuxième génération (2G) pour la téléphonie mobile, c'est la base des réseaux cellulaires. Elle a été spécifiée et mise au point par l'ETSI pour la gamme de fréquences des 900 MHz. Une variante appelée Digital Communication System (DCS) utilise la gamme des 1 800 MHz.

Cette norme est particulièrement utilisée en Europe, en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie [9].

Une comparaison entre le GSM-900 et DCS-1800 est représentée sur la table I.5.

	GSM	DCS-1800
Bande de fréquences (↑)	890, 2 - 915 [MHz]	1710 - 1785 [MHz]
Bande de fréquences (↓)	935, 2 - 960 [MHz]	1805 - 1880 [MHz]
Nombre d'intervalles de temps par trame TDMA	8	8
Débit total par canal	271 [kb/s]	271 [kb/s]
Débit de la parole	13 [kb/s]	13 [kb/s]
Débit maximal de données	12 [kb/s]	12 [kb/s]
Technique de multiplexage	fréquentiel et temporel	fréquentiel et temporel
Rayon de cellules	0, 3 à 30 [km]	0, 1 à 4 [km]
Puissance des terminaux	2 à 8 [W]	0, 25 et 1 [W]
Sensibilité des terminaux	-102 [dB]	
Sensibilité de la station de base	-104 [dB]	

Table I.5: Comparaison des systèmes GSM et DCS-1800

1.3.4.2 GPRS (General Packet Radio Service):

Le General Packet Radio Service ou GPRS est une norme pour la téléphonie mobile dérivée du GSM et complémentaire de celui-ci, permettant un débit de données plus élevé. On le qualifie souvent de 2,5G. Le GPRS est une extension du protocole GSM, il ajoute par rapport à ce dernier la transmission par paquets. Cette méthode est plus adaptée à la transmission des données. En effet, les ressources ne sont allouées que lorsque des données sont échangées, contrairement au mode « circuit » en GSM où un circuit est établi pour toute la durée de la communication [4, 9].

1.3.4.3 EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution):

Enhanced Data Rates for GSM Evolution est une norme de téléphonie mobile, une évolution du GPRS qui est une extension de GSM avec rétrocompatibilité. Il est connu aussi sous les noms Enhanced GPRS (EGPRS). EDGE est considéré comme une technologie pré-3G. Le EDGE se révèle être un complément d'un réseau UMTS pour offrir des services à haut débit à davantage d'utilisateurs en zone rurale ou zone suburbaine non dense qu'à ceux en zone urbaine, et d'autre part, peut être une étape en vue du lancement d'un réseau 3G qui est

une meilleure solution pour les utilisateurs en zone urbaine dense. Le débit maximal a été fixé à 384 kbit/s par l'ITU (International Telecommunication Union) [9].

1.3.4.4 L'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) :

L'UMTS est une norme de téléphonie mobile de 3^{ème} génération. C'est la raison pour laquelle on parle aussi de "3G" pour désigner les réseaux UMTS, ou les téléphones UMTS. On parle de 3G en référence au réseau 2G (GSM), de 2,5G (GPRS) et de 2,75G (EDGE), car il permet d'offrir des services supplémentaires (tels que la visiophonie, la télévision...) grâce à des débits supérieurs [4].

Pour utiliser les services des réseaux UMTS, il faut un téléphone UMTS (appelé téléphone UMTS, 3G ou bi-mode). Les téléphones UMTS sont compatibles avec le réseau GSM. Avec un téléphone UMTS, il est donc possible de téléphoner de la même manière qu'on le fait actuellement avec téléphone mobile [4].

1.3.4.5 LTE (Long Term Evolution):

Le LTE (Long Term Evolution) est l'évolution la plus récente des normes de téléphonie mobile GSM/GPRS, EDGE et UMTS. La norme LTE, définie par le consortium 3GPP, a d'abord été considérée comme une norme de troisième génération « 3.9G » (car proche de la 4G), spécifiée dans le cadre des technologies IMT-2000, car dans les « versions 8 et 9 » de la norme, elle ne satisfaisait pas toutes les spécifications techniques imposées pour les normes 4G par l'Union internationale des télécommunications [4].

Le LTE utilise des bandes de fréquences hertziennes d'une largeur pouvant varier de 1,4 MHz à 20 MHz, permettant ainsi d'obtenir (pour une bande 20 MHz) un débit binaire théorique pouvant atteindre 300 Mbit/s en « liaison descendante » (downlink, vers le mobile) ; la "vraie 4G", appelée LTE Advanced1 offrira un débit descendant pouvant atteindre 1 Gbit/s; ce débit nécessitera l'utilisation de bandes de fréquences de 2x100 MHz de largeur qui sont définies dans la version 10 (3GPP release 10) de la norme LTE Advanced [9].

1.4 Les réseaux Mesh (WMNs) :

Le réseau Mesh (ou réseau maillé) est une topologie de réseau qualifiant les réseaux filaires ou non dont tous les hôtes sont connectés pair à pair sans hiérarchie centrale, formant

ainsi une structure en forme de filet. Par conséquent, chaque nœud doit recevoir, envoyer et relayer les données [1]. Cela évite d'avoir des points sensibles, qui en cas de panne, coupent la connexion d'une partie du réseau. Si un hôte est hors service, ses voisins passeront par une autre route. C'est une technologie de rupture comparée aux solutions centralisées classiques sans-fil avec station de base. Elle permet aussi la connexion et la déconnexion de nouveaux relais sans recourir à la configuration manuelle et fastidieuse du réseau [2].

1.4.1 Qu'est-ce qu'un WiFi-Mesh ?

Un WiFi Mesh est un réseau WiFi avec une topologie maillée. C'est-à-dire que tous les points d'accès sont reliés de proche en proche sans hiérarchie centrale. Concrètement, les gens installent des routeurs chez eux sur lesquels roule une application de routage via Mesh qui automatiquement recherche des voisins, accessibles via les ondes WiFi, qui roulent le même protocole et se connectent à eux. Les utilisateurs se connectent à un point d'accès comme à n'importe quel autre point d'accès WiFi et font alors partie du réseau Mesh et accèdent à tout le contenu disponible depuis cet hôte [10].

1.4.2 Est-ce que c'est sécuritaire ?

Le Mesh n'est pas plus ni moins sécuritaire que d'autres réseaux sans fil publics tels celui d'île sans fil. Pour permettre l'accès à tous au Mesh, les points d'accès sont non sécurisés. De même, le protocole de communication entre les hôtes utilise une connexion non sécurisée. L'utilisateur est donc responsable de la sécurité de sa navigation, en s'assurant d'être bien en *https* sur les sites demandant authentification [2].

1.4.3 Problèmes d'un réseau WiFi traditionnel :

Un réseau WiFi «classique» dépend du réseau Ethernet, cela les rend difficiles à modifier (déplacement d'une borne), difficiles à étendre et ils sont difficiles à administrer, c'est-à-dire impossible de savoir si une borne fonctionne bien ou mal sans essayer chaque borne une à une [11].

1.4.4 Réponses aux problèmes d'un réseau traditionnel :

Les réseaux WiFi Mesh ne nécessitent pas que tous les points d'accès soient reliés à une prise Ethernet. Les points d'accès (AP) sont capables de répéter le signal des autres AP

automatiquement et d'adapter leur fonctionnement si un point d'accès devient défaillant. Ils sont administrables depuis une interface web, sans être physiquement présent sur le lieu d'utilisation [11].

1.4.5 Topologie d'un réseau Mesh :

Une topologie maillée correspond à plusieurs liaisons point à point. (Une unité réseau peut avoir $(1, N)$ connexions point à point vers plusieurs autres unités). Chaque terminal est relié à tous les autres. L'inconvénient est le nombre de liaisons nécessaires qui devient très élevé, lorsqu'il y a N terminaux, le nombre de liaisons nécessaires est de $\frac{N(N-1)}{2}$, fonction qui croît comme N^2 . Cette topologie se rencontre dans les grands réseaux de distribution (Exemple : Internet) [1, 2].

Il y a 2 types de topologies maillées : le maillage complet et le maillage partiel.

1.4.5.1 Topologie maillée complète :

La topologie maillée complète (full Mesh) (figure I.5) est caractérisée par le fait que chaque nœud dans un realm (royaume, réseau logique) est connecté à tous les autres nœuds. Ce type de topologie offre un haut niveau de redondance, dans le cas où un nœud subit un dysfonctionnement, le trafic réseau peut prendre la direction de n'importe quel autre nœud. Un maillage sans fil complet est difficile à mettre en place à grande échelle en utilisant des Mesh AP. Cependant, les petites zones telles que des bureaux ou des petits campus peuvent s'avérer idéales. Alors le déploiement d'une topologie maillée complète est difficile [1].

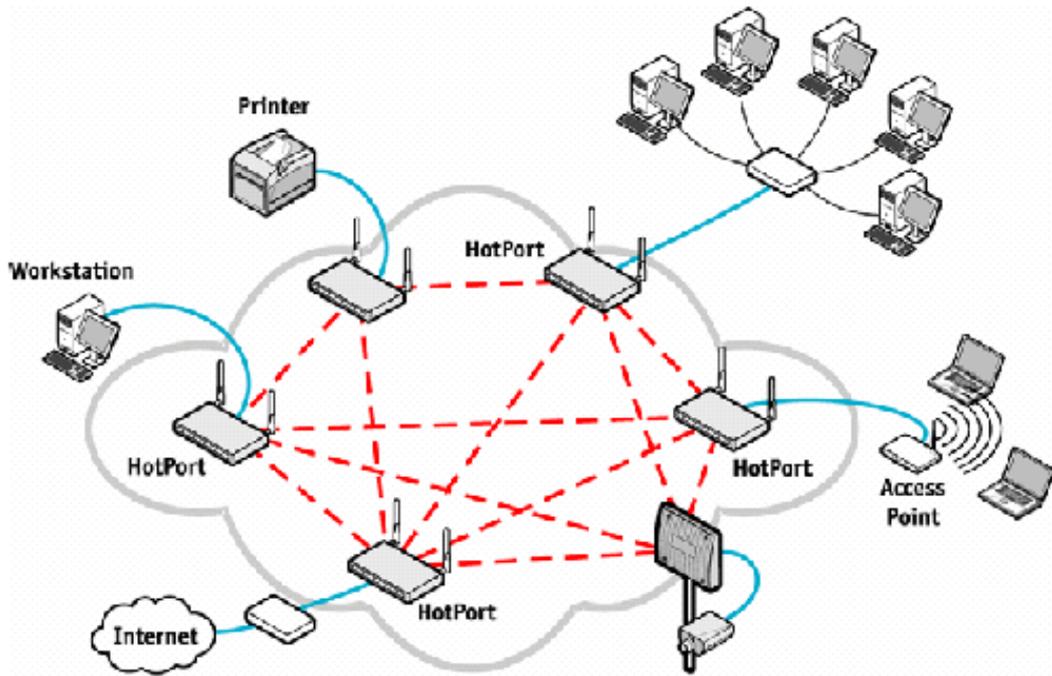


Figure I.5: Une topologie maillée complète

1.4.5.2 Topologie maillée partielle:

La topologie maillée partielle (figure I.6) offre moins de redondance que la topologie maillée complète. Avec un maillage partiel, certains nœuds sont organisés selon un schéma de maillage complet mais les autres sont seulement connectés à un ou plusieurs nœuds dans le realm. Cette topologie est utilisée aussi bien au sein de petits ou grands réseaux [2].

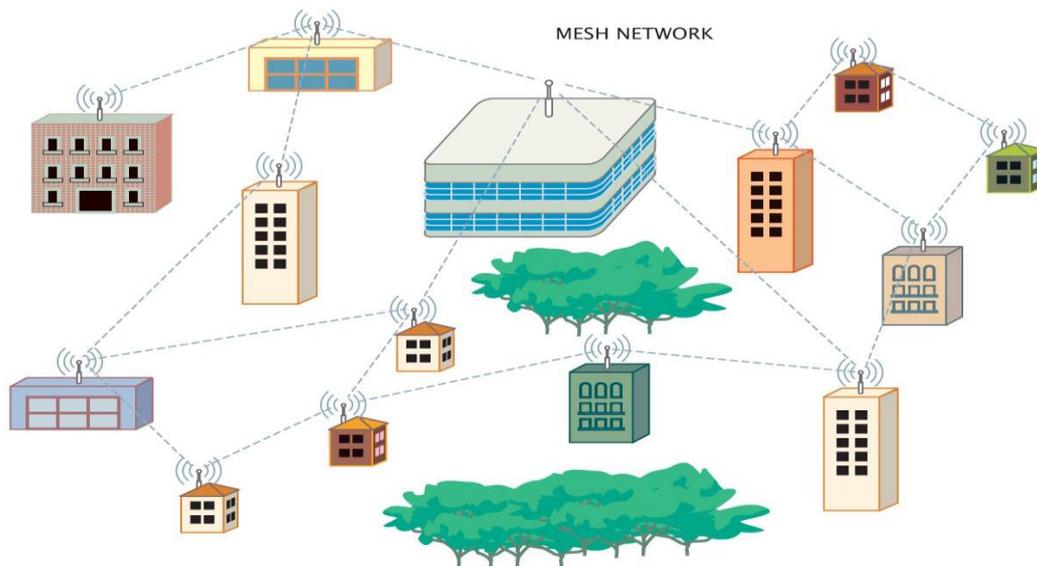


Figure I.6 : Une topologie maillée partielle.

Il y a 4 types principaux de topologies maillées partielles sans-fil [12]:

- Point-à-point.
- Point-à-multipoints ou multipoints-à-point.
- Multipoints-à-multipoints.
- Métropolitain.

A. Topologie à nœuds point-à-point

Un réseau *point-à-point* (figure I.7) est la plus simple forme de réseau sans fil, composée de 2 cartes radio et 2 antennes à haut gain en communication directe. Les liens point-à-point sont souvent utilisés afin de fournir des connections à hautes performances ou des liens d'interconnexions à grande vitesse. Ces liens sont rapides à déployer individuellement, mais ne sont pas adaptés à la création d'un réseau important. Les clients utilisent ces nœuds en configuration site-à-site [12].

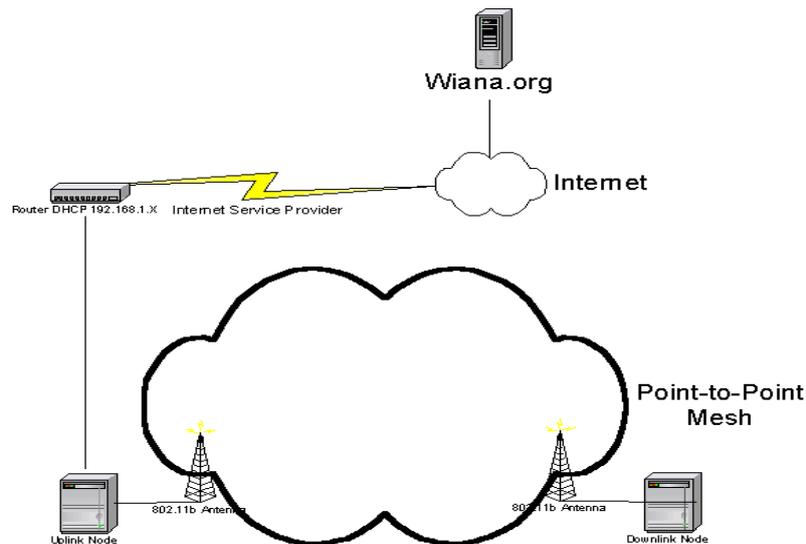


Figure I.7: Topologie à nœuds point-à-point

B. Topologie à nœuds point-à-multipoints :

Les nœuds point-à-multipoint ou multipoint-à-point (figure I.8) partagent le lien entre un nœud « Uplink » avec une antenne omnidirectionnelle et des nœuds répéteurs ou « Downlink » pourvus d'antennes à haut gain. Ce type de réseau est plus facile à déployer qu'un réseau point-à-point parce que l'ajout d'un nouveau participant ne nécessite qu'un

déploiement de l'équipement sur le site du participant, et non au niveau du nœud « Uplink » [2, 12].

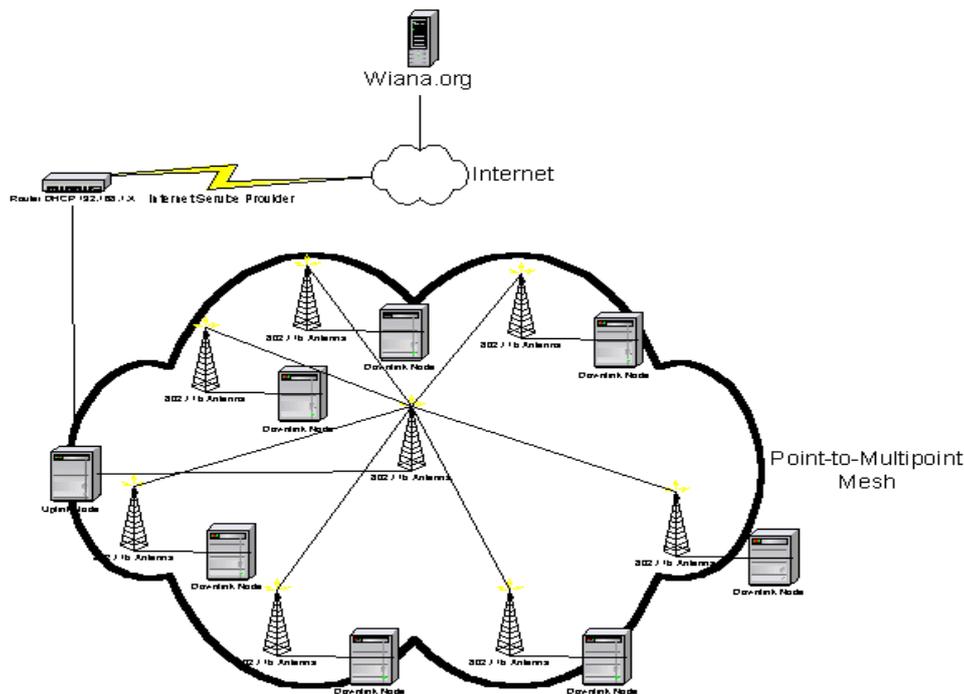


Figure I.8 : Topologie à nœuds point-à-multipoints

Cependant, chaque site distant doit être dans le champ et avoir une ligne de vue dégagée par rapport à la station de base [1]. Les nœuds font office de ponts vers le réseau d'Uplink et sont généralement en configuration filaire pour les clients. Le problème de cette topologie est que ses nœuds ne sont pas conçus pour se mailler avec d'autres nœuds à cause des antennes directionnelles [12].

C. Topologie à nœuds multipoints

Les réseaux multipoints-à-multipoints (figure I.9) créent une topologie maillée routée qui copie celle de l'Internet filaire. Pour construire un réseau maillé, l'accès intérieur ou extérieur à Internet est tout d'abord établi par le déploiement d'un concentrateur d'accès connecté à un ISP filaire. Des routeurs d'accès supplémentaires sont alors déployés au sein de la zone de couverture jusqu'à ce qu'une densité maximum soit atteinte [12, 2].

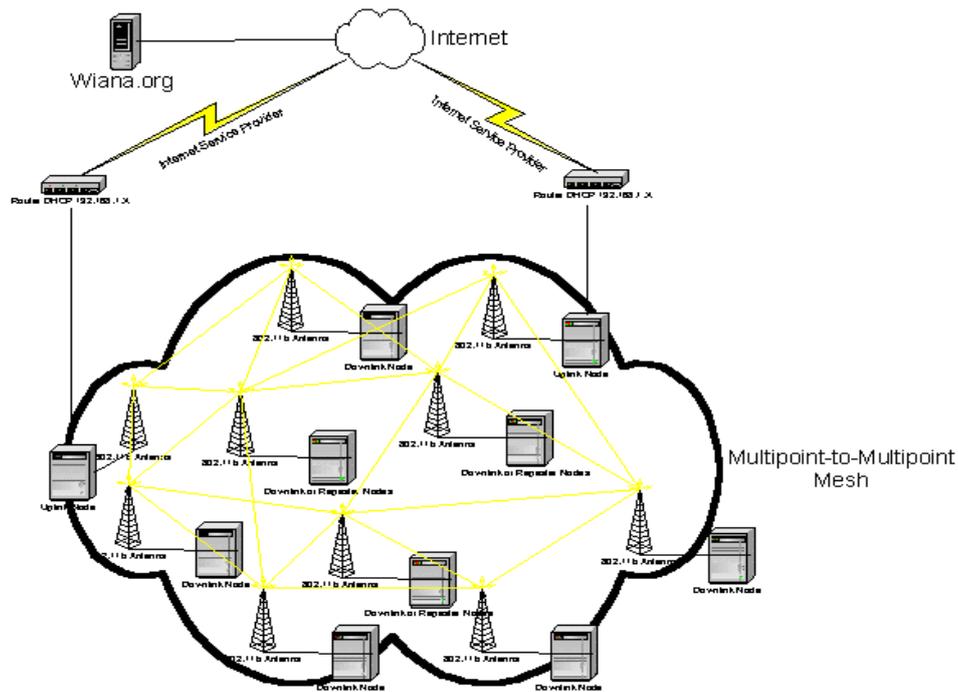


Figure I.9 : Topologie à nœuds multipoints

Chaque routeur d'accès ne fournit pas seulement un accès pour les utilisateurs associés, mais devient également une partie de l'infrastructure du réseau en routant le trafic à travers le réseau sur plusieurs sauts (Hops). Ceci permet à n'importe quel client de rejoindre le réseau par n'importe quel point du maillage, même si les clients n'utilisent pas un nœud. Le client peut accéder à tout le maillage sans fil ou filaire, faisant de cette topologie le meilleur choix de déploiement pour les zones nécessitant des Mesh AP à haute couverture [2].

D. Topologie à nœuds métropolitains :

La topologie à nœuds métropolitains (figure I.10) utilise les deux types de réseaux maillés. On les nomme « Backhaul » et « Last Mile » [1].

Les «*Backhaul*» sont soit des topologies point-à-point, soit des topologies point-à-multipoints. Leur conception vise à fournir un *Backbone* aux nœuds « Uplink ». Les nœuds utilisent deux antennes, une étant directionnelle vers l'Uplink, l'autre fournissant la connexion au dernier kilomètre (last mile). Cette dernière antenne est souvent omnidirectionnelle [12].

Les clients n'utilisent pas le *Backhaul* en tant que point d'accès. Sa mission principale est d'amener de la bande passante à différentes parties du « Last Mile ». Les nœuds « Uplink » dans le *Backhaul* fournissent des connexions multi-redondantes à l'Internet filaire et ont plus

de capacité que les 11Mbps radio. En fonction de la zone à couvrir, un certain nombre de *Backhaul* peuvent d'avérer indispensable pour couvrir une grande ville [12, 1].

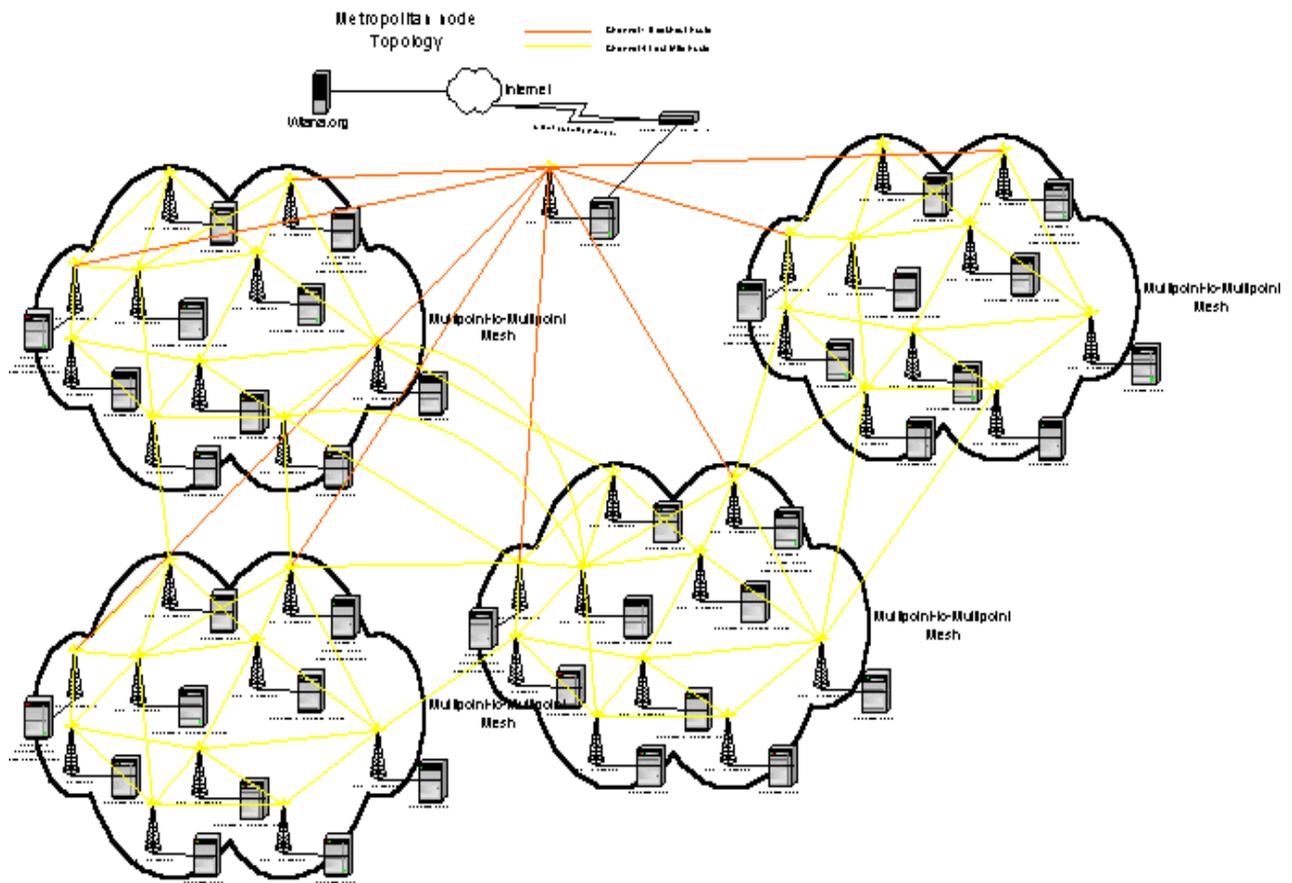


Figure I.10 : Une topologie maillée métropolitain

Le “Last Mile” (le dernier kilomètre) est une topologie multipoints-à-multipoints. Ses nœuds ont une seule carte radio reliée à une antenne omni et sont reliées à l’antenne omni du *Backhaul* [12]. La différence entre les topologies « Last Mile » et « Multipoints-à-multipoints » est que la connexion Internet ne vient pas d’un routeur filaire mais du maillage *Backhaul* via un point central. La complexité augmente quand on ajoute une seconde carte radio à un nœud ou différents types d’antennes [2, 12].

1.4.6 La différence entre « Mesh » et « Ad-hoc » :

Dans un monde du sans fil dominé par WiFi, les architectures combinant le Mesh Networking et les connexions “ad hoc” portent en elles les germes d’une révolution basée sur la simplicité de mise en œuvre et la décentralisation poussée à son extrême [5]. Au point que Mesh, ad hoc et WiFi pourraient bien devenir synonymes, et donner aux utilisateurs “les clés

du pouvoir du réseau”. On notera qu’une confusion fréquente consiste à assimiler les réseaux “Mesh” et les réseaux “ad hoc”, et les deux avec WiFi [2, 5, 12].

Le concept de réseau “ad hoc” correspond au fait que chaque élément rejoint le réseau de façon immédiate, au besoin (en général, l’élément est identifié par son adresse réseau, reconnue spontanément) [12].

Mesh, comme nous l’avons dit, implique simplement que les éléments du réseau sont connectés les uns aux autres et plus exactement, en pratique, à leurs plus proches voisins. Il s’agit d’un type de réseau, pour les infrastructures, équivalent aux réseaux “peer to peer” utilisés au niveau applicatif [2].

« Mesh » et « ad hoc » sont donc bien deux notions distinctes. Quant au sans fil, ces concepts peuvent s’appliquer à toute technologie, et pas seulement à WiFi, c’est à dire on peut créer des réseaux ad hoc utilisant Bluetooth, et des réseaux Mesh fonctionnant en infrarouge [2, 12].

Cependant, la popularité croissante de WiFi éclipse les autres technologies locales sans fil, en tout cas dans la littérature, et la notion de « Réseau Mesh sans-fil » fait presque toujours référence à l’utilisation de WiFi. De même, une topologie Mesh légitime l’utilisation du “ad hoc”, et en démultiplie l’intérêt [2].

Il est donc aussi très fréquent de parler simplement de “réseau Mesh” pour désigner ce qui est, plus justement, “un réseau sans fil basé sur WiFi, présentant une architecture Mesh partielle et reposant sur des connexions ad-hoc” [2].

1.4.7 Architectures des réseaux sans fil maillés

Un réseau sans fil maillé contient deux types de nœuds : les routeurs Mesh et les clients Mesh. Les routeurs Mesh forment une dorsale sans fil que les clients Mesh utilisent pour accéder à Internet ou pour communiquer entre eux [1].

À la différence de l’approche traditionnelle où les nœuds de la dorsale communiquent via des liaisons souvent câblés, dans les WMNs les routeurs Mesh sont reliés par des liens radio [5]. Cette caractéristique facilite l’installation et la maintenance des WMNs et diminue également le coût de ce type de réseau [2]. En outre, les routeurs Mesh opèrent en utilisant des communications multi-saut, ainsi les données des clients sont envoyées de proche en proche jusqu’à la destination [1]. Dans un réseau sans fil maillé, un ou plusieurs routeurs Mesh intègrent les fonctionnalités d’une passerelle/pont afin de permettre aux clients d’accéder à

Internet ou communiquer avec d'autres clients se trouvant sur d'autres réseaux par exemple réseaux WiFi.

En ce qui concerne l'architecture des réseaux sans fil maillés, nous pouvons distinguer principalement trois types à savoir : les WMNs basés sur une infrastructure, les WMNs basés sur les clients et les WMNs hybrides [1].

1.4.7.1 Les WMNs basés sur une infrastructure :

C'est l'ensemble des routeurs Mesh qui constituent une dorsale sans fil de communication (Wireless Backbone). Les clients utilisent cette dorsale pour accéder à Internet ou pour communiquer entre eux. La dorsale est auto-configurable. Ainsi, s'il y a une défaillance au niveau d'un routeur ou bien sur un lien, les routeurs Mesh s'organisent pour router les données via un chemin alternatif [1].

Principalement, la technologie radio utilisée dans la dorsale est l'IEEE 802.11 [7]. Cependant, les routeurs Mesh peuvent interconnecter des clients appartenant à plusieurs types de réseaux, par exemple réseaux WiMAX, réseaux cellulaires, réseaux WiFi, réseaux de capteurs. Les clients utilisant la même technologie radio que la dorsale communiquent directement avec les routeurs Mesh alors que les autres clients doivent passer par les stations de base disponibles au niveau de leurs réseaux pour avoir accès à la dorsale [1].

Les clients possédant des interfaces Ethernet peuvent aussi communiquer avec les routeurs Mesh via des liens Ethernet [1].

1.4.7.2 Les WMNs basés sur des clients :

Dans cette architecture, le réseau est composé seulement de clients Mesh (la composante routeur Mesh n'existe pas). C'est aux clients Mesh du réseau qu'incombe la responsabilité de router les données [2]. Donc, chaque client joue le rôle d'un routeur Mesh qui sert les autres clients dans le réseau. Dans une transmission, un client Mesh peut être la source des données, la destination des données ou juste un routeur Mesh. Les clients assurent aussi l'auto-configuration en cas de défaillance. Il est évident que dans ce type d'architecture les clients Mesh ont plus de fonctions à accomplir et doivent intégrer les mécanismes nécessaires au routage des données et à l'auto-configuration du réseau. Cette architecture des WMNs est équivalente à un réseau ad-hoc [1].

1.4.7.3 Les WMNs hybrides :

Ce dernier type d'architecture combine les deux précédentes. Il essaye de rassembler les avantages des WMNs basés sur l'infrastructure et ceux basés sur les clients. Dans ce type d'architecture les clients Mesh intègrent les fonctionnalités de routage au même niveau que les routeurs Mesh. Ainsi un client Mesh peut accéder à la dorsale même s'il se retrouve hors de la couverture radio des routeurs Mesh et aussi hors de la couverture radio des stations de bases disponibles au niveau de son réseau. En effet, un client Mesh voulant transmettre des données à destination de la dorsale peut se baser sur les fonctionnalités de routage des autres clients pour router ses données vers le point d'accès de son réseau ou vers un routeur Mesh et ainsi atteindre la dorsale. Par conséquent, la couverture radio et la fiabilité de la dorsale sont considérablement améliorées. Les WMNs hybrides représentent le cas le plus général et le plus utilisé [2, 1, 5].

1.5 Conclusion :

Dans le domaine de l'accès à haut débit sans fil, une variété de technologies de communications sans fil se développent dans un même temps, une nouvelle technologie de réseau sans fil, un réseau maillé sans fil a progressivement développé, a suscité une large attention [4]. Le maillage est une technologie qui vient du monde des réseaux optiques et a été adaptée au marché Internet. L'architecture en maillage crée l'opportunité de modifier les chemins des données en une seconde quand un problème se manifeste. Comparé aux solutions plus anciennes, le maillage a représenté une grande avancée [2].

Dans le monde Ethernet du WAN en réseau, le maillage a été complètement implémenté et largement accepté. Le maillage est surtout appliqué aux réseaux WLAN urbains et extérieurs, et aux réseaux intérieurs lorsqu'aucun câblage Ethernet n'est disponible. Ceci explique immédiatement pourquoi le maillage est devenu populaire. En particulier dans ces réseaux, les modules radios doivent compter les uns sur les autres pour permettre un accès WAN, et quand un module radio est en panne, un autre doit assurer l'accès au WAN. Le réseau maillé est aussi construit de telle manière que les modules radios sont capables de trouver facilement leur chemin les uns vers les autres sans interaction humaine [4, 2].

Dans les WMNs les stations de base appelées routeurs Mesh utilisent des liens radio. Cette spécificité simplifie considérablement l'installation, la modification et la maintenance des WMNs et réduit le coût de celles-ci par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. En

outre, les WMNs emploient la communication multi saut, ce qui a pour conséquence l'amélioration de la flexibilité et la couverture radio du réseau et l'économie de l'énergie au niveau des routeurs Mesh [1].

Récemment, les chercheurs se sont tournés vers un autre but qui consiste à l'augmentation de l'efficacité spectrale du canal radio [13]. Ce changement d'objectif est le résultat direct du besoin d'augmenter le débit des systèmes de communications sans fil notamment après la démocratisation des appareils mobiles et la multiplication de la quantité de données destinées à être transportées sur les réseaux sans fil. Dans la quête incessante pour atteindre ce nouveau but, les systèmes de communication sans fil à antennes multiples appelés communément MIMO pour 'Multiple Input Multiple Output' sont nés [3]. Dans le chapitre suivant on va détailler les systèmes MIMO : leurs caractéristiques, leur principe, et leurs expressions de capacité.

II.1 Introduction :

Les réseaux locaux sans fils souffrent des problèmes d'atténuations, et d'interférences inter-symboles dus au support de transmission radio. Cependant, les techniques de transmissions numériques sans fil connaissent depuis quelques années une grande révolution. La révolution en transmission numérique sans fil se manifeste dans l'émergence de plusieurs nouvelles technologies permettant d'augmenter considérablement les débits de transmission et d'améliorer la qualité de transmission. Parmi ces technologies, la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output) [3].

La technologie MIMO présente une solution prometteuse pour augmenter l'efficacité spectrale et en transmettant les données à travers un réseau multi-antennes en émission et en réception. En effet, elle offre un débit important et une bonne qualité de transmission grâce à la diversité spatiale. Cependant, une source importante de dégradation des performances dans les systèmes MIMO est la sélectivité fréquentielle du canal. Les systèmes MIMO constituent de ce fait, un changement important quant à la conception des systèmes de communication. Ce changement est lié à la manière dont on considère le multi-trajet dans les systèmes de communication sans fil est de combattre les distorsions causées par les multi-trajets afin d'approcher la limite théorique de la capacité pour une largeur de la bande déterminée. La nouvelle vision avance que puisque les multi-trajets représentent plusieurs canaux entre l'émetteur et le récepteur, alors l'objectif des communications sans fil est de profiter des multi-trajets pour dépasser la capacité pour une largeur de bande limitée [1].

II.2 Les systèmes MIMO :

Les systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output) ; consistent à utiliser plusieurs antennes à l'émission et à la réception. Ils permettent une amélioration de la fiabilité et des débits dans la communication sans fil Sont considérés comme une technologie capable de résoudre les problèmes d'encombrement et de limitation de capacité des réseaux sans fil large bande [15].

II.2.1 Principe du MIMO:

Les technologies MIMO utilisent des réseaux d'antennes à l'émission et à la réception (figure II.1) afin d'améliorer la qualité du rapport signal sur bruit (Signal-to-noise ratio ou SNR en anglais) et le débit de transmission. Cela permet ensuite de pouvoir diminuer le

niveau d'émission des signaux radio afin de réduire la pollution électromagnétique environnante, mais aussi de prolonger la durée des batteries dans le cas d'un téléphone [15].

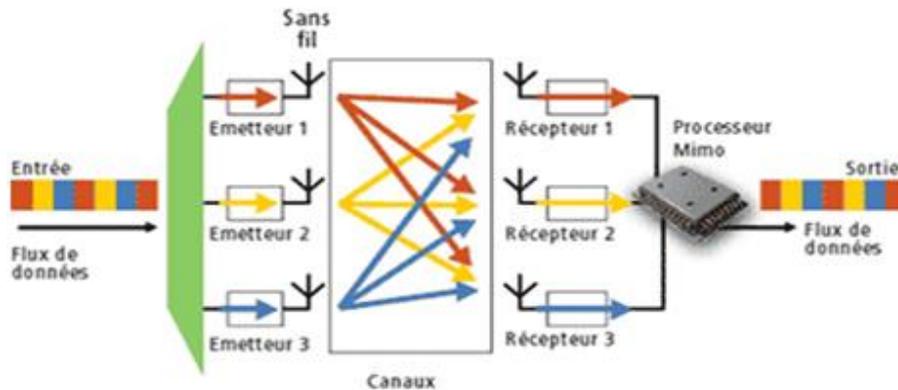


Figure II.1: Principe du MIMO

II.2.2 Catégories des techniques du MIMO :

On peut considérer trois catégories de MIMO :

- A. **La diversité spatiale MIMO** : on transmet simultanément un même message sur différentes antennes à l'émission. Les signaux reçus sur chacune des antennes de réception sont ensuite remis en phase et sommés de façon cohérente. Cela permet d'augmenter le rapport signal sur bruit (S/B) de la transmission [16].
- B. **Le multiplexage spatial MIMO** : chaque message est découpé en sous-messages. On transmet simultanément les sous-messages différents sur chacune des antennes d'émission. Les signaux reçus sur les antennes de réception sont réassemblés pour reformer le message entier d'origine. Le multiplexage MIMO permet d'augmenter le débit de transmission [16].
- C. **Le MIMO - Beamforming** : on utilise le réseau d'antenne MIMO pour orienter et contrôler le faisceau d'onde radio. Les techniques de beamforming permettent à la fois d'étendre une couverture radio (d'une station de base ou d'un point d'accès par exemple) et de limiter les interférences entre utilisateurs et la pollution électromagnétique environnante (en ciblant le récepteur visé) [16].

II.3 Intérêt de la transmission sur plusieurs antennes

Lors de transmission, la quantité d'information transmise est limitée par la capacité du canal, ainsi cette limite est indépendante de l'utilisateur, et par conséquent, impose une limite aux transmissions, cette limite est appelée « capacité de Shannon ». Pour un lien simple, c'est-à-dire une antenne à l'émission et une autre à la réception, la capacité maximale du canal est donnée par :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad \text{bps} \quad (\text{II-1})$$

où : P est la puissance du signal utile en Watt,

N_0 est la densité spectrale de puissance du bruit calculée en W/Hz,

W est la bande passante donnée en Hz.

Pour rendre la capacité indépendante de la bande passante du canal W , la notation d'efficacité spectrale η a été définie, qui est le rapport entre la capacité du canal et la bande passante :

$$\eta = \frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) \quad \text{bps/Hz} \quad (\text{II-2})$$

Physiquement cela se traduit par la quantité d'information que l'on peut envoyer par chaque Hertz de bande passante. Autrement dit, l'efficacité spectrale renseigne sur la limite à laquelle on peut exploiter la bande passante disponible [17].

II.3.1 Limite de Shannon :

La limite physique imposée par le canal à la quantité d'information envoyée nous pousse à trouver une solution pour améliorer le débit, tout en gardant une complexité du matériel raisonnable. L'équation (II-2) montre que l'augmentation de la puissance du signal émis se traduit par une augmentation logarithmique de l'efficacité spectrale. À titre d'exemple, si on veut gagner 1 bps/Hz, on doit doubler la puissance de l'émetteur. Si on veut passer de 1 bps/Hz à 10 bps/Hz, on doit multiplier la puissance de l'émetteur par 1000, ce qui n'est pas toujours possible.

Certaines techniques ont été utilisées pour améliorer qualitativement ou quantitativement l'information transmise, comme la technique de diversité spatiale en émission (MISO) ou la technique de diversité spatiale en réception (SIMO) [17].

II.3.2 Transmission en diversité spatiale à l'émission (MISO) :

En mode de transmission en diversité spatiale d'émission, une superposition du signal transmis simultanément par les N_t antennes émettrices est reçue. Chaque antenne émet le même symbole de d'énergie E_s/N_t , autrement dit, la puissance émise est divisée sur le nombre d'antennes, telle que, $P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i$, avec P_i est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les antennes, alors on dira que $P=N_t.P_i$.

C'est une technique qui permet une augmentation logarithmique de la capacité du canal avec le nombre d'antennes N_t avec la formule suivante [17]:

$$C = W.\log_2\left(1 + N_t \frac{P_i}{N_0W}\right) = W.\log_2\left(1 + \frac{P}{N_0W}\right) \quad (\text{II-3})$$

L'équation (II-3) s'écrit de la même façon que l'équation (II-1), mais l'intérêt de cette technique réside dans le fait que dans les multi trajets, la probabilité d'évanouissement dans N_t antennes est inférieure à la probabilité d'évanouissement sur une seule antenne.

Autrement dit, avec une seule antenne émettrice, si le canal introduit un fort évanouissement, tout le signal émis sera affecté, alors qu'avec N_t antennes, même si le canal introduit un fort évanouissement, ce dernier a peu de chances d'affecter tous les trajets émis. La figure suivante montre un tel système (MISO : Multiple Input Signal Output).

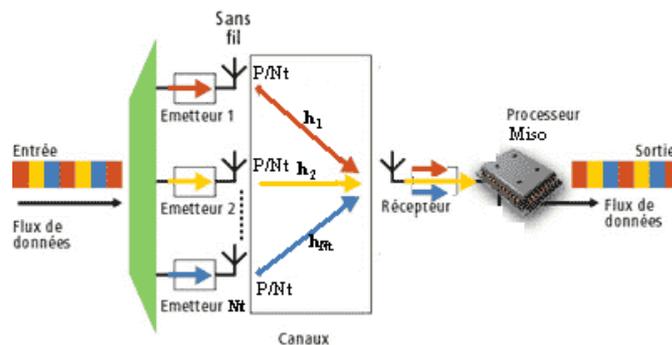


Figure II.2 : Structure d'un système MISO

Ce type de système est équivalent à un simple émetteur récepteur avec une réponse impulsionnelle h_k qui représente une moyenne des canaux [17], avec :

$$h_k = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \sum_{i=1}^{N_t} h_{i1} \quad (\text{II-4})$$

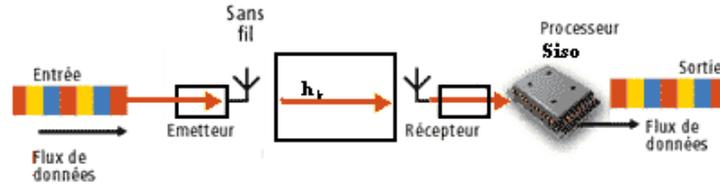


Figure II.3 : Structure d'un système MISO équivalent à un simple émetteur récepteur

II.3.3 Transmission en diversité spatiale à la réception (SIMO) :

C'est une technique qui consiste à déployer plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Le signal reçu est additionné et le rapport signal à bruit résultant est la somme des rapports signaux à bruits de chacune des branches du récepteur [18]. La figure suivante illustre un tel système (SIMO : Signal Input Multiple Output).

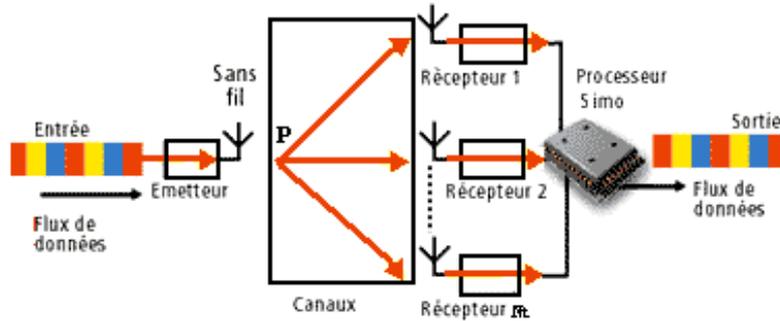


Figure II.4 : Structure d'un système SIMO

La diversité de réception est une solution qui améliore la capacité (débit). En effet, dans ce cas de figure, la capacité est :

$$C = W \cdot \log_2 \left(1 + N_r \frac{P}{N_0 W} \right) \quad (\text{II-5})$$

La capacité est améliorée, seulement la propagation de celle-ci reste logarithmique avec le nombre d'antennes à la réception.

II.3.4 Transmission en diversité spatiale en émission et réception (MIMO) :

La technique de la diversité spatiale est un bon moyen pour contrer le phénomène du fading, et ne permet pas d'atteindre de très hauts débits, d'une part parce que la capacité du canal progresse de manière logarithmique avec le nombre d'antennes, et d'autre part, les

mêmes symboles sont émis plusieurs fois dans le cas de la diversité d'émission et reçus plusieurs fois dans le cas de la diversité de réception [17].

La technique MIMO (Multiple Input Multiple Output), par contre, utilise des paquets de symboles différents à chaque antenne émettrice, le tout à la même fréquence. La principale différence entre un système MIMO et un système MISO est que ce dernier envoie les mêmes paquets aux antennes qui émettent à la même fréquence (diversité spatiale en émission) pour contrer l'évanouissement produit par le canal. Par ce fait, si les symboles émis d'une antenne s'annulent à cause de l'évanouissement du signal, une autre copie de ces symboles émis d'une antenne différente arrivera sans être influencés par cet évanouissement à des instants plus tard. MIMO peut envoyer des paquets différents aux antennes.

En utilisant la technique MIMO, la capacité (débit) augmentera avec le nombre d'antennes à la réception de façon linéaire (avec quelque approximations), d'où son intérêt [17, 19, 20]. Cette technique est suivie présentement dans beaucoup de travaux, elle a été appliquée pour la première fois par G. Foschini en 1996 sous l'appellation BLAST. La technique MIMO est montrée dans la figure II-5.

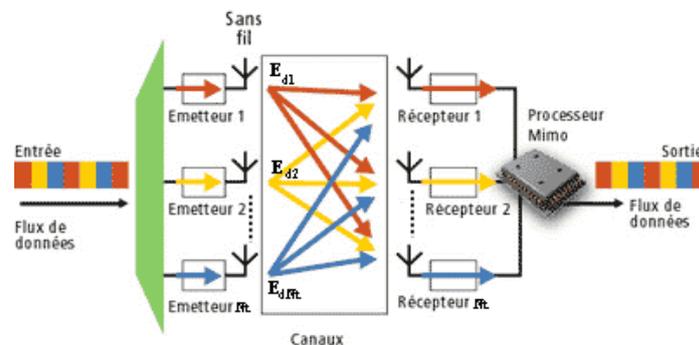


Figure II.5 : Structure d'un système MIMO

La technologie MIMO lutte aussi contre l'évanouissement du canal, en effet, les signaux émis sont indépendants et identiquement distribués (iid) [20, 21, 22]. Par conséquent, si un signal arrive fortement atténué et évanoui dans un chemin de propagation, la probabilité qu'il le soit dans tous les chemins est minimale, car les signaux sont décorrélés.

Seulement, cette approche est complexe, elle exige des techniques de traitement des signaux rigoureuses et adéquates pour réduire la plage d'évanouissements tout en gardant la complexité du système acceptable.

II.4 Modèle de système MIMO :

L'idée de base des systèmes MIMO est très simple puisqu'il s'agit d'associer la diversité spatiale à l'émission à la diversité spatiale à la réception. Il s'agit en quelque sorte d'une extension des "antennes intelligentes" [23]. Utilisé dans les systèmes sans fil traditionnels, ce concept regroupe les techniques de traitement du signal qui exploitent la multiplicité d'antennes d'un seul côté de la liaison (souvent d'ailleurs au niveau de la station de base pour des raisons évidentes d'encombrement spatial). La multiplicité autorise une communication plus sûre et permet d'éviter les désagréments inhérents aux conditions de propagation, tels les trajets multiples et les évanouissements. Si les antennes sont multiples à l'émission, on parle de liaison MISO (Multiple input Single Output), et dans le cas inverse de liaison SIMO (Single Input Multiple Output) [17, 19]. La formation de faisceaux est une application particulière de ce type de système qui consiste à augmenter le RSB en regroupant l'énergie dans des directions privilégiées, évitant ainsi les évanouissements trop profonds et les interférences [23].

Par ailleurs, lorsqu'on utilise plusieurs antennes à l'émission ou à la réception, la probabilité de perdre toute l'information diminue exponentiellement avec le nombre d'antennes décorréelées [24]. C'est le phénomène de diversité spatiale et l'ordre de diversité est défini par le nombre de branches décorréelées.

Les avantages des systèmes MIMO vont cependant bien au-delà de ceux des antennes intelligentes. Le fait de placer des antennes des deux côtés de la liaison crée une matrice de canal et donne la possibilité de transmettre de l'information par plusieurs modes spatiaux de cette matrice sur le même créneau spatio-temporel et sans puissance supplémentaire. Si cela peut paraître simple intuitivement, il aura tout de même fallu attendre les travaux rigoureux de Foschini [22] et Telatar [21] pour que des systèmes pratiques de ce type soient mis en œuvre.

Considérons un système MIMO avec N_r récepteurs et N_t émetteurs. On suppose que la bande de fréquence utilisée pour la transmission est assez étroite pour que le canal soit non sélectif en fréquence. Chaque trajet entre une antenne émettrice et une antenne réceptrice peut alors être caractérisé par un gain complexe h_{ij} représentant le coefficient d'évanouissement entre le $i^{\text{ème}}$ émetteur et le $j^{\text{ème}}$ récepteur (figure II-6). A la réception, chaque antenne reçoit la somme des symboles s_i transmis simultanément par chacune des N_t antennes émettrices. Le signal y_j reçu par la $j^{\text{ème}}$ antenne peut par conséquent s'écrire de manière discrète [8]:

$$y_j = \sum_{i=1}^{N_t} h_{ji} s_i + n_j \quad (\text{II-6})$$

La où n_j est un échantillon de bruit gaussien complexe circulairement symétrique avec une variance N_o , s_i est le signal transmis prélevé, et h_{ji} est le gain complexe normal de chemin de l'antenne de transmission i à l'antenne de réception j . Il contient tous les effets linéaires sur le signal, tel que la perte de puissance de propagation et le déphasage, l'effacement dû aux trajets multiples, l'interférence, l'accouplement d'antenne, et les polarisations [18]. Nous avons en outre supposé que le taux de symbole est assez bas tels que la sélectivité de fréquence provoquée par des différences de temps d'arrivée entre les diverses reproductions par trajets multiples du signal reçu n'est pas une issue qui se manifeste sensiblement. Ceci implique des taux de symbole environ de 1 MBd ou de moins pour la transmission d'intérieur (indoor), et environ de 50 KBd ou de moins pour les situations extérieures (outdoor).

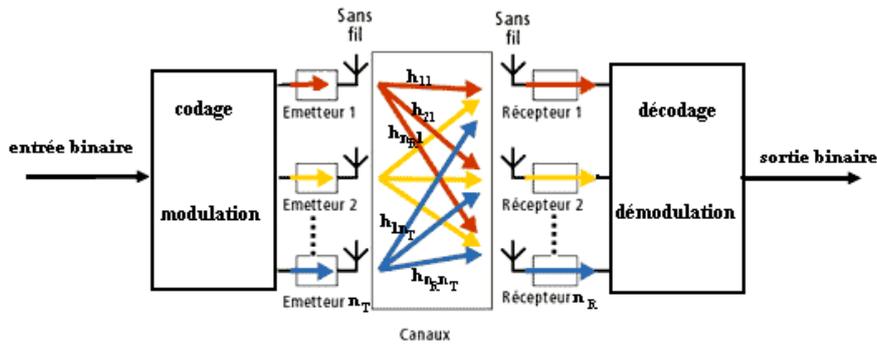


Figure II.6 : Représentation des différents trajets entre antennes émettrices et réceptrices

Si l'on considère à présent l'ensemble des symboles reçus simultanément par les antennes, le système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante:

$$y = Hs + n \quad (\text{II-7})$$

Où H est la matrice de canal de taille $N_r \times N_t$ définie par l'ensemble des trajets:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & h_{N_r,2} & \dots & h_{N_r,N_t} \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

$$\begin{aligned} h_{ij} &= \alpha + j\beta \\ \text{Où} \quad &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \cdot e^{-j \arctan \frac{\beta}{\alpha}} \\ &= |h_{ij}| \cdot e^{j\phi_{ij}} \end{aligned} \quad (\text{II-9})$$

s est le vecteur émis de taille $N_t \times 1$ et n est le vecteur de bruit de taille $N_r \times 1$.

On suppose que les symboles sont indépendants et identiquement distribués et que le bruit et ces mêmes symboles sont parfaitement décorrélés. Si on note de plus R_n la matrice de corrélation du bruit, on peut écrire:

$$\varepsilon\{ss^*\} = I_{N_t}, \quad \varepsilon\{nn^*\} = R_n, \quad \varepsilon\{sn^*\} = 0 \quad (\text{II-10})$$

Dans la plupart de nos études, on suppose que le canal est sans mémoire, *i.e.*, pour chaque bloc de symboles émis la matrice H est tirée indépendamment et aléatoirement selon la loi qui s'adapte le mieux au type de transmission envisagé. Cela veut dire que la capacité du système peut être calculée comme le maximum d'information mutuelle [20, 22, 21].

La majorité des systèmes suppose par ailleurs une parfaite connaissance du canal (CSI) à la réception, tandis que la connaissance du canal à l'émission n'est envisagée que dans certaines architectures et sous certaines conditions. En pratique, le canal est estimé par le récepteur à chaque paquet transmis grâce à une séquence d'apprentissage. D'un autre côté, les limites fondamentales des systèmes MIMO en terme de capacité sont approchées si les signaux transmis par les différentes antennes sont orthogonaux et si la répartition de l'énergie sur ces dernières est uniforme [20, 23].

II.5 Capacité des canaux MIMO :

La capacité des systèmes MIMO est un sujet d'actualité dans la littérature, dont nous ne présentons ici que le minimum pour montrer l'intérêt des transmissions MIMO. Afin de pouvoir comparer les différentes capacités que nous allons voir, la puissance totale moyenne émise P reste constante. Lorsque le nombre d'antennes varie à l'émetteur, alors la puissance est répartie entre les N_t antennes de façon à ce que leur somme reste égale à P . Si aucune connaissance du canal n'est disponible à l'émetteur, la répartition de la puissance uniforme est optimale en terme de capacité (chaque antenne émet une puissance $P_t = P/N_t$) [20, 17, 19].

Pour les formules de capacité les notations suivantes sont utilisées :

- La puissance du bruit est identique sur chaque antenne réceptrice et est notée σ_r^2 .
- p_t est défini comme la puissance moyenne qui serait reçue sur chaque antenne si un seul émetteur utilisait toute l'énergie E_s (donc un canal SIMO).
- Le rapport signal sur bruit moyen (RSB) sur chaque antenne de réception est $\rho = p_t / \sigma_r^2$, et est indépendant de N_t .

II.5.1 Capacité du canal SISO :

La capacité (moyenne) ergodique d'un canal aléatoire avec $N_t=N_r=1$ antenne et une contrainte de puissance moyenne transmetteur P_t peut être exprimée comme [20] :

$$C = \varepsilon \left\{ \max_{\rho(x): P \leq P_t} I(x, y) \right\}, \quad (\text{II-11})$$

là où P est la puissance moyenne d'un mot de code de canal simple transmis sur le canal et $\varepsilon\{\cdot\}$ dénote l'espérance sur toutes les réalisations de canal. La capacité du canal est maintenant définie comme le maximum d'information réciproque entre l'entrée et la sortie sur toutes les distributions statistiques sur l'entrée qui satisfont la contrainte de puissance. Si chaque symbole de canal à l'émetteur est dénoté par s , la contrainte moyenne de puissance peut être exprimée par [21] :

$$P = \varepsilon \left[|s|^2 \right] \leq P_t \quad (\text{II-12})$$

Utilisant (II-11), la capacité (moyenne) ergodique d'un système SISO ($N_t=N_r=1$) avec un gain complexe aléatoire h_{ij} de canal est donné par [25, 20] :

$$C = \varepsilon \left\{ \log_2 \left(1 + \rho |h_{11}|^2 \right) \right\} \quad (\text{II-13})$$

là où ρ est le rapport signal sur bruit (RSB) moyen à la branche de récepteur. Elle augmente lentement, en fonction du logarithme de $1 + \rho |h_{11}|^2$. Lorsque le RSB est élevé, un gain de 3 dB sur ρ ne fournira une augmentation de capacité que d'un bit par seconde par hertz (bps/Hz).

Si $|h_{ij}|$ est Rayleigh, $|h_{ij}|^2$ suit une distribution chi-carré avec deux degrés de liberté [10]. L'Equation (II-13) peut alors être écrit comme suit :

$$C = \varepsilon \left\{ \log_2 \left(1 + \rho \chi_2^2 \right) \right\} \quad (\text{II-14})$$

là où χ_2^2 est une variable aléatoire distribuée chi-carré avec deux degrés de liberté.

II.5.2 Capacité du canal SIMO :

Un canal SIMO (Single Input, Multiple Output), est un système multi-antennes conventionnel réalisant, par exemple, de la formation de voie conventionnelle en réception. Sa capacité est donnée par :

$$C = \log_2 \left(1 + \rho_r N_r^2 |h_{1j}|^2 \right) \quad \text{bps/Hz} \quad (\text{II-15})$$

Sa capacité augmente en fonction du logarithme de $1 + \rho_r N_r^2 |h_{1j}|^2$, soit un peu moins lentement que dans le cas SISO. Elle reste toutefois petite devant celle du canal MIMO, car la dimension spatiale du système n'est que partiellement exploitée.

II.5.3 Capacité du canal MIMO :

La capacité d'un canal aléatoire de MIMO avec la contrainte de puissance P_t peut être exprimée par l'expression suivant :

$$C = \mathcal{E} \left\{ \max_{p(x): \text{trace}(\Phi) \leq P_t} I(s, y) \right\}, \quad (\text{II-16})$$

là où $\Phi = \mathcal{E} \{ s s^* \}$ est la matrice de covariance du vecteur de signal transmis s . La puissance totale transmise est limitée à P_t , indépendamment du nombre des antennes de transmission. En utilisant (II-6) et le rapport entre l'information et l'entropie mutuelles, (II-16) peut être exprimée comme suit pour une matrice de canal H donnée

$$\begin{aligned} I(x, y) &= h(y) - h(y|x) \\ &= h(y) - h(Hx + n|x) \\ &= h(y) - h(n|x) \\ &= h(y) - h(n) \end{aligned} \quad (\text{II-17})$$

là où $h(\cdot)$ dénote dans ce cas-ci l'entropie différentielle d'une variable aléatoire continue. On le suppose que le vecteur x de transmission et le vecteur n de bruit sont indépendants.

L'équation (II-17) est maximisée quand y est gaussien, puisque la distribution normale maximise l'entropie pour une variance donnée [21]. L'entropie différentielle d'un vecteur gaussien réel $y \in R^n$ avec la matrice de covariance de moyenne zéro K est égale à $\frac{1}{2} \log_2 ((2\pi e)^n \det k)$ [25]. Pour un vecteur gaussien complexe $y \in C^n$, l'entropie différentielle est inférieure ou égal à $\log_2 \det(\pi e K)$ [20].

$$H(y) \leq \log_2 [\det(\pi e K)] \quad (\text{II-18})$$

avec l'égalité si et seulement si y est un gaussien complexe circulairement symétrique [3, 10], avec $\mathcal{E} \{ y y^* \} = K$. En assumant la distribution gaussienne optimale pour le vecteur de transmission s , la matrice de covariance du vecteur complexe reçu y est donnée par :

$$\begin{aligned}
\varepsilon\{yy^*\} &= \varepsilon\{(Hs+n)(Hs+n)^*\} \\
&= \varepsilon\{Hss^*H^*\} + \varepsilon\{nn^*\} \\
&= H\Phi H^* + K^n \\
&= K^d + K^n
\end{aligned} \tag{II-19}$$

L'indice supérieur d et n dénote respectivement la partie désirée et la partie de bruit de (II-19). L'information réciproque maximum d'un canal aléatoire de MIMO $I(s,y)$. Cette information mutuelle est maximisée lorsque y suit une distribution gaussienne optimale on obtient alors:

$$\begin{aligned}
I(x,y) &= h(y) - h(n) \\
&= \log_2 [\det(\pi e(K^d + K^n))] - \log_2 [\det(\pi eK^n)] \\
&= \log_2 [\det(K^d + K^n)] - \log_2 [\det(K^n)] \\
&= \log_2 \left[\det \left((K^d + K^n)(K^n)^{-1} \right) \right] \\
&= \log_2 \left[\det \left(K^d (K^n)^{-1} + I_{N_r} \right) \right] \\
&= \log_2 \left[\det \left(H\Phi H^* (K^n)^{-1} + I_{N_r} \right) \right]
\end{aligned} \tag{II-20}$$

Quand l'émetteur n'a aucune connaissance de l'état du canal, il est optimal d'utiliser une distribution d'énergie uniforme [23]. La matrice de covariance de transmission est alors donnée par :

$$\Phi = \frac{P_t}{N_t} I_{N_t} \tag{II-21}$$

C'est également commun à supposer que le bruit non-corrélatif dans chaque branche de récepteur décrite par la matrice de covariance $K^n = \sigma^2 I_{N_r}$.

La capacité (moyenne) ergodique pour un canal MIMO complexe peut alors être exprimée comme suit :

$$C = \varepsilon_H \left\{ \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{P_t}{\sigma^2 N_t} HH^* \right) \right] \right\} \tag{II-22}$$

Ceci peut également être écrit comme suit :

$$C = \varepsilon_H \left\{ \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} HH^* \right) \right] \right\} \quad \text{bps/Hz} \tag{II-23}$$

là où $\rho = P_t/\sigma_n^2$ est le rapport signal sur bruit (RSB) moyen à chaque branche de récepteur.

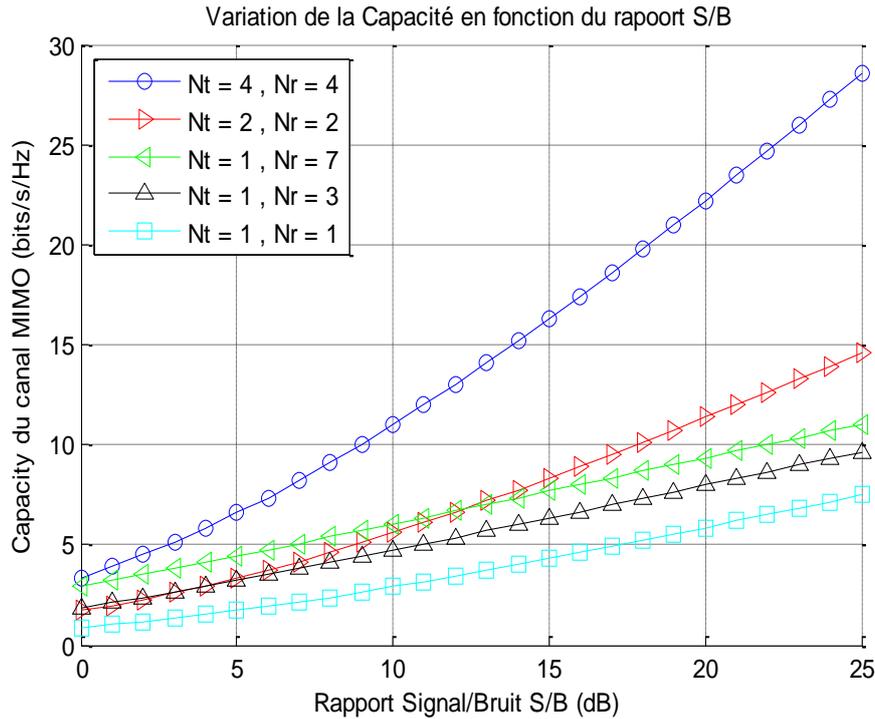


Figure II.7: Capacités de systèmes SIMO et MIMO par rapport au canal SISO

La capacité augmente donc beaucoup plus vite que dans les cas SISO et SIMO. La figure II.7 représente l'espérance de la capacité en fonction du RSB pour plusieurs valeurs de N_t et N_r . Un programme, effectué suivant la loi définie précédemment, est été utilisé pour tracer ces courbes.

- Dans le cas SISO ($N_t = 1$ et $N_r = 1$) la capacité varie de 1.15 à 7,5 bps/Hz environ. Elle reste faible et croît lentement avec le RSB, ce qui illustre bien les limitations des transmissions SISO. Malgré les techniques actuelles, qui permettent de tirer le maximum d'un canal SISO, sa capacité est une borne qui ne peut être dépassée et un système multi-antennes, même sous-exploité, obtiendra de meilleures performances.
- Les deux exemples SIMO ($N_t = 1$ et $N_r = 3$ et $N_r = 7$) montrent les bornes supérieures des traitements sans multiplexage spatial. Le passage à trois antennes en réception permet de gagner 3 bps/Hz par rapport au SISO, ce qui n'est pas très important, en particulier à fort RSB. Avec $N_r = 7$ le gain est d'environ 2.5 bps/Hz, ce qui est peu pour quatre antennes supplémentaires. Comme pour les systèmes SISO la capacité augmente lentement, ce qui reste la principale limitation des systèmes SIMO, à fort RSB notamment.
- Les deux exemples MIMO ont le même nombre total d'antennes que les systèmes SIMO, de façon à faciliter les comparaisons ($(N_t + N_r = 4$ et 8). Pour un RSB de 0 dB,

le système MIMO avec ($N_t = 2$ et $N_r = 2$) à une capacité presque équivalente à celle du système SIMO avec quatre antennes. La capacité MIMO augmente ensuite beaucoup plus rapidement, pour finir avec un gain de plus de 50 % à 25 dB de RSB. Exactement les mêmes commentaires peuvent être faits sur les systèmes MIMO et SIMO à huit antennes. Nous pouvons aussi vérifier que la capacité du système MIMO à huit antennes est presque 3/2 fois de celle du système à quatre antennes.

L'avantage en capacité des systèmes MIMO est principalement dû à l'exploitation des trajets multiples. Tout d'abord ils permettent au récepteur de différencier les différentes antennes d'émission, et donc d'émettre plusieurs symboles simultanément. Ensuite, chaque trajet est une réplique du signal émis, et est donc porteur d'information utile. Nous pouvons aussi dire que chaque trajet est l'équivalent du signal direct émis par une antenne virtuelle, ce qui augmente virtuellement le nombre d'antennes émettrices.

Le prix à payer pour cette augmentation de la capacité est tout d'abord matériel, avec la multiplication des antennes et de leur électronique associée, mais aussi logiciel, avec des récepteurs nettement plus complexes et demandant plus de puissance de calcul.

II.6 Conclusion :

Les systèmes de télécommunication mobile de la prochaine génération doivent permettre des améliorations substantielles par rapport aux anciennes générations et des débits plus élevés devraient être atteints [4]. Pour atteindre ces objectifs, une nouvelle technique de transmission a été mise en évidence, cette technique consiste à une architecture de transmission à plusieurs antennes à l'émission et à la réception, appelée MIMO [3].

Cette technique MIMO repose sur l'utilisation conjointe de réseaux d'antennes à l'émission et à la réception, elle permet d'améliorer le débit d'un lien radio sans augmenter la puissance d'émission et la bande de fréquence allouée. Cependant, les performances de cette technique sont largement dépendantes des propriétés du canal de propagation, Elle n'apporte une amélioration substantielle par rapport aux techniques mono-antennes classiques que si le canal de propagation est suffisamment riche en trajets multiples [15].

La technologie MIMO peut être implémentée au niveau de la couche physique des réseaux sans fil maillés. Une telle combinaison est très bénéfique. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, les WMNs sont généralement utilisés comme des dorsales d'accès sans fil et par conséquent, ils sont le point de concentration et de transit d'une importante

quantité de données. Les systèmes MIMO peuvent être utilisés dans ce cas pour améliorer le débit des transmissions et ainsi permettre au réseau de servir un plus grand nombre de clients en respectant la qualité de service requise par les applications clients. En outre, les systèmes MIMO permettent au réseau WMN de couvrir une plus grande zone radio et de tirer avantage du phénomène de l'évanouissement, notamment dans les milieux urbains [26].

Dans le 3^{ème} chapitre on va traiter une combinaison des réseaux sans fil maillés et la technologie de communication MIMO, c'est-à-dire une étude analytique de la capacité des réseaux Mesh sans fils en configuration MIMO.

III.1 Introduction :

Les réseaux sans fil maillés sont généralement utilisés comme dorsale sans fil pour relier des clients appartenant à plusieurs types de réseaux. Les WMNs assurent dans ce cas la communication entre les clients et aussi la connexion des clients à l'Internet. La tâche de la dorsale implique le transfert d'une grande quantité de données. Ce transfert doit se faire tout en respectant les besoins en termes de qualité de service comme le débit et le délai de transmission exigés par les différentes applications des clients [1]. Afin de répondre dans les meilleures conditions aux différents besoins des clients et supporter la charge de données à transmettre, les WMNs doivent exploiter de nouvelles techniques de communication. Les systèmes MIMO avec leurs avantages en termes de débit constituent une solution très intéressante pour les WMNs. En effet, en implémentant les systèmes MIMO au niveau de la couche physique, les performances des réseaux sans fil maillés sont considérablement améliorées [16].

Lors du développement de nouveaux algorithmes pour la transmission des données dans le réseau Mesh sans-fil, le relai des données est un sujet essentiel à traiter. Pour cela, nous définissons la capacité par nœud dans un réseau Mesh sans-fil comme étant la quantité de données envoyée par les clients vers le point d'accès Mesh auquel ils sont connectés et transmise vers la passerelle. Le débit par nœud se dégrade rapidement lorsque la quantité de données à relayer augmente. Ceci peut être dû soit à l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau ou à l'augmentation de la charge de trafic par nœud. Pour cela, il est intéressant de profiter du système MIMO et l'intégrer dans l'architecture Mesh sans-fil afin d'améliorer la capacité du réseau [1].

Un problème attractif à résoudre sera de déterminer la manière de choisir le nombre d'antennes de transmission à chaque nœud dans le réseau Mesh sans-fil dans le but de maximiser la capacité du réseau. Nous appelons ceci le problème de la configuration de transmission. Pour simplifier l'étude, nous supposons que le trafic est envoyé dans un seul sens, des nœuds vers la passerelle. Nous supposons que les nœuds possèdent la même charge de trafic G à émettre vers la passerelle. La capacité par nœud du réseau est finalement définie comme la valeur maximale de G permise. D'où, la quantité du trafic à émettre par un nœud est égale à G plus le trafic à relayer, reçu d'autres nœuds [1].

III.2 Le Mode d'Accès :

Le réseau Mesh sans-fil soit capable d'opérer sous le mode Time Division Duplexing (TDD) ou le mode Frequency Division Duplexing (FDD), nous choisissons le mode TDD pour sa facilité et son dynamisme d'allocation des intervalles de temps pour garantir l'accès.

Des études similaires peuvent être effectuées dans le mode FDD. Il est aussi intéressant d'intégrer un mécanisme d'auto-ajustement dans un réseau Mesh sans-fil.

Nous supposons que le temps est divisé en trames. La durée d'une trame est notée T_f . Puisqu'il est difficile pour un nœud d'émettre et recevoir simultanément, nous supposons que chaque trame est composée de 4 intervalles de temps égaux (time slots), chacun de durée T_s . Le premier intervalle est dédié aux liens de transmission impairs "Vers la Passerelle" (odd To Gateway), le second intervalle est pour les liens impairs "De la Passerelle" (odd From Gateway), le troisième intervalle est attribué aux liens pairs "Vers la passerelle" (even To Gateway), tandis que le dernier est pour les liens pairs "De la Passerelle" (even From Gateway). Figure III.1 décrit la structure de la trame.

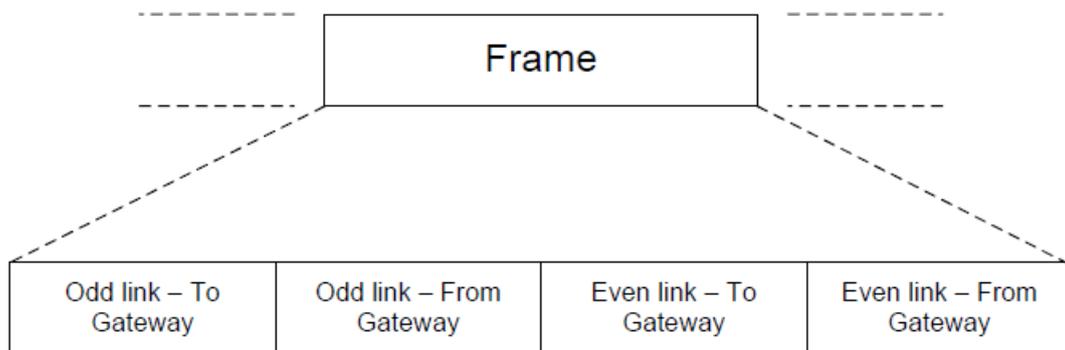


Figure III.1: Structure de la Trame

Dans le but de garantir la disponibilité du CSI au récepteur, nous supposons que l'information utile à émettre est précédée d'une séquence de bits d'apprentissage (Training Sequence) connue par le récepteur et qui lui permet d'estimer le canal. Toutefois, nous négligerons dans ce qui suit la durée de cette séquence par rapport à la durée des données utiles. Nous supposons aussi que tous les nœuds sont synchronisés. Ceci permet de garantir l'activation et la désactivation simultanée des liens à un intervalle de temps donné [27].

III.3 Le Modèle du Réseau :

Chaque nœud dans le réseau Mesh sans-fil est équipé de deux interfaces radio fonctionnant à des fréquences différentes. Une interface est dédiée au service des clients locaux du nœud. La seconde interface est réservée à la fonction de reliage des paquets venant d'autres nœuds, en plus des paquets du trafic local. L'ensemble de ces dernières interfaces radio de chaque nœud constituent le Backhaul (Backbone sans-fil). Pour le Backhaul, chaque nœud possède N antennes. Nous supposons que les M nœuds du réseau sont équidistants. Le rayon de couverture C_r de chaque nœud est supposé limité aux nœuds voisinant et il est égal au rayon d'interférence I_r (Figure III.2) [1].

Nous appelons les positions des nœuds dans le réseau par la topologie du réseau. Nous allons utiliser deux modèles: La topologie chaine et la topologie en grille [12].

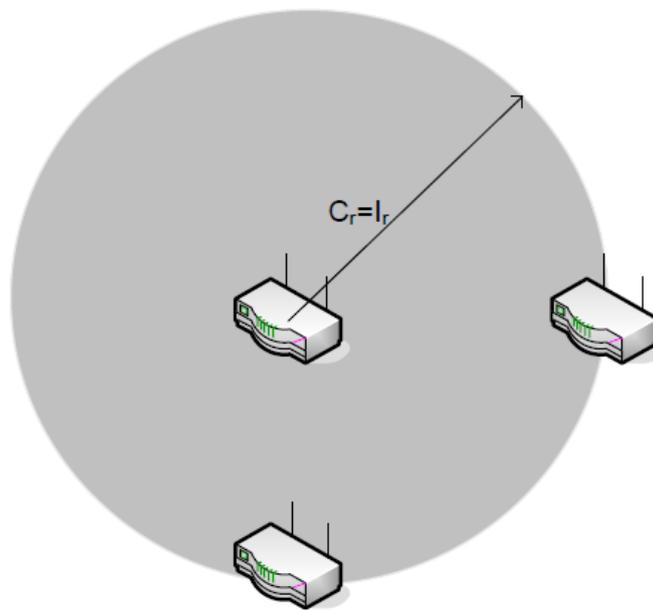


Figure III.2: Couverture radio

III.3.1 Topologie Chaîne:

Considérant la topologie chaîne, le dernier nœud à l'extrémité est appelé la passerelle (gateway or egress node) et il est connecté au réseau filaire vers Internet. Nous supposons qu'il y a une seule passerelle dans le réseau. S'il y a plusieurs passerelles, le réseau peut être divisé en plusieurs chaînes, chacune connectée à une passerelle.

Chaque nœud a des données à relayer venant d'un nœud précédant en plus des données propres à ses clients locaux jusqu'à ce que tout le trafic de tous les nœuds arrive à la passerelle. Chaque nœud a $(M - n) \times G$ trafic à envoyer, où n ($n = 1 \dots M - 1$) est l'index du lien entre le nœud n et le nœud $n-1$ et G est le trafic local généré par les clients du nœud.

Nous choisissons le nombre d'antennes de transmission à chaque nœud égal à $N_t(n)$ d'une manière à obtenir la capacité par nœud maximale possible. Le récepteur utilise toutes ses antennes N pour la réception puisqu'il est connu que ceci permet d'augmenter la capacité.

La figure III.3 illustre un exemple de réseau chaîne composé de $M = 6$ nœuds. Les nœuds sont énumérés de 0 à 5, où le nœud 0 correspond à la passerelle, et les liens sont énumérés de 1 à 5.

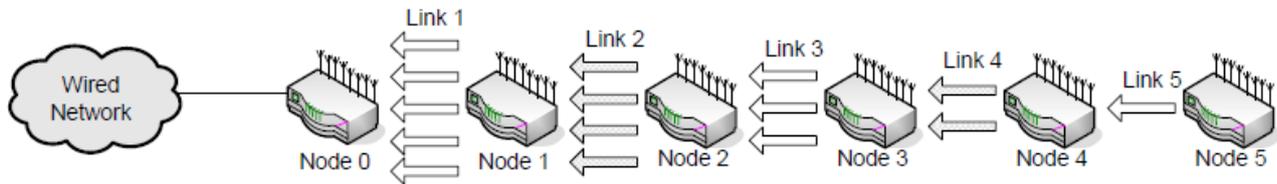


Figure III.3: Réseau Chaîne $M = 6$

Dans cette figure, considérant le mode "Vers la Passerelle", les nœuds 1, 3 et 5 transmettent vers les nœuds 0, 2 et 4 respectivement (les flèches correspondent au nombre des flux à transmettre par un nœud). La transmission du nœud 1 vers le nœud 0 (qui correspond au lien 1) n'est pas interférée, mais la réception du nœud 2 du signal utile émis par le nœud 3 est interférée par la transmission du nœud 1 (destinée réellement au nœud 0). De façon équivalente, la réception du nœud 4 est interférée par la transmission du nœud 3.

III.3.2 Topologie en Grille:

Dans la topologie en grille, les M nœuds sont distribués en $p \times p$. Le nœud central du réseau est la passerelle connectée au réseau filaire. Nous supposons de façon identique à la topologie chaîne que les nœuds sont séparés par une distance égale. Le rayon de couverture, égal au rayon d'interférence, est supposé capable d'atteindre seulement les nœuds voisins horizontaux et verticaux. En d'autres termes, le rayon d'action du nœud n'atteint pas les nœuds sur la diagonale.

Chaque nœud est identifié par un couple d'index $(n_1; n_2)$ où n_1 et n_2 sont les index horizontal et vertical respectivement. Le nombre de flux de données à émettre dépend du mode d'accès utilisé dans le réseau. Nous supposons que chaque nœud utilise $N_t(n_1; n_2)$ antennes de transmission pour émettre ses données. Les récepteurs utilisent la totalité des N antennes.

La figure III.4 présente un exemple de réseau en grille 3×3 avec le modèle d'accès choisi au mode "Vers la Passerelle". $N_{ij} = N_t(n_1; n_2)$ est le nombre d'antennes utilisées par l'émetteur du lien $(n_1; n_2)$ pour envoyer ses données, $i = 1 \dots 3, j = 1 \dots 3, n_1 = 1 \dots 3$ et $n_2 = 1 \dots 3$. La capacité du réseau sera analysée pour les deux topologies présentées, chaîne et grille.

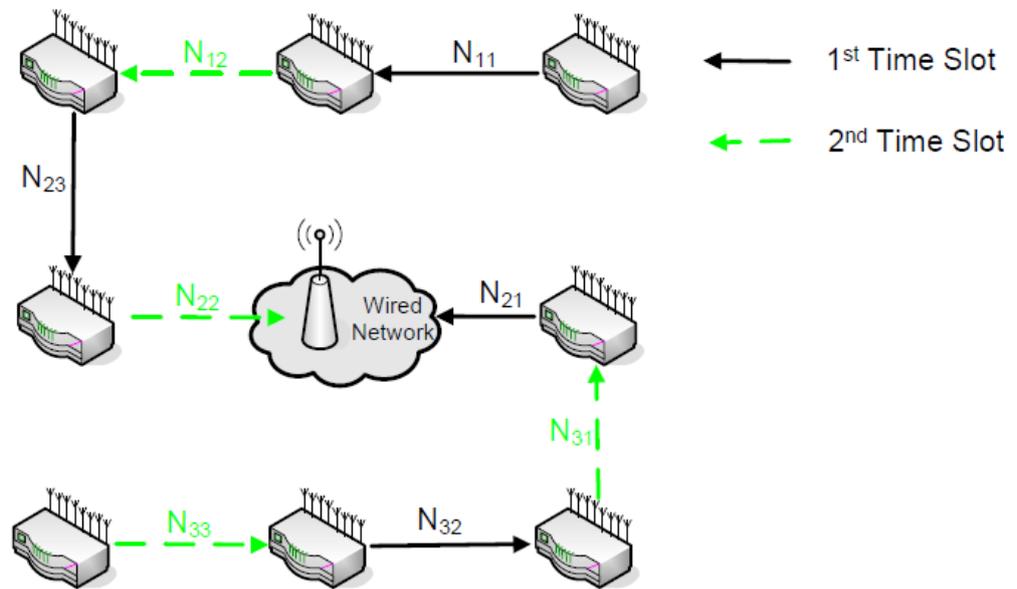


Figure III.4: Réseau en Grille 3×3

III.4 Problème de la configuration de transmission :

Dans cette section, nous introduisons le problème de la configuration de transmission optimale dans les réseaux Mesh sans-fil utilisant les systèmes MIMO. Puis, nous déterminons le point de congestion du réseau. Par la suite, nous définissons la capacité par lien du réseau.

Les nœuds sont supposés fixes et le trafic unidirectionnel, c'est-à-dire toutes les transmissions sont dans le mode "Vers la Passerelle" ou bien "De la Passerelle". Nous supposons aussi que tous les nœuds envoient la même quantité de données vers la passerelle.

La capacité par nœud G , définie comme étant la quantité de données pouvant être transmise par chaque nœud, est supposée égale entre tous les nœuds.

Nous effectuons notre analyse dans le mode "Vers la Passerelle". Une analyse similaire peut être réalisée dans le mode "De la Passerelle".

Considérons un réseau chaîne où chaque nœud n a $(M - n) \times G$ données à envoyer au nœud $n - 1$ en utilisant $N_t(n)$ antennes. Les différents liens n'ont pas les mêmes capacités vu que la quantité de données à émettre n'est pas la même ainsi que le niveau d'interférence appliqué.

Soit $L_2 = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{N^{M-1}}\}$ L'ensemble des configurations de transmission possibles, où N^{M-1} est le nombre total des configurations possibles et σ_i ($i = 1 \dots N^{M-1}$) désigne la $i^{\text{ème}}$ configuration de transmission. Notons que σ_i est définie comme étant l'ensemble des nombre d'antennes de transmission à chaque nœud, $\sigma_i = \{N_{t,i}(1); N_{t,i}(2); \dots, N_{t,i}(M-1)\}$ avec $N_{t,i}(n)$ est le nombre d'antennes utilisées pour la transmission du nœud n ($n = 1 \dots M-1$) à la $i^{\text{ème}}$ configuration.

La $i^{\text{ème}}$ configuration de transmission fournit une capacité par nœud notée $G(i)$. Soit $L_2 = \{G(1), G(2), \dots, G(N^{M-1})\}$ l'ensemble des capacités par nœud correspondantes aux différentes configurations de transmission.

Soit f l'application qui associe à chaque configuration σ_i ($i = 1 \dots N^{M-1}$) une unique valeur de capacité $G(i)$.

$$f: \begin{matrix} L_1 \rightarrow L_2 \\ \sigma_i \rightarrow G(i) \end{matrix} \quad \forall i \in \{1, \dots, N^{M-1}\} \quad (\text{III.1})$$

La capacité par nœud $G(i)$ est retrouvée en résolvant le problème suivant:

$$G(i) = \min_{j=1 \dots M-1} \left\{ \frac{C(n)}{4 \times (M - n)} \right\} \quad (\text{III.2})$$

Où $C(n)$ est la $n^{\text{ème}}$ capacité du lien entre le nœud n et le nœud $n - 1$ et $(M - n) \times G(i)$ est la quantité du trafic à envoyer par le nœud n . La division par 4 revient à moyenner la

valeur de la capacité car le lien congestionné est actif pendant une durée T_s et passif pendant $3 \times T_s$ à chaque durée de trame T_f . $C(n)$ est retrouvé à partir des formules précédentes (II.22) et (II.23) du chapitre II. Pour un réseau chaîne possédant $M > 3$ nœuds:

$$C(n) = \begin{cases} C_{\min}(n), n = 1, 2 \\ C_{\text{in}}(n), n = 3 \dots M - 1 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec $C_{\min}(n)$ est la capacité d'un lien non-interféré ($n = 1; 2$) donnée par ;

$$C_{\min} = \varepsilon \left\{ \log_2 \left(\det \left(I_{Nr} + \frac{\rho}{Nt} H_1 H_1^H \right) \right) \right\} \quad (\text{III.4})$$

et $C_{\text{in}}(n)$ est la capacité d'un lien interféré ($n = 3 \dots M - 1$). Tel que :

$$C_{\text{in}} = \varepsilon \left\{ \log_2 \left(\det \left(I_{Nr} + \frac{\rho}{Nt} H_1 H_1^H R^{-1} \right) \right) \right\} \quad (\text{III.5})$$

Soulignons que la $n^{\text{ième}}$ transmission (pour $n > 2$) est toujours interférée par la $(n - 2)^{\text{ième}}$ transmission dans le réseau chaîne.

Le lien congestionné du réseau est défini comme étant le lien présentant la plus faible valeur de capacité [1]. La capacité par nœud du réseau G est par la suite égale à $G(b) = \frac{C(b)}{4 \times (M - b)}$ où $C(b)$ est la capacité du lien congestionné et b est l'index qui lui correspond. Le lien congestionné varie selon la configuration de transmission [1]. Nous cherchons la configuration offrant la valeur maximale de capacité par nœud. Résoudre (III.2) permet d'obtenir le lien congestionné et la capacité par nœud associée.

La configuration de transmission optimale σ_{opt} est obtenue pour la valeur maximale de $G(i)$, ($i = 1 \dots N^{M-1}$).

$$\sigma_{\text{opt}} = f^{-1} \left(\max_{i=1 \dots N^{M-1}} G(i) \right) \quad (\text{III.6})$$

Ce problème est résolu par des simulations sur ordinateur utilisant le logiciel de calcul Matlab. Les résultats seront décrits et interprétés dans le chapitre suivant.

Dans un réseau en grille, cette étude est plus complexe et dépend de plusieurs paramètres. En fait, l'optimisation de la capacité dépend de la dimension du réseau et le mode d'accès utilisé. Nous décrivons le problème de configuration de transmission pour le cas simple du réseau en grille 3×3 [1].

Les ensembles L_1 et L_2 sont définis similairement à ceux du cas du réseau chaîne. En effet, la $i^{\text{ème}}$ configuration de transmission est égale à

$$\sigma_i = \{N_{t,i}(1,1); N_{t,i}(1,2), \dots, N_{t,i}(p,p)\} \quad (\text{III.7})$$

avec $N_{t,i}(n_1, n_2)$ le nombre d'antennes utilisées pour la transmission par le nœud (n_1, n_2) ; ($n_1 = 1 \dots p$; $n_2 = 1 \dots p$) dans la $i^{\text{ème}}$ configuration.

La définition de l'application f reste la même. La capacité par nœud résulte de la résolution du problème suivant:

$$G(i) = \min_{j=1..p; k=1..p} \left\{ \frac{C(j, k)}{4 \times F(j, k)} \right\} \quad (\text{III.8})$$

Où $C(j, k)$ est la capacité de la transmission initiée par le nœud (j, k) et $F(j, k) \times G(i)$ est la quantité de trafic à émettre par le (j, k) $i^{\text{ème}}$ nœud. $F(j, k)$ est le nombre de flux de données à envoyer par le (j, k) $i^{\text{ème}}$ nœud, et dépend de façon significative du mode d'accès et l'algorithme de routage définis dans le réseau en grille. La division par 4 suppose l'utilisation d'une trame de 4 intervalles de temps T_s .

Dans le cas considéré de la figure III.4, il y a seulement deux transmissions sans interférence et six transmissions avec interférence. Pour cela, la capacité est égale à:

$$C(j, k) = \begin{cases} C_{nin}(j, k), & j = 1, k = p \text{ et } j = p, k = 1 \\ C_{in}(j, k), & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Puis, la meilleure configuration de transmission est retrouvée en résolvant l'équation (III.6).

Pour un réseau en grille de dimensions plus larges, il est très difficile de déterminer $C(j, k)$ de façon simple. Ceci est dû à la méthode d'accès qui définit l'état d'interférence des liens actifs simultanément. Le problème de la localisation du lien congestionné peut être formulé de la façon suivante compte tenu de cette contrainte:

$$G(i) = \min_{j=1..p; k=1..p} \left\{ \begin{array}{l} \min_{(j,k) \in K_1} \left\{ \frac{C_{nin}(j, k)}{4 \times F(j, k)} \right\} \\ \min_{(j,k) \in K_2} \left\{ \frac{C_{in}(j, k)}{4 \times F(j, k)} \right\} \end{array} \right\} \quad (\text{III.10})$$

Avec K_1 et K_2 les ensembles des liens non-interférés et interférés dans le mode d'accès considéré, respectivement.

III.5 Conclusion :

Les WMNs doivent exploiter de nouvelles techniques de communication. Les systèmes MIMO constituent une solution très intéressante pour les WMNs, donc il est intéressant de profiter du système MIMO et l'intégrer dans l'architecture Mesh sans-fil afin d'améliorer la capacité du réseau.

Dans ce chapitre, nous avons expliqué comment nous avons intégré la technologie MIMO dans les réseaux Mesh sans-fil. Nous avons ensuite introduit les notions de lien de congestion et la configuration de transmission. Finalement, nous avons formulé le problème de la configuration de transmission optimale.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats numériques associés aux problèmes définis, ainsi que leurs interprétations.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté un algorithme pour les réseaux sans fil maillés basés sur des liens MIMO. Nous avons démontré que l'algorithme a atteint ses objectifs qui sont: la garantie de l'équité entre les nœuds et de trouver un moyen d'amélioration de la capacité dans les réseaux Mesh sans-fil.

Dans le premier chapitre de ce document, nous sommes intéressés au domaine d'accès à haut débit sans fil, nous avons commencé tout d'abord par une étude générale des propriétés des réseaux sans-fil traditionnel, leurs classification, normes, débit... Puis on a accédé à un nouveau genre de réseau sans fil qui sont les réseaux sans fil maillés (WMNs). Nous avons précisé que dans ce type de réseau sans fil, les communications entre les routeurs Mesh sont faites par des liens radio et que cette spécificité rend les WMNs plus facile à installer, modifier et maintenir que les réseaux sans fil traditionnel. Cette même spécificité permet de réduire les coûts d'installation de l'infrastructure de communication pour différents type d'applications. Nous avons aussi précisé les avantages apportés par les WMNs comme l'amélioration de la couverture radio et de fiabilité. Les différentes topologies qui peuvent présentées les WMNs comme les topologies partielles ont été présentées. Nous avons vu la différence entre « Mesh » et « Ad-hoc » et présenter aussi leurs architectures.

Le deuxième chapitre était consacré aux systèmes MIMO. La capacité de ces systèmes calculée en utilisant les résultats de la théorie de l'information ont démontré l'amélioration significative que les MIMO introduisent par rapport aux systèmes traditionnels appelés SISO. Nous avons constaté par la présentation de différentes équations de la capacité des systèmes MIMO que la valeur de cette dernière dépend des informations disponibles sur le canal au niveau de l'émetteur et le récepteur et le rapport signal sur bruit.

Nous avons vu dans le troisième chapitre que les WMNs peuvent tirer avantage des systèmes MIMO pour améliorer leurs débit et servir un plus grand nombre de clients avec une bonne qualité de service notamment quand le réseau WMN est utilisé comme une dorsale d'accès sans fil. Les MIMO améliorent aussi la portée radio des WMNs et permettent aux routeurs Mesh d'économiser d'avantage leurs énergies. Nous pensons qu'un WMN basé sur des liens MIMO est très efficace comme infrastructure de communication dans les milieux urbains. En effet, dans ces milieux les effets négatifs de l'évanouissement et de l'interférence

sont accentués. Les bâtiments, les voitures et autres obstacles amplifient le phénomène de l'évanouissement. D'un autre côté, la quantité de données à transférer est beaucoup plus importante qu'ailleurs et un très grand nombre de transmissions peuvent être réalisés simultanément dans une zone assez petite. Cette situation conduit à accroître les effets indésirables de l'interférence. Une combinaison entre les WMNs et les MIMO permet d'exploiter le phénomène de l'évanouissement pour augmenter le débit du réseau et utiliser les chemins redondants disponibles pour réduire l'interférence. Ceci a permis de définir la notion de la capacité par nœud dans le réseau Mesh sans-fil. Nous avons introduit aussi la notion de point de congestion du réseau ainsi que le problème de configuration de transmission.

Dans le quatrième chapitre nous avons pu résoudre graphiquement et par simulation les problèmes formulés et dresser les courbes de performances des réseaux Mesh sans-fil pour deux topologies particulières, la topologie en chaîne et la topologie en grille.

Dans ce qui suit, nous donnons des propositions pour des futurs travaux en relation avec notre travail :

Il serait intéressant de prouver que le choix de la configuration de transmission est un problème trop difficile et de lui trouver une solution sous-optimale. Dans une autre direction, nous pourrions exploiter le Multiplexage Spatial afin d'augmenter la capacité du réseau. Un autre point de recherche serait d'investiguer les méthodes d'accès dans une topologie complexe (grille) dans le but de trouver celle qui offre le plus de capacité pour le réseau.

Liste des figures :

I.1	Classification des réseaux sans fil suivant leur taille	6
I.2	Comparaison des caractéristiques HomeRF, Bluetooth et WiFi	7
I.3	Modes de fonctionnement du WiFi	10
I.4	Type de WiMax	11
I.5	Une topologie maillée complète.....	17
I.6	Une topologie maillée partielle	17
I.7	Topologie à nœuds point-à-point	18
I.8	Topologie à nœuds point-à-multipoints.....	19
I.9	Topologie à nœuds multipoints.....	20
I.10	Une topologie maillée métropolitain.....	21
II.1	Principe du MIMO.....	28
II.2	Structure d'un système MISO.....	30
II.3	Structure d'un système MISO équivalent à un simple émetteur récepteur.....	31
II.4	Structure d'un système SIMO.....	31
II.5	Structure d'un système MIMO.....	32
II.6	Représentation des différents trajets entre antennes émettrices et réceptrices.....	34
II.7	Capacités de systèmes SIMO et MIMO par rapport au canal SISO.....	39
III.1	Structure de la Trame.....	44
III.2	Couverture radio.....	45
III.3	Réseau Chaine M = 6.....	46
III.4	Réseau en Grille 3×3.....	47

IV.1	Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 6, N = 4, \sigma_1 = \{8,5,7,3,3\}$).....	54
IV.2	Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 6, N = 4, \sigma_2 = \{3,7,4,5,2\}$).....	55
IV.3	Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 6, N = 8, \sigma_1 = \{8,5,7,3,3\}$).....	56
IV.4	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 6, N = 8, \sigma_2 = \{3,7,4,5,2\}$).....	57
IV.5	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR.....	58
IV.6	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 6, N = 8, \sigma_1 = \{6,6,6,6,6\}$).....	59
IV.7	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 6, N = 8, \sigma_1 = \{12,12,12,12,12\}$).....	59
IV.8	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 9, N = 8, \sigma_1 = \{6,6,6,6\}$).....	61
IV.9	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR ($M = 9, N = 8, \sigma_1 = \{12,12,12,12\}$).....	62
IV.10	: Capacité par lien du réseau en fonction du SNR.....	63

LISTE DES TABLEAUX :

I.1	les classe de Bluetooth.....	7
I.2	Les différentes normes IEEE 802.11.....	9
I.3	Portées et débits	9
I.4	Les normes WiMax.....	12
I.5	Comparaison des systèmes GSM et DCS-1800.....	13

Bibliographie

- [1] A. DRIQUECH, "Algorithme d'ordonnement et d'activation de liens dans les réseaux sans fil maillé basés sur les systèmes MIMO ", Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL, NOVEMBRE 2009.
- [2] AKYILDIZ, I. F., WANG, X. et WANG, W. Wireless mesh networks : a survey. *Elsevier Comput. Netw. J.*, 47:445-487, 2005.
- [3] P.K. Bondyopadhyay, "The first application of array antenna", in *Proceedings of IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology.*, Dana Point , USA, 2000, pp. 2932.
- [4] GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [5] BRAY, J. et F STURMAN, C, *Bluetooth 1.1 : Connect Without Cables*. Prentice Hall PTR, 2000.
- [6] The ZigBee Alliance. Available from: [http : ==www:zigbee.org](http://www.zigbee.org).
- [7] IEEE 802.11 TASK GROUP (2007). Ieee standard for information technology - telecommunications and information exchange between systems -local and metropolitan area networks -specifie requirements -part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physicallayer (phy) specifications, iee std 802.11-2007.
- [8] L. Zhang, "A study of IEEE 802.16a OFDM-PHY Baseband" *Master thesis performed in Electronics Systems, Department of Electrical Engineering, Linköping Institute of Technology*, 16 February 2005.
- [9] www.extpdf.com/wwan-pdf.html
- [10] J. Walker, Wi-Fi mesh networks, "the path to mobile ad hoc". Available from: [http : // www.wi-fitechnology.com/Wi-FiReportsandPapers / MeshNetworksReferences.html](http://www.wi-fitechnology.com/Wi-FiReportsandPapers/ MeshNetworksReferences.html).
- [11] CUWIN COMMUNITY WIRELESS SOLUTIONS (2006). [http :jcuwireless.net/j](http://jcuwireless.net/j).
- [12] HEKMET, R. (2006). *Ad-hoc Networks : Fundamental Properties and Network Topologies*. Springer.
- [13] J. Jun, M.L. Sichitiu, "The nominal capacity of wireless mesh networks". *IEEE Wireless Communications* 10 (5) (2003) 814.
- [14] P. Gupta and P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", in *Proc. IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 2, pp 388-404, March 2000.
- [15] S. Salous, "Multiple Input Multiple Output: capacity and channel measurement", *Department of Electronic Engineering and Electronics, UMIST, Manchester, M60, 1QD, UK*, August 2003.
- [16] J. Paulraj *et al.* "An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit Wireless", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 2, February 2004.
- [17] A. Chaboub, "Etude des algorithmes de traitement de signal requis pour un système de communication MIMO". *Thèse de doctorat, Ecole de technologie supérieur, Université du Québec, Montréal*, 21 Mai 2003.

- [18] Paul Goud Jr., Christian Schlegel, Witold A. Krzymien, et Robert Hang "Multiple-antenna communication systems: An emerging technology", *Can. J. Elect. Comput. Eng.*, Vol. 29, No. 1/2, Janvier/Avril 2004.
- [19] Z. Rezeki, "Etude et optimisation des algorithmes de traitement de signal requis pour un système de communication MIMO", *Thèse de doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal*, 14 Octobre 2003.
- [20] B. Holter, "On the capacity of the MIMO channel - A tutorial introduction", *Norwegian University of Science and Technology*, ilab0.uib.no/norsig/finalpapers/57.capacity_of_1992001154555.pdf
- [21] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", *European Transactions on Telecommunications*, 10(6):585-595, 1999.
- [22] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Personal Communications*, 6(3):311-335, march 1998.
- [23] O. Berder, "Optimisation et stratégies d'allocation de puissance des systèmes de transmission multi-antennes", *Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, École doctorale : SMIV*, 20 Décembre 2002
- [24] L. Collin, "Optimisation de systèmes multi-antennes basée sur la distance minimale", *Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, École doctorale : SMIV 0373*, 17 Décembre 2002.
- [25] D. Gesbert and J. Akhtar, "Breaking the barriers of Shannon's capacity: An overview of MIMO wireless system", *Telektronikk Telenor Journal*, January 2002.
- [26] FOSCHINI, G. J. et GANS, M. J. (1998). On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wirel. Pers. Commun.*, 6(3):311-335.
- [27] N. Seshardi and J. Winters, "Two signaling schemes for improving the error performance of frequency-division-duplex (FDD) transmission systems using transmitter antenna diversity". *Int. J. Wireless Information Networks*, 1, 49-60, January 1994.

Résumé :

Les réseaux sans fil maillés (Wireless Mesh Networks) sont considérés comme l'une des solutions les plus prometteuses pour améliorer la couverture réseau et accroître le nombre de clients partageant un accès sans fil à large bande. La transmission des données dans les réseaux Mesh sans-fil est de nature multi-sauts. Les données sont générées de destinées à un nœud passerelle. Pour cela, la capacité de la transmission à la couche physique dépend de plusieurs facteurs comme la topologie du réseau, la méthode d'accès dans le réseau ou la configuration de transmission.

L'introduction des systèmes de communication sans fil à antennes multiples appelés communément MIMO au niveau de la couche physique des réseaux WMNs permet d'élever les performances en termes de débit maximal et d'établir des transmissions parallèles dans le réseau dans la même bande de fréquences, et ainsi supporter un plus grand nombre de clients

Au cours de ce travail, nous étudions la capacité par nœud dans un réseau Mesh sans-fil exploitant la technologie MIMO. Nous introduisons le problème de configuration de transmission dans les réseaux Mesh sans-fil et son effet sur la capacité du réseau. La configuration de transmission est définie comme étant le nombre d'antennes utilisées par chaque nœud pour émettre vers sa destination.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'intégration de la technologie MIMO dans les réseaux Mesh sans fil dans le but d'obtenir une capacité optimal.