

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES  
DÉPARTEMENT INFORMATIQUE



## *Mémoire de Master*

**En Informatique**

**Spécialité : Réseaux et Systèmes Distribués**

*Thème :*

---

La norme *IEEE 802.11ac* pour des réseaux  
*WLANs* à très haut débit : Présentation et  
Évaluation des performances

---

**Réalisé par :**

*M<sup>r</sup>* MALOUM Farès

**Devant le jury composé de :**

Président	M <sup>lle</sup> REBBOUH	Nadjette	MAA	Université de Béjaïa
Rapporteurs	M <sup>me</sup> BOUALLOUCHE	Louiza	MCA	Université de Béjaïa
	M <sup>r</sup> YAZID	Mohand	MAB	Université de Béjaïa
Examineurs	M <sup>me</sup> OUYAHIA	Samira	MAA	Université de Béjaïa
	M <sup>lle</sup> BOUSBA	Nassima	Doctorante	Université de Béjaïa

**Promotion 2012/2013.**

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des figures</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>1</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11</b>	<b>3</b>
1.1 Généralités sur les réseaux sans fil . . . . .	3
1.1.1 Définition et description des réseaux sans fil . . . . .	3
1.1.2 Classification des technologies sans fil . . . . .	4
1.1.2.1 Réseaux personnels sans fil (WPANs) . . . . .	5
1.1.2.2 Réseaux locaux sans fil (WLANs) . . . . .	5
1.1.2.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMANs) . . . . .	6
1.1.2.4 Réseaux étendus sans fil (WWANs) . . . . .	7
1.2 Présentation du standard IEEE 802.11 . . . . .	7
1.2.1 La famille IEEE 802 et les standards 802.11 . . . . .	7
1.2.2 Quelques spécifications 802.11 . . . . .	8
1.2.3 Couches physiques . . . . .	10
1.2.4 Couche MAC 802.11 . . . . .	12
<b>2 Les nouvelles normes IEEE 802.11</b>	<b>16</b>
2.1 Couche physique . . . . .	16
2.1.1 Modulation et codage . . . . .	16

2.1.1.1	Les Modulations fondamentales . . . . .	17
2.1.1.2	Les Modulations numériques . . . . .	17
2.1.2	L'OFDM . . . . .	19
2.1.3	Les canaux . . . . .	21
2.1.3.1	Les canaux à 2, 4 GHz . . . . .	21
2.1.3.2	Les canaux à 5 GHz . . . . .	21
2.1.3.3	Le Regroupement de canaux . . . . .	22
2.1.4	Techniques multi-antennes . . . . .	22
2.1.4.1	Classification multi-antennes . . . . .	23
2.1.4.2	Diversité d'espace . . . . .	24
2.1.4.3	Beamforming . . . . .	24
2.1.4.4	Multiplexage spatial . . . . .	26
2.1.4.5	Codage espace-temps . . . . .	28
2.1.5	Downlink MU-MIMO . . . . .	29
2.2	Couche MAC . . . . .	30
2.2.1	Méthodes d'accès au canal . . . . .	30
2.2.2	Block ACK . . . . .	32
2.2.3	Agrégation de trames . . . . .	33
2.2.4	Format des trames . . . . .	35
2.2.5	Opportunité de transmission TxOP . . . . .	36
2.3	IEEE 802.11n . . . . .	38
2.4	IEEE 802.11ac . . . . .	39
<b>3</b>	<b><i>Évaluation des performances de la norme IEEE 802.11ac</i></b> . . . . .	<b>41</b>
3.1	Synthèse sur les travaux existants, proposition et motivations . . . . .	42
3.1.1	Synthèse sur les travaux existants . . . . .	42
3.1.2	Motivations . . . . .	44
3.1.3	Proposition . . . . .	44
3.2	Résultats et analyse . . . . .	45
3.2.1	Outils logiciels utilisés . . . . .	45
3.2.2	Paramètres MAC et PHY utilisés . . . . .	46
3.2.3	Simulation et analyse des résultats. . . . .	48
3.2.3.1	Évaluation du mécanisme d'agrégation A-MSDU . . . . .	48
3.2.3.2	Évaluation du mécanisme d'agrégation A-MPDU . . . . .	49
3.2.3.3	Évaluation du mécanisme d'agrégation Two-level . . . . .	51
3.2.3.4	Influence de la taille des paquets sur les trois mécanismes d'agrégation . . . . .	53

3.2.3.5	Influence du taux d'arrivée des paquets sur les trois mécanismes d'agrégations . . . . .	54
3.2.3.6	Analyse de l'occupation de la bande passante selon la technique MIMO utilisée . . . . .	55
3.2.3.7	Éstimation du débit global atteignable avec les trois mécanismes d'agrégation . . . . .	56
	<b>Conclusion générale</b>	<b>58</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>59</b>

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	Classification des réseaux sans fil selon la portée. . . . .	4
1.2	Famille IEEE 802.11. . . . .	8
1.3	Étalement de spectre par saut de fréquences. . . . .	10
1.4	Etalement de spectre par séquence directe. . . . .	11
1.5	Huit premier canaux définis par OFDM. . . . .	11
1.6	Methode d'accès au canal DCF. . . . .	13
1.7	Binary exponentiel Backoff. . . . .	14
1.8	Methode d'accès au médium en mode RTS/CTS. . . . .	15
2.1	Modulation OFDM. . . . .	20
2.2	Classification multi-antennes. . . . .	23
2.3	Principe de fonctionnement du Beamforming. . . . .	25
2.4	Modèle du multiplexage spatial. . . . .	26
2.5	Downlink MU-MIMO. . . . .	29
2.6	Schéma d'une station avec EDCA. . . . .	31
2.7	Principe du Block Ack (BA). . . . .	32
2.8	Opération basic avec DCF. . . . .	33
2.9	Un niveau d'agrégation de trames : a)A-MSDU ;b) A-MPDU. . . . .	34
2.10	Aggregation a deux niveaux. . . . .	35
2.11	Format d'une trame MAC IEEE 802.11ac. . . . .	36
2.12	Opportunité de transmission TxOP. . . . .	36
2.13	Les phases du 802.11ac TxOP Sharing. . . . .	37
2.14	Exemple du TxOP Sharing. . . . .	38
3.1	Schéma détaillé de SADT du simulateur 802.11-ANNGW. . . . .	46
3.2	Débit effectif global de l'A-MSDU vs. Nombre de MSDUs . . . . .	48

3.3	Débit effectif global de l'A-MPDU vs. Nombre de MPDUs . . . . .	49
3.4	Débit effectif global vs. Nombre de MPDUs avec l'agrégation Two-level. . . . .	51
3.5	Débit effectif global vs. Longueur des paquets. . . . .	53
3.6	Débit effectif global vs. Taux d'arrivée des paquets (VPR). . . . .	54
3.7	Taux d'occupation de la bande passante vs. Techniques MIMO, utilisant aucune agrégation. . . . .	55
3.8	Débit effectif global vs. Nombre de nIJud. . . . .	56

---

# LISTE DES TABLEAUX

2.1	Correspondance entre la valeur UP et la catégorie d'accès. . . . .	31
2.2	Paramètres de contention par défaut d'EDCA. . . . .	32
2.3	La longueur des A-MSDU/MPDU dans IEEE 802.11n. . . . .	39
2.4	La longueur des A-MSDU/MPDU dans IEEE 802.11ac. . . . .	40
3.1	Paramètres de la couche PHY OFDM et de la couche MAC 802.11ac. . . . .	47
3.2	Correspondance entre techniques MIMO et débits PHY. . . . .	55

# *Liste des abréviations*

---

A	A-MPDU	Agregate MAC Protocol Data Unit	
	A-MSDU	Agregate MAC Service Data Unit	
	AC	Access Category	
	ACK	Acknowledgment	
	AC-BE	Best Effort AC	
	AC-BK	BackgroundAC	
	AC-VI	Video AC	
	AC-VO	Voice AC	
	AD	Destination Address	
	ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	
	AIFS	Arbitration Inter-frame Spacing	
	ANNGW	Analysis Network Next Generation Wifi	
	AR	Receptor Adress	
	ASK	Amplitude Shift-Keying	
	AT	Transmiter Address	
	AM	Amplitude Modulation	
	ATV	Amator Transmitter Voice	
	AP	Access Point	
	B	BA	Block ACK
		BE	Best Effort
		BK	Background
BEB		Binary Exponential Back-off	
C	BPSK	Bit PSK	
	CCK	Complementary Code Keyig	
	CL	Controlled Load	
	CFP	Centention Free Period	
	CF-POLL	Centention Frame POLLing	
	COFDM	Coded OFDM	
	CRC	Cyclic Redundancy Check	
	CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance	
	CTS	Clear To Send	
	CP	Contention Period	
CW	Contention Window		

<b>D</b>	<b>DCF</b>	<b>D</b> istributed <b>C</b> oordination <b>F</b> unction
	<b>DMT</b>	<b>D</b> iscrete <b>M</b> ultitone <b>M</b> odulation
	<b>DIFS</b>	<b>D</b> CF <b>I</b> nter- <b>F</b> rame <b>S</b> pacing
	<b>DSL</b>	<b>D</b> igital <b>S</b> ubscriber <b>L</b> ine
	<b>DSSS</b>	<b>D</b> irect <b>S</b> equence <b>S</b> pread <b>S</b> pectrum
	<b>DPSK</b>	<b>D</b> ifferential <b>P</b> hase <b>S</b> hift- <b>K</b> eying
<b>E</b>	<b>EDCA</b>	<b>E</b> nhanced <b>D</b> istributed <b>C</b> hannel <b>A</b> ccess
	<b>EE</b>	<b>E</b> xcellent <b>E</b> ffort
	<b>EDCAF</b>	<b>E</b> nhanced <b>D</b> istributed <b>C</b> hannel <b>A</b> ccess <b>F</b> unction
<b>F</b>	<b>FCS</b>	<b>F</b> rame <b>C</b> heck <b>S</b> equence
	<b>FDM</b>	<b>F</b> requency <b>D</b> ivision <b>M</b> ultiplexing
	<b>FM</b>	<b>F</b> requency <b>M</b> odulation
	<b>FHSS</b>	<b>F</b> requency <b>H</b> opping <b>S</b> pread <b>S</b> pectrum
	<b>FSK</b>	<b>F</b> requency <b>S</b> hift <b>K</b> eying
<b>G</b>	<b>GFSK</b>	<b>G</b> aussian <b>F</b> requency <b>S</b> hift <b>K</b> eying
	<b>GSM</b>	<b>G</b> lobal <b>S</b> ystem for <b>M</b> obile
	<b>GPRS</b>	<b>G</b> eneral <b>P</b> acket <b>R</b> adio <b>S</b> ervice
<b>H</b>	<b>HC</b>	<b>H</b> ybride <b>C</b> oordination
	<b>HCF</b>	<b>H</b> C <b>F</b> unction
	<b>HR-DSSS</b>	<b>H</b> igh <b>R</b> ate <b>D</b> SSS
	<b>HCCA</b>	<b>H</b> ybrid <b>C</b> ontrolled <b>C</b> ontention <b>A</b> ccess
<b>I</b>	<b>IEEE</b>	<b>I</b> nstitute of <b>E</b> lectrical and <b>E</b> lectronic <b>E</b> ngineer
	<b>ICI</b>	<b>I</b> nter- <b>C</b> arrier <b>I</b> nterférence
	<b>IFS</b>	<b>I</b> nter <b>F</b> rame <b>S</b> pacing
	<b>IFFT</b>	<b>I</b> nverse <b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform
<b>L</b>	<b>LTF</b>	<b>L</b> ong <b>T</b> raining <b>F</b> ield
	<b>L-LTF</b>	<b>L</b> ayer <b>L</b> T <b>F</b>
	<b>L-SIG</b>	<b>L</b> ayer <b>S</b> ignal field
<b>M</b>	<b>MAC</b>	<b>M</b> edium <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
	<b>MCS</b>	<b>M</b> odulation and <b>C</b> oding <b>S</b> cheme
	<b>MIMO</b>	<b>M</b> ultiple- <b>I</b> nter, <b>M</b> ultiple <b>O</b> utput
	<b>MU-MIMO</b>	<b>M</b> ultiple- <b>U</b> ser <b>M</b> IMO
	<b>MPEG</b>	<b>M</b> otion <b>P</b> icture <b>E</b> xpert <b>G</b> roup
	<b>MSDU</b>	<b>M</b> AC <b>S</b> ervice <b>D</b> ata <b>U</b> nit
	<b>MISO</b>	<b>M</b> ultiple <b>I</b> nter <b>S</b> ingle <b>O</b> utput
	<b>MPDU</b>	<b>M</b> AC <b>P</b> rotocol <b>D</b> ata <b>U</b> nit

<b>N</b>	NC	Network Control
	<b>O</b>	OFDM
<b>P</b>	OSI	Open System Interconnect
	PHY	Physical layer
<b>Q</b>	PDA	Personal Digital Assistant
	PCF	Point Coordination Function
	PIFS	PCF Inter-Frame Spacing
	PM	Phase Modulation
	PSK	Phase Shift Keying
	PPDU	PHY Protocol Data Unit
	PSDU	PHY Service Data Unit
	QoS	Quality of Service
	QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
	QAM	Quadrature Amplitude Modulation
<b>R</b>	QSTA	Quality STA
	RES	RESeaux
<b>S</b>	RTS	Request To Send
	SIFS	Short Inter-Frame Spacing
	SIMO	Single-Input, Multiple-Output
	SISO	Single-Input, Single-Output
	SDMA	Spatial Division Multiple Access
	STBC	Space-Time Block Coding
	STC	Space Time Coding
	STA	STAtion
	SU-MIMO	Single User MIMO
	<b>T</b>	TXOP
TDMA		Transmission Dynamic Medium Access
TCP		Transmission Control Protocol
TID		Transmitter IDentificator
<b>U</b>	UP	User Priority
	<b>V</b>	VHT
<b>W</b>	WLAN	Wireless Local Area Network
	WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
	WPAN	Wireless Personnal Area Network
	WWAN	Wireless Wide Area Network

<b>WECA</b>	<b>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</b>
<b>WiFi</b>	<b>Wireless Fidelity</b>

---

# *INTRODUCTION GÉNÉRALE*

De nos jours, de plus en plus d'applications exigeantes en termes de qualité de service sont conçues et mise en œuvre au sein des réseaux locaux sans fil. De ce fait, un besoin croissant de nouvelles normes sans fil permettant de répondre à ce besoin de QoS est de plus en plus important [1]. Pour cela, en 2005 la norme IEEE 802.11e a été publiée pour offrir une différenciation de service au niveau MAC du protocole 802.11 [2]. Cette différenciation de service est possible grâce aux intervalles inter trames AIFs, fenêtres de contention CWs et à la limite de l'opportunité de transmission TxOPLimit [3].

Très rapidement les communautés industrielles et de recherches scientifiques, se sont rendu compte qu'une simple différenciation de service, permet certes de favoriser certains flux par rapport aux autres, mais le problème du débit de transmission reste toujours d'actualité. En particulier, lorsque le réseau local atteint un état de saturation, la différenciation de services ne permet pas de maintenir un bon fonctionnement du réseau [4]. Pour pallier au problème du débit dans un réseau local sans fil et pour permettre une fluidité dans le transfert de grandes quantités d'informations, le groupe de travail IEEE a proposé le standard IEEE 802.11n qui a été ratifié en 2009 [5]. Ce standard a défini de nouvelles caractéristiques MAC et PHY qui n'ont jamais existé dans les anciennes normes telles que b/a/g/e. D'une part, le standard IEEE 802.11n a proposé essentiellement de nouveaux mécanismes d'agrégation (A-MSDU, A-MPDU, Two-level) de paquets de données au niveau de la couche MAC. Ces mécanismes ont pour objectif de réduire au minimum possible les overheads dûs particulièrement aux entêtes PHY et MAC et permettent ainsi d'augmenter la quantité de données utiles envoyées sur le réseau [6]. D'autre part, la couche PHY de la norme IEEE 802.11n, a proposé des techniques de transmission mettant en œuvre le multiplexage de plusieurs flux OFDM [7]. Ces nouvelles techniques sont connues sous l'appellation MIMO.

Encore une fois, l'amendement IEEE 802.11n ne permet pas une utilisation optimale de la bande passante et la satisfaction de la QoS de tous les trafics sollicitant la ressource radio.

Ceci est dû essentiellement à une absence de communications inter-couches MAC-PHY et à une mauvaise gestion du canal de transmission [8].

L'amendement IEEE 802.11ac est proposé pour offrir un bien meilleur débit de transmission que l'existant, via des mécanismes MAC et PHY, assurant une exploitation efficace du canal de transmission. Ces mécanismes se traduisent par un nouveau schéma d'opportunité de transmission partagée TxOPSharing, permettant à de multiples trafics réseaux d'être transmis simultanément suivant une certaine différenciation de services [9], et une nouvelle technique multi-antennes dite downlink MU-MIMO permettant à un point d'accès (*AP*) d'établir plusieurs liens de communication avec plusieurs stations au même instant [10]. L'avantage principal de la norme IEEE 802.11ac réside dans la possibilité aux couche PHY et MAC de s'informer l'une sur l'autre et de pouvoir communiquer, afin d'optimiser les performances d'un réseau WLAN.

Dans ce projet, nous nous intéressons à l'implémentation, la simulation et l'évaluation des performances de la norme IEEE 802.11ac. Et ceci afin de montrer l'impact des caractéristiques MAC et PHY sur l'augmentation du débit effectif global du réseau, d'une part et de mettre en évidence le besoin réel de communication entre les couche MAC et PHY, qu'on appelle communication cross-Layer MAC-PHY, d'autre part. Dans ce travail nous quantifions pour la première fois, le débit effectif global d'un réseau 802.11ac, on considérant à la fois les améliorations MAC et PHY.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- ▷ Le premier chapitre sera consacré à la description générale des réseaux locaux sans fil et la présentation du standard IEEE 802.11.
- ▷ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les principales améliorations des deux couche PHY et MAC implémentées dans les nouvelles normes (VHT) et nous donnerons une brève présentation des normes, IEEE 802.11n et IEEE 802.11ac.
- ▷ Le troisième et dernier chapitre sera consacré à la présentation de notre simulateur 802.11 – *ANNGW* et l'analyse des résultats obtenus après simulation de la norme IEEE 802.11ac.

Ce mémoire s'achèvera par une conclusion, suivie par les perspectives de recherche induites par notre travail.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## *RÉSEAUX SANS FIL ET LE STANDARD IEEE 802.11*

### Introduction

De nos jours, les réseaux locaux informatiques connaissent une évolution importante. Il s'agit, d'une part, de l'utilisation courante du réseau local chez les particuliers, due en grande partie à Internet, et d'autre part, de l'arrivée en masse des ordinateurs et autres matériels mobiles. Pour cela il faut trouver une technologie permettant de simplifier le câblage du réseau chez un particulier et offrir une mobilité pour les produits portables [11].

La norme *IEEE 802.11* est un standard international s'adressant à la couche physique (*PHY*) et la couche contrôle d'accès au médium (*MAC*) du modèle de référence OSI. Son but est de faciliter l'interopérabilité entre les produits sans fil des grands constructeurs [12].

Dans ce chapitre, nous définirons les réseaux sans fil et les avons classés selon leurs étendus (*section 1.2*), puis nous présenterons le standard *IEEE 802.11* et ses couches physiques et *MAC* (*section 1.3*).

## 1.1 Généralités sur les réseaux sans fil

### 1.1.1 Définition et description des réseaux sans fil

Un réseau sans fil (*wireless network*) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux (*ordinateur portable, PDA, etc.*) 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 permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourds aménagements des infrastructures existantes, comme c'est le cas avec les réseaux filaires, ce qui a valu un développement rapide de ce type de technologies [11].

### 1.1.2 Classification des technologies sans fil

Les technologies dites *sans fil*, la norme 802.11 en particulier, facilitent et réduisent le coût de connexion pour les réseaux de grande taille. Avec peu de matériel et un peu d'organisation, de grandes quantités d'informations peuvent maintenant circuler sur plusieurs centaines de mètres, sans avoir recours à une compagnie de téléphone ou de câblage [11].

En fonction de leur étendue et de leur domaine d'application, ces réseaux sont catégorisés en quatre types : ( Voir la Figure 1.1)

- Les réseaux personnels sans fil (*WPANs, Wireless Personal Area Networks*);
- Les réseaux locaux sans fil (*WLANs, Wireless Local Area Networks*);
- Les réseaux métropolitains sans fil (*WMANs, Wireless Metropolitan Networks*);
- Les larges réseaux sans fil (*WWANs, Wireless Wide Area Networks*).

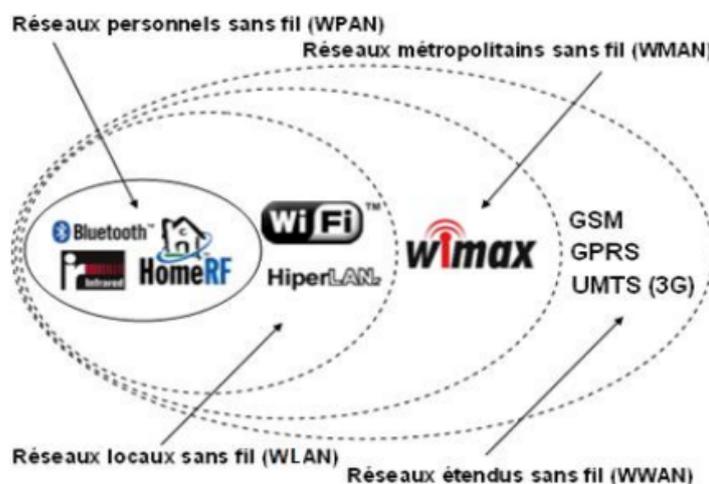


FIGURE 1.1 – Classification des réseaux sans fil selon la portée.

### 1.1.2.1 Réseaux personnels sans fil (WPANs)

Un réseau personnel sans fil (appelé également *réseau individuel sans fil* ou *réseau domestique sans fil* et noté *WPAN*) concerne les réseaux sans fil d'une faible portée ( $\approx 10m$ ). Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (*imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, etc.*) 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 comme par exemple le réseau Zigbee [12].

Le ZigBee est un réseau pour des communications bas débit et dédié à des applications embarquées. Un émetteur/récepteur ZigBee est caractérisé par une portée de quelques dizaines de mètres et un débit de 20 à 250 Kbit/s. La norme prévoit l'utilisation de trois bandes de fréquence (868, 915 ou 2400 MHz). La spécification ZigBee propose une pile protocolaire propriétaire et légère, déclinable dans plusieurs versions. Elle s'appuie sur la norme *IEEE 802.15.4* pour les couches Physique et Liaison de données. Elle propose ses propres couches supérieures (*Réseau, etc.*). ZigBee réalise de fortes économies d'énergie grâce à une optimisation du regroupement des communications de manière à favoriser de larges périodes de mise en veille du matériel [11]. L'objectif en termes d'autonomie est d'atteindre deux ans avec des piles alcalines standard pour des dispositifs embarqués faiblement communicants. Depuis l'amendement *802.15.4* en 2006, plusieurs couches physiques ont été rajoutées permettant une malléabilité plus grande en termes de débit et de bandes de fréquences disponibles. Le lecteur intéressé pourra trouver la description de ces couches physiques dans [12].

### 1.1.2.2 Réseaux locaux sans fil (WLANs)

Un réseau local sans fil (*noté WLAN*) est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre-eux les terminaux présents dans la zone de couverture. Comme le Wifi et l'HiperLAN .

**ETSI HiperLAN/2** la dernière version de l'HiperLAN a été ratifiée en février 2000. Cette seconde version est radicalement différente de la première : mode infrastructure, transport natif, plusieurs couches physiques pour s'adapter à l'environnement électromagnétique. HiperLAN/2 a été la première technologie à mettre en œuvre la technique d'étalement de spectre OFDM. Elle propose plusieurs modulations (*BPSK, QPSK, 16QAM et 64QAM*) pour plusieurs débits (*6, 9, 12, 18, 27, 36 et 54 Mbits/s*) sur la bande des 5,4 GHz - 5,7 GHz. La couche physique d'HiperLAN/2 a ensuite été reprise par *802.11a*, puis *802.11g*, ce qui explique les similarités des fréquences et des débits en bande de base entre HiperLAN/2 et *802.11a/g*. Il est intimement liée à ATM qui était prévu pour être le protocole de niveau réseau/transport au dessus d'Hi-

perLAN/2. Outre le transport des cellules ATM, il peut aussi véhiculer nativement des données vidéo MPEG, des paquets IP, ainsi que la voix numérisée des téléphones cellulaires UMTS. Elle prévoit également une gestion de la mobilité pour des vitesses inférieures à 10 m/s par handover<sup>1</sup> et propose une gestion de Qualité de Service (*QoS*) par des communications établies en mode connecté. A l'opposé d'HiperLAN/1 qui est basé sur une topologie de réseau ad hoc, HiperLAN/2 propose un réseau sans fil avec infrastructure. Les informations échangées passent par un ou plusieurs points d'accès (*AP, Access Points*) qui gèrent l'accès au médium selon le principe du TDMA dynamique. Malheureusement pour lui, RES10 n'a pas reçu autant de soutien que le groupe IEEE 802.11, son concurrent direct. La commercialisation d'équipements au standard HiperLAN/2 a été très limitée et le projet est abandonné aujourd'hui [12].

**Wifi** est connu sous le nom d'IEEE 802.11, il s'agit d'un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil. Le Wifi est soutenu par l'alliance WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), sa mission consiste à certifier l'interopérabilité et la compatibilité entre les fournisseurs des équipements *IEEE 802.11*.

Grâce au Wifi, il est possible de créer des réseaux locaux sans fils à haut débit pour que l'ordinateur à connecter ne soit pas trop distant par rapport au point d'accès. Dans la pratique, le Wifi permet de relier des ordinateurs portables, des ordinateurs de bureau, des assistants personnels ou tout type de périphérique à une liaison haut débit (*11 Mbits/s ou supérieur*) sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres en intérieur ( $\approx 50m$ ) à Plusieurs centaines de mètres en environnement ouvert [12]. Nous ne donnons pas plus de détails sur ce standard dans ce paragraphe, car il fera l'objet des sections qui suivent.

### 1.1.2.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMANs)

Un réseau métropolitain sans fil (WMAN) est connu sous le nom de BLR. Les WMANs sont basés sur la norme *IEEE 802.16*. La boucle locale radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbits/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication.

**WiMAX** est le réseau métropolitain sans fil le plus connu, permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbits/s sur un rayon de plusieurs kilomètres. Il permet de fournir un accès internet rapide à certaine zones rurales qu'il coûterait trop cher d'équiper en ADSL classique. WiMAX utilise des bandes de très hautes fréquences, situées entre 2 et 66 GHz. C'est une technologie de réseau sans fil fixe et non mobile. Elle nécessite que les antennes émettrices et réceptrices soient situées l'une en face de l'autre pour que les transmissions passent. Connue sous le nom officiel *IEEE 802.16*, cette technologie est très utile pour éviter les coûteuses

---

1. Nous appelons handover le changement de cellule

liaisons câblées qui étaient jusque là nécessaires pour apporter l'internet à haut débit dans les régions moins peuplées. WiMAX peut être utilisé en complément de Wifi pour relier deux réseaux trop éloignés l'un de l'autre, par exemple deux bâtiments d'une même entreprise [12].

#### 1.1.2.4 Réseaux étendus sans fil (WWANs)

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

**GSM** constitue au début du 21<sup>me</sup> siècle le standard de téléphonie mobile le plus utilisé en Europe. Il s'agit d'un standard de téléphonie dit de *seconde génération (2G)*, car contrairement à la première génération de téléphones portables, les communications fonctionnent selon un mode entièrement numérique.

**GPRS** permet d'étendre l'architecture du standard *GSM*, afin d'autoriser le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums de l'ordre de 171,2 Kbits/s (en pratique jusqu'à 114 Kbits/s). Grâce au mode de transfert par paquets, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque c'est nécessaire. Le standard GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans surcoût [11].

## 1.2 Présentation du standard IEEE 802.11

La norme *IEEE 802.11* de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), standardisée en 1997, définit plusieurs couches physiques et une seule couche d'accès au médium pour les réseaux WLANs. Les débits possibles varient entre 1 et 54 Mbits/s et les portées prévues varient entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres [11]. Cette norme est prévue pour fonctionner dans deux architectures, infrastructure et ad hoc.

### 1.2.1 La famille IEEE 802 et les standards 802.11

Le *802.11* est issu de la famille *802*, qui est une série de spécifications pour les réseaux locaux. La Figure 1.2 montre la relation entre les différents composants de la famille *802* et leurs emplacements dans le modèle OSI. Comme les spécifications *802*, le standards *IEEE 802.11* couvre les deux couches inférieures du modèle OSI : la couche liaison de donnée et la couche physique. La couche *MAC* définit un ensemble de règles permettant d'accéder au médium et

d'envoyer des données, les détails de la réception et de la transmission, sont traités au niveau de la couche physique.

Actuellement au sein du *802.11* plusieurs groupes de travail ont été créés afin d'améliorer ou de proposer de nouveaux mécanismes régissant divers aspects. Des révisions donc ont été apportées à la norme originale (avec un débit de 1 ou 2 Mbits/s) afin d'optimiser le débit, c'est le cas des normes *802.11* physiques à savoir (*802.11a*, *802.11b*, *802.11g*) ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité (*802.11i*) ou une meilleure interopérabilité (*802.11c*) [11].

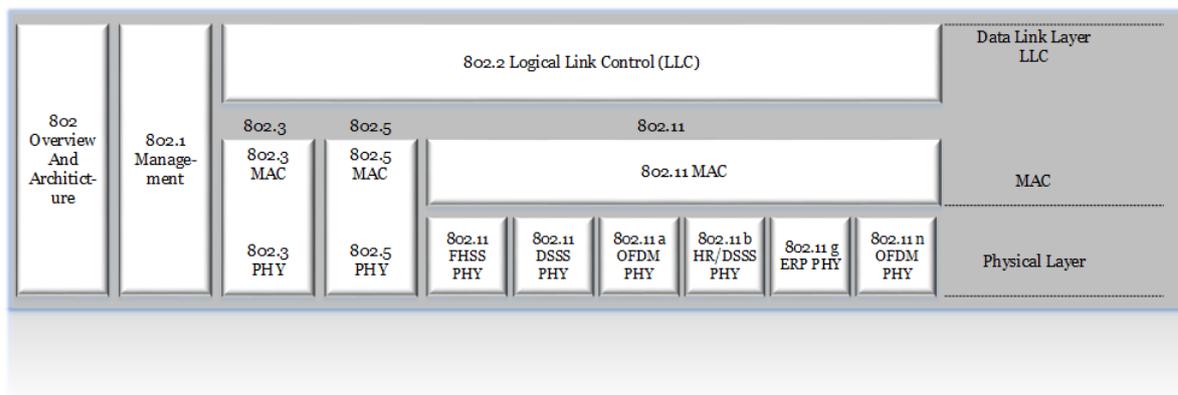


FIGURE 1.2 – Famille IEEE 802.11.

## 1.2.2 Quelques spécifications 802.11

On trouvera ci-après une brève description des principales révisions de la norme *802.11* :

- **802.11b** est la première norme des réseaux locaux sans fil utilisée par un nombre conséquent d'utilisateurs et de hotspots publics, elle était la norme la plus répandue en 2003 et 2004. Elle propose un débit théorique de 11 Mbits/s avec une portée de 300 mètres dans un environnement dégagé. La norme *802.11b* est définie par une modulation DSSS, un accès par *CSMA/CA* et une détection de porteuse. La norme *802.11b* utilise la bande de fréquence libre des 2.4 GHz. Elle est subdivisée en 13 sous canaux de 22 Mhz en Europe (11 aux USA, 14 au Japon) qui se chevauchent partiellement. Le principal inconvénient de *802.11b* consiste à présenter des interférences possibles avec les appareils fonctionnant sur les mêmes fréquences tels que les fours à micro ondes, les caméras analogiques sans fil et toutes les formes de surveillance ou d'observation professionnelles ou domestiques à distance comme les transmetteurs de salon, la télémétrie, la télémédecine,

les radioamateurs ATV, les claviers et souris sans fil [14].

- **802.11a** permet d'obtenir un haut débit de 54 Mbits/s. Celle-ci opère sur plusieurs canaux radio de la bande de fréquence U-NII utilisant une modulation OFDM. Un des avantages de cette norme consiste à remédier aux problèmes rencontrés avec *802.11b*, en utilisant une bande de fréquence moins utilisée pour d'autres applications. De plus, la vitesse théorique de 54 Mbits/s s'avère être plus confortable pour l'échange de gros fichiers comparé à celle du *802.11b* qui vaut 11 Mbits/s. Le *802.11a* possède également des inconvénients comme sa portée réduite (15m) et son incompatibilité avec le *802.11b*. Ainsi le passage à cette norme exige donc l'acquisition d'un tout nouveau matériel [15].
- **802.11g** : est la plus répandue, elle offre un haut débit (*54 Mbits/s*) sur la bande de fréquence des 2.4 GHz. De plus, les matériels conformes à la norme *802.11g* fonctionnent en *802.11b* (à *11 Mbits/s*), ce qui garanti une compatibilité avec les points d'accès *802.11b*. La modulation de *802.11g* est OFDM comme pour la norme *802.11a*. Malheureusement, ce standard est aussi sensible aux interférences avec d'autres appareils utilisant les mêmes fréquences dans la bande des 2.4 GHz [16].
- **802.11e** offre des possibilités de qualité de service (QoS) au niveau de la couche liaison de données *802.11*. Elle définit ainsi les besoins des différents paquets en terme de bande passante et de délai de transmission de telle manière à permettre des flux prioritaires. Nous pouvons alors espérer, par exemple, une transmission de la voix et de la vidéo de meilleure qualité (*fluidité et débit important*). Actuellement, ces applications font l'objet d'un marché en pleine expansion. Par exemple, les téléphones Wifi (*F1000 de UTStarcom*), télévision Wifi etc. [2].
- **802.11n** propose un débit bande de base de 540 Mbits/s sur une portée de 50 mètres environ, grâce à l'utilisation conjointe des techniques MIMO et OFDM. Elle propose l'utilisation des deux bandes de fréquences 2, 4 GHz (comme *802.11b* et *802.11g*) et 5 GHz (comme *802.11a*). Comme *802.11g*, cette norme reste compatible avec *802.11*, de plus, elle reprend les concepts de *802.11e* pour la gestion de la Qualité de Service, de *802.11i* pour la sécurité et de *802.11f* pour la gestion des handovers. Cette norme a été ratifiée le 11 septembre 2009 [5].

### 1.2.3 Couches physiques

**FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)** est une technique basée sur le saut de fréquence périodique de l'émetteur (*toutes les 20 à 400ms*), suivant un ordre cyclique prédéterminé. Le fait de ne jamais rester sur le même canal accroît fortement l'immunité au bruit. Dans le cas de canaux encombrés, cela permet d'avoir au final un bon moyennage et d'utiliser au mieux toute la bande passante allouée. La bande des 2.4 GHz est divisée en 79 canaux de 1 MHz chacun. L'avantage de cette technique est aussi que même en perdant quelques *sauts* (ou *hop*) suite à des interférences très localisées, (*Voir la Figure 1.3*) on peut tout demême retrouver le signal. D'un autre côté, si le bruit de fond est plus puissant que le signal émis, il n'y a rien à faire. De plus, cette méthode de transmission est relativement simple mais elle est limitée par son débit maximum de 2 Mbits/s. Enfin, elle introduit une certaine complication au niveau *MAC*, ce qui se traduit en termes de multiplication d'en-têtes et donc de réduction de débit [11].

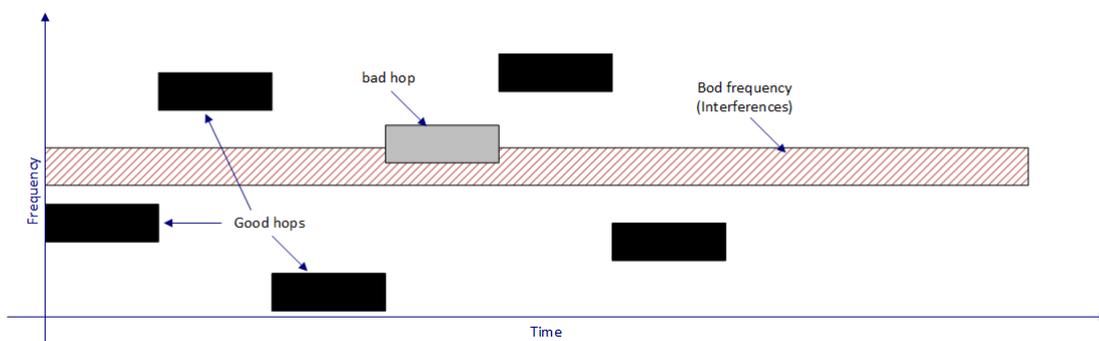


FIGURE 1.3 – Étalement de spectre par saut de fréquences.

**DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)** est une technique de la séquence directe qui divise la bande des 2.4 GHz en 14 canaux de 22 MHz chacun. Les données sont envoyées uniquement sur l'un des 14 canaux. Pour minimiser le bruit de fond et les interférences locales, une technique dite de chipping est utilisée. Elle consiste à convertir les bits de données en une série de bits redondants. Le bit 1 sera remplacé par une succession de 11 bits 0 ou 1 (*appelée code PN*) pendant le même temps de transmission. Le bit 0 sera remplacé par le complémentaire de la succession de bits utilisée pour le bit 1. On étale ainsi le signal sur une bande de fréquence plus large en sur-modulant chaque bit du paquet à transmettre par ce code PN répétitif. Au niveau du récepteur, le signal original est retrouvé en réceptionnant tout le canal étalé et en le démodulant avec le même code (*Voir la Figure 1.4*) [11].

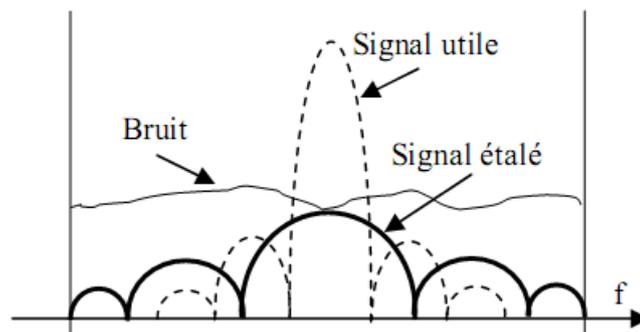


FIGURE 1.4 – Etalement de spectre par séquence directe.

**HR-DSSS (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum*)** exploite une technique de transmission par étalement de spectre à haut débit par séquence directe. C'est une extension de la couche DSSS qui ajoute la technique de modulation CCK (*Complementary Code Keying*) afin de supporter les débits de 5.5 Mbits/s et 11 Mbits/s en plus de ceux déjà supportés par la couche DSSS [11].

**OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)** est une méthode de codage appliquée aux normes 802.11a, g et n qui permet d'obtenir une meilleure bande passante. De ce fait, OFDM divise la bande de fréquence en bandes secondaires qui transmettent simultanément des fractions de données. Plus le nombre de canaux est élevé, plus les données transmises en parallèle sont nombreuses, plus la bande passante est élevée. Selon les conditions de bande passante, OFDM peut utiliser des méthodes de modulation de phase et d'amplitude [19]. OFDM offre un débit allant jusqu'à 54 Mbit/s en utilisant une modulation de phase. Elle subdivise la bande des 5 GHz en 12 canaux disjoints de 20 MHz (voir Figure 1.5 [12]).

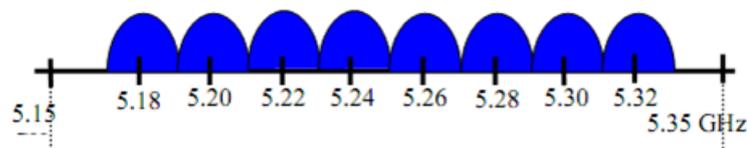


FIGURE 1.5 – Huit premiers canaux définis par OFDM.

## 1.2.4 Couche MAC 802.11

### Modes de fonctionnement :

Le médium de transmission peut être accédé selon un des deux modes : le mode *PCF* (*Point Coordination Function*) et le mode *DCF* (*Distributed Coordination Function*).

**PCF** est une méthode optionnelle implémentée dans les matériels *802.11*. PCF consiste en une gestion centralisée des ressources. C'est le point d'accès qui ordonne les transmissions et distribue le droit à la parole. Dans ce projet, on ne considère que le mode DCF.

**DCF** est le mode d'accès principal qui doit être supporté par toutes les stations dans le réseau. Le DCF opère uniquement dans un réseau ad hoc ou coexiste avec PCF dans un réseau d'infrastructure. Selon le mode DCF, les stations voulant émettre doivent se concurrencer pour avoir l'accès au médium. Après une trame est transmise, la station doit répéter cette étape pour émettre les trames suivantes. Cette procédure assure l'équité de l'accès au médium pour toutes les stations. DCF s'appuie sur le protocole *CSMA/CA* (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*) et l'algorithme de backoff [12].

### Protocole CSMA/CA :

Une station voulant transmettre écoute le support, et s'il est occupé, la transmission est différée. Si le support est libre pour un temps spécifique (appelé *DIFS*, *Distributed Inter Frame Space*, dans la norme), alors la station est autorisée à transmettre après une durée tirée aléatoirement en se basant sur l'algorithme de Backoff. La station réceptrice va vérifier le CRC du paquet reçu et renvoie un accusé de réception (ACK). La réception de l'ACK indiquera à l'émetteur qu'aucune collision n'a eu lieu. Si l'émetteur ne reçoit pas l'accusé d'ACK, alors il retransmet le fragment jusqu'à ce qu'il l'obtienne ou abandonne au bout d'un certain nombre de retransmissions (*Voir la Figure 1.6*).

### Durées inter-trames :

La norme *802.11* définit quatre types d'espace *IFSs* (*Inter Frame Space*) entre deux trames, ils sont classés du plus court au plus long :

**SIFS** (*Short IFS*) est le plus court de tous. Il est utilisé pour la transmission des trames ACK, CTS, réponse à un polling et des rafales de trames issues d'une même station. **PIFS** (*PCF IFS*) est utilisé en mode PCF, il permet aux transmissions PCF de gagner l'accès au médium par l'utilisation d'un IFS plus petit que celui utilisé pour la transmission des trames en DCF.

**DIFS** (*DCF IFS*) est le plus couramment utilisé (*avec le SIFS*), il est utilisé en mode DCF comme temps minimal d'attente avant transmission. Enfin, **EIFS** (*Extended IFS*) est utilisé lorsqu'il y a détection de collision. Ce temps relativement long par rapport aux autres IFS, est utilisé comme inhibiteur pour éviter des collisions en série. Les valeurs des différents PIFS et DIFS sont calculées de la manière suivante :  $PIFS = SIFS + \text{Slot Time}$ ,  $DIFS = SIFS + 2 * \text{Slot Time}$  ou  $\text{Slot Time} = \text{durée minimale pour détecter un canal libre}$  [12].

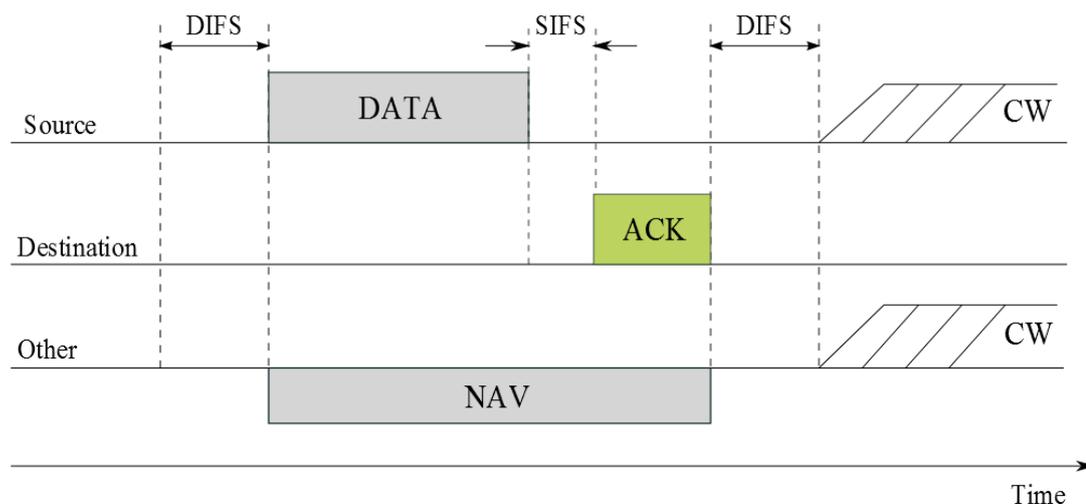


FIGURE 1.6 – Méthode d'accès au canal DCF.

### Algorithme de backoff :

Le backoff est une méthode bien connue pour résoudre les différences entre plusieurs stations voulant avoir accès au support. Cette méthode demande que chaque station choisisse un délai d'attente aléatoire compris entre 0 et la taille d'une fenêtre de contention de valeur  $CW - 1$  qui est égale à un certain nombre de slots, et d'attendre ce nombre de slots avant de transmettre, toujours en vérifiant qu'une autre station n'a pas accédé au support avant elle. Le backoff exponentiel signifie qu'à chaque fois qu'une station choisit un slot et provoque une collision, la durée d'attente aléatoire est augmentée exponentiellement<sup>2</sup> (Voir la Figure 1.7 [12]).

2. la durée d'attente est doublée à la tentative de transmission suivante

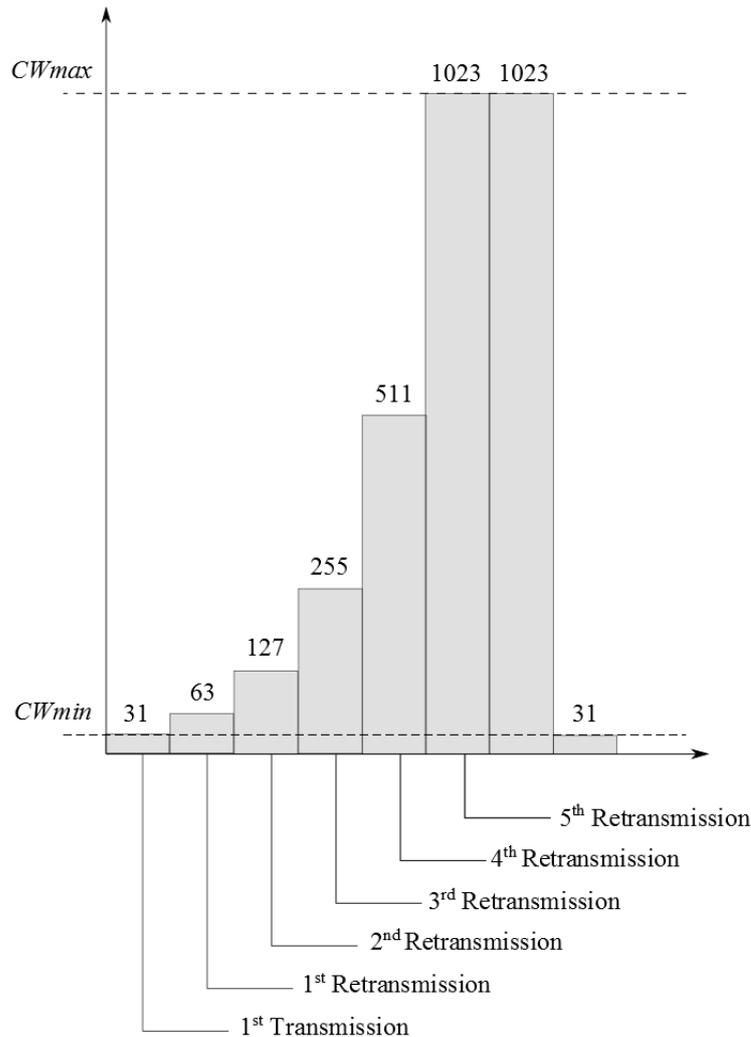


FIGURE 1.7 – Binary exponentiel Backoff.

### Mécanisme RTS/CTS :

Pour éviter la collision sur le paquet de données, la norme définit un mécanisme optionnel avec échange de messages courts *RTS* et *CTS*. Une station voulant émettre transmet d'abord un petit paquet de contrôle appelé *RTS* (*Request To Send*), qui comprend la source, la destination, et la durée de transmission<sup>3</sup> la station destination répond (*si le canal est libre*) avec un paquet de contrôle de réponse appelé *CTS* (*Clear To Send*) qui inclura les même informations sur la durée. Grâce à l'envoi de la trame *RTS*, toutes les stations situées dans la couverture radio de la source sont informées d'une transmission imminente et de sa durée éventuelle. Le *CTS* a le même rôle d'annonce mais cette fois autour du récepteur. Ce mécanisme quoique efficace entraîne un surcôt important occasionné par la transmission sur la voie radio des trames de signalisation *RTS/CTS*. Ce surcôt correspond à autant de bande passante qui

3. c'est-à-dire la durée totale de la transmission du paquet et de son accusé de réception

n'est pas utilisée pour transmettre des données. C'est pourquoi à ce mécanisme est associé un seuil de déclenchement qui en limite l'usage lorsque le surcôt devient trop important. Si la longueur des données à transmettre est inférieure à ce seuil, la transmission se fera sans utilisation des trames *RTS/CTS*. Si le seuil est dépassé alors le mécanisme est utilisé pour la transmission [12].

La Figure 1.8 montre un accès au médium en mode *RTS/CTS*.

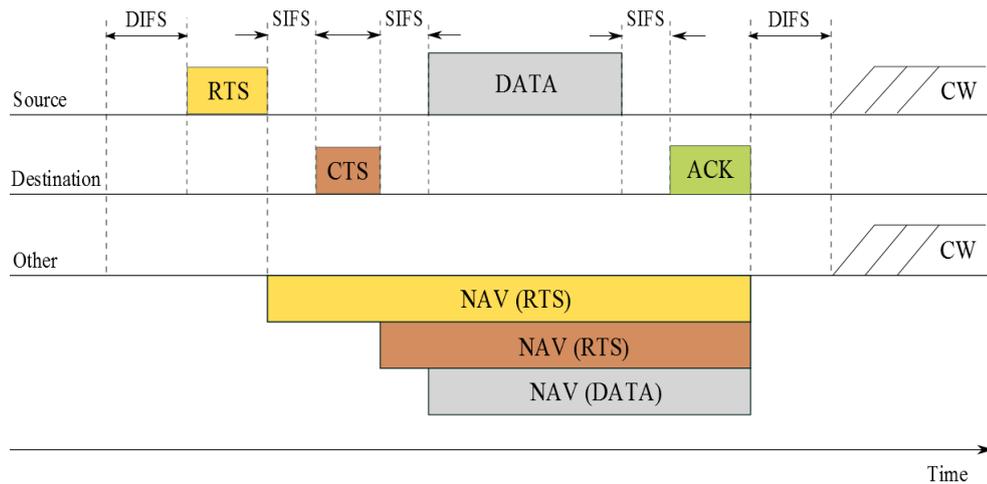


FIGURE 1.8 – Methode d'accès au médium en mode *RTS/CTS*.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le concept des réseaux sans fil, en décrivant ses différentes technologies ainsi que ses modes de fonctionnement, nous avons présenté les différentes techniques de transmission sans fil et nous avons brièvement décrit le standard IEEE 802.11, en détaillant les différents mécanismes permettant d'assurer la transmission des paquets de données.

---

---

## CHAPITRE 2

---

# *LES NOUVELLES NORMES IEEE 802.11*

### Introduction

Les nouvelles normes IEEE 802.11, aussi connues sous le nom de Very High Throughput (*VHT*) WLANs, se positionnent comme les successeurs de la norme IEEE 802.11n, connue sous le nom de High Throughput (*HT*) WLANs. Comme évolutions antérieures au sein des WLANs, les nouvelles normes sont conçues pour être entièrement compatibles avec les normes précédentes, d'où les traits communs avec les anciennes normes [17].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes technologies et les différents mécanismes qui font que les nouvelles normes sont nommées VHT WLANs. Nous allons commencer par définir les principales améliorations au niveau PHY (*section 2.2*), pour passer ensuite aux améliorations MAC (*section 2.3*) et enfin nous terminerons par une brève présentation de la norme (*HT*) IEEE 802.11n (*section 2.4*) et la norme (*VHT*) IEEE 802.11ac (*section 2.5*).

## 2.1 Couche physique

### 2.1.1 Modulation et codage

Nous avons dans la littérature deux types de modulations (*fondamentales et numériques*), qui sont détaillés ci-dessous :

### 2.1.1.1 Les Modulations fondamentales

**Modulation d'amplitude** consiste à émettre une onde radio de fréquence fixe, que l'on appelle l'onde *porteuse*, dont on modifie l'amplitude en fonction de l'onde sonore, qui est l'onde *source* : c'est la modulation d'amplitude (*Amplitude Modulation, AM*). On dit que l'onde source *module* l'onde porteuse, ce n'est possible que si l'onde porteuse a une fréquence bien plus élevée que l'onde source. L'avantage est que l'on peut alors choisir la fréquence que l'on préfère pour le signal porteur, ce qui permet d'émettre plusieurs émissions en même temps sur des fréquences différentes. Le récepteur n'a plus qu'à sélectionner un *canal*, c'est-à-dire une fréquence à *démoduler*, pour choisir l'émission qu'il préfère [17].

**Modulation de fréquence** consiste à émettre une onde radio d'amplitude fixe, mais dont la fréquence varie au sein d'une bande de fréquences donnée, de façon proportionnelle au signal source. Il s'agit alors de la modulation de fréquence (*Frequency Modulation, FM*). La FM a besoin d'une bande assez large : plusieurs dizaines de kHz pour une station de radio, par exemple, et est beaucoup moins sensible aux distorsions de puissance dues aux obstacles ou aux interférences puisque les variations de l'intensité du signal ne sont pas prises en compte par le récepteur au cours de la démodulation [17].

**Modulation de phase** est telle que la phase d'une onde représente sa position dans le temps : si deux ondes de même fréquence sont en phase, alors leurs pics d'amplitude sont simultanés. Elles sont en opposition de phase lorsque les pics de l'une correspondent aux creux de l'autre. On mesure la phase en degrés : deux ondes en phase n'ont aucun décalage, c'est-à-dire une phase égale à  $0^\circ$ . Deux ondes en opposition de phase ont un décalage de  $180^\circ$ . Il est possible de moduler la phase en fonction du signal source, ce qu'on appelle simplement la modulation de phase (*Phase Modulation, PM*) [17].

### 2.1.1.2 Les Modulations numériques

#### Modulations simples : ASK, FSK et PSK

Lorsque l'on souhaite transmettre des informations numériques (*des 0 et des 1, c'est-à-dire des bits d'information*) plutôt qu'une source analogique (*comme une onde sonore*), on peut utiliser les modulations AM, FM ou PM. On parle alors de *codage* (*keying*). Pour l'AM, il y' aura simplement deux amplitudes possibles, l'une symbolisant le 0 et l'autre le 1. C'est ce qu'on appelle l'Amplitude-Shift Keying (*ASK*), c'est-à-dire le *codage par décalage d'amplitude*. Cette modulation est malheureusement très sensible au bruit et aux interférences. De même, en FM, on émettra une fréquence donnée pour symboliser le 0 et une autre pour le 1. Cela s'appelle le Frequency-Shift Keying (*FSK*), c'est une technique utilisée par le Wifi comme nous le verrons dans les paragraphes suivants. En modulation de phase, on pourra choisir une

phase de  $0^\circ$  pour coder le 0, ou de  $180^\circ$  pour coder le 1. C'est ce qu'on appelle le Phase-Shift Keying (*PSK*) [18].

### Modulations différentielles : DPSK

Une autre technique consiste à prendre en compte la variation de phase et non la phase dans l'absolu : aucun changement de phase signifie 0; un changement de  $180^\circ$  signifie 1. C'est le Différentiel PSK (*DPSK*). On pourrait également appliquer la même logique à l'ASK et FSK. Malheureusement, les modulations différentielles sont souvent moins performantes en environnement bruyant car elles introduisent une nouvelle source d'erreur possible : le décalage du signal précédent vient se rajouter à celui du signal actuel. L'avantage des modulations différentielles est qu'elles sont plus simples à mettre en œuvre que des systèmes *absolus* : le récepteur peut en effet se calibrer à tout instant sur le dernier signal reçu [18].

### Symboles à bits multiples : QPSK, QAM

On peut aller plus loin avec le PSK en choisissant quatre phases possibles plutôt que deux (*le raisonnement est identique pour les autres modulations*). Ces quatre phases auront alors les significations binaires suivantes : 00, 01, 10 et 11. On peut donc transmettre les bits d'information par couples, ce qui double naturellement le débit. Cette technique s'appelle la Quadrature PSK (*QPSK* ou *4PSK*). Les groupes de bits sont appelés des *symboles* ou des *échantillons* (*samples*). On peut donc mesurer le débit en symboles par seconde. Le PSK peut être combiné avec la modulation d'amplitude pour coder encore plus de bits d'information dans chaque symbole. Cette technique s'appelle la Quadrature Amplitude Modulation (*QAM*). On pourra par exemple avoir quatre phases possibles (*ou transitions de phase avec le DPSK*) et deux amplitudes possibles pour chaque phase. Dans ce cas, on aura huit combinaisons possibles, soit 3 bits d'information pour chaque symbole émis (*car*  $2^3 = 8$ ) : on parle alors de *8QAM*. Comme nous le verrons, pour les débits les plus élevés, le Wifi repose sur le *16QAM* (*douze phases possibles dont quatre pour lesquelles deux amplitudes sont possibles*) avec 4 bits d'information par symbole, ou même le *64QAM* avec 6 bits par symbole! Le QAM requiert toute fois un matériel assez sophistiqué [18].

**Filtre gaussien : GFSK** Une autre technique de modulation assez complexe consiste à faire passer la source binaire au travers d'un filtre gaussien avant de moduler la porteuse. Avant le passage dans le filtre la source possède deux états (*0 et 1*) et les transitions entre ces états sont brutales : en d'autres termes, le signal est *carré*. Une fois passé au travers du filtre, le signal source est *adouci*, les transitions sont moins brutales. Cela revient en quelque sorte à étaler chaque bit et à le faire déborder sur son voisin. Ensuite, n'importe quelle modulation peut être appliquée à cette source adoucie, comme le FSK, par exemple : on parle alors de FSK Gaussien, noté GFSK [18].

Les différentes modulations que nous venons de voir n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques : le *PSK* et ses variantes permettent d'atteindre des débits très élevés, mais ils débordent sur les canaux voisins, donc les interférences inter-canaux (*Inter-Carrier Interférence, ICI*) sont à craindre, le *2PSK* offre un débit moins élevé que le *4PSK*, lui-même moins rapide que le *8PSK* et ainsi de suite, en revanche, le *2PSK* est moins sensible au bruit que le *4PSK*, lui-même moins sensible que le *8PSK*, etc. Le *64QAM* est 1, 5 fois plus rapide que le *16PSK* et est aussi résistant au bruit, mais il suppose un matériel plus complexe, le *DPSK* est légèrement moins performant que le *PSK* mais plus simple à mettre en œuvre, le *GFSK* est moins rapide que le *PSK*, mais il est moins sensible au bruit, enfin le *GFSK* débordé très peu de la bande de fréquence qu'il utilise, ce qui le rend très efficace lorsque plusieurs canaux voisins sont utilisés simultanément.

### 2.1.2 L'OFDM

La modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), parfois appelée *Discrete Multitone Modulation* (DMT), est sans doute la plus puissante des trois modulations du Wifi car elle permet à la fois les débits les plus importants, la meilleure résistance au multipath, mais aussi la plus grande capacité de partage du spectre : elle est donc particulièrement indiquée en intérieur avec une densité importante d'antennes Wifi. On la trouve à la fois dans le *802.11g*, le *802.11a* et dans le *802.11n*. D'autres technologies l'exploitent, dont en particulier la technologie Digital Subscriber Line(*DSL*) ou encore le *Wimax* [18].

L'OFDM repose sur le principe du multiplexage, permettre la transmission simultanée de plusieurs communications sur une même bande de fréquences. Il existe le multiplexage par division des communications au cours du temps, qu'on appelle le Time Division Multiplexing (*TDM*), tel que chaque communication dispose de sa tranche de temps pour émettre des données et peut utiliser l'ensemble du spectre. Le multiplexage peut également se faire en partageant les différentes communications par fréquences, c'est le Frequency Division Multiplexing (*FDM*). Un spectre assez large est divisé en de multiples sous-porteuses (*sub-carriers*) et les données sont émises simultanément sur chaque sous-porteuse. Malheureusement, il est alors possible d'avoir des interférences entre les sous-porteuses, ce qu'on appelle l'Inter-Carrier Interférence (*ICI*). Pour résoudre ce problème, l'OFDM utilise une fonction mathématique assez complexe pour rendre les sous-porteuses *orthogonales*, ie., pour qu'elles n'interfèrent pas les unes avec les autres. Dans le cas du 802.11, il s'agit d'une transformation de Fourier inverse rapide (*Inverse Fast Fourier Transform, IFFT*). Grâce à cette fonction, les porteuses sont placées dans le spectre de fréquences de telle sorte que les pics de puissance d'une porteuse donnée correspondent aux zéros des autres porteuses [19].

En Wifi, 52 sous-porteuses d'environ 312,5 KHz chacune permet de couvrir un spectre de 16,66 MHz, qui forme un canal de communication OFDM. Chaque sous porteuse est modulée en PSK (*2PSK* ou *4PSK*) ou en QAM (*16QAM* ou *64QAM*). Sur ces 52 sous-porteuses, le Wifi en utilise quatre comme *pilotes* qui servent à synchroniser les fréquences et à mesurer en permanence les interférences et les décalages de phase, afin de s'y adapter au mieux. Ainsi, les données à émettre sont groupées en symboles de 48 bits en *2PSK* (et six fois plus en *64QAM* par exemple). Ces symboles sont émis en 48 portions simultanées : une par sous-porteuse. Puisqu'on émet de nombreux bits simultanément, on peut se permettre de diminuer le nombre de symboles émis par seconde tout en conservant un bon débit en termes de bits par seconde. Ceci permet de limiter considérablement le risque de perturbations dues au multipath, car il est alors peu probable qu'un symbole arrivera en même temps que le symbole suivant (car il y a un laps de temps important entre les deux), Voir la Figure (2.1).

Enfin, l'OFDM peut être renforcé par des codes *convolutés* (on parle de *Coded OFDM* ou *COFDM*) : il s'agit d'un codage qui rajoute de la redondance dans le message à transmettre et permet ainsi au récepteur de corriger les erreurs de transmission. À la réception, un algorithme sophistiqué est utilisé pour retrouver le message original le plus probable (par exemple l'algorithme de *Viterbe*). En rajoutant une redondance plus ou moins importante, ce mécanisme permet une bonne résistance aux interférences [20].

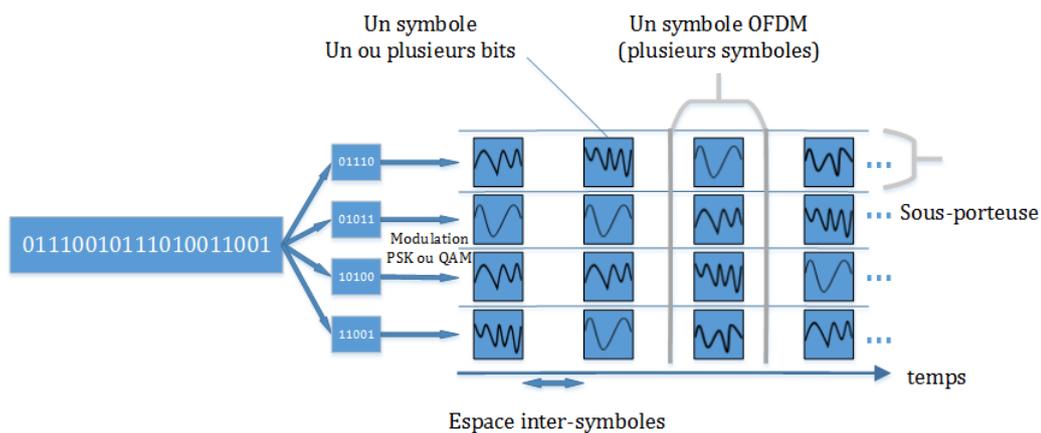


FIGURE 2.1 – Modulation OFDM.

Plus on souhaite un débit élevé, moins la redondance doit être importante. En conséquence, les débits élevés sont plus sensibles aux interférences. De plus, l'étalement du spectre étant assez homogène (*contrairement au DSSS*), un signal *OFDM* ne provoque que peu d'interférences pour les autres équipements sans fil présents.

### 2.1.3 Les canaux

Comme nous l'avons vu, toutes les variantes du Wifi découpent la bande de fréquences sur laquelle elles reposent (2, 4 GHz ou 5 GHz) en canaux. Ils sont différents selon les variantes utilisées.

#### 2.1.3.1 Les canaux à 2, 4 GHz

Le *802.11 FHSS* utilise la bande de 2, 4 GHz et la découpe en canaux de 1 MHz numérotés à partir de 2 400 MHz. Les canaux utilisables changent en fonction de la législation du pays où l'on se trouve.

Pour toutes les autres variantes du Wifi sur la bande de 2, 4 GHz, c'est-à-dire *le 802.11 DSSS, le 802.11b, le 802.11g et le 802.11n*, quatorze canaux de 22 MHz de largeur sont définis, également numérotés à partir de 2 400 MHz. Leurs centres ne sont espacés que de 5 MHz de sorte qu'ils se superposent en partie. Ceci permet de choisir avec une certaine souplesse la bande de fréquence que l'on préfère utiliser, mais si l'on a deux réseaux au même endroit et qu'ils utilisent des canaux voisins, on aura beaucoup d'interférences. Pour éviter les interférences, on recommande un espace de cinq canaux au moins, donc on ne peut utiliser que trois canaux simultanément au même endroit. En conséquence, on utilise habituellement les canaux 1, 6 et 11 qui sont suffisamment espacés pour éviter toute interférence et sont autorisés presque partout sur la planète [18].

En résumé pour *le 802.11 DSSS, le 802.11b, le 802.11g et le 802.11n* à 2, 4 GHz, 14 canaux de 22 MHz chacun sont définis. Puisqu'ils se superposent, on recommande en général de n'utiliser que les canaux 1, 6 et 11.

#### 2.1.3.2 Les canaux à 5 GHz

En ce qui concerne *le 802.11a et le 802.11n* sur la bande de fréquences de 5 GHz, les centres de deux canaux successifs sont également espacés de 5 MHz, mais la numérotation commence à 5 000 MHz. Par exemple, le canal 34 a pour centre 5 170 MHz car  $34 \times 5 + 5000 = 5\,170$ . De plus, chaque canal à 20 MHz de largeur, donc le canal 34 s'étend de 5 160 à 5 180 MHz. Naturellement, si l'on souhaite éviter tout chevauchement, il faut utiliser au moins un écart de quatre canaux. Dans un même lieu, on peut donc avoir jusqu'à 19 points d'accès indépendants, en utilisant ces différents canaux. Cela signifie que l'on peut atteindre un débit total maximal

de 1 Gb/s avec *le 802.11a*. Dans la pratique, il faut diviser environ par deux ces valeurs, mais cela reste très important. Avec *le 802.11n*, la capacité théorique à 5GHz est presque de 3 Gb/s.

En résumé pour le Wifi à 5 GHz, 19 canaux indépendants de 20 MHz chacun sont utilisables. Ces couches physiques du Wifi sont donc celles qui offrent la plus grande capacité : jusqu'à 19 fois 54 Mbits/s pour le 802.11a, et 19 fois 150 Mbits/s pour *le 802.11n* [18].

### 2.1.3.3 Le Regroupement de canaux

Certaines solutions propriétaires autorisent depuis plusieurs années le regroupement de deux canaux adjacents pour former un seul canal. Certains AP proposent une liste de couples de canaux adjacents : la bande de fréquences utilisée s'étend alors bien sûr du bas du canal inférieur au haut du canal supérieur. Mais parfois les choses sont moins explicites : on doit choisir un canal principal, puis préciser dans quelle direction on souhaite l'étendre (vers le bas ou le haut du spectre). L'intérêt du regroupement de canaux est simple : le débit que l'on peut atteindre est proportionnel à la largeur de la bande de fréquences utilisée, le regroupement de deux canaux permet donc de doubler le débit, sans effort [18].

On peut être tenté de systématiquement d'utiliser un "double canal" pour doubler le débit, mais il ne faut pas oublier que l'on va alors occuper deux fois plus de spectre radio. Or, celui-ci est limité, surtout pour la bande des 2, 4 GHz : on dispose en tout et pour tout d'un peu plus de 80 MHz dans cette bande. Si vous déployez un point d'accès à 2, 4 GHz sur 40 MHz, vous ne laissez pas beaucoup de place pour les réseaux voisins (notamment pour vos autres points d'accès) et vous risquez donc de subir de fortes interférences. Ce mode ne fait pas partie des tests d'interopérabilité. Pour résumer, ce mode 40 MHz peut doubler le débit, mais il est surtout recommandé à 5 GHz.

Une station Wifi incompatible avec le regroupement de canaux est incapable de détecter qu'une communication a lieu sur un double canal. Du coup, elle risque de prendre la parole sur l'un des deux canaux alors qu'une station a déjà commencé à émettre sur le double canal : les interférences provoqueront des pertes de paquets à la fois pour elle et pour le réseau à double canal, donc le débit sera réduit et instable. Heureusement, les nouvelles normes prévoient une solution : avant d'émettre un paquet sur le double canal, une nouvelle station 802.11 doit d'abord signaler sa volonté d'envoyer un paquet sur chacun des deux canaux. Les anciennes stations 802.11a/b/g sauront alors qu'il ne faut pas prendre la parole avant un délai précis [18].

### 2.1.4 Techniques multi-antennes

La plupart des points d'accès et même de nombreux adaptateurs Wifi sont équipés de plusieurs antennes. Celles-ci sont mises à profit en Wifi pour améliorer la portée, la fiabilité ou encore le débit des communications, à l'aide de plusieurs techniques assez sophistiquées. Nous

allons présenter les plus importantes d'entre elles.

### 2.1.4.1 Classification multi-antennes

Précisons tout d'abord le vocabulaire :

- ▶ Si l'émetteur n'utilise qu'une seule antenne pour émettre et le récepteur n'utilise qu'une seule antenne pour recevoir, on parle de *Single Input Single Output (SISO)*.
- ▶ Si l'émetteur n'utilise toujours qu'une seule antenne mais que le récepteur en utilise plusieurs, alors on parle de *Single Input Multiple Output (SIMO)*.
- ▶ Si l'émetteur utilise plusieurs antennes et le récepteur une seule, on parle de *Multiple Input Single Output (MISO)*.
- ▶ S'il y a plusieurs antennes en émission et en réception, il s'agit de *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*.

La Figure 2.2 présente ces quatre configurations possibles, en représentant les différents chemins que le signal peut emprunter en présence d'un obstacle [18].

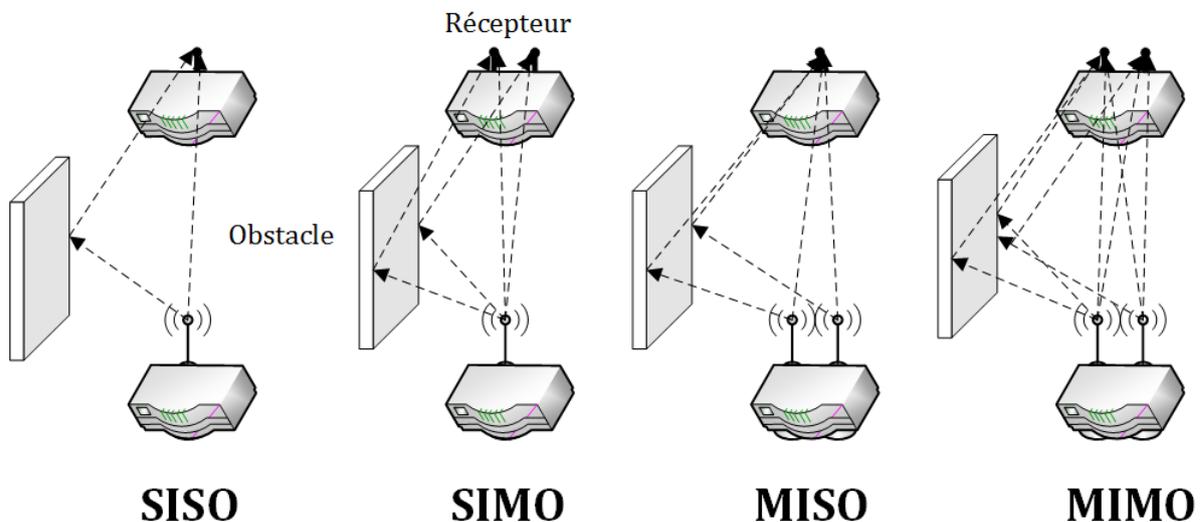


FIGURE 2.2 – Classification multi-antennes.

Notons au passage que le *MIMO* ne désigne pas une technique unique, mais plutôt toutes les techniques reposant sur des antennes multiples à la fois du côté de l'émetteur et du récepteur, sur un unique canal radio. La norme *802.11n* exploite plusieurs techniques *MIMO* et *MISO* pour améliorer considérablement le débit, la portée et la fiabilité du Wifi. Avant d'aborder ces techniques, commençons par deux techniques multi-antennes bien plus anciennes que le *802.11n/ac* : la diversité d'espace et le Beamforming.

### 2.1.4.2 Diversité d'espace

Depuis plusieurs années déjà la plupart des points d'accès ont deux antennes : une seule sert à l'émission, mais les deux servent à la réception<sup>1</sup>. À quoi servent donc ces deux antennes ? Elles permettent de faire ce qu'on appelle de la *diversité d'espace* à la réception. La mise en œuvre la plus simple de ce principe consiste simplement à écouter sur les deux antennes à la fois, et à sélectionner à tout moment le signal de l'antenne qui reçoit le mieux. Ceci est surtout utile pour résister aux interférences dues aux multiples chemins, qu'empruntent les ondes pour arriver à leur destination (ce qu'on appelle le *multipath*). Précisons ce point : si une partie du signal émis suit un chemin indirect avant d'arriver au récepteur, en se reflétant contre un obstacle par exemple, alors il arrivera avec un léger retard, et risquera alors d'être en opposition de phase avec le signal qui aura suivi le chemin le plus court, ce qui diminuera la puissance du signal reçu. Mais si l'on a plusieurs antennes à la réception, et qu'elles sont espacées judicieusement, alors la probabilité qu'il y ait opposition de phase sur les deux antennes à la fois sera faible. En choisissant toujours l'antenne qui a le plus fort signal, on résiste donc mieux à ce type d'interférences. Notons que les algorithmes sont parfois plus sophistiqués et combinent le signal reçu sur les deux antennes, plutôt que de retenir uniquement le plus fort. Cette technique permet donc de mieux résister aux interférences dues à la présence d'obstacles (notamment en intérieur). Elle a l'avantage d'être entièrement mise en œuvre du côté du récepteur, sans la moindre participation de l'émetteur[18].

### 2.1.4.3 Beamforming

On voit sur le marché, depuis plusieurs années, des antennes *intelligentes*<sup>2</sup> qui exploitent une technique appelée le *Beamforming*, littéralement la *formation de faisceaux*. Une antenne intelligente est en réalité composée de multiples antennes classiques qu'elle synchronise de façon à former une sorte de faisceau de rayonnement en direction de chaque utilisateur. La *Figure 2.3* illustre le principe de cette technique. Un point d'accès est ici muni d'une seule antenne intelligente et il doit envoyer un message à un utilisateur [21].

Admettons (*A*) que le point d'accès émette le message simultanément sur ses deux antennes. Puisque l'utilisateur se situe sur la gauche, il recevra les ondes émises par l'antenne de gauche très légèrement avant les ondes émises par l'antenne de droite. Ces ondes risquent donc d'être en décalage de phase : si c'est le cas le récepteur risquera malheureusement de recevoir un signal affaibli<sup>3</sup>. La technique du Beamforming consiste à décaler dans le temps l'émission du signal sur les différentes antennes. Dans notre exemple, le point d'accès commence par émettre

1. Si une station connectée à un tel point d'accès n'a qu'une seule antenne, alors on est en configuration SISO de l'AP vers la station, et en configuration SIMO de la station vers l'AP.

2. une seule antenne "intelligente" est l'équivalent de deux antennes simples

3. parfois même plus faible que si l'AP n'avait utilisé qu'une seule antenne pour émettre le message

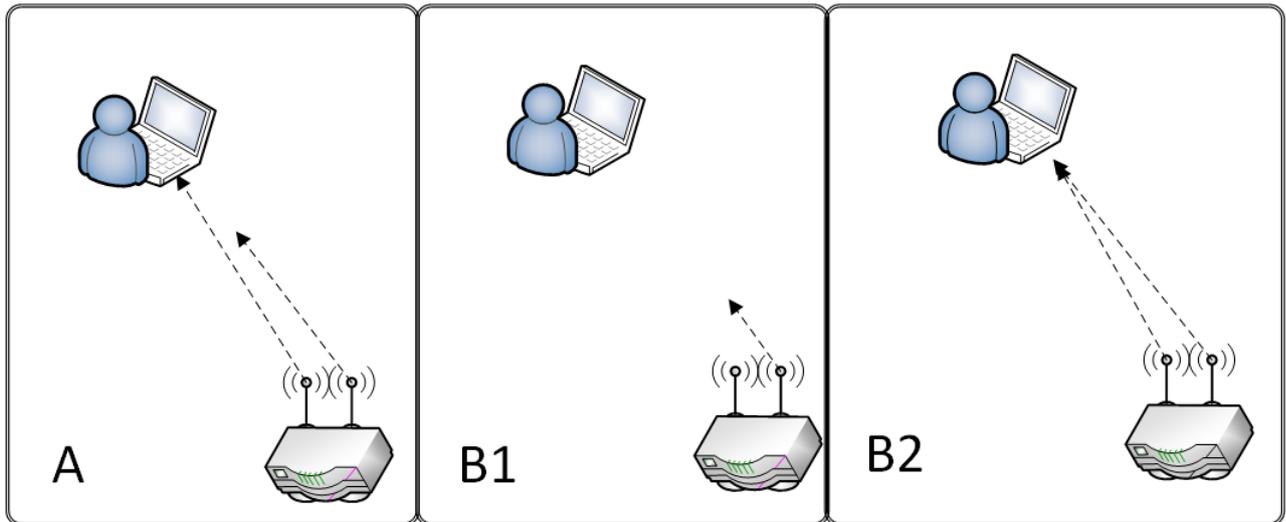


FIGURE 2.3 – Principe de fonctionnement du Beamforming.

le signal uniquement sur l'antenne de droite (*B1*), et après un très bref instant il commence à émettre également sur l'antenne de gauche (*B2*). De cette façon, les deux ondes parviendront exactement en même temps à destination : elles seront donc en phase, et l'amplitude du signal reçu sera égale à la somme de l'amplitude des deux ondes. Le Beamforming parvient ainsi à amplifier le signal en direction de la station, sans que l'on ait à orienter physiquement les antennes vers le récepteur [21].

La question qui se pose maintenant est de savoir comment le point d'accès peut bien deviner dans quelle direction se trouve une station afin d'orienter le faisceau vers elle ? La réponse est la suivante : lorsqu'une station envoie un paquet au point d'accès, ce paquet est reçu par les deux antennes du point d'accès avec un léger décalage dans le temps. Il suffit alors de renvoyer la réponse avec le même décalage, mais inversé, pour que le faisceau se forme dans la bonne direction.

Le Beamforming offre un gain de puissance important, ce qui permet d'atteindre une portée plus importante ou un meilleur rapport signal/bruit permettant d'utiliser une modulation radio plus élevée, donc d'atteindre un débit plus important. En outre, le faisceau reste concentré en direction des récepteurs, pour chaque paquet émis, ce qui permet de limiter les interférences avec les réseaux voisins. Autre avantage du Beamforming : il est mis en œuvre entièrement au niveau de l'émetteur, de façon entièrement transparente pour les récepteurs [22].

Mais cette technique n'a pas que des atouts : le gain de puissance peut être assez important dans l'axe des faisceaux, et il faut donc faire attention à ne pas dépasser les limites légales de puissance rayonnée. En outre, si le récepteur est en mouvement alors le Beamforming est moins efficace, voire même nuisible. En effet, comme nous l'avons vu, le faisceau est orienté automatiquement vers l'endroit où se trouvait le récepteur la dernière fois qu'il a envoyé un message. Du coup, s'il s'est déplacé depuis, le faisceau sera mal orienté, donc le gain de puissance

sera moins important, voire même négatif : le signal sera alors plus faible que si l'on n'utilisait pas de Beamforming. Cette technique n'est donc pas adaptée aux usages mobiles [22].

#### 2.1.4.4 Multiplexage spatial

La technique MIMO la plus utilisée, notamment dans les produits respectant la norme 802.11n est le multiplexage spatial : les données à émettre sont découpées en plusieurs flux, et chaque flux est émis par une antenne distincte. Lorsque ces flux parviennent aux antennes du récepteur, pourvu qu'ils aient des *signatures spatiales* suffisamment distinctes (*c'est-à-dire pourvu qu'ils aient suivi des chemins assez différents*), alors le récepteur est capable de les distinguer, de les recevoir correctement et donc de reconstruire les données d'origine. Le multiplexage spatial est donc plus efficace en situation où le multipath est important, c'est-à-dire lorsqu'il y a de multiples obstacles et reflets, notamment à l'intérieur des bâtiments. Il n'est pas très efficace lorsque l'émetteur et le récepteur sont en ligne de vue directe. Le principe mathématique du multiplexage spatial est le suivant. Nous prendrons pour exemple le cas où l'émetteur et le récepteur ont chacun deux antennes. La Figure 2.4 montre la situation réelle et sa modélisation dans le cadre du multiplexage spatial [18].

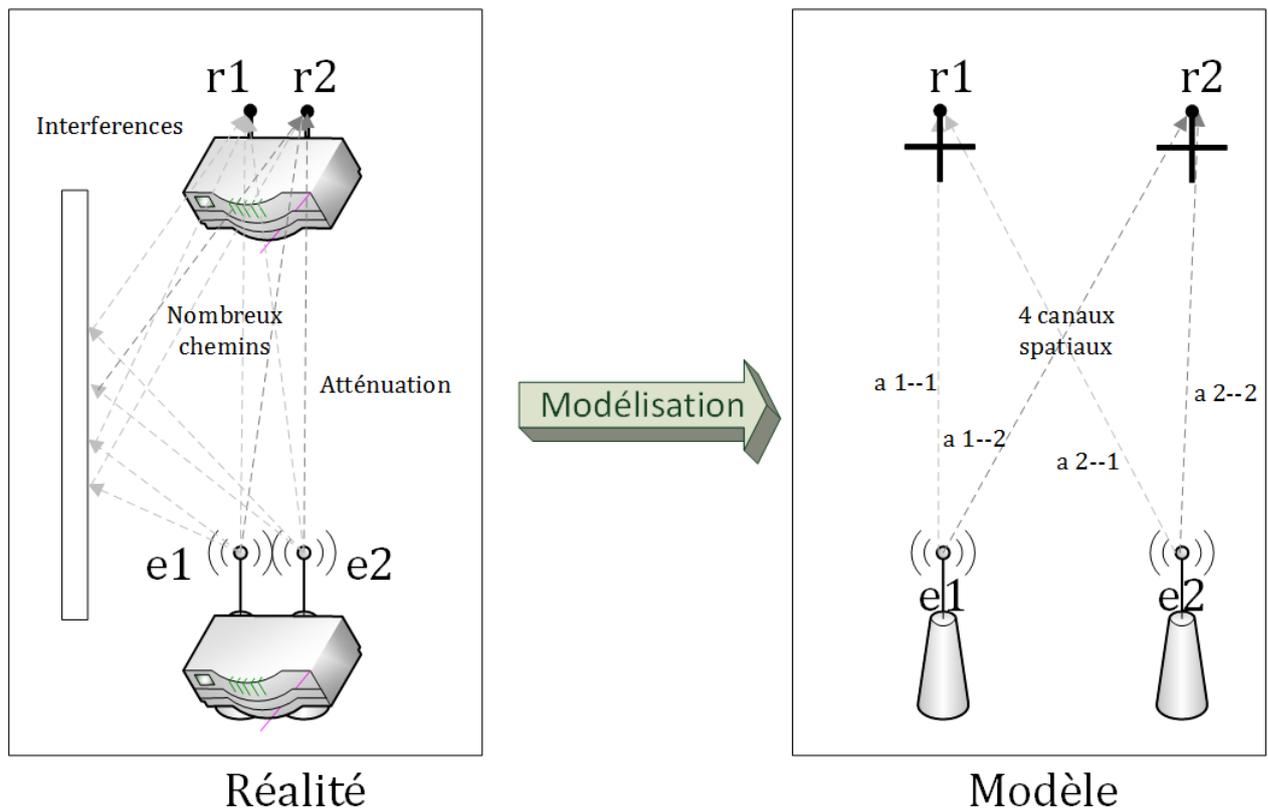


FIGURE 2.4 – Modèle du multiplexage spatial.

Le signal émis par l'antenne 1 de l'émetteur est noté  $e_1$ . Il est capté par l'antenne 1 du récepteur après avoir subi une atténuation notée  $a_1 \rightarrow 1$ . De même, le signal  $e_2$  émis par l'antenne 2 de l'émetteur est capté par l'antenne 1 du récepteur après avoir subi une atténuation notée  $a_2 \rightarrow 1$ . Si l'on suppose que la seule altération d'un signal pendant son trajet est une simple atténuation, due à la distance parcourue et à des interférences (*en situation de multipath*), alors le signal capté par l'antenne 1 du récepteur, noté  $r_1$ , est défini par la formule suivante :

$$r_1 = e_1 \times a_1 \rightarrow 1 + e_2 \times a_2 \rightarrow 1$$

Le récepteur ayant reçu  $r_1$  et  $r_2$ , s'il peut également estimer la valeur des différentes atténuations ( $a_1 \rightarrow 1$ ,  $a_1 \rightarrow 2$ ,  $a_2 \rightarrow 1$ , et  $a_2 \rightarrow 2$ ) alors il peut retrouver  $r_1$  et  $r_2$  : il s'agit d'une résolution d'un système à deux équations et deux inconnues. Malheureusement la résolution ne sera possible qu'à condition que les facteurs d'atténuation ne soient pas trop corrélés. Par exemple, si toutes les atténuations sont égales ( $a_1 \rightarrow 1 = a_1 \rightarrow 2 = a_2 \rightarrow 1 = a_2 \rightarrow 2$ ) alors le système d'équations n'a pas de solution car les deux équations n'en sont en fait plus qu'une seule, avec toujours deux inconnues (*l'atténuation unique est notée  $a$* ) :

$$r_1 = r_2 = a \times (e_1 + e_2)$$

Ceci n'est pas rare : il suffit par exemple que l'émetteur et le récepteur soient en vision directe, à plusieurs mètres l'un de l'autre, sans le moindre obstacle à proximité. Puisqu'il n'y a pas d'obstacles, seuls les chemins en ligne droite entre les différentes antennes seront empruntés, donc pas d'interférences dues aux chemins multiples : l'atténuation ne dépend alors que de la distance. Puisque l'émetteur et le récepteur sont à plusieurs mètres l'un de l'autre, les quatre chemins entre les antennes de l'émetteur et du récepteur ( $1 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 1$  et  $2 \rightarrow 2$ ) ont tous à peu près la même longueur, donc les atténuations sont presque égales. Le système d'équations ne peut pas être résolu. Pour que le récepteur puisse résoudre son système d'équations, il faut donc que les paramètres d'atténuation soient aussi peu corrélés que possible : absence de ligne de vue, beaucoup d'obstacles pour refléter les signaux, antennes espacées, émetteur et récepteur proches, etc. Paradoxalement, le débit sera meilleur avec le MIMO si l'on n'est pas en ligne de vue. Mais ce n'est pas tout : comme nous l'avons vu, le récepteur doit également évaluer la valeur des facteurs d'atténuations pour pouvoir résoudre ses équations. Ceci se fait en permanence, par l'échange régulier d'informations de calibrage entre l'émetteur et le récepteur [18]. Cet échange permet également d'évaluer le niveau de bruit reçu sur chaque antenne du récepteur.

Nous avons en effet négligé ce paramètre jusqu'ici pour ne pas alourdir l'explication, mais pour plus de réalisme il faudrait rajouter à droite de la première équation le bruit capté par l'antenne 1 (... +  $b_1$ ), et à droite de la seconde équation le bruit capté par l'antenne 2 (... +  $b_2$ ). Pour résoudre ce système d'équations, il est donc nécessaire d'évaluer également le bruit.

La technique de multiplexage spatial est en fait un peu plus complexe, l'émetteur optimise les signaux qu'il émet sur ses différentes antennes afin de les dés-corréler au maximum du point de vue du récepteur. Pour cela, il exploite sa connaissance des paramètres d'atténuation et de bruit et emploie des algorithmes assez complexes : la puissance de calcul de l'émetteur doit être importante, ce qui explique en partie pourquoi les équipements Wifi MIMO (*et notamment 802.11n*) consomment davantage d'énergie et coûtent plus cher que les équipements classiques. Le nombre de flux émis simultanément est limité par le nombre minimum d'antennes du récepteur ou de l'émetteur. En effet, l'émetteur ne peut évidemment pas émettre plus de flux simultanés qu'il n'a d'antennes, et le récepteur ne peut pas non plus décoder plus de flux qu'il n'a d'antennes, car son système d'équations aurait moins d'équations que d'inconnues, ce qui est impossible à résoudre (*on ne peut pas, par exemple résoudre un système à deux équations et trois inconnues*). Donc si l'émetteur a trois antennes et le récepteur en a deux, alors (*avec le 802.11n*) l'émetteur se limitera automatiquement à deux flux simultanés. On parle dans ce cas de MIMO 3 x 2 x 2 : trois antennes à l'émission, deux antennes à la réception et deux flux simultanés. Le 802.11n prévoit au maximum 4 x 4 x 4, ce qui suppose que l'émetteur et le récepteur aient quatre antennes et soient compatibles avec ce mode, mais dans la pratique les produits se limitent, au mieux, à 3 x 3 x 3 [18].

#### 2.1.4.5 Codage espace-temps

Autre technique permettant d'exploiter de multiples antennes du côté de l'émetteur : le *codage espace-temps*. En anglais, on parle de *Space Time Coding (STC)*. Cette technique consiste à émettre la même information plusieurs fois dans l'espace et dans le temps afin que cette redondance améliore la fiabilité de la transmission (*on augmente donc le débit réel et la portée*). La même information est envoyée via plusieurs antennes (*redondance dans l'espace*) et à plusieurs reprises (*redondance dans le temps*), mais elle est à chaque fois codée d'une façon différente, selon des algorithmes qui permettent d'optimiser la probabilité de pouvoir correctement reconstruire l'information à l'arrivée. Il existe plusieurs variantes du STC, dont la plus simple (*ou plutôt la moins complexe*) est le *Space Time Block Coding (STBC)*, c'est-à-dire *STC par bloc*, qui est optionnel en 802.11n. Si l'émetteur a  $n$  antennes, une information à émettre est d'abord découpée en  $n$  blocs. Par exemple, avec deux antennes, l'information  $x$  est d'abord découpée en  $x_1$  et  $x_2$ . On émet alors simultanément  $x_1$  sur l'antenne 1 et  $x_2$  sur l'antenne 2. Jusqu'ici, cela ressemble au multiplexage spatial. Mais l'instant d'après (*sur le symbole OFDM suivant*), on émet à nouveau  $x_1$  et  $x_2$ , mais d'une façon transformée et en inversant les antennes : cette fois-ci on émet  $x_1^*$  sur l'antenne 2 et  $-x_2^*$  sur l'antenne 1. La notation  $x_1^*$  désigne une transformation mathématique de  $x_1$  appelée le " conjugué complexe " de  $x_1$  : les propriétés mathématiques du conjugué complexe font que le récepteur a de fortes chances de pouvoir reconstruire correctement  $x$ , même s'il reçoit mal  $x_1$ ,  $x_1^*$ ,  $x_2$  et  $-x_2^*$  [18].

### 2.1.5 Downlink MU-MIMO

*Downlink MU-MIMO*, ou liaison *Downlink SDMA* est l'un des dispositifs importants d'*IEEE 802.11ac*. Par cette nouvelle technique un débit cumulé de 1 Gbits/s peut être atteint. Un point d'accès (*AP*) peut transmettre simultanément des groupes indépendants de flux spatiaux aux multiples stations clients. Ces flux sont unicast et envoyés simultanément en un seul accès au canal. Jusqu'à quatre groupes indépendants de flux spatiaux peuvent être transmis. Les antennes disponibles sur un AP peuvent donc être utilisées pour augmenter l'efficacité du système [18].

La diversité spatiale entre les antennes peut être exploitée dans un contexte de multiple-utilisateur par l'accès multiple de division spatiale (*SDMA*). *SDMA*, également appelé multiple-utilisateur MIMO (*MU-MIMO*) dans *IEEE802.11ac*, permet la communication simultanée avec de multiples utilisateurs employant la même bande. Un émetteur peut simultanément envoyer ainsi de multiples flux de données indépendants à différents récepteurs, se fondant sur les différences dans leur espace-temps. Le système équivalent est illustré sur *La Figure 2.5*, où  $N$  récepteurs sont simultanément servis par l'émetteur [17].

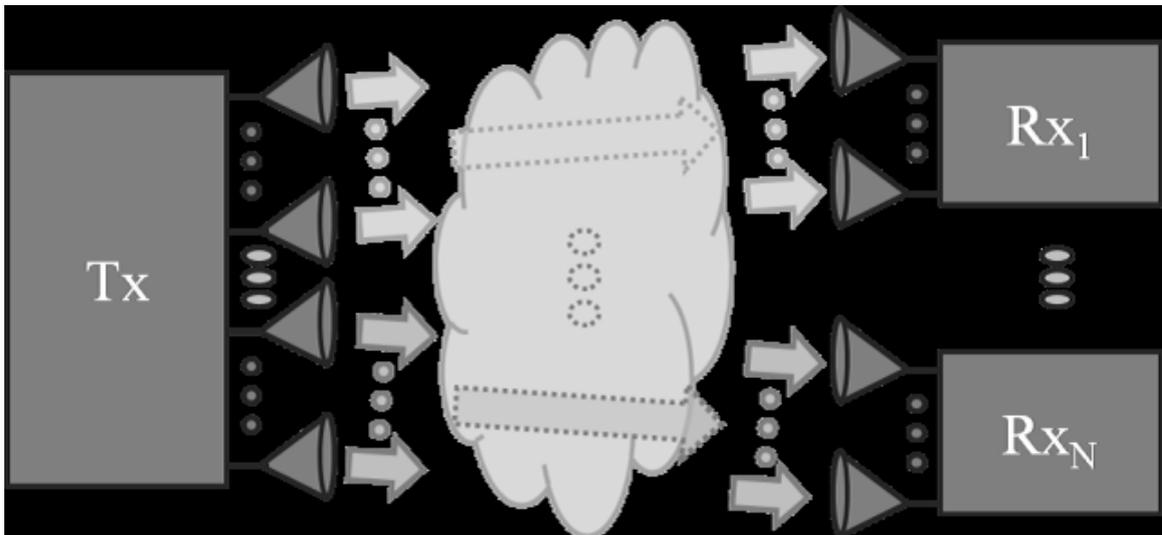


FIGURE 2.5 – Downlink MU-MIMO.

L'avantage primaire de *DL MU-MIMO* est que les dispositifs client avec des possibilités limitées (*peu ou une antenne*) ne dégradent pas la capacité du réseau en occupant trop d'heure sur l'air dû à leurs débits inférieurs. Avec *DL MU-MIMO*, la capacité du réseau est basée sur l'agrégat des clients de transmission simultanée. Cependant, cet avantage vient avec un coût et une complexité accrus. D'une vue PHY, l'AP devrait avoir plus d'antennes que le

nombre total des flux spatiaux pour un gain de diversité. En outre, l'AP exige l'acheminement de l'information d'état de chacun des clients participant à la transmission de *DL MU-MIMO* pour passer commande afin de former les poids d'antennes. Avec *DL MU-MIMO*, les poids d'antenne sont beaucoup plus sensibles aux changements du canal. Dans le cas de transmission beamforming, si les poids d'antenne sont éculés, l'exécution du système se dégrade au cas sans transmission beamforming [17].

## 2.2 Couche MAC

### 2.2.1 Méthodes d'accès au canal

Dans la norme IEEE 802.11, le mécanisme d'accès fondamental s'appelle la fonction de coordination distribuée (*DCF*). Cependant la fonction DCF est incapable de fournir la qualité de service (*Qualité of service, QoS*) requise aux applications audio et vidéo, car elle est fondamentalement développée pour les services au mieux (*Best effort*) [3].

Pour cette raison, l'amendement d'IEEE 802.11e était approuvé afin de fournir l'appui de QoS aux WLANs. Il a défini la fonction de coordination hybride (*HCF*) en tant que mécanisme d'accès amélioré, qui inclut deux mécanismes d'accès qui sont : Accès distribué amélioré (*EDCA*) et accès centralisé amélioré (*HCCA*) [3].

**EDCA** (représentée par La Figure 2.6) apporte à l'accès par contention de 802.11 la différenciation de services. La méthode définit quatre catégories d'accès (*AC*) qui ont des propriétés différentes à l'accès. Une proposition de correspondance est établie entre la valeur UP (*User Priority*) et les 4 ACs, elle est détaillée dans la Table 2.1 [3].

A chaque catégorie d'accès est attachée une fonction logique semblable à DCF, appelée EDCAF (*Enhanced Distributed Channel Access Function*) qui participera à la contention afin d'obtenir une TXOP au profit de l'AC concernée et lui permettre ainsi d'accéder au médium. L'EDCAF fonctionne comme DCF, suivant un schéma CSMA/CA avec BEB, elle a ceci de particulier telle qu'elle utilise un lot de paramètres de contention qui lui est propres (*une valeur de AIFS et un intervalle de fenêtre de contention [CWmin, CWmax] ainsi qu'une limite sur la taille d'une opportunité de transmission*).

Ces paramètres sont soit fixés par défaut soit déterminés et annoncés par le point d'accès. Les paramètres de contention permettent de mettre en place la différenciation à l'accès d'EDCA. Les valeurs par défaut (Table 2.2) le montrent clairement. L'introduction de fonctions d'accès concurrentes et indépendantes au niveau des ACs de chaque station amène une nouvelle notion, celle de la collision virtuelle. En effet, les fonctions d'accès procédant à l'activation de leur backoff de façon indépendantes, il est possible que deux (*ou plus*) ACs d'une même station voient leurs compteurs de backoff expirer au même moment. Dans ce cas, la catégorie d'accès de plus haute priorité ( $AC - VO > AC - VI > AC - BK > AC - BE$ ) gagne l'opportunité de

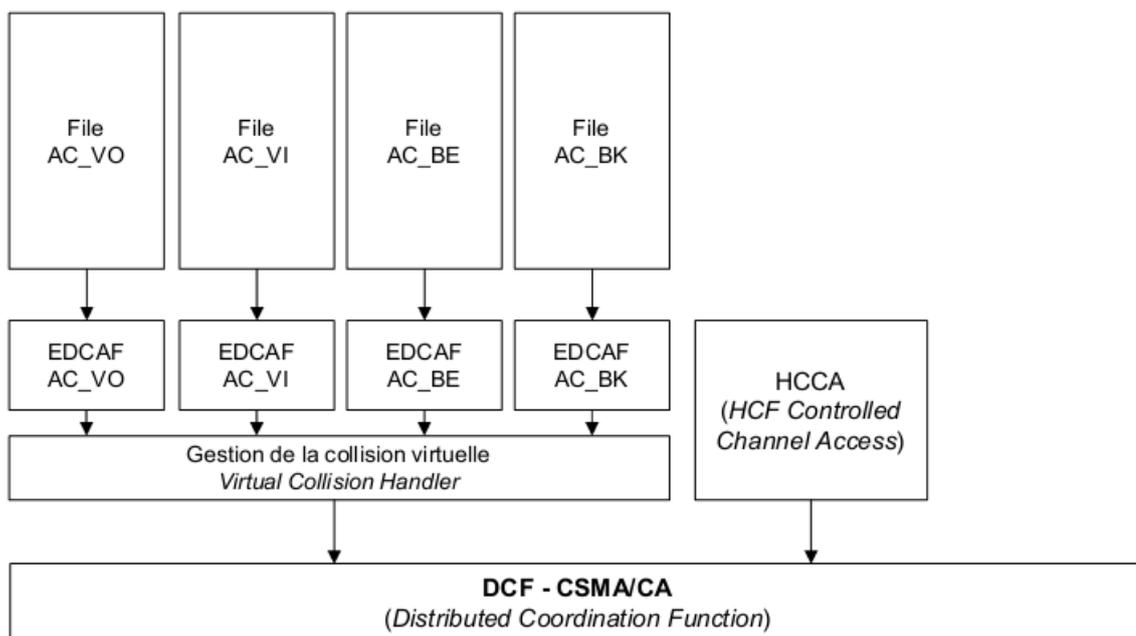


FIGURE 2.6 – Schéma d’une station avec EDCA.

transmission, les éventuelles autres se comportent comme si une collision réelle s’était produite [3].

**HCCA** est une implémentation d’un accès par scrutation. Il met en place des améliorations par rapport à PCF. La division de la super trame en CP (*Contention Period et CFP Contention Free Period*) cesse d’être importante lorsque la fonction HCCA est employée. Cette division continue à exister afin de permettre aux *non – QoS STA (Station)* de fonctionner dans un réseau QoS. Cependant, HCCA permet au HC (*Hybrid Coordinator*) d’intervenir durant une CP ou une CFP pour mettre en place une scrutation. L’accès du HC pour ce genre de procédure se faisant avec une temporisation PIFS qui est inférieure aux AIFS, cet accès devient ainsi plus

User Priority	Appellation 802.1D	Catégorie d’accès
1	BK (Background)	AC – BK (Background)
2	— (Spare)	AC – BK (Background)
0	BE (Best Effort)	AC – BE (Best Effort)
3	EE (Excellent Effort)	AC – BE (Best Effort)
4	CL (Controlled Load)	AC – VI (Video)
5	VI (Video)	AC – VI (Video)
6	VO (Voice)	AC – VO (Voice)
7	NC (Network Control)	AC – VO (Voice)

TABLE 2.1 – Correspondance entre la valeur UP et la catégorie d’accès.

Catégorie d'accès	AIFS	CWmin	CWmax
$AC - VO$	$SIFS + 2 \times aSlotTime$	$(aCW_{min} + 1) / 4 - 1$	$(aCW_{min} + 1) / 2 - 1$
$AC - VI$	$SIFS + 2 \times aSlotTime$	$(aCW_{min} + 1) / 2 - 1$	$aCW_{min}$
$AC - BE$	$SIFS + 3 \times aSlotTime$	$aCW_{min}$	$aCW_{max}$
$AC - BK$	$SIFS + 7 \times aSlotTime$	$aCW_{min}$	$aCW_{max}$

TABLE 2.2 – Paramètres de contention par défaut d'EDCA.

prioritaire que les accès par EDCA. La scrutation est mise en place grâce à une connaissance supposée du HC de l'état des files des stations au sein de la BSS. Durant la CP, une QSTA (*Quality of Service Station*) peut accéder au médium si elle y parvient par EDCA, ou si elle y est explicitement invitée par un paquet  $CF - POLL$  envoyé par le HC. Le HC peut accéder au médium afin de scruter les QSTAs (*envoie d'un paquet  $CF - POLL$* ) suite à une période PIFS d'inactivité du médium. Durant la CFP, les QSTA ne peuvent accéder au médium à moins qu'elles y soient explicitement invitées par un paquet  $CF - POLL$  envoyé par le HC. Le HC peut s'accorder une TXOP pour un envoi sur la voie descendante ou peut envoyer un paquet de scrutation  $CF - POLL$  suite à une période PIFS d'inactivité du médium. Un paquet  $CF - POLL$  contient une valeur TXOPLimit, indiquant à la station scrutée la durée d'utilisation du médium à ne pas dépasser [3].

### 2.2.2 Block ACK

Cette amélioration consiste à grouper les trames et à partager le temps d'accès au canal entre plusieurs trames possédant la même destination. Ainsi, les trames sont introduites successivement, séparé avec des SIFS, au cours d'une période de transmission (*TxOP*). Toutes les trames envoyées sont acquittées par un BA (*Block Acknowledgment*) au lieu d'un ACK pour chaque trame transmise, (*Voir La Figure 2.7*). La station transmet une demande de BA (*BAR*), et les récepteurs répondent avec un BA après une période SIFS. La transmission a lieu au cours d'une période de TxOP [23].

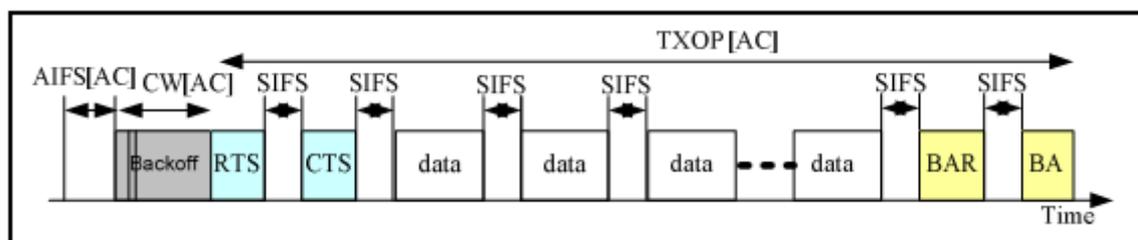


FIGURE 2.7 – Principe du Block Ack (BA).

### 2.2.3 Agrégation de trames

La principale limitation de la couche MAC pour les anciennes normes IEEE 802.11 est causée par les overheads ajoutés à l'entête. Dans ce contexte la norme IEEE 802.11n a proposé la transmission de plusieurs paquets agrégés, de ce fait l'agrégation réduit les overheads et le temps deoisiveté généré par l'algorithme de backoff après des transmissions successives, comme indiqué dans *La Figure 2.8* [4].

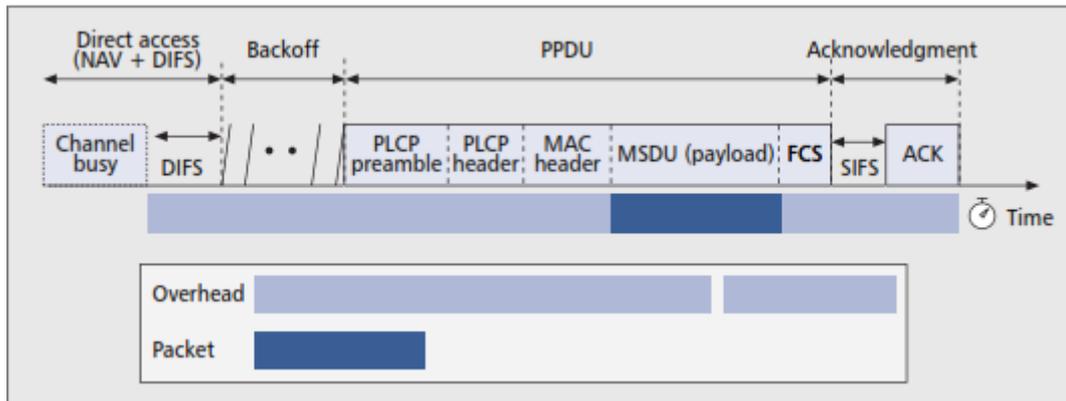


FIGURE 2.8 – Opération basic avec DCF.

#### A-MSDU

Le principe de l'A-MSDU (*Aggregate MAC Service Data Unit*) est de permettre l'envoi de multiples MSDUs au même récepteur enchaînés dans un MPDU simple. Ceci améliore certainement l'efficacité de la couche de MAC, spécifiquement quand il y a beaucoup de petits MSDUs, tel que des acquittements de TCP.

La couche MAC reçoit des paquets de la couche liaison et ces derniers qui sont protégés sont alors agrégés pour former un A-MSDU simple. Pour chaque sous-trame MSDU dans une trame d'A-MSDU est inclus l'en-tête de la sous-trame, les données utiles de l'MSDU et le champ de remplissage (*padding*). L'en-tête de la sous-trame inclut trois champs : l'adresse de destination, l'adresse source et la longueur qui indique la charge utile de données MSDU. L'A-MSDU est seulement tolérable pour des paquets ayant la même source et destination. La longueur maximum A-MSDU que la station peut recevoir est de 3839 octets ou de 7935 octets. Une trame A-MSDU simple est transmise après avoir ajouté l'en-tête physique, l'en-tête MAC et le champ FCS [23]. Il y a également certaines contraintes en construisant un A-MSDU :

Tous les MSDUs doivent avoir la même valeur de TID (*Transmission IDentificator*) ; Le temps de vie de l'A-MSDU devrait correspondre au temps de vie maximum de ses éléments constitutifs ; L'adresse destination (AD) et l'adresse expéditeur (AE) dans l'en-tête de la sous-trame doit s'assortir à l'adresse récepteur (AR) et à l'adresse émetteur (AT) inscrites dans l'en-tête MAC respectivement. Dans *La Figure 2.9 (a)* nous illustrons comment ce mécanisme peut être réalisé.

## A-MPDU

Le principe de l'A-MPDU est d'envoyer les sous-frames multiples de MPDU avec une entête PHY unique dans le but de réduire l'overhead du aux entêtes PHY. Pour chaque A-MPDU, chaque sous-frame inclut une frame MPDU, le delimitateur de MPDU et les bytes de remplissage. Des sous-frames multiples de MPDU sont enchainées dans une plus grande frame nommé A-MPDU. Toutes les sous-frames MPDUs constituant un A-MPDU devraient être adressées au même récepteur, mais elles peuvent avoir des adresses sources différentes. Un delimitateur court de MPDU est feint à chaque MPDU et l'agrégat est présenté au PHY comme PSDU (*PHY Service Data Unit*) pour la transmission dans un PPDU (*PHY Protocol Data Unit*) simple. Le delimitateur de MPDU a 32 bits de longueur et se compose d'un champ réservé de 4 bits, 12 bits pour le champ MPDU, d'un champ à 8 bits pour le CRC, et d'un champ à 8 bits pour la signature. Le CRC couvre les 4 bits réservé, les 12 bits pour le MPDU est valide l'intégrité des entêtes. Le MPDU est capitonné avec 0-3 bytes pour l'arrondir jusqu'à une limite de mot à 32 bits. Une station annonce la longueur maximum d'une frame A-MPDU qu'elle peut recevoir dans son élément de possibilités de HT (*High Throughput*). La longueur maximum annoncée peut être l'une de ce qui suit : 8191, 16383, 32767, ou 65 535 bytes. Dans *La Figure 2.9 (b)* nous illustrons comment ce mécanisme peut être réalisé [24].

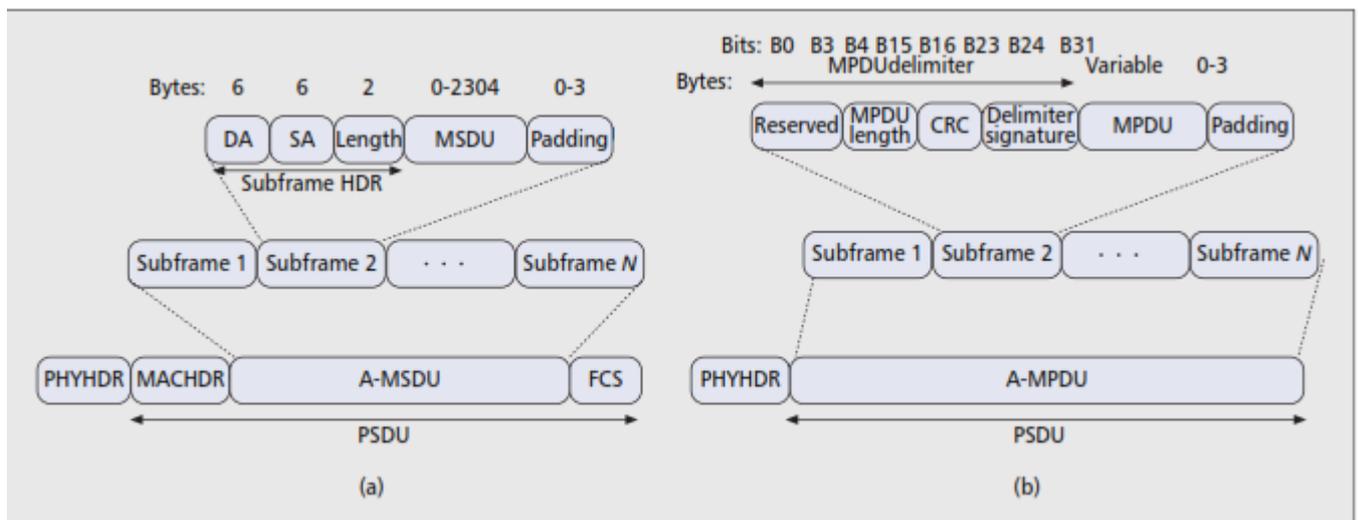


FIGURE 2.9 – Un niveau d'agrégation de frames : a) A-MSDU ; b) A-MPDU.

### L'agrégation a deux niveaux (*Two-level aggregation*).

Une agrégation à deux niveaux de frames comporte un mélange d'A-MSDU et d'AMPDU après deux phases. Dans *La Figure 2.10* nous illustrons comment ce nouveau mécanisme peut être réalisé. L'opération de base est expliquée comme suit : Dans la première phase, les MSDUs qui sont engrangées dans l'aire de stockage temporaire justifient les contraintes d'A-MSDU expliquées dans la sous-section relative précédente, ces unités de données peuvent être compactées

dans un A-MSDU simple. Si les TIDs sont différents, toutes ces trames peuvent passer à la seconde phase où elles seront emballées ainsi que n'importe quel A-MSDU dérivé de la première phase ou de tout autre simple MSDU en employant l'agrégation d'A-MPDU. Cependant, il doit être mentionné que la longueur maximum MPDU pour une trame de données A-MPDU est limitée dans ce cas à 4095 bytes, donc des A-MSDUs ou MSDUs avec des longueurs plus grandes que ce seuil ne peuvent pas être transmises. Conjointement, tous fragments d'un A-MSDU ou des MSDUs ne peuvent pas également être inclus dans un A-MPDU [24].

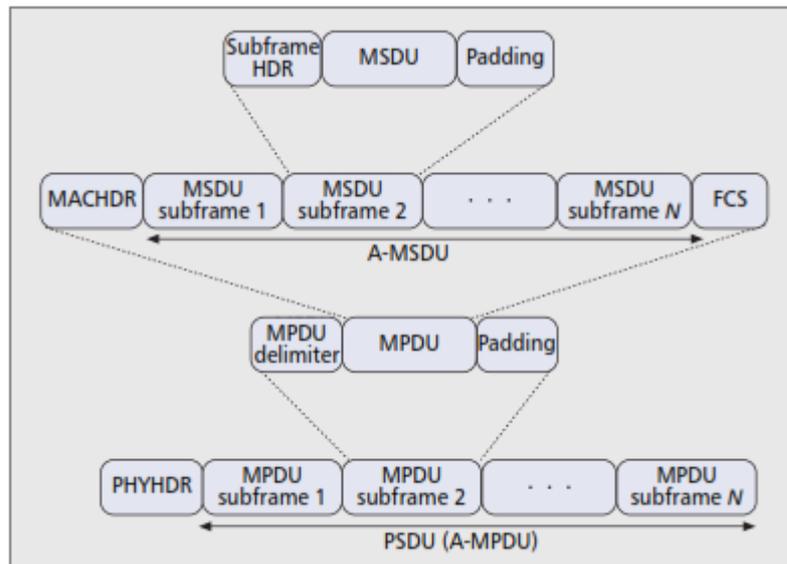


FIGURE 2.10 – Aggregation a deux niveaux.

## 2.2.4 Format des trames

L'IEEE 802.11ac a introduit de nouveaux champs VHT (*Very High Throughput*) pour les trames PPDU comme c'est illustré dans *La Figure 2.11*. Tous les dispositifs 802.11 courant utilisent *L-STF* (*Short Training Field*), *L-LTF* (*Log Training Field*) and *L-SIG* (*Signal*). Le champ de L-STF est employé pour améliorer la commande automatique de gain dans une transmission de MIMO. *L-STF* et *L-LTF* contiennent des informations pour identifier le signal, compenser la fréquence après évaluation, etc. Le champ L-SIG contient l'information au sujet de la longueur du reste du paquet [17].

Les nouveaux champs VHT sont ajoutés par 802.11ac, VHT-SIG-A contient deux symboles d'OFDM. Le premier est modulé avec BPSK, ainsi n'importe quel utilisateur 802.11n considérera un utilisateur 11ac comme à un 11a, alors que le deuxième symbole emploie des BPSK tournés 90 degrés pour permettre à un utilisateur de VHT de distinguer un dispositif 802.11ac. D'ailleurs, un certain nombre de bits de ces deux symboles contiennent d'importantes informations telle que la largeur de bande, MCS (*Modulation Coding Scheme*) quand on emploie un seul

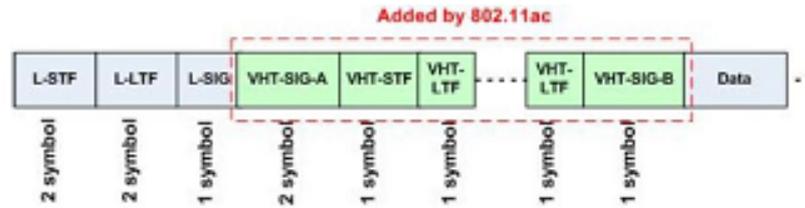


FIGURE 2.11 – Format d'une trame MAC IEEE 802.11ac.

utilisateur, le nombre de flux espace-temps, etc.

Les 8 champs VHT-LTFs appartiennent à VHT-SBS qui est à savoir utilisée pour estimer le canal MIMO correspondant au signal reçu. Ils sont aussi appelés "LTF résolu" parce que le nombre de LTFs envoyé peut dépasser le nombre de flux spatiaux par utilisateur. VHT-SIG-B, modulé avec BPSK, est le dernier champ dans le préambule avant l'envoi du champ de données. Il donne des informations sur la longueur des données présentes dans le paquet. En outre, il fournit les MCS dans le cas du MU-MIMO [17].

### 2.2.5 Opportunité de transmission TxOP

Une opportunité de transmission ( $TxOP$ ) est une période où une station peut transférer des données de catégorie d'accès particulière, comme illustré sur *La Figure 2.12*. Une fois que le TxOP est obtenu, par des procédures d'accès au canal, la station peut continuer à transmettre des trames et à recevoir des trames de réponse, tant que toute la durée ne dépasse pas l'ensemble de limite de TxOP pour cette catégorie d'accès. De cette façon toutes les stations accédant au réseau avec le trafic de la même classe recevront en moyenne le même montant de temps de transmission [17].

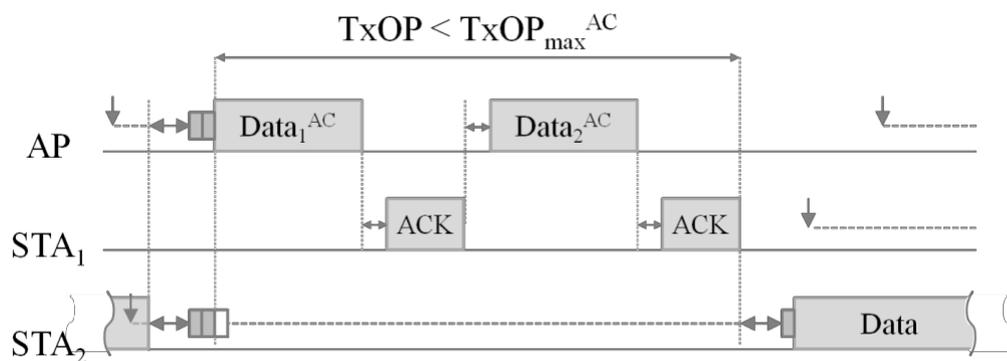


FIGURE 2.12 – Opportunité de transmission TxOP.

Cette équitabilité de ressource permet à des stations utilisant des débits plus élevés de transmettre plus d'information que des stations de débits inférieurs. En effet, la première

station enverra plus de trames que cette dernière dans une durée identique TxOP.

### TXOP Sharing

Pour supporter la liaison downlink et l'envoi de multiple flux de données vers plusieurs récepteurs STAs, 802.11ac améliore la couche MAC en proposant une nouvelle technique appelée le TXOP Sharing. L'idée du TXOP Sharing vient des limitations du principe du TXOP déjà existant. En effet, pendant un EDCA TXOP obtenu par une station, seulement les trames appartenant à la même catégorie d'accès sont transmises. De cette façon, on ne permet pas à de multiples trames appartenant à des catégories d'accès différentes d'être transmises simultanément. L'idée principale du TXOP Sharing est de permettre à un point d'accès d'exécuter les transmissions simultanées aux STAs de multiple réception en employant l'identification de groupe. Avec cette amélioration, chaque EDCAF d'un AP emploie ses propres paramètres EDCA à concurrencer pour un TXOP. Quand un EDCAF gagne un TXOP, il est le propriétaire de ce TXOP, et sa catégorie d'accès associé est considérée en tant que C.A. primaire et le reste des C.A. secondaires. Nous pouvons parler de TXOP à utilisateurs multiples (*MU-TXOP*) quand la C.A. primaire permet à la C.A. secondaire de partager le TXOP pour les transmissions simultanées. Par conséquent, un AP a deux types de destinations : Destinations primaires et secondaires ce qui sont respectivement visés par des trames de données de C.A. primaire et de C.A. secondaire. Nous pouvons avoir seulement une C.A. primaire et de multiple CAs secondaires, mais il pourrait y avoir de multiples destinations (*primaire et secondaire*) [17]. Comme on le montre dans *La Figure. 2.13*, 802.11ac ajoute une nouvelle phase pour garantir le mécanisme TXOP Sharing. Dans cette période c'est la C.A. primaire qui décide avec quelle C.A. secondaire partager le TXOP, aussi bien vers des destinations (*primaires et secondaires*).

	Principe courant du 802.11 TXOP ▼	Principe du 802.11 TXOP Sharing ▼
<b>Déclanchement</b>	Se produit une fois que les règles d'EDCA permettent l'accès au medium	Les mêmes que le 802.11 TXOP courant.
<b>La Phase de partage</b>	N'est pas employé	Se produit après le mode de déclenchement et avant le mode de transmissions multiples
<b>Transmission de multiples trames</b>	Commencer quand un EDCAF avec une C.A. à des trames multiples à transmettre	Commence quand un EDCAF permet les lancements simultanés d'échange multiples se trames

FIGURE 2.13 – Les phases du 802.11ac TxOP Sharing.

D'ailleurs, la durée de TXOP est définie à base du TXOP limite de la C.A. primaire et le temps de transmission est basé sur la quantité de données programmées pour être transmise par la C.A. primaire. La période du MU-TXOP est finie quand la C.A. primaire finit sa transmission,

même si les C.A secondaires ont plus de trames à transmettre.

La Figure 2.14 représente comment des C.As différentes peuvent partager un EDCA TXOP. AC-VI est considéré comme C.A. primaire, et il veut envoyer deux blocs de trames MSDUs pour STA-1 et STA-3 respectivement. Par conséquent, ces deux stations sont les destinations primaires. Les C.As secondaires sont AC-VO et AC-BE, et STA-2 est une destination secondaire. Des trames MSDUs seront transmises dans de multiples A-MPDUs. Pour les deux C.As secondaires, la plus haute priorité est transmise en premier [17].

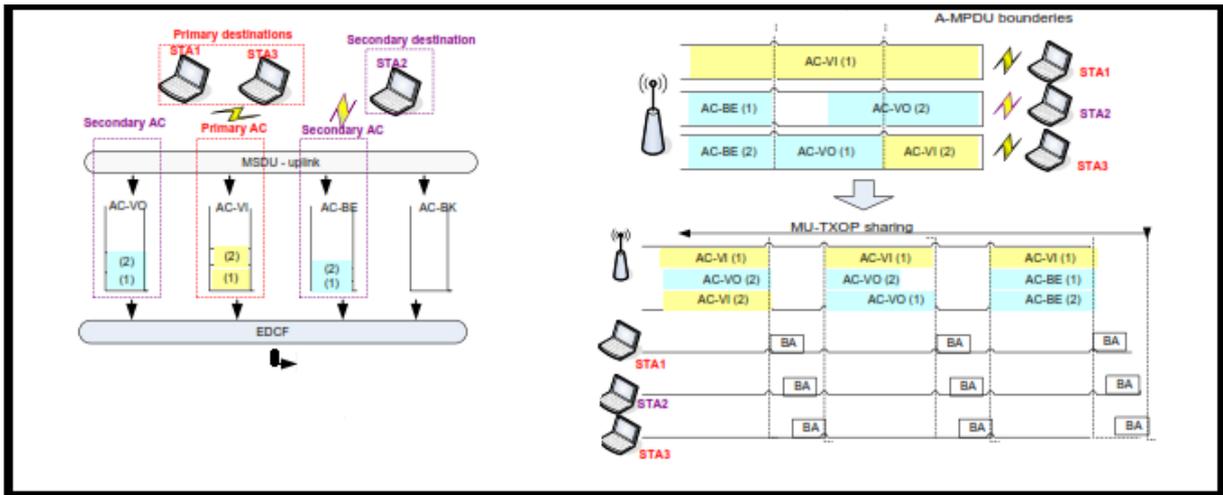


FIGURE 2.14 – Exemple du TxOP Sharing.

## 2.3 IEEE 802.11n

Le 802.11n parvient à augmenter la portée et doper le débit, D'abord par de considérables améliorations au niveau de la couche physique :

L'utilisation de plusieurs techniques MIMO : le codage espace-temps permet en principe d'augmenter la portée du signal de 10 à 20 % , tandis que le multiplexage spatial peut aller jusqu'à quadrupler le débit maximal (*en MIMO 4 x 4 x 4*), selon les conditions radio ; il y'a aussi le regroupement de canaux (*optionnel*) afin d'utiliser une bande de 40 MHz de largeur plutôt que 20 MHz habituellement : ceci permet de doubler le débit ; d'autres améliorations plus légères qui peuvent chacune améliorer le débit de 10 % environ : 52 sous-porteuses OFDM plutôt que 48 ; un délai de garde plus court entre les symboles OFDM, de 400 ns plutôt que 800 ns (*optionnel*) ; un préambule plus court (*optionnel*) [5].

D'autre part, des améliorations de la couche MAC peuvent encore doubler le débit par le biais de deux optimisations de la couche MAC : l'agrégation de trames et les acquittements groupés.

Il y a toujours des délais entre les trames Wifi, et en outre chacune comporte une entête de

taille fixe. Donc si ces trames transportent peu de données, on peut facilement se retrouver dans une situation où l'on passe plus de temps à attendre entre les trames et à transmettre des entêtes qu'à envoyer des données. Autrement dit, plus les trames sont petites, plus on gaspille de la bande passante. Afin d'augmenter le débit, le 802.11n propose donc deux solutions alternatives qui permettent d'augmenter la taille des trames, en regroupant plusieurs trames en une seule : l'A-MSDU et l'A-MPDU (*Aggregated MSDU/MPDU, c'est-à-dire "MSDU/MPDU agrégé"*) présenté au paravent (*voir §2.2.3*), la Table 2.3. Illustre la longueur des trames dans 802.11n [5].

	<b>802.11n</b>
<b>A-MSDU length (bytes)</b>	7935
<b>A-MPDU length (bytes)</b>	65535

TABLE 2.3 – La longueur des A-MSDU/MPDU dans IEEE 802.11n.

A chaque fois qu'une station Wifi émet un paquet, elle attend en retour un ACK (*"acknowledgement", c'est-à-dire acquittement*). Cet ACK occupe donc une part non négligeable de la bande passante. Le 802.11n optimise donc la couche MAC du Wifi en réduisant d'une part la taille du paquet ACK, qui passe de 128 octets à 8 octets, et surtout en permettant à une station d'émettre plusieurs trames, puis d'attendre un acquittement groupé, qu'on appelle le "Block-ACK". On économise ainsi un peu de bande passante. Ceci est particulièrement utile lorsque l'on met en œuvre l'agrégation de trames (*voir §2.2.2*).

## 2.4 IEEE 802.11ac

Pour améliorer le débit du réseau, un nouveau IEEE appelé standard 802.11ac est en cours de développement et le premier amendement est apparu en août 2011.

Bien qu'IEEE 802.11ac soit en grande partie une évolution d'IEEE 802.11n, il est basé sur 802.11n dans certaines parties telles que le codage de canal et le mode MIMO. Les quatre perfectionnements principaux de la couche de PHY par rapport à 11n sont l'utilisation des canaux 80/160MHz, le codage 256QAM, monte à huit antennes et le downlink multiple utilisateurs MIMO tel mentionné dans [17].

1. La liaison a 80MHz : IEEE 802.11ac supporte les canaux 80MHz aussi bien que les canaux 20MHz et 40MHz, avec l'utilisation facultative des canaux 160MHz contigus ou de deux canaux 80MHz non-contigus. L'utilisation des canaux 80MHz est basée sur la liaison de deux canaux 40MHz adjacents.
2. 256 QAM (*Quadrature amplitude modulation*) : 802.11ac ajoute une nouvelle technique de modulation facultative mais plus élevée qui est la modulation 256QAM tandis que 802.11n est basé sur la technique de la modulation 64QAM.

3. MIMO 8\*8 : IEEE 802.11ac prolonge les quatre flux spéciaux de 802.11n à huit.
4. Le downlink MU-MIMO : IEEE 802.11ac supporte la technologie downlink MU-MIMO pour permettre à de multiples trames d'être envoyées d'un point d'accès à de multiples récepteurs simultanément par de multiples flux spatiaux. Ainsi, ces flux simultanés sont envoyés aux utilisateurs sur le même canal. Il vise à réaliser au moins 1Gbps et 500Mbps en tant que sortie maximum dans le cas du multiposte et celui de sortie simple respectivement, du point d'accès (voir § 2.1.5) [17].

Pour profiter au maximum des améliorations PHY d'autres améliorations ont été apportées à la couche MAC existante :

1. Le TXOP Sharing (voir §2.2.5).
2. L'agrégation améliorée :

IEEE 802.11n a proposé un arrangement d'agrégation où des sous-trames multiples sont accumulées et transmises dans une seule trame afin d'améliorer l'efficacité MAC. Il y a deux types d'agrégation : A-MSDU et A-MPDU, et tous les deux peuvent être combinés dans une seule trame avec l'agrégation à deux niveaux A-MSDU/A-MPDU (voir §2.2.3). L'IEEE 802.11ac améliore ceci aussi en augmentant la taille des A-MSDUs et A-MPDUs, la Table 2.5 illustre la longueur des trames dans 802.11ac.

	<b>802.11ac</b>
<b>A-MSDU length (bytes)</b>	11426
<b>A-MPDU length (bytes)</b>	1048579

TABLE 2.4 – La longueur des A-MSDU/MPDU dans IEEE 802.11ac.

3. 3) Le format de la trame MAC (voir §2.2.4).

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la mise en évidence des caractéristiques des deux couches PHY et MAC des nouvelles normes à très haut débit. En particulier, nous avons accordé un grand intérêt au couple (*MIMO*, *OFDM*) et à la nouvelle révolution des techniques MIMO qui est le downlink MU-MIMO au niveau PHY d'une part, et aux nouveaux systèmes d'agrégations implémentés dans la couche MAC avec le Block ACK d'autre part.

---

---

## CHAPITRE 3

---

# *ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE LA NORME IEEE 802.11AC*

### Introduction

Dans ce chapitre, nous donnerons une synthèse des travaux déjà existants dans la littérature, ainsi que nos motivations et notre proposition (*section 3.1*). Nous présenterons les outils logiciels utilisés pour réaliser ce projet, parmi eux le simulateur 802.11 – *ANNGW*, nous définirons les paramètres MAC et PHY utilisés pour la simulation et nous présenterons les résultats obtenus (*Section 3.2*).

## 3.1 Synthèse sur les travaux existants, proposition et motivations

Dans cette section, nous présenterons une synthèse sur les travaux d'évaluation des Performances du protocole IEEE 802.11, les motivations qui nous ont permis de définir l'orientation de notre projet, et aussi nos objectifs concernant les nouvelles normes IEEE 802.11, et les actions entreprises dans ce sens.

### 3.1.1 Synthèse sur les travaux existants

Les principaux travaux d'évaluation des performances des nouvelles normes très haut débits (*VHT*) et des nouveaux systèmes d'agrégations, sont présentés dans cette section selon l'ordre chronologique de leurs publications :

***D. Skordoulis et al. (2008) [6]*** : Les auteurs ont étudié la clef des perfectionnements MAC qui aide la norme 802.11n à réaliser un très haut débit effectif et atteindre un rendement élevé. Ils ont donné une description détaillée des divers mécanismes d'agrégation proposés dans la dernière ébauche de 802.11n. Les résultats de simulation présentés par les auteurs, confirment que l'A-MSDU, l'A-MPDU et une combinaison de ces derniers améliorent intensivement le débit effectif global.

***E. Perahia et al. (2010) [25]*** : Les auteurs ont donné une vue d'ensemble des amendements WLANs gigabit d'IEEE, i.e. IEEE 802.11ac et 802.11ad. Les deux amendements standards annoncent un débit de réseau au-delà du gigabit. Ils décrivent aussi la répartition de canaux dans 802.11ac, la conception de la couche PHY, les modifications de la couche MAC, et la liaison downlink MU- MIMO. Pour 802.11ad, la nouvelle couche PHY, des perfectionnements MAC, et le beamforming sont présentés.

***E. H. Ong et al. (2011) [26]*** : Les auteurs ont présenté les principales améliorations des normes haut (IEEE 802.11n) et très haut débit (IEEE 802.11ac) en se concentrant sur les caractéristiques de la couche MAC. A partir d'une analyse analytique et d'une simulation, ils ont comparé les performances MAC avec les trois différents mécanismes d'agrégation, A-MPDU, A-MSDU et l'agrégation hybride (*A-MSDU/A-MPDU*). En outre, ils démontrent que l'agrégation hybride d'A-MSDU/A-MPDU apporte le meilleur gain pour les deux normes 802.11n et 802.11ac, et son amélioration est en fonction de la taille du maximum A-MSDU.

**M. Park (2011) [27]** : Dans cet article, l'auteur donne d'abord une vue d'ensemble de la bande passante statique de 40 MHz et les mécanismes d'accès dynamiques au canal de largeur de bande de 20/40 MHz définis dans 802.11n. Il a aussi prolongé ces mécanismes dans l'IEEE 802.11ac pour un canal de largeur de 80 MHz et étudie les mécanismes d'accès statiques et dynamiques au canal.

**X. Zhu et al. (2011) [21]** : les auteurs ont étudié l'utilisation de trois types de technique Beamforming sur un canal de 60 GHz en utilisant la technique de modulation OFDM. Ils ont simulé ces mécanismes avec variation de BER (Bit Error Rate).

**T. Selvam et al. (2012) [24]** : Les auteurs ont présenté une étude détaillée de la simulation des mécanismes d'agrégation A-MSDU et A-MPDU et propose un mécanisme simple d'agrégation de trames. La méthode proposée choisit dynamiquement la technique d'agrégations à utiliser et la taille des trames à agréger en se basant sur divers paramètres.

**B. Bellalta et al. (2012) [28]** : Les auteurs ont présenté et évalué une technique d'agrégation de paquets dans IEEE 802.11ac MU-MIMO. Les résultats présentés par les auteurs, montrent que les performances du système sont affectées par le nombre de stations et la charge du réseau (*trafic en entrée*).

**J. Cha et al. (2012) [10]** : Ils ont comparé les deux mécanismes d'agrégation avec une liaison downlink MU-MIMO, selon divers cas distinctifs : les stations envoient des trames de longueurs différentes, etc. Les auteurs ont observé que les mécanismes d'agrégation surpassent les avancées PHY comme la technique MU-MIMO.

**C. Zhu et al. (2012) [9]** : Dans cet article, les auteurs ont présenté la version actuelle de la norme IEEE 802.11ac, en se concentrant sur les modifications et les perfectionnements de la couche MAC qui sont nécessaires pour soutenir le dispositif unique de la transmission à multiples utilisateurs de la liaison downlink MIMO. Ils se sont concentrés en particulier, sur l'amélioration de la technique d'opportunité de transmission (TXOP) pour la liaison downlink MU-MIMO et les procédures révisées de backoff pour les ACs secondaires qui ont été présentées et discutées. Ils ont aussi proposé le TXOP Sharing partageant le mécanisme TXOP existant qui a été accepté dans les nouvelles spécifications IEEE tel qu'IEEE 802.11ac.

**E. Charfi et al. (2012) [29]** : Ils ont donné un large résumé des nouvelles normes IEEE 802.11 ac/ad/aa. Ils ont décrit comment la nouvelle norme IEEE 802.11ac utilise des liaisons multi-user et comment elle partage l'opportunité de transmission sur les stations et ils clarifient comment la norme peut monter jusqu'à 7Gbits/s.

**E. Charfi et al. (2013) [22]** : Dans ce Survey, les auteurs ont examiné les différentes améliorations de la couche PHY et de la couche MAC qui définissent toute les spécifications des futures générations WLANs. En particulier, ils se sont concentrés sur les caractéristiques de chaque amélioration telle que les principaux mécanismes de la couche MAC qui permettent d'améliorer les performances du réseau. Puisque les mécanismes récents de la couche MAC visent à assurer une certaine QoS pour des applications multimédia et temps réel, ils ont étudié les différents systèmes et mécanismes qui fournissent la satisfaction de QoS pour le transport en temps réel des flux multimédia dans les WLANs.

Cette synthèse nous a permis de constater l'absence de références sur l'évaluation des performances exhaustive des futures générations WLANs (les normes à très haut débit). En effet, la plupart de ces travaux concernent principalement la norme haut débit IEEE 802.11n, et les mécanismes d'aggrégation déjà existant dans cette dernière.

### 3.1.2 Motivations

Comme nous l'avons fait remarquer dans la sous-section précédente, nous constatons un manque considérable de travaux sur les nouvelles générations des réseaux WLANs, le peu de travaux que nous avons pu trouver concernent généralement la norme haut débit IEEE 802.11n. Par ailleurs, nous avons trouvé quelques papiers qui concernent les normes très haut débit telle que IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad. Ces travaux consistent entre autres, à présenter les nouvelles générations Wifi sous forme de *Survey* (Voir [6, 22, 29]), ou concernent des études qui se sont penchées soit sur la couche PHY, soit sur la couche MAC. Il s'agit pour couche PHY d'analyser les nouvelles techniques de codage, de modulation, le multiplexage spatial (*MIMO*), le *MU-MIMO* et le regroupement de canaux, et pour la couche MAC d'analyser les nouveaux mécanismes d'agrégation (A-MSDU, A-MPDU, Two-level) sans tenir compte de la configuration de la couche PHY.

### 3.1.3 Proposition

Dans ce mémoire de Master, nous allons donner pour la première fois dans la littérature une étude exhaustive des performances qui concernent l'une des normes permettant l'installation d'un réseau à très haut débit, il s'agit de la norme IEEE 802.11ac. Notre étude vise en particulier à présenter pour la première fois des résultats quantitatifs qui tiennent compte à la fois des caractéristiques PHY et MAC de la norme IEEE 802.11ac. Les résultats obtenus après une implémentation de la norme IEEE 802.11ac dans un simulateur dédié, mènent à des conclusions qui n'ont été présentés dans aucun papier.

## 3.2 Résultats et analyse

Dans cette section, nous présenterons les outils logiciels utilisés pour implémenter la nouvelle norme IEEE 802.11ac, et les paramètres MAC et PHY utilisés pour avoir les résultats surprenant que nous analyserons ci-dessous.

### 3.2.1 Outils logiciels utilisés

Pour réaliser l'évaluation des performances, nous avons développé un simulateur pour simuler les mécanismes de la couche MAC en tenant compte des caractéristiques PHY. En raison d'appartenance du protocole IEEE 802.11 à la famille des algorithmes de communication asynchrone qui s'exécutent d'une manière parallèle et concurrentielle par les différents mobiles du réseau pour accéder au canal radio, nous avons opté pour la programmation multithread avec le langage C sous Linux pour réaliser le simulateur 802.11-ANNGW (*802.11 Analysis Network Next Generation Wifi*) basé sur le simulateur 802.11-ANSRE [30].

Le mot thread peut se traduire par *fil d'exécution*, c'est à dire un déroulement particulier du code du programme, qui se produit parallèlement à d'autres entités en cours de progression. Il s'agit d'une manière différente d'aborder la conception multitâche. Linux implémente les mécanismes qui, mis en œuvre par le noyau et des fonctions de bibliothèque, permettent d'accéder à la puissance des threads avec la portabilité de la norme Posix.1c.

Pour avoir un bon partage des données et une bonne synchronisation et communication entre les mobiles, nous avons utilisé les threads de la norme Posix.1.c, les IPC system V (*files de messages*) et les outils POSIX (*mutex et variables conditions*). Enfin, pour la génération de graphes nous avons opté pour MATLAB 7.14 (R2009a) en exploitant les résultats du simulateur 802.11-ANNGW.

Ce simulateur implémente les fonctions principales du protocole IEEE 802.11ac (*CSMA/CA, BeB, RTS/CTS, agrégation, etc.*) telles qu'elles sont décrites dans le standard et un module d'erreurs pour éliminer les paquets de données erronés, ceci en fait un outil très intéressant pour étudier un réseau utilisant les nouvelles carte IEEE 802.11ac et les technique MIMO. Il nous permettra, d'analyser les performances de la norme IEEE 802.11ac sous l'influence des nouvelles techniques de multiplexage spatial et d'évaluer le niveau d'amélioration des mécanismes d'agrégation dans un environnement radio. Nous montrons ci-après le schéma SADT de ce simulateur :

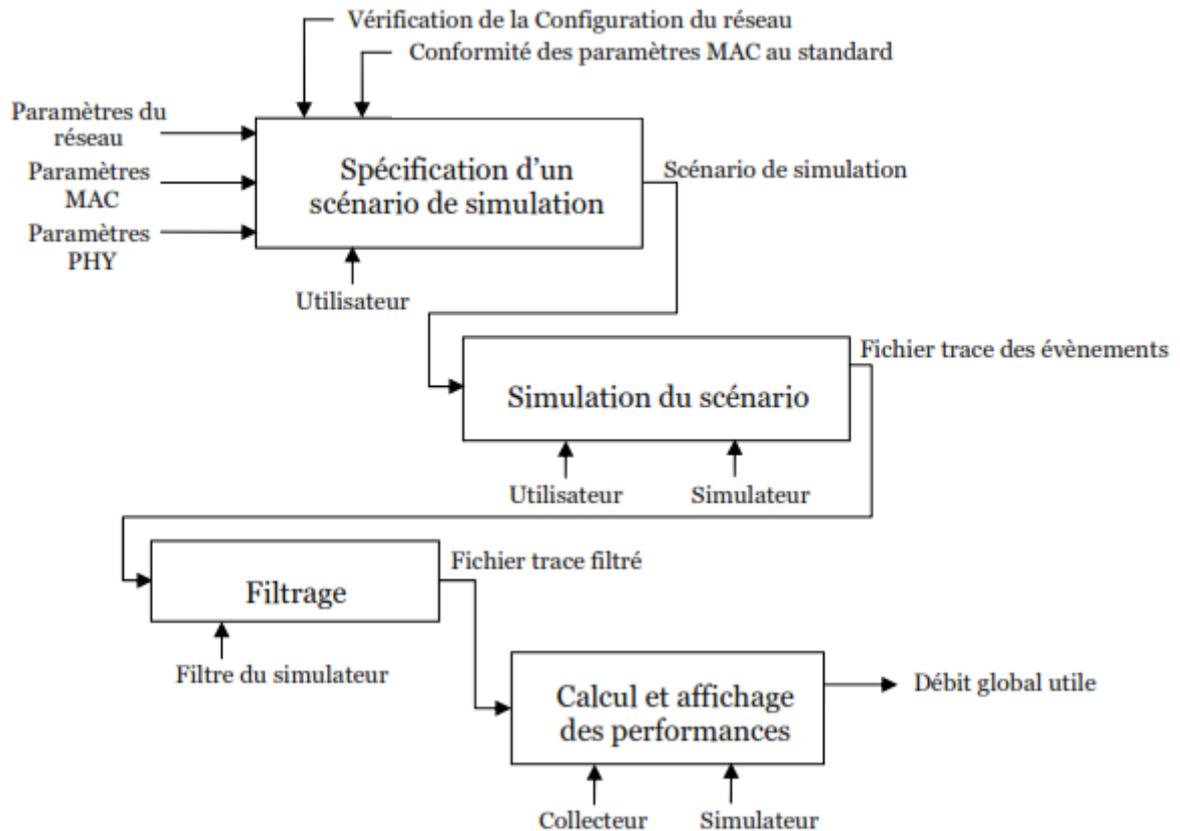
**Schéma détaillé de SADT :**

FIGURE 3.1 – Schéma détaillé de SADT du simulateur 802.11-ANNGW.

**3.2.2 Paramètres MAC et PHY utilisés**

Les valeurs des paramètres utilisés pour obtenir les résultats de simulation sont résumées dans la *Table 3.1*. Ces valeurs sont celles spécifiées pour la couche physique OFDM telle qu'elle est décrite dans le standard [5] et la taille des trames est celle définie dans la spécification de la couche MAC 802.11ac.

<i>Paramètres de "PHY OFDM"</i>	<b>Valeurs Numériques</b>
<i>Temps de propagation du signal</i>	1 $\mu$ s
<i>DIFS</i>	34 $\mu$ s
<i>SIFS</i>	16 $\mu$ s
<i>Durée d'un slot vide</i>	9 $\mu$ s
<i>Débit de transmission des paquets de control (RTS, CTS, ACK)</i>	2 Mbits/s
<i>Débit de transmission des paquets de données</i>	54 Mbits/s
<i>Débit de transmission de l'entête PHY</i>	1 Mbits/s
<i>Débit de transmission de l'entête MAC</i>	2 Mbits/s
<i>Taille minimal de la fenêtre de contention</i>	15
<i>Taille maximal de la fenêtre de contention</i>	1024
<i>Nombre maximum de retransmission</i>	7
<i>Taille de l'entête PHY</i>	192 bits
<i>Taille de l'entête MAC</i>	34 octets
<i>Taille d'un RTS</i>	20 octets
<i>Taille d'un CTS</i>	14 octets
<i>Taille d'un ACK</i>	14 octets
<i>Taille maximum d'un A-MSDU</i>	7535 octets
<i>Taille maximum d'un A-MSDU pour A-MPDU</i>	4095 octets
<i>Nombre maximum d'MPDUs dans un A-MPDU</i>	64

TABLE 3.1 – Paramètres de la couche PHY OFDM et de la couche MAC 802.11ac.

### 3.2.3 Simulation et analyse des résultats.

Les différents cas que nous discuterons par la suite se résument en sept points :

- Évaluation du mécanisme d'agrégation A-MSDU ;
- Évaluation du mécanisme d'agrégation A-MPDU ;
- Évaluation du mécanisme d'agrégation Two-level ;
- Influence de la taille des paquets sur les trois mécanismes d'agrégation ;
- Influence du taux d'arrivée des paquets sur les trois mécanismes d'agrégations ;
- Analyse de l'occupation de la bande passante selon la technique MIMO utilisée ;
- Estimation du débit global atteignable avec les trois mécanismes d'agrégation.

La visualisation des résultats de simulation pour chaque cas, sous forme de courbes nous permettra de comprendre de quelle manière les performances globales d'un réseau utilisant des cartes 802.11ac évoluent.

#### 3.2.3.1 Évaluation du mécanisme d'agrégation A-MSDU

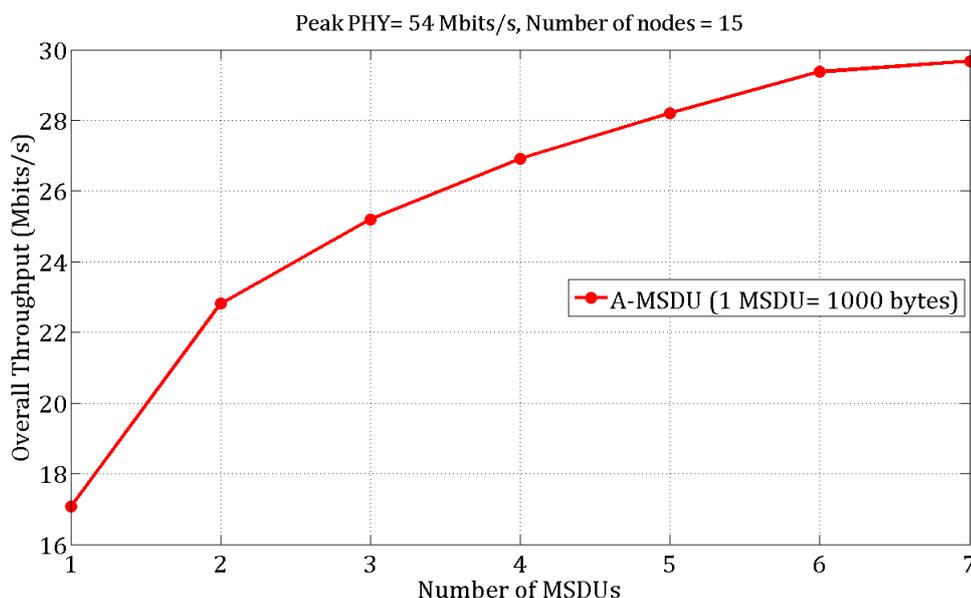
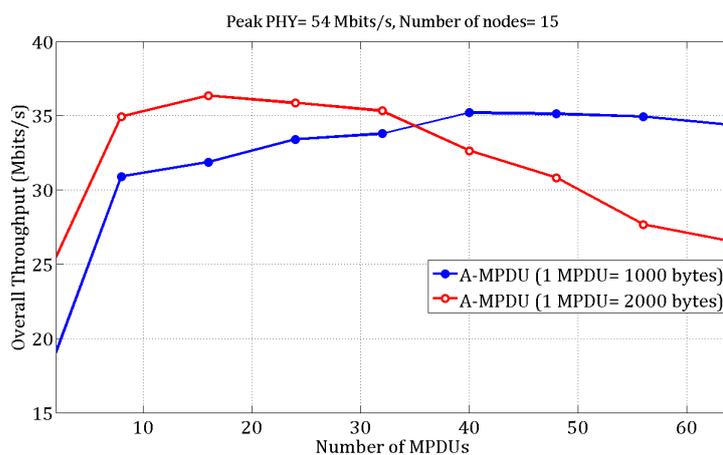


FIGURE 3.2 – Débit effectif global de l'A-MSDU vs. Nombre de MSDUs .

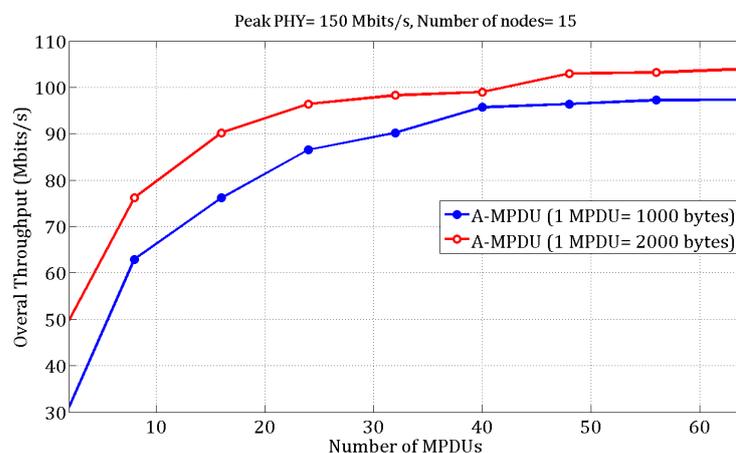
La Figure 3.2 montre le débit effectif global résultant en augmentant le nombre de MSDUs de longueur de 1000 octets agrégés dans un seul A-MSDU simple, utilisant la technique MIMO (1x1x1) sur un canal de 20 MHz. Ainsi, seul le mécanisme d'agrégation A-MSDU est utilisé dans un réseau comportant 15 stations.

On observe que le débit résultant du mécanisme d'agrégation A-MSDU augmente avec l'augmentation du nombre de MSDUs agrégés, car en augmentant ce dernier, on augmente automatiquement la charge de la trame A-MSDU à envoyer, donc le débit effectif global. Nous observons aussi que le débit se stabilise aux environs de 30 Mbits/s. Ceci est relatif au débit PHY qui est de 54 Mbits/s. Ce dernier est offert en utilisant une technique MMO (1x1x1) sur un canal de 20 MHz (OFDM).

### 3.2.3.2 Évaluation du mécanisme d'agrégation A-MPDU



a) MIMO (1x1x1) avec 20 MHz



b) MIMO (3x3x3) avec 20 MHz

FIGURE 3.3 – Débit effectif global de l'A-MPDU vs. Nombre de MPDUs .

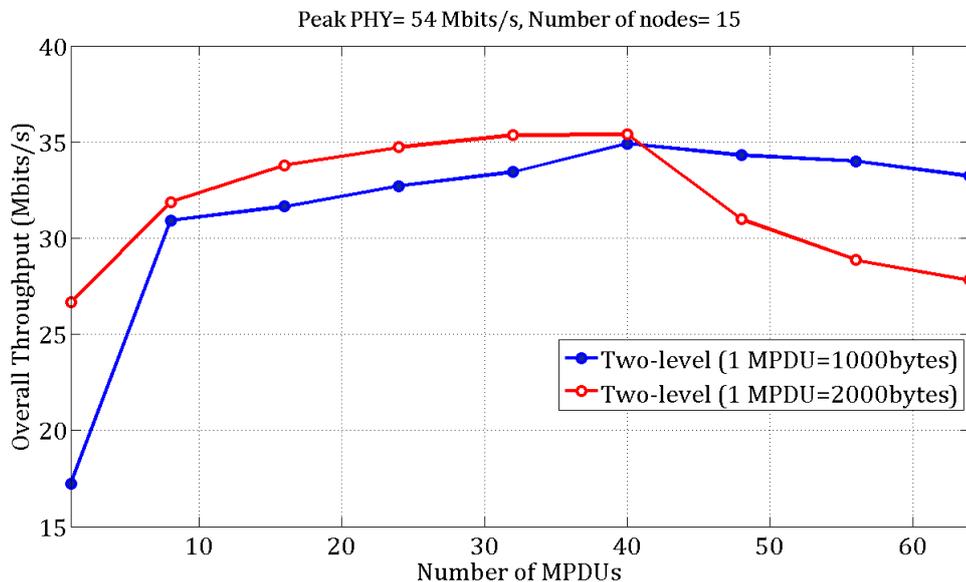
Les Figures 3.3. (a) et 3.3. (b) montrent la variation du débit effectif global d'un réseau 802.11ac, suivant le nombre de MPDUs agrégés dans un seul A-MPDU, en utilisant les

systèmes MIMO (1x1x1) et MIMO (3x3x3) respectivement, sur un canal de 20 MHz. Les deux figures montrent une comparaison du débit du 802.11ac en fonction de la taille des MPDU agrégés (1000 et 2000 octets).

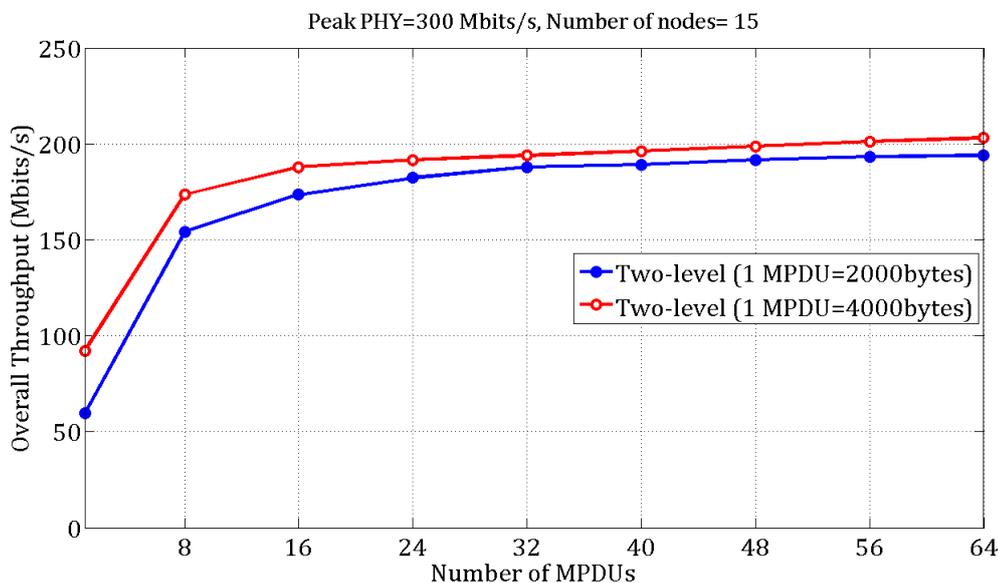
Suivant les indications de la Figure 3.3 (a), nous observons que les deux courbes augmentent avec l'augmentation du nombre de MPDUs agrégés jusqu'à atteindre leurs maximums, 40 MPDUs pour l'agrégation d'MPDUs de 1000 octets et 16 MPDUs pour les MPDUs de 2000 octets. Après avoir dépasser ce seuil, on observe une diminution du débit qui est très flagrante avec les MPDUs de 2000 octets. Ces résultats ne sont guère surprenants, vu qu'on utilise dans cette simulation une technique MIMO (1x1x1), sur un canal de 20 MHz, par conséquent, une crête de débit PHY de 54 Mbits/s. Autrement dit, la quantité de données qui afflue de la couche MAC vers la couche PHY ne peut être contenue par cette dernière. Si nous suivons les indications de la Figure 3.3 (b), nous observons que les deux courbes avec 1000 et 2000 octets augmentent avec l'augmentation du nombre d'MPDUs agrégés. Le débit du réseau se stabilise, quand le nombre de MPDUs agrégés atteint 64, avec un débit de 99 et 105 Mbits/s respectivement. Donc, sans aucun affaiblissement du débit, vu que cette fois ci la couche PHY intègre le MIMO (3x3x3), sur un canal de 20 Mhz, qui offre une crête de débit PHY de 150 Mbits/s.

Pour résumer, le mécanisme d'agrégation A-MPDU étant utilisé au niveau MAC, implique l'utilisation d'une technique MIMO (3x3x3), sur un canal de 20 MHz minimum, au niveau PHY, pour tirer parti de cet amélioration MAC (A-MPDU).

### 3.2.3.3 Évaluation du mécanisme d'agrégation Two-level



a) MIMO (1x1x1) avec 20 MHz



b) MIMO (3x3x3) avec 40 MHz

FIGURE 3.4 – Débit effectif global vs. Nombre de MPDUs avec l'agrégation Two-level.

Les Figures 3.4 (a) et 3.4 (b) montrent la variation du débit effectif global d'un réseau 802.11ac, suivant le nombre de MPDUs agrégés dans une seule trame Two-level, en utilisant les systèmes MIMO (1x1x1) et MIMO (3x3x3) respectivement, avec un canal de 20 MHz.

Les deux figures montrent une comparaison du débit du 802.11ac en fonction de la taille des MPDUs agrégés (1000 et 2000 octets).

Suivant les indications de *la Figure 3.4 (a)*, nous observons que les deux courbes augmentent avec l'augmentation du nombre de MPDUs agrégés jusqu'à atteindre leurs maximums, 35 MPDU pour l'agrégation d'MPDUs de 1000 octets et 34 MPDUs pour les MPDUs de 2000 octets. On observe après ces valeurs une diminution du débit qui est très flagrante avec les MPDUs de 2000 octets. Ces résultats ne sont aussi guère surprenants, vu qu'on utilise dans cette simulation une couche PHY, OFDM avec MIMO (1x1x1), sur un canal de 20 MHz, donc une crête de débit PHY de 54 Mbits/s. Autrement dit la quantité de données qui afflue de la couche MAC vers la couche PHY ne peut être contenue par cette dernière.

Si on suit les indications de *la Figure 3.4 (b)*, nous observons que les deux courbes avec 2000 et 4000 octets augmentent avec l'augmentation du nombre de MPDUs jusqu'à se stabiliser au maximum de MPDUs requis pour ce mécanisme, avec un débit de 199 et 201 Mbits/s respectivement. Ainsi sans aucun affaiblissement du débit vu que cette fois ci la couche PHY intègre le MIMO (3x3x3), sur un canal de 20 Mhz, donc une crête de débit PHY de 300 Mbits/s.

Pour résumer, le mécanisme d'agrégation Two-level étant utilisé au niveau MAC, implique l'utilisation d'une technique MIMO (3x3x3), sur un canal de 40 MHz minimum cette fois ci, au niveau PHY, pour tirer parti de cet amélioration MAC (Two-level).

### 3.2.3.4 Influence de la taille des paquets sur les trois mécanismes d'agrégation

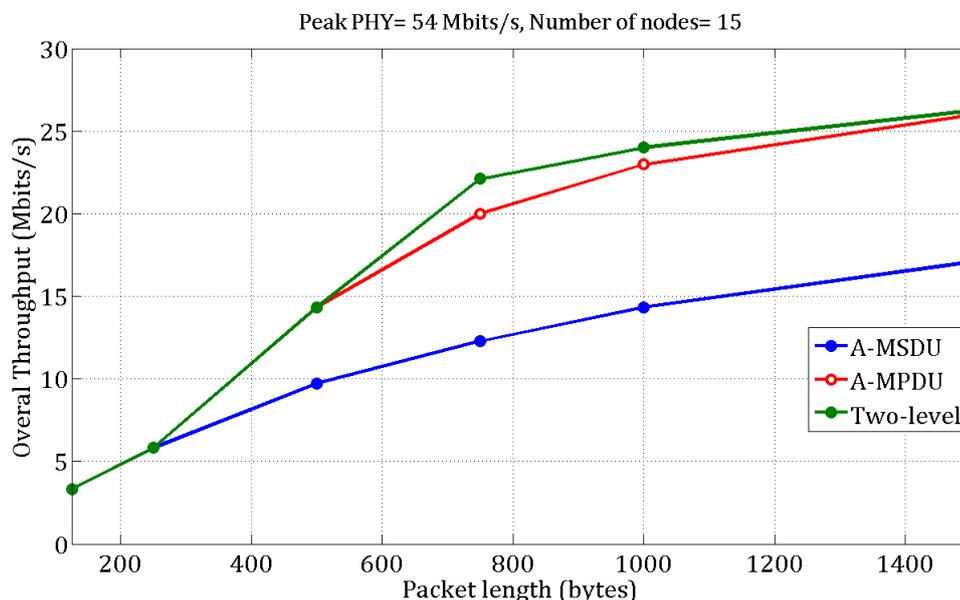


FIGURE 3.5 – Débit effectif global vs. Longueur des paquets.

La Figure 3.5 montre le débit effectif global obtenu en variant la longueur des paquets, pour les trois mécanismes d'agrégation. Dans cette figure, nous analysons le débit effectif global, suivant la longueur des paquets de données, avec un taux d'arrivée constant, obtenu en utilisant le système MIMO (1x1x1) avec un canal de 20 MHz.

Suivant les indications de la Figure 3.5, nous observons que le débit des trois mécanismes d'agrégation, augmentent selon la charge. Nous observons que, le débit obtenu avec le mécanisme A-MSDU est en-dessous de 20 Mbits/s, malgré l'augmentation de la longueur des paquets de données. Tandis que les mécanismes A-MPDU et Two-level, réalisent des débits maximum de 26 et 27 Mbits respectivement. Par ailleurs, quand la longueur des paquets est inférieure à 250 octets, les débits sont semblables pour n'importe quel type d'agrégation. C'est parce que l'A-MSDU peut agréger plusieurs petits paquets dans un MPDU simple, même si la longueur est limitée à 7000 octets, de la même manière un A-MPDU peut placer plusieurs MPDUs dans un simple PSDU. Ainsi, pour de petites longueurs de paquet, nous pouvons choisir n'importe quel type d'agrégation.

D'une part, quand la longueur des paquets est plus grande que 250 octets, le débit de l'A-MSDU se distingue de manière significative de l'AMPDU et du Two-level, car le nombre de

MSDUs qu'on peut mettre dans un simple A-MSDU devient plus petit par rapport aux autres mécanismes. Nous pouvons observer ce comportement plus distinctement quand la longueur du paquet varie de 1000 à 1500 octets.

### 3.2.3.5 Influence du taux d'arrivée des paquets sur les trois mécanismes d'agré- gations

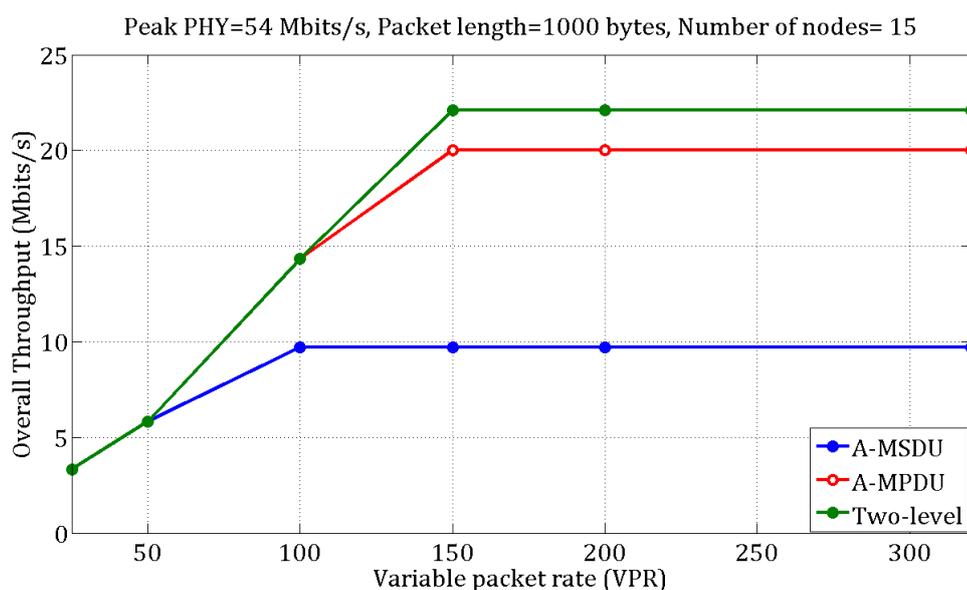


FIGURE 3.6 – Débit effectif global vs. Taux d'arrivée des paquets (VPR).

La Figure 3.6 montre le débit effectif global obtenu en variant le taux d'arrivée des paquets, pour les trois mécanismes d'agrégation. Dans cette figure, nous varions le taux d'arrivée des paquets, avec une longueur constante (1000 octets). Nous y remarquons que le débit obtenu avec les mécanismes d'agrégation augmente d'abord avec une augmentation du taux d'arrivée. Cependant, après que le canal soit saturé, le débit obtenu avec tous les mécanismes d'agrégation demeure constant même lorsque le taux d'arrivée continue d'augmenter. Ce comportement est qualifié de normale en raison de la saturation du canal. Ceci est dû aux ressources limitées par rapport à la demande imminente. Autrement dit, les systèmes d'agrégation ont un temps prédéfini d'attente pour agréger les paquets.

### 3.2.3.6 Analyse de l'occupation de la bande passante selon la technique MIMO utilisée

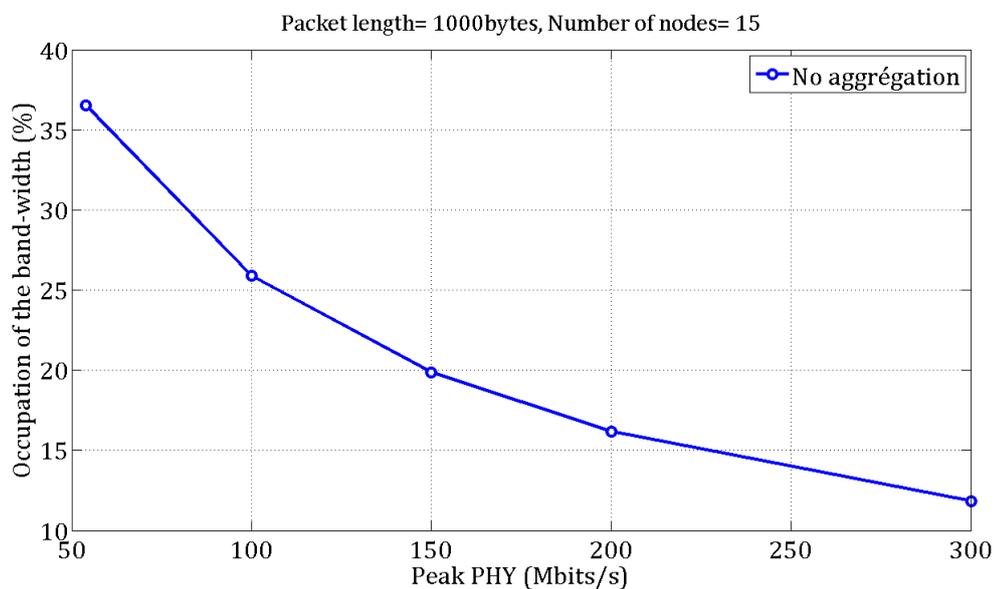


FIGURE 3.7 – Taux d'occupation de la bande passante vs. Techniques MIMO, utilisant aucune agrégation.

La Figure 3.7 montre le taux d'occupation de la bande passante selon le système MIMO utilisé. L'agrégation de trames est exclue dans cette simulation.

Dans cette simulation, nous utilisons une variété de systèmes MIMO qui sont récapitulés dans la Table 3.2.

Peak PHY	MIMO	Canal
54 Mbits/s	MIMO (1x1x1)	canal de 20 MHz
100 Mbits/s	MIMO (2x2x2)	canal de 20 MHz
150 Mbits/s	MIMO (3x3x3)	canal de 20 MHz
200 Mbits/s	MIMO (2x2x2)	canal de 40 MHz
300 Mbits/s	MIMO (3x3x3)	canal de 40 MHz

TABLE 3.2 – Correspondance entre techniques MIMO et débits PHY.

Dans la Figure 3.7, nous observons que le taux d'occupation de la bande passante diminue avec l'augmentation du *Peak PHY*, jusqu'à atteindre 12 %. Cette utilisation inefficace de la

bande passante est dû à l'augmentation du rapport Overhead / le temps total d'envoi d'un MPDU, car en augmentant le débit PHY, nous réduisons le délai de transmission de la charge utile, sans pour autant réduire celui des entêtes PHY et MAC.

### 3.2.3.7 Estimation du débit global atteignable avec les trois mécanismes d'agrégation

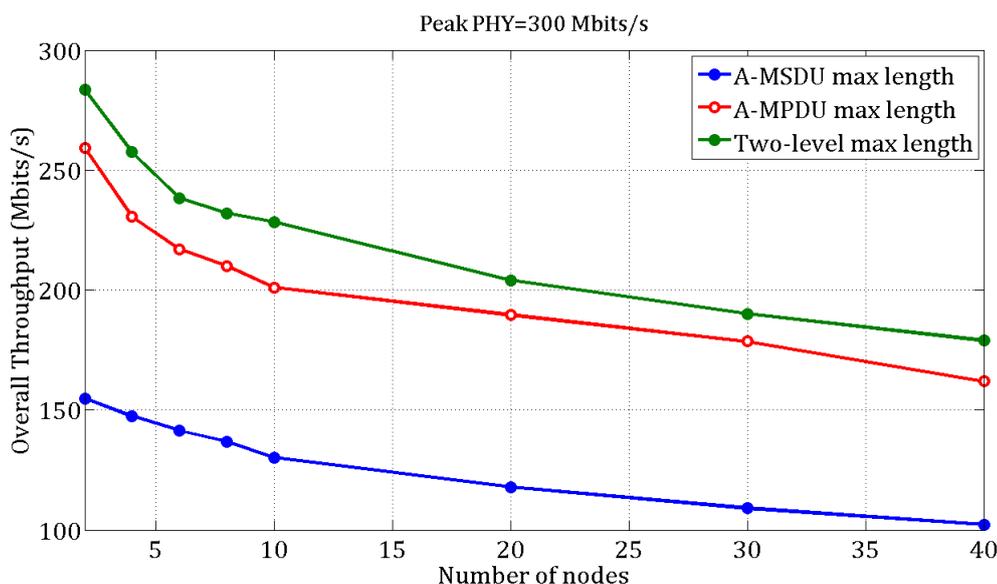


FIGURE 3.8 – Débit effectif global vs. Nombre de nIJud.

La Figure 3.8 montre le débit effectif global obtenu avec les trois mécanismes d'agrégation, suivant la taille du réseau.

Dans cette figure, on fixe la longueur trames A-MSDU, A-MPDU et Two-level au maximum autorisé, comme suit : 7 MSDUs de 1000 octets pour l'A-MSDU, 64 MPDUs de 2000 octets pour l'A-MPDU et 64 MPDUs de 4000 octets pour le Two-level. Nous avons pour objectif d'estimer le débit maximum pouvant être offert par chaque mécanisme d'agrégation. C'est pourquoi nous avons utilisé le système MIMO (3x3x3) sur un canal de 40 MHz.

Suivant les indications de la Figure 3.8, nous observons que tous les débits diminuent selon la taille du réseau. On observe aussi que, à mesure que le nombre de stations augmente, l'AMSDU reste en-dessus de 100 Mbits/s, tandis qu'A-MPDU et le Two-level réalisent des débits minimum de 160 et 170 Mbits/s, respectivement. On peut noter que le débit maximum atteint avec les

mécanismes d'agrégation A-MSDU, A-MPDU et Two-level est de 160, 260 et 280 Mbits/s.

## Conclusion

Les résultats de simulation, nous ont permis de comprendre de quelle manière les performances globales d'un réseau utilisant des cartes IEEE 802.11ac évoluent.

Les résultats obtenus avec notre simulateur montrent, d'une part, une amélioration significative des performances du réseau lorsque l'agrégation est utilisée, et lorsque la couche physique adéquate est utilisée. Dès lors, la prise en compte des différents systèmes MIMO et le regroupement de canaux est essentielle pour évaluer les performances des trois mécanismes d'agrégation. D'autre part, ces résultats nous ont permis de conclure que l'agrégation constitue une solution très intéressante et très efficace pour augmenter le débit, et l'utilisation d'une couche physique moindre n'améliore pas les performances du réseau, au contraire elle les dégrade. De même, l'utilisation d'une couche physique améliorée, avec aucun mécanisme d'agrégation au niveau MAC, n'est pas rentable, vu qu'on affaiblit aussi le débit. Ainsi, nous concluons que les nouveaux mécanismes d'agrégation défini dans la norme IEEE 802.11ac, améliorent considérablement le débit, à condition qu'on utilise la technique MIMO appropriée et la longueur de canal adéquate.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce projet de fin de cycle, nous nous sommes intéressés à l'analyse des performances de la nouvelle norme à très haut débit (VHT), IEEE 802.11ac. Nous avons évalué les performances des trois mécanismes d'agrégation définis dans la norme 802.11ac et nous avons analysé quantitativement, l'influence de la longueur des paquets de données, du système MIMO implémenté au niveau PHY et l'utilisation du regroupement de canaux, sur les performances d'un réseau 802.11ac, le débit effectif global et le taux d'occupation de la bande passante. Nous avons aussi montré la dépendance et le besoin d'une communication Cross-Layer MAC-PHY au sein d'un réseau local sans fil, afin d'optimiser le taux d'occupation de la bande passante et d'utiliser les améliorations MAC au maximum de leurs performances.

Pour atteindre notre objectif, nous avons proposé un simulateur, 802.11 – *ANNGW* (802.11 Analysis Network Next Generation Wifi), que nous avons programmé avec le langage C sous un environnement linux (Programmation avancée Multi-threads). Ce simulateur implémente un modèle réel du mode DCF (CSMA/CA, BeB, RTS/CTS et l'agrégation) de la norme IEEE 802.11ac et les différents systèmes MIMO existants.

Nos résultats de simulation montrent une dégradation significative des performances de la norme IEEE 802.11ac (une diminution accrue de l'occupation de la bande passante), lorsqu'aucun mécanisme d'agrégation n'est activé au niveau MAC, un débit PHY élevé est utilisé (MIMO [3x3x3]) et un regroupement de canaux est effectué. L'application d'un des trois mécanismes d'agrégation définis dans la norme IEEE 802.11ac avec le protocole CSMA/CA permet un niveau d'amélioration considérable et constitue une solution très efficace pour réduire les overheads dûs aux entêtes MAC et PHY, à condition bien sûr d'utiliser le système MIMO adéquat. Par ailleurs, ces résultats montrent une dégradation flagrante des performances du réseau 802.11ac, lorsqu'un des trois mécanismes d'agrégation est utilisé au niveau MAC, avec un système MIMO moindre au niveau PHY, dans le sens où, une couche PHY basique

annule le gain qu'offre les améliorations MAC (l'agrégation) ou pire, les performances du réseau se dégradent à un point, où il est préférable d'exclure carrément l'utilisation de l'agrégation de paquets.

En résumé, afin de tirer profit du très haut débit offert par la principale amélioration MAC qui est l'agrégation de paquet de données, une communication Cross-Layer MAC-PHY est nécessaire pour choisir le système MIMO et le regroupement de canaux adéquats à utiliser au niveau PHY, pour gérer au mieux la quantité de données qui afflue vers cette dernière.

Dans la continuité de nos travaux de mémoire de Master, nous proposons les perspectives suivantes :

- ▷ Comparaison PHY+MAC des performances du SU-MIMO et du MU-MIMO définis dans le standard IEEE 802.11ac ;
- ▷ Analyse de l'influence des phénomènes radio (atténuation par la distance, bruits de l'environnement, interférences) sur les performances du réseau IEEE 802.11ac ;
- ▷ Proposition d'un algorithme permettant à la couche MAC et PHY de choisir la meilleure solution (activation du mécanisme d'agrégation, utilisation du regroupement de canaux et/ou activation de tel système MIMO) parmi celles que propose la norme IEEE 802.11ac pour améliorer ses performances ;
- ▷ Mettre au point des algorithmes de commutation dynamiques entre SU-MIMO et MU-MIMO ;
- ▷ Réaliser l'extention de la plate-forme de simulation PHY+MAC 802.11ac aux normes : IEEE 802.11ah et IEEE 802.11ad.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. PATTARA-ATIKOM, S. BANERJEE, and P. KRISHNAMURTHY, *Starvation Prevention and Quality of Service in Wireless LANs*, The fifth International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, India, Volume 3, Page(s) : 1078 - 1082, Octobre 2002.
- [2] IEEE Standard for Information technology - *Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8 : Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.*, IEEE Std, Page(s) : 0-189, 2005.
- [3] H.S. ALAVI, M. MOJDEH and N. YAZDANI , *A Quality of Service Architecture for IEEE 802.11 Standards*, Asia-Pacific Conference on Communications, India, Page(s) : 249-253, Octobre 2005.
- [4] P. ANSELL, J. FAROOQ and B. RAUF, *An efficient-scheduling scheme for IEEE 802.11e*, Proceedings of WiOpt (Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks)., Page(s) : 189-210, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004.
- [5] IEEE 802.11n<sub>D</sub>5.00, *Approved Draft Standard for Information Technology Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements- Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications : Amendment 4 : Enhancements for Higher Throughput*, IEEE, Fevrier 2012.
- [6] D. SKRDOULIS, Q. NI, H. CHEN, A. P. STEPHENS, C. LIU and A. JAMALIPOUR, *IEEE 802.11 Mac Frame Aggregation Mechanisms for Next-Generation High-Throughput WLANs*, IEEE Wireless Communications, pages(s) : 40-47, Fevrier 2008.

- [7] Z. PAJOUHI, Y. DALDOUL, T. AHMED and D. MEDDOUR, *Hardware Implementation of an 802.11n MIMO OFDM Transceiver*, 2008 International Symposium on Telecommunications., NY, Page(s) : 1-12 , 2008.
- [8] N. S. MOKHTARI, *Cross-Layer Design : A New Paradigm* , Proceeding in International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT '06), Bangkok, page(s) : 183-188, Septembre 2006.
- [9] C. ZHU, A. BHATT, Y. KIM, O. ABOUL-MAJD and C. NGO, *MAC Enhancements for Downlink Multi-User MIMO Transmission in Next Generation WLAN*, The 9th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference - Wireless Consumer Communication and Networking, Los Angeles, USA, pages(s) : xx-xx, juin 2012.
- [10] J. CHA, B. C. JUNG and D. K. SUNG, *Performance Comparison of Downlink User Multiplexing Schemes in IEEE 802.11ac : Multi-User MIMO vs. Frame Aggregation*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference : MAC and Cross-Layer Design, Anchorage, AK, USA, page(s) : 20-22, juin 2012.
- [11] G. PUJOLLE, *Les Réseaux Edition 2008*, EYROLLES, Septembre 2007.
- [12] F. LEMAINQUE, *Tous sur les Réseau sans fil*, DUNOD, Avril 2009.
- [13] C. SERVIN, *Réseaux et Télécoms*, DUNOD, Décembre. 2003
- [14] IEEE 802.11b Supplement to 802.11-1999, *Wireless LAN MAC and PHY specifications : Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band*, 1999.
- [15] IEEE 802.11a, (8802 – 11 : 1999/Amd1 : 2000(E)), *IEEE Standard for Information technology-Specific requirements-Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications- Amendment 1 : High-speed Physical Layer in the 5 GHz band*, 1999.
- [16] IEEE 802.11g, *IEEE Standard for Information technology-Specific requirements-Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications- Amendment 4 : Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*, 2003.
- [17] G. REDIETEAB, *Optimisation cross-layer pour des futures générations de réseaux Wi-Fi*, Thèse de doctorat, (INSA) de Rennes, Octobre 2012.
- [18] A. GERON, *Wifi Professionnel- La norme 802.11, le déploiement et la sécurité*, 3ème Edition, DUNOD, 2009.
- [19] H. KANO, S. YOSHIZAWA, T. GUNJI , T. SAITO and Y. MIYANAGA, *development of 600 Mbps 2x2 MIMO-OFDM Baseband and RF Transceiver at 5 GHz Band*, Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation, Tokyo, Japan, pages(s) :141-173, Octobre 2010.
- [20] P. SZULAKIEWICZ, R. KOTRYS, M. KRASICKI, P. REMLEIN and A. STELTER, *OFDM Interfering Signal Rejection From 802.11ac Channel*, IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC), Bangkok, pages(s) : 134-136, 2012.

- [21] X. ZHU, A. DOUFEXI and T. KOCAK, *Beamforming Performance Analysis for OFDM Based IEEE 802.11ad Millimeter-Wave*, IEEE explorer, Los Angeles, USA, xx, Octobre 2011.
- [22] E. CHARFI, L. CHAARI and L. KAMON, *PHY/MAC Enhancements and QoS Mechanisms for Very High Throughput WLANs : A Survey*, IEEE Communication Surveys, Février 2013.
- [23] J. KOLAP, S. KRISHNAN and N. SHAHA, *Comparison of Frame Aggregation Mechanism in 802.11n WLAN*, International Conference on Communication, Information and Computing Technology (ICCICT), Mumbai, India, 2012.
- [24] T. SELVAM, S. SRIKANTH, *A Frame Aggregation Scheduler for IEEE 802.11n*, IEEE Conference, NY, 2012.
- [25] E. PERAHIA and M. X. GONG, *Gigabit Wireless LANs : an overview of IEEE 802.11ac and 802.11ad*, IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Cambridge University Press, pages(2) : 23-33, Septembre 2010.
- [26] E. H. ONG, J. KNECKT, O. ALANEN, Z. CHANG, T. HUOVINEN and T. NIHTILA, *IEEE 802.11ac : Enhancements for Very High Throughput WLANs*, IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2011.
- [27] M. PARK, *IEEE 802.11ac : Dynamic Bandwidth Channel Access*, IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the IEEE ICC 2011 proceedings, 2011.
- [28] B. BELLALTA, J. BARCELO, D. STAEHLE, A. VINEL and M. OLIVER, *On the Performance of Packet Aggregation in IEEE 802.11ac MU-MIMO WLANs*, IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, Volume 16, NO.10, Octobre 2012.
- [29] E. CHARFI, L. CHAARI and L. KAMON, *Upcoming WLANs MAC access mechanisms : an overview*, 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, xx, pages(s) : 1-5, 2012.
- [30] M. YAZID, L. Z. KHODJA, *Analyse des performances du standard IEEE 802.11 mode ad hoc dans un environnement radio*, mémoire d'ingénieur, U.A.M.B., 2008.

# Résumé

---

La norme IEEE 802.11ac, qui est prévue être ratifiée pour Décembre 2013, constitue l'une des nouvelles normes IEEE 802.11 permettant d'offrir un très haut débit ( $\approx 1$  Gbits/s) et un rayon de communication important ( $\approx 100$  m). Ceux-ci est possible grâce aux différents mécanismes d'agrégation de la couche MAC (A-MSDU, A-MPDU et Two-Level aggregation), et aux différentes techniques multi-antennes (MIMO) de la couche PHY. Notamment, la norme IEEE 802.11ac est considérée comme un pont vers les futures générations Wifi, en proposant le mécanisme de partage d'une opportunité de transmission (TxOPSharing) au niveau MAC, la technique de transmission multi-utilisateurs MIMO (MU-MIMO) au niveau PHY et surtout en intégrant pour la première fois des communications Cross-Layer (MAC-PHY). Dans ce travail, nous avons implémenté, simulé et évalué les performances de la norme IEEE 802.11ac. À travers cette étude, nous avons montré l'impact des caractéristiques MAC et PHY sur l'augmentation du débit effectif global du réseau. De même, nous avons mis en évidence la dépendance et le besoin d'une communication Cross-Layer (MAC-PHY) au sein d'un réseau local sans fil, dans le but d'optimiser la bande passante. Les résultats obtenus par simulation permettent pour la première fois de quantifier le débit effectif global d'un réseau IEEE 802.11ac, en considérant à la fois les mécanismes MAC et PHY proposés par cette norme.

**Mots-clé** : IEEE 802.11ac, Mécanismes d'agrégation, Techniques Multi-Antennes, Simulation et Analyse.

# Abstract

---

IEEE 802.11ac standard, which is foreseen to be ratified for December 2013, constitutes one of new IEEE 802.11 versions allowing to provide a very high throughput ( $\approx 1$ Gbits/s) and a wide communication range ( $\approx 100m$ ). These features are possible due to both aggregation mechanisms (A-MSDU, A-MPDU and Two-Level Aggregation) and multi-antennas techniques (MIMO) available at MAC and PHY layers, respectively. Particularly, IEEE 802.11ac is the first IEEE 802.11 amendment, which proposes the sharing transmission opportunity mechanism (TxOPSharing) at MAC level, the multi users MIMO technique at PHY layer and integrating for the first time the Cross-Layer communication (MAC-PHY). In this work, we implemented, simulated and evaluated the performances of the IEEE 802.11ac standard. Through this study, we showed the impact of both MAC and PHY features on the increase of overall throughput. In the same way, we highlighted the efficiency of Cross-layer communication, in order to optimize the bandwidth utilization. The obtained simulation results, allow for the first time to quantify the overall throughput of the IEEE 802.11ac network by considering at the same time both MAC and PHY mechanisms proposed by this standard.

**keyword** : IEEE 802.11ac, Mechanisms of aggregation, Multi-Antenna Techniques, Simulation and Analysis.