

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - Bejaia -
Faculté des Sciences Exactes
Département d'Informatique



***Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention d'un
master professionnel***

Option : Administration et sécurité des réseaux

Thème

**Amélioration de la Qos et de la réutilisation spéciale dans
la norme 802.11ax**

Présenté par :

M^{elle} BELKACEM Lynda

M^{elle} KHELOUF Hanane

Soutenu le 27/09/2020 devant le jury composé de :

Présidente	M^{me} AITABDELOUHAB	Karima	M.C.B	U.A/Mira Bejaia, Algérie.
Rapporteurs	M^r MOKETFI	Mohand	M.A.A	U.A/Mira Bejaia, Algérie.
	M^r YAZID	Mohand	M.C.A	U.A/Mira Bejaia, Algérie.
Examinatrice	M^{me} HOUHA	Amel	M.A.A	U.A/Mira Bejaia, Algérie.

Promotion 2019/2020

- Remerciements -

Nous tenons à remercier en premier lieu DIEU le tout puissant, pour ses faveurs et ses grâces, et de nous avoir donné le courage, la santé et la patience pour terminer ce travail.

Nos plus profonds remerciements vont à nos parents. pour leur soutien et encouragements tout au long de notre cursus.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à notre encadreur « YAZID Mohand » Nous voudrions également lui témoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous a été précieux afin de mener notre travail à bon port.

Nous adressons aussi nos remerciements les plus chaleureux à notre Co-encadreur « MOKETFI Mohand » pour sa disponibilité et pour tous ses précieux conseils. Nous tenons à remercier également l'ensemble des membres du jury pour avoir examiné notre travail.

On voudrait exprimer notre reconnaissance envers les amis et proches qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

- Dedicaces -

Je dédie ce modeste travail

- *A ma Chère Mère Karima*
- *A mon Chèr Père Hassen*

Autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soit-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. votre patience sans fin, votre compréhension et encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir. que Dieu le tout puissant vous préserve, vous accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et vous protège de tout mal.

- *A mes Frères et ma belle-sœur*

Amine, Nadjim, Sarah

Pour leur soutien moral et leurs soutien précieux tout au long de mes études.

- *A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*
- *A ma chère binôme Hanane je te souhaite beaucoup de succès.*

(*BELKACEM Lynda*)

- Dedicaces -

Je dédie ce modeste travail

- *A ma Chère Mère*

celle qui m'a donné la vie, qui m'a soutenue et encouragée durant toute ces années d'étude, que dieu le tout puissant, te préserve et t'accorde santé, longue vie et bonheur.

- *A l'âme de mon très cher père*

qui je n'aurai jamais pensé te perdre aussi rapidement, tu resteras toujours dans mon cœur et mon esprit, repose en paix.

- *A mes adorables sœurs et mes chers frères.*

- *A tous les membres de ma famille, petits et grands.*

- *A ma chère binôme Lynda et tous mes amis à qui je souhaite tout le succès.*

(*KHELOUF Hanane*)

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
1 Généralité sur les réseaux sans fils et le standard IEEE 802.11ax	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition et description d'un réseau sans fil	3
1.2.1 Transmission par des ondes infrarouges	3
1.2.2 Transmission par des ondes radio	3
1.3 Classification des réseaux sans fil	4
1.4 Présentation du réseau Wifi et le standard 802.11	5
1.5 Architecture cellulaire de IEEE802.11	5
1.5.1 Mode ad-hoc	5
1.5.2 Mode infrastructure	6
1.6 Architecture en couche de IEEE 802.11	6
1.6.1 Couche physique	7
1.6.1.1 Bandes de fréquences et canaux utilisés par le standard 802.11	7
1.6.1.2 Techniques de modulation	8
1.6.1.3 Techniques multi-antennes	11
1.6.2 Couche MAC 802.11	12
1.6.2.1 Trames Mac 802.11	13
1.6.2.2 Distributed Coordination Function (DCF)	14
1.6.2.3 Point Coordination Function (PCF)	17
1.6.2.4 Hybrid Coordination Function (HCF)	17
1.7 Évolutions principales du IEEE 802.11	18
1.7.1 IEEE 802.11a, b et g	18

1.7.2	IEEE 802.11e (QoS)	18
1.7.2.1	Limitations en QoS dans les anciennes normes 802.11	19
1.7.2.2	Méthode d'accès EDCA	20
1.7.2.3	Méthode d'accès HCCA	22
1.7.2.4	Mécanisme BA	22
1.7.3	IEEE 802.11n	23
1.7.3.1	Regroupement des canaux	24
1.7.3.2	Agrégation de trames	24
1.7.3.3	Mécanisme BA amélioré	25
1.7.4	IEEE 802.11ac	26
1.7.5	IEEE 802.11ax	26
1.8	Conclusion	27
2	Présentation des normes IEEE 802.11ac et 802.11ax	28
2.1	Introduction	28
2.2	Norme IEEE 802.11ac	28
2.2.1	Fonctionnement dans la bande de fréquence 5 GHz	28
2.2.2	Principales améliorations de la couche physique	29
2.2.2.1	Structure des canaux	29
2.2.2.2	Modulation 256-QAM	29
2.2.2.3	Technique Multi-User MIMO et le downlink MU-MIMO	30
2.2.2.4	BeamForming	31
2.2.3	Principales amélioration de la sous couche MAC	31
2.2.3.1	Agrégation améliorée	31
2.2.3.2	Mécanisme TXOP sharing	32
2.3	Norme 802.11ax	33
2.3.1	Fonctionnement sur les deux bandes 2.4 et 5 GHz	33
2.3.2	Exigences de la norme 802.11ax	33
2.3.3	Principales nouveautés de la norme 802.11ax	34
2.3.3.1	DL et UL OFDMA	34
2.3.3.2	DL et UL MU-MIMO	36
2.3.3.3	Nouveaux formats PPDU	36
2.3.3.4	Modulation 1024-QAM	37
2.3.3.5	Réutilisation spatiale (SR)	38
2.3.3.6	Mécanisme de réservation d'énergie TWT	39
2.4	Synthèse sur les travaux autour de la QoS pour IEEE 802.11ax	40
2.5	Conclusion	48
3	Contribution	49
3.1	Introduction	49
3.2	Problématique et motivation	49
3.3	Proposition	50
3.4	Description de la proposition	50
3.4.1	Considération de système	50

3.4.2	Présentation de L'algorithme ScP-OFDMA et son fonctionnement	51
3.4.3	Fonctionnement de l'algorithme	53
3.5	Conclusion	55
	Conclusion générale	56
	Bibliographie	58

TABLE DES FIGURES

1.1	Types des réseaux sans-fil	4
1.2	Mode ad-hoc	5
1.3	Architecture de réseau wifi en mode infrastructure	6
1.4	Modèle en couche de la norme 802.11	7
1.5	Canaux sur le 2.4 GHz (20MHz largeur de bande)	8
1.6	Canaux sur le 5 GHz (20 MHz largeur de bande)	8
1.7	Etalement de spectre par saute de fréquence	9
1.8	Code Barker	10
1.9	Modulation ofdm	11
1.10	Classification multi-antennes	12
1.11	Format standard d'une trame MAC 802.11	13
1.12	DCF avec le protocole CSMA/CA	15
1.13	Algorithme BEB	16
1.14	DFS avec le mécanisme RTS/CTS	16
1.15	Mécanisme PCF	17
1.16	Modèle d'implémentation d'EDCA	21
1.17	TXOP	22
1.18	Mécanisme d'acquittement par bloc	23
1.19	Un niveau d'agrégation de trames A-MSDU et A-PSDU	25
1.20	Format d'une trame BA	25
2.1	Regroupement des canaux dans la norme 802.11ac	29
2.2	Différence entre 64 et 256 QAM en termes de performance	30
2.3	Différence entre transmission SU et MU MIMO	31
2.4	Fonctionnement du mécanisme TXOP Sharing	33
2.5	Allocation des RUs en utilisant OFDM et OFDMA	35
2.6	Tailles et positions possibles des unités de ressources pour la bande passante de 20 MHz	36
2.7	Exemple illustratif de transmission d'une TF	37
2.8	Différence entre QAM 802.11ac/ax	38
2.9	Exemple de transmission en utilisant la technique de réutilisation Spatiale BSS-Color	39
2.10	Fonctionnement du protocole CBQO	41

2.11	Comparaison entre le protocole MAC IEEE 802.11ac et CBQO	42
2.12	Algorithme OFDMASCH	43
2.13	Fonctionnement du protocole DRA-OFDMA	44
2.14	Exemple d'établissement de la session d'acquittement par bloc sous l'AN-BA	45
2.15	Algorithme de transmission vidéo multi files d'attente	46
2.16	Exemple de compétition interne en mode AVAC-EDCA	47
3.1	Organigramme de fonctionnement de l'algorithme ScP-OFDMA	52
3.2	Pseudo algorithme d'ordonnancement de ressources (ScP-OFDMA)	53

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Nombre de canaux obtenu pour la fréquence 2.4GHz.	7
1.2	Fréquence centrales des sous canaux du mode DSSS.	10
1.3	Catégories d'accès de la méthode AVAQ-EDCA	20
1.4	Tableau récapitulatif des différentes normes 802.11.	27
2.1	Longueur des MPDU/PSDU dans IEEE 802.11.	32
2.2	Catégories d'accès de la méthode AVAQ-EDCA	47
3.1	Valeurs de QoS possible.	50
3.2	Débit de code en différant RUs sous chaque MCS en Mb/s.	51
3.3	Définition des valeurs utilisées.	52

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AP	Access Point
ACK	Acknowledgement
ADSL	Assymeric Digital Subscriber Line
AIFS	Arbitration IFS
AVAQ-EDCA	Ahort Vnter Arame Qpace EDCA
AC-BE	Access Category Best Effort
AC-VI	A ccess Category Video
AC-VO	A ccess Category Voice
AIFS	Arbitration Inter Frame Space
A-MPDU	Aggregate MAC Protocol Data Unit
A-MSDU	Aggregate MAC Service Data Unit
BEB	Binary Exponential Backo
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSR	Buffer State Report
BSS	Based Station Subsystem
BSA	Basic Service Area
BSSID	Basic Service Set Identifier
BA	Block Acknowledgment
CCA	Clear Channel Aessement
CPL	Communication Power Line
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Centntion Free Period
CFE	Centention Free End
CBQO	Channel Bonding Based QoS Ofdma
CTS	Clear To Send
CRC	Cyclic Redundancy Code
CW	Contention Windows
CTMC	Continuous Time Markov Cain
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance

CSMA/CD **C**arrier **S**ense **M**ultiple **A**ccess / **C**ollision **D**etection

DSSS	D irect S equence S pread S pectrum
DCF	D istributed C oordination F unction
DL	D own L ink
DELBA	D E L ete B lock A cknowledgment
DS	D istribution S ystem
EDGE	E nhanced D ata R ates for G sm
ESS	E xtend S ervice S et
E-RTS	E nhanced R TS
E-ACK	E nhanced A CK
EIFS	E xtended I nter F rame S pace
EDCAF	E D C A F unction
EDCA	E nhanced D istributed C hannel
ESA	E xtend S ervice A rea
FHSS	F requency H opping S pread S pectrum
GPRS	G eneral R adio S ervice
HR	H igh R ate
HCF	H ybrid C oordination F unction
HCCA	H CF C ontrolled C hannel A ccess
HC	H ybrid C oordinator
HEW	H igh E fficiency W lan
ISM	I ndustrial S cientific and M edical
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics for E ngineers
IBSS	I ndependent B asic S ervice S et
ICI	I nter C arrier I nterference
IFS	I nter F rame S pace
IFFT	I nverse F ast F ourier T ransform
LLC	L ogical L ink C ontrol
MIMO	M ultiple I nput M ultiple O utput
MSDU	M ac S ervice D ata U nit
MU-MIMO	M ulti U ser M IMO
MBA	M ulti-sta B lock A cknowledgment
MU	M ulti U nter
MAC	M edia A ccess C ontrol
MPDU	M ac P rotocol D ata U nit
MISO	M ultiple I nput S ingle O utput
NAV	N etwork A llocation V ector
OBSS	O verlapping B ss

OFDM	O rthogonal F requency D ivision M ultiplexing
OSI	O pen S ystem I nterconnection
OFDMA	O rthogonal F requency D ivision M ultiple A ccess
PPDU	P hysical P rotocol D ata U nit
PIFS	P oint coordination I nter F rame S pace
PC	P oint C oordinator
PCF	P oint C oordination F unction
PMD	P hysical layer M edium D ependent
PSK	P hase S hift K eying
PLCP	P hysical L ayer C onvergence P rocedure
QSTA	Q os-enabled S Tation
QoS	Q uality of S ervice
QPSK	Q uadrature P hase S hift K eying
QAM	Q uadrature A mplitude M odulation
RU	R essource U nit
RTS	R equ E st T o S end
RTS	R istributed T oordination F unction
SIFS	S hort I nter F rame S pace
SIFS	S hort I nter F rame S pace
SIFS	S hort I nter F rame S pace
SU	S ingle U ser
STA	S Tation
SIMO	S ingle I nput M ultiple O utput
SISO	S ingle I nput S ingle O utput
ScP-OFDMA	S cheduler with P roportionnel gain
TSPEC	T raffic S PECification
TID	T raffic I Dentifier
TGAX	T ask G roup ax
TF	T ri G ger F rame
TB	T ri G ger B ased
TWT	T ar G et W ake T ime
UHD	U ltra H aute D efinition
UL	U p L ink
UNII	U nlicensed N ational I nformation I nfrastructure
UMTS	U niversal M obile T elecommunication S ystem
UWB	U ltra W ide B and
VHT	V erry H ight T hroughput

WIFI	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personnel Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WiMax	WorldWide Interoperability Microwave acces
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les réseaux sans fil, (Wireless Networks) constituent de plus en plus une technologie émergente permettant à ses utilisateurs un accès à l'information et aux services électroniques indépendamment de leurs positions géographiques. Le succès de ce type de réseaux ces dernières années est suscité par un grand intérêt de la part des particuliers, des entreprises et du milieu industriel [31].

Le wifi est une technologie de réseau local sans fil (WLAN) qui permet la communication radio électronique entre des terminaux et des points d'accès. Elle repose sur un standard international décrivant ses caractéristiques appelé L'IEEE 802.11, ce standard est lancé en 1997 par L'IEEE, la plus grande organisation professionnelle au monde dédiée à l'avancement de la technologie pour l'humanité. L'IEEE 802.11 définit les deux premières couches du modèle OSI, à savoir la couche physique (PHY) et la sous couche de liaison de données (MAC).

Depuis son apparition plusieurs extensions ont été publiées, lui ajoutant des améliorations et des nouveaux modes de fonctionnements plus performants ce qui permet de servir plus les utilisateurs de réseau. Avec un débit maximal de 54 Mbit/s les normes 802.11a, b et g et sont un peu dépassées aujourd'hui. Ce sont pourtant des normes qui ont été très utiles durant de longues années lors des balbutiements du Wifi. Le 802.11e été publié pour but d'introduire le support de la QoS dans ce type de réseau. Ce dernier a réussi à introduire la différenciation de service via la nouvelle méthode d'accès EDCA, en mode décentralisé et HCCA en mode centralisé. Cependant, il ne permet pas de fournir la garantie de QoS aux applications ayant des contraintes strictes de QoS. Ceci apparait plus particulièrement dans le cas des réseaux dense. Le 802.11n a révolutionné le wifi en apportant un débit élevé en utilisant les deux bandes de fréquences 2.4 et 5 GHz et une compatibilité avec toutes les autres normes précédentes. Cette norme a permis d'intégrer deux évolutions importantes ; Le MIMO et le regroupement des canaux. Le 802.11ac s'agit d'un réseau de très haut débit (VHT) utilisé actuellement, proposé afin d'améliorer le débit de la norme 802.11n. Le 802.11ax représente un nouvel amendement de Wifi tout en s'appuyant sur les points fort du standard 802.11ac.

L'émergence continue des nouvelles applications sans fil conjuguée à la concentration du nombre d'utilisateurs dans certaines zones (aéroports, stades, ...) et les exigences accrues en matière de QoS impose d'améliorer les techniques et les protocoles existants du Wi-Fi déployé dans tels environnements. Pour cela, l'IEEE a lancé le groupe de recherche Task Group AX (TGax) afin de développer le 802.11ax. Ce standard permet d'améliorer la fiabilité des performances pour des applications avancées telles que la vidéo 4K, 8k, la technologie UHD (Ultra-Haute Définition), wireless office,

l'Internet des objets (IoT). Deux fonctionnalités majeures sont apportées par cet amendement, qui lui permet d'être le plus approprié aux environnements denses et sont : l'adaptation de la méthode OFDMA en liaison montante et ascendante qui offre la possibilité de desservir simultanément plusieurs utilisateurs et le partage de la bande passante disponible sur même canal, et l'utilisation de la technologie MU-MIMO. La modulation 1024-QAM, les techniques de réutilisation spéciale et le Mécanisme de réservation d'énergie sont également des principes de ce réseau, tous employés dans une optique d'optimisation du débit de connexion des utilisateurs qui pourra ainsi aller au-delà de 10 GHz/s.

La technologie OFDMA 11ax issue des réseaux radio cellulaires/LTE représente la nouveauté la plus importante de la norme 802, en permettant l'amélioration de la performance, le déterminisme, une efficacité et la garantie de la qualité de service (QoS). Le gain de ce mécanisme dépend principalement de l'ordonnancement des ressources entre différents utilisateurs, donc il est important d'introduire des planificateurs pour permettre de prendre en compte les flux de données multimédia, de prendre en compte plusieurs flux destinés à un même utilisateur, d'adresser des objectifs sensibles aux délais et d'élaborer une allocation très rapidement.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons dans un premier lieu, une description générale des réseaux locaux sans fil en particulier le réseau Wifi et la norme IEEE 802.11 dédié à ce dernier, en illustrant ses architectures et son mode de fonctionnement.

Dans un second temps, nous allons tracer l'évaluation qu'a subi le standard 802.11 dans le but d'améliorer les performances de réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la norme actuelle 802.11ac et la nouvelle norme 802.11ax et leurs différentes caractéristiques, ensuite nous allons élaborer les principales améliorations apportées par l'amendement 802.11ax et nous allons étudier les travaux existants pour le but de l'amélioration de la QoS dans cette norme.

Nous consacrons le troisième chapitre, à la définition de problème lié à la garantie de la QoS par les ordonnanceurs d'allocation de ressource dans le mécanisme OFDMA pour le réseau 802.11ax, puis nous allons proposer un nouvel algorithme qui permet de traiter ce problème.

Finalement, ce s'achève par une conclusion générale, suivie de quelques perspectives.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR LES RÉSEAUX SANS FILS ET LE STANDARD IEEE 802.11AX

1.1 Introduction

Le wifi (Wireless Fidelity) est une technologie permettant de créer des réseaux locaux sans fil (WLANs) à haut débit, considérés comme la version sans fil d'Ethernet, les principales qualités de cette technologie résident dans sa facilité de mise en œuvre, la rapidité de déploiement et le coût réduit. Les caractéristiques du réseaux wifi sont décrites par la norme IEEE 802.11.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter les réseaux sans fil, plus particulièrement les réseaux locaux sans fil et ses différentes notion tel que le standard IEEE 802.11, les modes de fonctionnement, les composant de l'architecture, etc.

1.2 Définition et description d'un réseau sans fil

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.

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

1.2.1 Transmission par des ondes infrarouges

La technologie infrarouge a pour caractéristique principale d'utiliser une onde lumineuse pour la transmission de données, cette transmission permet la communication directe entre des équipements proches l'un de l'autre, tels que la télécommande, la télévision, voiture, jouets, etc.

1.2.2 Transmission par des ondes radio

L'onde radio fait partie de la famille des ondes électromagnétiques, utilisée pour la création des réseaux sans fil a longue distance. Les ondes radio ont l'avantage de ne pas être arrêtées par les obstacles, car sont émises d'une manière omnidirectionnelle. Le problème de cette technique, est les

perturbations extérieures qui peuvent affecter la communication, à cause de l'utilisation de la même fréquence par exemple.

1.3 Classification des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil sont classifiés selon leur étendue et domaine d'application en quatre (4) catégories :

- **Les réseaux personnels sans fil (WPAN, Wireless Personal Area Network) :** Concernent les réseaux sans fil d'une faible portée de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, ...) sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes. Parmi les technologies de WPAN on trouve : Le Bluetooth, UWB (Ultra-Wide Band) et le ZigBee.
- **Les réseaux locaux sans fil (WLAN, Wireless Local Area Network) :** Prolongent ou remplacent un réseau local traditionnel. Ces réseaux autorisent des débits dans les versions courantes qui peuvent aller jusqu'à 6 Gbit/s. Le wifi sont considérés comme la principale technologie de communication connue dans les réseaux locaux sans fil.
- **Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN, Wireless Metropolitan Area Network) :** Il s'agit d'un réseau sans fil qui a une zone de couverture pouvant aller jusqu'à 50 km (une ville), le WiMax (worldwide Interopability for Microwave Access) s'agit d'un exemple de technologie de communication de WMAN.
- **Les réseaux étendus sans fil (WWAN, Wireless Wide Area Network) :** C'est la catégorie des réseaux cellulaires mobiles dont la zone de couverture est très large (échelles mondiale). Pour cette catégorie, on peut citer le réseau GSM et ces extensions (GPRS (General Radio Service), EDGE (Enhanced Data Rates for Gsm), l'UMTS (Univesal Mobile Telecommunication System), 3^{ème} génération (3G). La figure(1.1) schématise les types des réseaux sans fil cités auparavant.

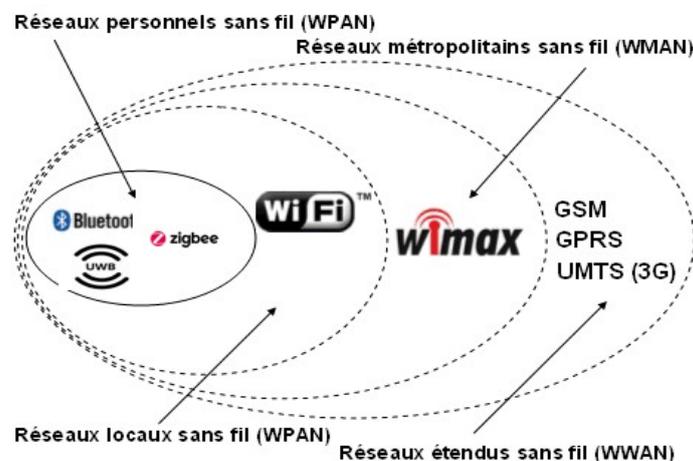


FIGURE 1.1 – Types des réseaux sans-fil

1.4 Présentation du réseau Wifi et le standard 802.11

Le WiFi (noté Wi-Fi) est une technologie qui permet la communication radio électronique entre des terminaux et des points d'accès pour se connecter sur un réseau local ou sur internet. C'est une technologie de réseau local sans fil (WLAN), appelé aussi Ethernet sans fil ou Ethernet radio. Elle repose sur un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau sans fil, la norme IEEE 802.11.

L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) a ratifié la spécification 802.11, norme régissant les réseaux locaux sans fil en 1997. Par abus de langage (et pour des raisons de marketing), le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification. Ainsi un réseau Wifi est en réalité un réseau répondant à la norme 802.11.

La WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) est le groupe marketing qui soutient cette technologie et en assure son avenir par une validation permanente des matériels pour garantir leur compatibilité et d'une façon plus générale la cohérence de la technologie Wi-Fi.

1.5 Architecture cellulaire de IEEE802.11

L'architecture de réseau WIFI est basée sur celle des réseaux de radiocommunication : les transferts d'informations s'effectuent à l'intérieur d'une cellule. Il existe deux types de fonctionnements selon le mode de communication : le mode ad hoc et le mode infrastructure.

1.5.1 Mode ad-hoc

La première architecture définie dans la norme 802.11 permet une communication en mode ad hoc ou bien mode sans infrastructure dans lequel les stations sans fils clientes se connectent les unes aux autres afin de constituer un réseau point à point, c'est-à-dire un réseau dans lequel chaque station joue en même temps le rôle de client et le rôle de point d'accès.

Comme l'illustre la figure(1.2), l'ensemble formé par les différentes stations est appelé ensemble de services de base indépendants (Independant Basic Service Set, abrégé en IBSS),[5].

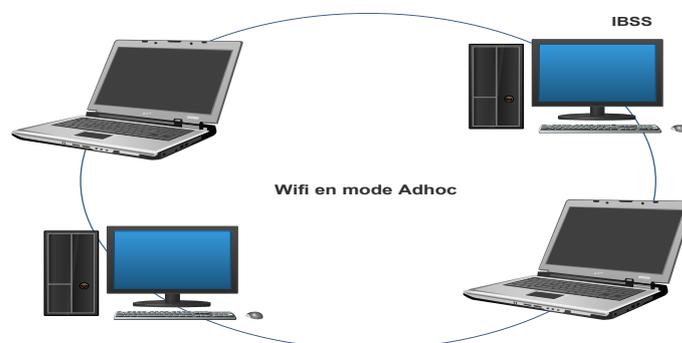


FIGURE 1.2 – Mode ad-hoc

1.5.2 Mode infrastructure

La seconde architecture nécessite un composant d'infrastructure, nommé Access Point (AP), chaque station (notée STA) dans ce mode se connecte à ce point d'accès via une liaison sans fil. L'ensemble formé par le point d'accès et les stations situés dans sa zone de couverture, est appelé Based station Subsystem (BSS) et constitue une cellule nommée Basic Service Area (BSA). Chaque BSS est identifié par un BSSID (Basic Service Set Identifier), un identifiant de 6 octets (48 bits). Dans le mode infrastructure, le BSSID correspond à l'adresse MAC (Media Access Control) du point d'accès[5][3]. Dans ce mode de communication, les stations de type (client) peuvent se déplacer (notion de la mobilité), dans ce cas la station peut se déplacer en dehors de la BSA, ce qui influence la communication entre la station et le point d'accès.

La solution à ce type de problème est le déploiement de Plusieurs APs, ce qui nous donne une plus grande couverture pour la communication.

Ces BSS multiples peuvent être reliés par un système de distribution DS (Distribution System) d'une façon à former un seul réseau sans fil qui couvre une zone plus large. Donc de cette façon, si les stations de type (client) se déplacent, la probabilité de perdre la communication est diminuée, On parle dans ce cas d'Extended Service Set ESS qui couvre naturellement un espace appelé Extended Service Area (ESA), composé de plusieurs cellules[3], voir la figure 1.3).

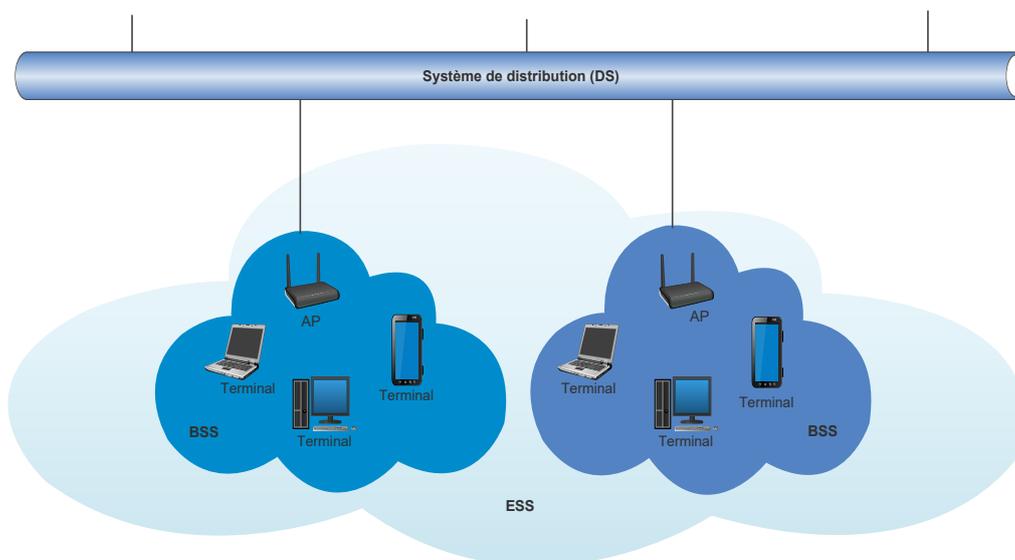


FIGURE 1.3 – Architecture de réseau wifi en mode infrastructure

1.6 Architecture en couche de IEEE 802.11

Le standard IEEE 802.11 définit les deux premières couches du modèle OSI (Open System Interconnection), à savoir la couche physique et la couche liaison de données. Cette dernière est partitionnée en deux sous couches, la sous-couche LLC (Logical Link Control) et la sous-couche MAC, comme le montre la Figure (1.4) Une des particularités du standard est qu'il définit quatre couches physiques différentes gérées par une seule couche de liaison des données.

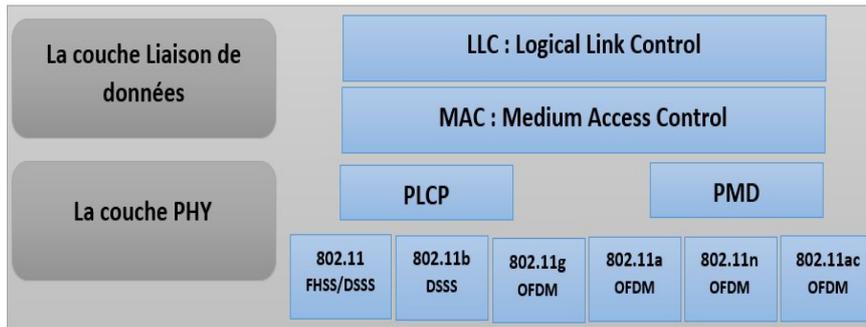


FIGURE 1.4 – Modèle en couche de la norme 802.11

1.6.1 Couche physique

La couche Physique définit la modulation des ondes radioélectrique et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données. Elle est subdivisée en deux sous couches :

La couche PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) qui s’occupe de l’écoute du support physique et indique à la couche MAC pour la transmission radios i le support est occupé ou non via un signal appelé CCA (Clear Channel Assesment).

La couche PMD (Physical Layer Convergence Protocol) qui gère la modulation et l’encodage des données à transmettre sur le support.

1.6.1.1 Bandes de fréquences et canaux utilisés par le standard 802.11

Une bande de fréquence définit un ensemble continu des fréquences des ondes radio comprises entre deux fréquences spécifiées. Toutes les variantes du WiFi reposent sur deux bandes de fréquence qui sont découpées en canaux selon la variante utilisée qui sont :

- **La bande ISM** (Industiral, Scientific and Medical).
- **La bande U-NII** (Unilicened-National Information Infrastructure)

Ces deux bandes ne nécessitent pas de licence d’utilisation de la part d’un organisme de réglementation, c’est-à-dire l’exploitation de ces fréquences est libre[1].

— **La bande ISM :**

Elle est située autour de 2.4 GHz, avec une largeur de bande 83.5 MHz (2.4GHz- 2.4835 GHz). Pour cette bande de fréquences des 2.4 GHz, un canal est défini tous les 5Mhz et chaque canal possède une largeur de 20Mhz ou 22Mhz. Le nombre de canaux obtenus varie en fonction du pays (voir la table (1.1) et la figure(1.5)).

Pays	Europe	Japon	Amérique du Nord
Nombre de canaux maximum	13	14	11

TABLE 1.1 – Nombre de canaux obtenu pour la fréquence 2.4GHz.

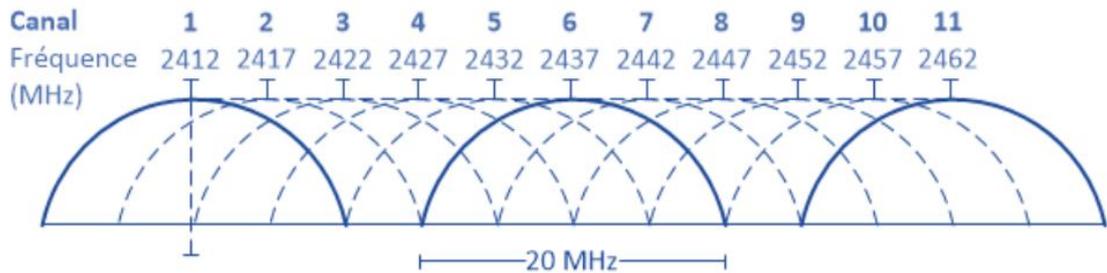


FIGURE 1.5 – Canaux sur le 2.4 GHz (20MHz largeur de bande)

— La bande U-NII(Unlicensed National Information Infrastructure) :

C'est une bande sans licence située autour de 5 GHz. Elle offre une largeur de bande de 300 MHz. Cette bande est divisée en trois sous bandes de 100 MHz distinctes. La première et la deuxième sont employées pour les transmissions à l'intérieur, La troisième sous-bande est, quant à elle, employée pour des transmissions à l'extérieur. La disponibilité de ces trois bandes, de même que pour la bande ISM(Industrial, Scientific and Medical), est liée à la zone géographique concernée.

A titre d'exemples, les États-Unis utilisent les trois sous-bandes, l'Europe n'utilise que la première et la deuxième, le Japon emploie uniquement la première[1]. Pour les 5 GHz, comme le montre la figure(1.6) l'espacement entre les bandes de fréquences est toujours similaire, soit 5 MHz, si le 5GHz décidait d'élire un canal à chaque intervalle, il pourrait théoriquement atteindre un nombre de 200 canaux. Le 5 GHz étant plus large que le 2.4 GHz, il possède bien évidemment un nombre plus important de canaux. Tout comme le 2.4 GHz, son nombre dépend du pays/continent dans lequel la bande de fréquences est déployée. En Europe, 19 canaux sont disponibles alors qu'en Amérique du Nord, 25 canaux existent[2].

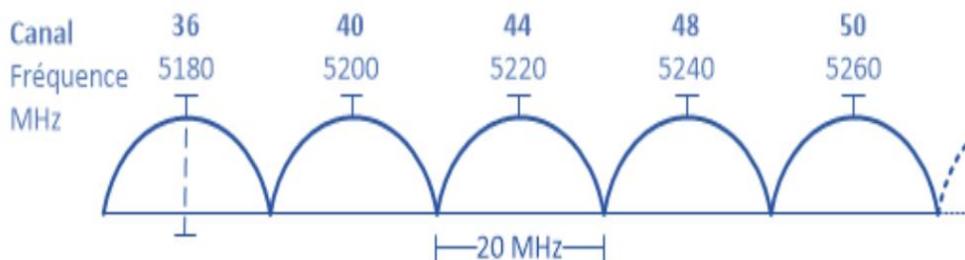


FIGURE 1.6 – Canaux sur le 5 GHz (20 MHz largeur de bande)

1.6.1.2 Techniques de modulation

Le standard IEEE 802.11 permet l'encodage des bits transmis sous forme de symboles grâce à une opération de modulation du signal, dans le but d'augmenter l'efficacité et la fiabilité d'une transmission avec des débits élevés. La modulation d'un signal est basée sur la modification de l'amplitude, la fréquence ou la phase du signal. Les principales modulations sont :

- BPSK (Binary Phase-Shift Keying) : 1 bit est transmis par symbole.
- QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) : 2 bits sont transmis par symbole.
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) : 4 (QAM-16), 6 (QAM-64) ou 8 (QAM-256) bits sont transmis par symbole.

La transmission de ces symboles est réalisée dans la bande de fréquences publique 2.4 GHz ou bien 5 GHz (les bandes de fréquences les plus utilisées), ce qui augmente la probabilité d'être altéré par d'autres signaux d'interférences. Pour cela, ils existent deux techniques fondamentales pour améliorer la résistance aux interférences : l'étalement de spectre (FHSS et DSSS) et le multiplexage orthogonal OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [3][4].

- **FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) :**

C'est une technique d'étalement de spectre basé sur le saut de fréquence, Elle consiste à diviser la bande de fréquences de 2,4GHz en 79 sous canaux, de 1 MHz de largeur de bande, chacun a un débit d'au moins 1 MB/s avec codage binaire. L'émetteur et le récepteur s'entendent sur une séquence de sauts de fréquence porteuse pour envoyer les données successivement sur les différents sous-canaux, ce qui sert à ne pas utiliser (temporairement) les sous-canaux fortement perturbés. La séquence de sauts est calculée pour minimiser la probabilité que deux émissions utilisent le même sous-canal[7]. Le FHSS offre une résistance importante aux interférences car les canaux pour lesquels il y a une interférence importante peuvent être évités en sautant aux autres canaux. Il offre aussi la possibilité d'avoir plusieurs communications en même bande de fréquence comme le montre la figure(1.7).

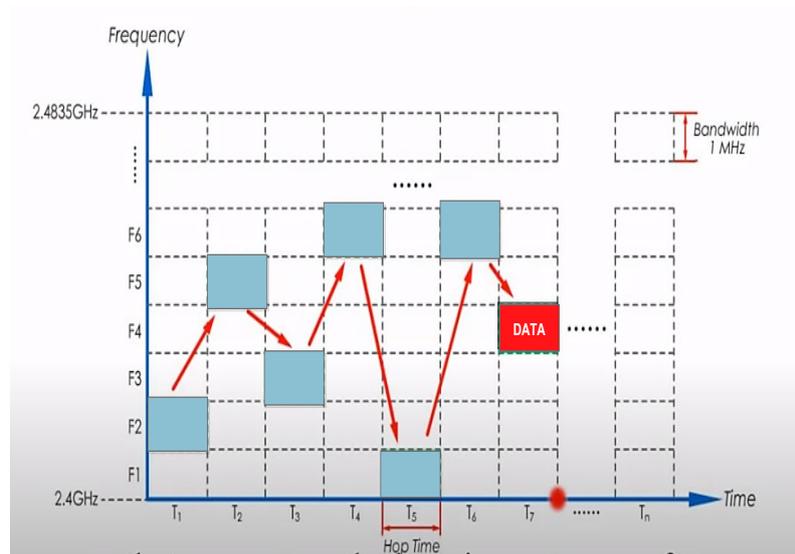


FIGURE 1.7 – Etalement de spectre par saut de fréquence

- **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) :**

La modulation DSSS est également une technique d'étalement de spectre, mais elle exploite une fréquence continue. Elle divise la bande ISM en sous bande, cependant la division se fait ici en 14 canaux de 20MHz chacun et la transmission ne se fait que sur un canal donné. La largeur de la bande ISM étant égale à 83.5 MHz, il est impossible d'y placer 14 canaux adjacents de 20 MHz. Comme le montre la table(1.2), les fréquences centrales de chaque sous-canal sont espacées de 5 MHz.

Canal	Fréquence centrale (GHz)
1	2.412
2	2.417
3	2.422
4	2.427
5	2.432
6	2.437
7	2.442
8	2.447
9	2.452
10	2.457
11	2.462
12	2.467
13	2.472
14	2.477

TABLE 1.2 – Fréquence centrales des sous canaux du mode DSSS.

L'étalement du spectre est réalisé en utilisant une séquence binaire dite barker de 11 bits, (10110111000) pour représenter un 1 et son complément (01001000111) pour coder un 0 comme le montre la figure 1.8 , on appelle « chip » ou « chipping » chaque bit encodé à l'aide de la séquence. Cette approche introduit un étalement de spectre rendant le signal à transmettre plus insensible aux interférences bande étroite. En effet, si le bruit n'affecte qu'une zone de la bande, il sera possible de restaurer le signal et de récupérer les bits d'information.

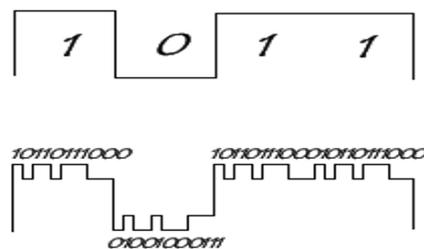


FIGURE 1.8 – Code Barker

- **HR/DSSS (High Rate / Sequence Spread Spectrum) :** C'est extension du DSSS qui permet d'avoir des taux de transmission de 5.5 et 11 Mbit/s en utilisant une technique de codage appelée Complementary Code Keying(CCK) qui a pour principale propriété d'être facilement détectable par le récepteur même si l'environnement radio est fortement bruité.

• **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** : La modulation OFDM, parfois appelée Discrete Multitone Modulation (DMT), est la plus puissante par rapport aux autres techniques de modulation du Wifi car elle permet un débit très élevé, la meilleure résistance au multipath et une plus grande capacité de partage du spectre. Est utilisée pour tous les systèmes radios numériques récents (télévision, radio, réseaux cellulaires), ainsi que pour les systèmes filaires ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), CPL (Power Line Communication) et les réseaux sans fil basé sur les normes IEEE 802.11 (Wifi : 802.11a/g/n/ac) et 802.16 (WiMAX).

Elle consiste à diviser la bande de fréquence en multiples sous-porteuses, en reposant sur le principe du multiplexage qui permet la transmission simultanée de plusieurs communications sur une même bande de fréquences, et La vitesse de transmission peut atteindre 54 Mbit/s, (voir figure 1.9).

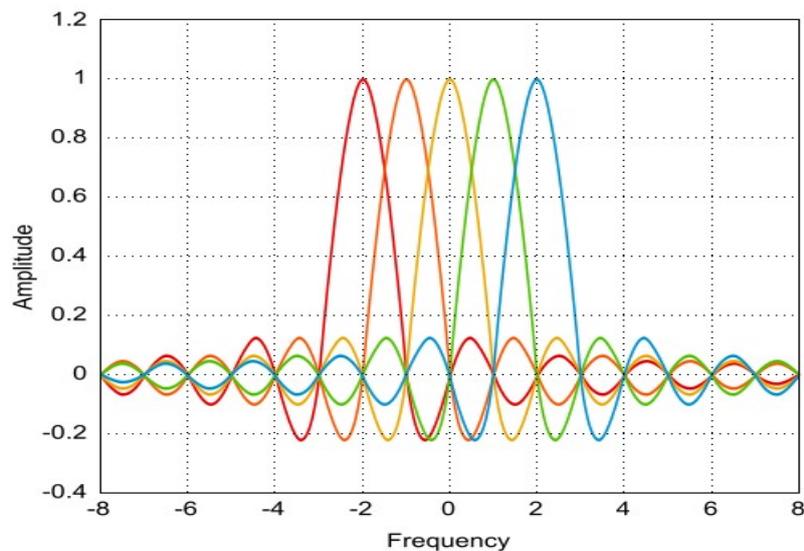


FIGURE 1.9 – Modulation ofdm

Le fonctionnement de cette méthode est le suivant :

un spectre assez large est décomposé en de multiple sous-porteuses et les données sont émises simultanément sur chaque sous-porteuses selon une modulation PSK (Phase-Shift Keying) ou en QAM (QAM-16/64). Malheureusement, il est possible d'avoir des interférences entre les sous-porteuses, ce qu'on appelle l'Inter-Carrier Interference (ICI) lié à la réception multiple d'une même information (transmission multipath). Pour résoudre ce problème, l'OFDM utilise une fonction mathématique assez complexe pour rendre les sous-porteuses « orthogonales ». Dans le cas du 802.11, il s'agit d'une transformation de Fourier inverse rapide (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) [3].

1.6.1.3 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 (Figure 1.10).

• **Système SISO (Single Input Single output)** : C'est l'architecture la plus simple qui utilise une seule antenne en émission et une autre en réception.

• **Système MISO (Multiple Input Single Output)** : C'est une technique de diversité spatiale en

émission. C'est-à-dire Plusieurs antennes émettent des signaux qui sont interceptés par une seule antenne en réception.

- **Système SIMO (Single Input Multiple Output) :** C'est une technique qui utilise plusieurs antennes en réception pour lutter contre l'évanouissement dû au canal. Le signal reçu est additionné, et le rapport signal sur bruit total est la somme des rapports signaux sur bruits de chacun des antennes de la réception.

- **Système MIMO (Multiple Input Multiple output) :** S'il y a plusieurs antennes en émission et en réception.

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 [3].

Les antennes radios diffusent les données d'un utilisateur sur plusieurs flux spatiaux, les données sont ensuite transmises par différentes antennes et se propagent dans l'air en suivant différents chemins.

Lorsque tous les flux atteignent le client, les données sont recombinaées. Si l'émetteur par exemple a trois antennes et le récepteur en a deux, alors avec 802.11n l'émetteur se limitera à deux flux simultanés. On parle dans ce cas de MIMO 3x2x2 : trois antennes à l'émission, deux antennes à la réception et deux flux simultanés.

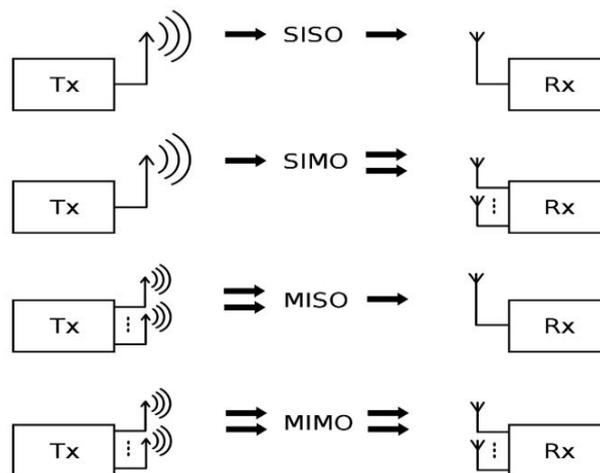


FIGURE 1.10 – Classification multi-antennes

1.6.2 Couche MAC 802.11

La couche liaison de données est composée essentiellement de deux sous couches, LLC et MAC. La couche LLC est standardisée par l'IEEE sous le nom de 802.2 et elle est identique à LLC 802.11, son rôle consiste à adapter les données venant des couches supérieures à la couche physique.

La couche MAC représente l'interface entre la partie logicielle contrôlant la liaison d'un nœud et la couche physique. La première version du standard 802.11 a défini la couche MAC en y intégrant un certain nombre de fonctionnalités cruciales, telles que le partage de la parole entre utilisateurs, les modalités de connexion au réseau, le contrôle d'erreur ou encore la sécurité, la qualité de service, la gestion de l'énergie et de la mobilité, etc.

L'accès au support est parmi les fonctionnalités les plus importantes qu'assure la couche MAC 802.11, car elle indique à la station si elle peut émettre ou non.

Trois modes d'accès au canal sont définis par ce standard :

- **Distributed Coordination Function(DCF)** : un mode d'accès dit à compétition qui propose un accès équitable au canal radio dont la gestion est réalisée de façon totalement distribuée entre les nœuds du réseau, ce mode peut être utilisé en mode ad-hoc ou bien en mode infrastructure[6].
- **Point Coordination Function (PCF)** un mode d'accès au canal dans lequel les stations de base ont la charge de la gestion de l'accès dans leur zone de couverture. Ce protocole appartient à la famille des protocoles dits à réservation. Il ne peut être utilisé que par les réseaux d'infrastructure[6].
- **Hybrid Coordination Function(HCF)**

Ces trois modes d'accès seront décrits ultérieurement.

1.6.2.1 Trames Mac 802.11

La figure 1.11 présente le format standard d'une trame MAC 802.11(MPDU : MAC Protocol Data Unit). Les données à envoyer sont placées dans le champ Données utiles, d'une longueur variable (0-2312). Les stations source et destination ainsi que les points d'accès utilisés pour relayer la trame sont identifiées par leurs adresses physiques, dans les champs de type @.

Le champ contrôle de trame (Tr) contient les informations de protocole utilisé et le type de trame transmise, le champ durée ID contient la durée calculée pour la transmission de la trame qui dépend du débit de la couche physique et le champ CRC (Cyclic Redundancy Code) permet la détection et la correction des erreurs de transmission.



FIGURE 1.11 – Format standard d'une trame MAC 802.11

Il existe trois sortes de trames échangées entre les stations d'un réseau sans fil 802.11 :

- **Les trames de données** ;
- **Les trames de contrôle** : utilisées pour l'accès au support RTS(Request To Send), CTS(Clear To Send),ACK(Acknowledgment), dont le rôle est d'éviter les collisions avec des stations plus éloignées.
A cause de leur caractère de contrôle, cette catégorie de trames est propriétaire pour l'accès au medium ;
- **Les trames de gestion** : utilisées pour l'association à un point d'accès ou pour la synchronisation et l'authentification.

La représentation de la trame est une représentation générale et ses champs changent suivant la fonction de celle-ci.

La taille maximale d'une trame est 2346 octets et son type est codé dans le champ contrôle Tr.

1.6.2.2 Distributed Coordination Function (DCF)

Ce mode d'accès permet de donner la parole aux différents nœuds du réseau par la mise en place d'une technique d'accès distribuée CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) proche des techniques d'accès à compétitions. DCF dispose de deux modes de fonctionnement : l'accès en mode station de base et le mode RTS/CTS pour palier au problème des nœuds cachés survenant principalement en mode ad-hoc.

Le protocole CSMA/CA :

La méthode d'accès DCF est basée sur CSMA/CA. Celle-ci prévoit que lorsqu'un élément du réseau veut émettre un paquet, il écoute le canal et attend qu'il soit libre. Contrairement à CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) que la norme Ethernet utilise, une interface sans fil ne peut pas écouter le canal et émettre en même temps. Le CSMA/CD permet de détecter et de signaler une collision entre deux paquets émis alors que CSMA/CA nécessite des accusés de réception pour approuver la bonne transmission du paquet. Lorsqu'un élément du réseau WiFi veut émettre un paquet, il attend que le canal soit libre. Pour ceci, il va écouter le canal pendant une durée variable nommée IFS (Inter Frame Space), qui permet de faire varier la priorité d'accès au médium de certains paquets. Pendant cette attente, s'il détecte une transmission, il va attendre la fin et à nouveau écouter pendant une durée de IFS. Comme présenté sur la figure ci-dessous, plusieurs durées sont possibles :

- SIFS (Short IFS) est la plus petite espace inter-trames, il donne une priorité absolue à certaines trames et notamment aux acquittements ce qui garantit la transmission d'ACK avant tout autre paquet en attente, ainsi que les trames CTS.
- PIFS (Priority Coordination IFS) est utilisé en mode PCF. Il permet aux trames envoyées d'être plus prioritaire par rapport aux trames en mode DCF. Le PIFS correspond à la valeur du SIFS, auquel on ajoute un temps, ou SloTime qui correspond à la durée minimale pour déterminer l'état du canal + temps aller-retour + temps de propagation.

$$\text{PIFS} = \text{SIFS} + \text{SloTime}$$

- DIFS (Distribution Coordination IFS) est le plus couramment utilisé. Il est utilisé pour l'envoi des trames en mode DCF. Le DIFS correspond à la valeur du SIFS, à laquelle on ajoute un SlotTime*2.

$$\text{DIFS} = \text{SIFS} + \text{SloTime} * 2$$

- EIFS (Extended IFS) est utilisé pour toute retransmission après détection d'une collision.

Si une transmission a été détectée pendant cette durée, l'émetteur compte à nouveau ce délai dès la fin de la transmission. Si ce délai ne suit pas immédiatement une transmission, le paquet est émis sans attendre. Sinon, le nœud attend un nouveau délai nommé Backoff ou période de contention. En effet, si le médium est libre, il est très improbable que deux nœuds décident d'émettre exactement au même moment. Par contre, si le médium est occupé, il est fort probable que deux nœuds se synchronisent

sur la fin de la transmission, attendent le même délai IFS, et émettent au même moment. Ceci produit alors une collision. C'est pourquoi ce délai aléatoire est introduit.

La figure(1.12) schématise ce qui se passe lorsque deux mobiles à portée de communication veulent émettre vers un troisième et que le canal devient libre.

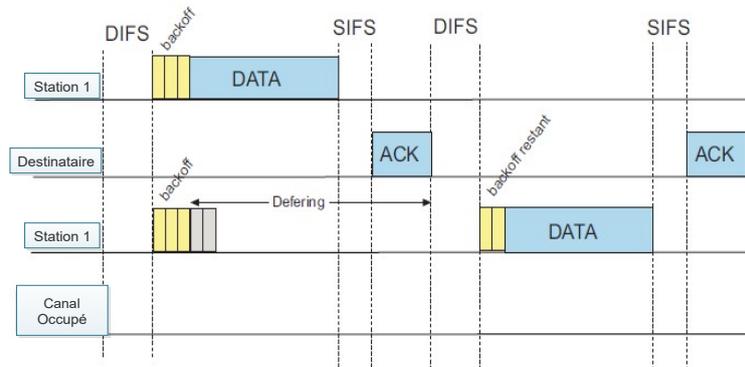


FIGURE 1.12 – DCF avec le protocole CSMA/CA

Le backoff est tiré aléatoirement dans un intervalle de temps appelé fenêtre de contention (contention windows) dénotée $[0, CW]$ par chaque station qui souhaite accéder au canal quand celui-ci est libre. Dans l'exemple de la figure, c'est la station 1 qui accède en premier au canal, car elle a tiré un backoff plus petit que la station 2. La station 2 se rend alors compte de l'activité sur le canal et va attendre la fin de la transmission en cours, elle se met en mode defering. Le récepteur va acquitter son message à l'aide d'une trame ACK reçue par les deux stations. La station 2 va alors sortir du mode defering et décrémente le reste de son backoff. S'il n'y a pas d'autre émission détectée ce temps, elle émet ses données. Si la source (la station 1 par exemple) ne reçoit pas, au bout d'un certain temps, la trame d'acquiescement associée à la trame de donnée qu'elle vient d'envoyer, elle considère qu'il y a eu une collision. Elle va alors retransmettre sa trame selon l'algorithme de BEB (Binary Exponential Backoff). Cet algorithme, figure (1.13) consiste à doubler la taille de la fenêtre de contention pour le tirage aléatoire, et ça a chaque retransmission. Si au bout de plusieurs essais de retransmission (avec plusieurs tirages dans la fenêtre de contention maximale) la trame n'est pas toujours transmise avec succès, l'émetteur la détruit.

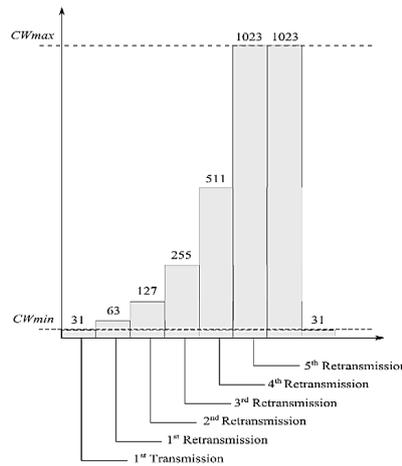


FIGURE 1.13 – Algorithme BEB

Mécanisme RTS/CTS :

Un problème spécifique du monde sans fil est le problème de la station cachée. Deux stations situées chacune à l’opposé d’un point d’accès (AP) ou d’une autre station peuvent entendre l’activité de cet AP mais ne pas s’entendre l’une l’autre. Ceci est dû soit à la distance entre les deux qui est trop grande ou c’est parce qu’un obstacle empêche la communication entre elles. Le mécanisme de réservation RTS/CTS permet de résoudre ce problème.

Lorsqu’une station désire transmettre une trame, elle commence par envoyer une trame RTS (Request To Send) après avoir attendu un temps DIFS. La trame RTS contient les adresses MAC de l’émetteur et récepteur et fournit également un champ d’estimation de la durée de la transmission des données (champ Duration). Chaque station, hormis la station destinataire, sait alors que le canal est réservé et pour combien de temps. Afin de savoir quand elles pourront recommencer à émettre, les stations utilisent un NAV (Network Allocation Vector). Le NAV est initialisé à partir de la durée transmise par la trame RTS. Lorsqu’une station reçoit un RTS qui lui est destiné, elle attend SIFS et envoie une trame CTS. Une station n’ayant pas reçu de RTS, car trop éloignée de la station émettrice, peut recevoir le CTS et configurer son NAV.

La figure(1.14) illustre le processus d’émission d’une trame lorsque la station destination est cachée.

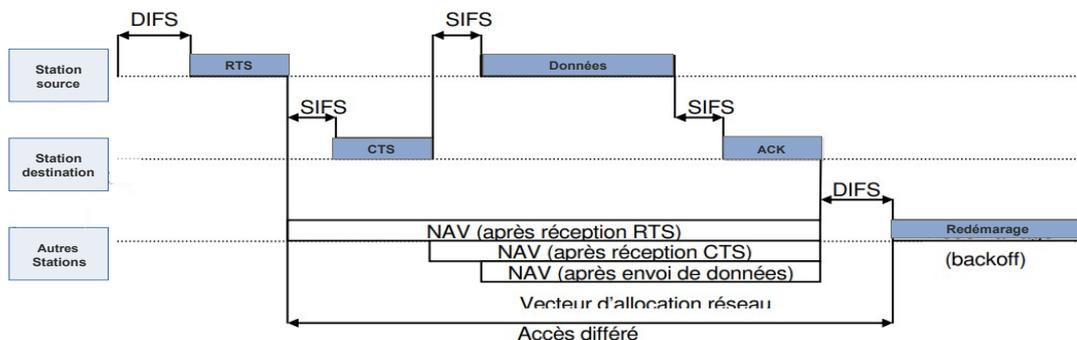


FIGURE 1.14 – DFS avec le mécanisme RTS/CTS

Le mécanisme utilisé par RTS/CTS peut laisser penser qu’il est moins performant que CSMA/CA car il nécessite l’envoi de deux trames avant de pouvoir émettre de l’information. Cela est vrai mais

seulement dans le cas où la longueur des données est petite. Le fait qu'avec RTS/CTS les collisions ne peuvent survenir que pendant l'envoi de la trame, RTS garantit que de longues trames ne seront pas à répéter suite à une collision.

Pour optimiser les transmissions, un RTS threshold (seuil) a été introduit : Lorsque les trames à envoyer sont petites c'est CSMA/CA qui est utilisé. Dans le cas où les trames sont plus grandes qu'un certain seuil (RTS Threshold), c'est alors RTS/CTS qui est utilisé.

1.6.2.3 Point Coordination Function (PCF)

Le mode PCF permet aux stations de réseau (STA) d'accéder au médium sans contention, est utilisé dans une topologie avec infrastructure dans lequel une entité centralisée appelée le PC (Point-Coordinator) est située au niveau du point d'accès (AP) donne la parole à tour de rôle pour les STA. Lorsqu'un PC est actif au niveau de l'AP, le temps d'accès au médium est divisé en deux périodes :

- **CFP (Contention Free Period) :** les stations n'émettent leurs données que sur invitation explicite de l'AP auquel elles sont associées, et quand une STA est sollicitée pour l'envoi de ses données, mais si elle ne répond pas dans un intervalle de temps PIFS, le point d'accès passe à la station suivante et faire la même chose.

Le point d'accès peut mettre fin à la première période et basculer en mode DCF par l'envoi d'une trame CF-End (Contention Free End).

- **CP (Contention Period) :** correspond à une période de temps avec contention dans lequel toutes les stations peuvent émettre leurs données en utilisant l'accès traditionnel à compétition du mode DCF.

Les deux périodes peuvent s'exécuter l'une après l'autre où chaque période est délimitée par des trames balises (Beacon) qui indiquent la durée de chaque période. (Figure 1.15)

Ce mode est conçu essentiellement pour la transmission de données sensibles, qui demandent une gestion du délai utilisé pour les applications temps réel, telles que la voix ou la vidéo.

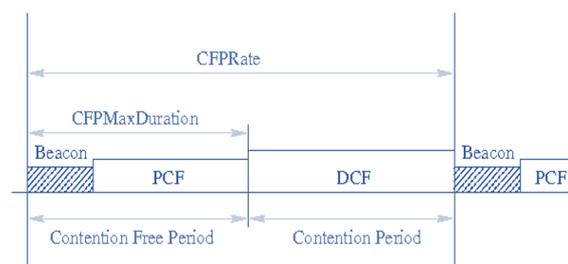


FIGURE 1.15 – Mécanisme PCF

1.6.2.4 Hybrid Coordination Function (HCF)

Cette fonction est définie par un standard IEEE 802.11e consacré à l'amélioration de la qualité de service QoS (Quality of Service). Elle introduit des modifications à DCF et PCF ainsi qu'un certain nombre de mécanismes et de types de trames permettant la mise en place de transferts avec qualité de service pendant la CP et la CFP.

HCF introduit la notion d'opportunité de transmission TXOP (Transmit Opportunity) qu'une QSTA(

les stations supportant les mécanismes de qualité de service) , peut obtenir en utilisant l'une des méthodes d'accès d'HCF : la méthode d'accès avec contention EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) qui est l'extension de mode DCF ou la méthode d'accès par scrutation HCCA (HCF Controlled Channel Access) qui est une extension de PCF.

1.7 Évolutions principales du IEEE 802.11

Le premier standard IEEE 802.11 dédié aux réseaux locaux sans fil (WLANs) a été proposé en 1990. La version finale de ce standard a vu le jour en 1997. Les débits théoriques étaient de 1 à 2 Mbits/s en utilisant des méthodes de codage basées sur DSSS et FSSS dans la bande des 2.4 GHz. [3] Ensuite, de nombreuses améliorations ont été apportées au standard par rapport à sa version d'origine, et chaque nouvelle version surpasse la précédente que ce soit en termes du débit de transmission, de la portée et le degré de la sécurité

1.7.1 IEEE 802.11a, b et g

Avec un débit maximal de 54 Mbit/s les normes Wifi 802.11a, b et g sont un peu dépassées aujourd'hui. Ce sont pourtant des normes qui ont été très utiles durant de longues années lors des balbutiements du Wifi.

802.11b : Cette norme publiée en septembre 1999 est la première norme des réseaux locaux sans fil utilisée par un nombre conséquent d'utilisateurs et de hotspots publique, elle était la norme la plus répandue en 2003 et 2004.

Elle propose un débit théorique de 11 Mbit/s avec une portée de 300 mètres, Cette norme opère dans la bande de fréquence ISM en utilisant la technique de modulation DSSS ou HR/DSSS. Le principal inconvénient de 802.11b consiste à présenter des interférences possibles avec les appareils fonctionnant sur les mêmes fréquences.

802.11a : Comme 802.11b, la norme 802.11a est publiée en 1999. Par contre, sa couche physique est prévue pour travailler sur les bandes UNII de 5 GHz en utilisant la technique modulation OFDM. Ces bandes sont beaucoup plus larges, de 300 MHz au maximum au lieu de 83.5 MHz en 2.4 GHz, permettent de réduire fortement les risques d'interférences entre réseaux.

Les spécifications 802.11a autorisent une montée en débit significative par rapport au 802.11b. La transmission maximale est de 54 Mpbs sur une portée d'une vingtaine de mètres.

Les principaux inconvénients de cette norme : sa portée réduite et son incompatibilité avec 802.11b donc le passage à cette norme exige l'acquisition d'un tout nouveau matériel[5].

802.11g : La version 802.11g publiée en 2003, est une transposition de la forme d'onde du 802.11a de la bande U-NII vers la bande ISM. Elle utilise toujours la technique de codage de type OFDM de 802.11a.

l'objectif étant de maintenir une compatibilité avec le 802.11b tout en offrant de meilleurs débits.

1.7.2 IEEE 802.11e (QoS)

C'est un standard publié en 2005, il définit des mécanismes permettant de mieux contrôler le flux de données et le partage du média entre plusieurs stations ; ceci permet notamment de mettre en œuvre une véritable gestion de la qualité de service (Quality of Service, QoS) qui définit la capacité

d'un réseau à transporter les données d'une façon à offrir une meilleure exploitation de la bande passante, augmenter le débit, minimiser la latence et le taux de perte des paquets de données, permettre l'échange fluide de données multimédias et satisfaire les exigences de l'utilisateur.

802.11e définit une nouvelle fonction de coordination pour l'accès au médium appelée HCF . Les points d'accès et les stations qui implémentent ce nouveau standard sont appelés respectivement QAP (QoS-enhanced Access Point) et QSTA.

1.7.2.1 Limitations en QoS dans les anciennes normes 802.11

L'IEEE 802.11 est basé sur un modèle de service dit de meilleur-effort « Best-effort » pour le transfert des trames depuis l'émetteur jusqu'au récepteur. Ce service n'assure aucune garantie en termes de QoS et sert les paquets de l'ensemble des applications de la même manière.

c'est Pour cette raison qu'on dit que le modèle de base ne supporte pas la différenciation de service. Par conséquent, tous les types de trafic de données, même ceux dédiés aux applications multimédia, souffrent du même retard et de la variation de la bande passante durant la congestion du réseau. Comparées avec les réseaux câblés, les caractéristiques du canal sans fil ne sont pas constantes et sont souvent sensibles aux variations spatio-temporelles. En contrepartie, les éléments du réseau (applications, stations, routeurs, ...) espèrent maintenir le même niveau de QoS indépendamment de la variation du canal [8].

QoS dans la DCF : Cette fonction supporte uniquement la classe de trafic de type « Best-effort service » où le débit, le délai et la perte de paquets ne sont pas garantis. Comme les stations du même réseau interagissent d'une manière concurrentielle pour le partage des ressources et du canal avec une même priorité, il n'y a pas de mécanisme pour différencier les flux prioritaires par rapport aux autres [8].

QoS dans la PCF : La faiblesse en termes de qualité de service de la PCF est résumée principalement en trois problèmes :

- Toutes les communications entre les stations du même BSS transitent par un seul AP. Ceci conduit à des pertes dans la bande passante.
- L'incompatibilité de la coopération entre CP et CFP dans PCF nécessite l'emploi des trames Beacons pour séparer les deux modes. Ces trames sont gérées par le PC de la même manière que les autres. Ceci qui génère un retard pénalisant le déclenchement de la phase CFP (4.9ms de retard dans le pire des cas avec la 802.11a).
- En mode PCF le temps de transmission d'une station est inconnu et l'envoi peut être fait en plusieurs fragments ce qui affecte le temps de transmission de l'unité MSDU sans le contrôle du PC. Ceci empêche le PC de maintenir une garantie en QoS pour les autres stations qui sont interrogées durant le reste de la CFP [8].

Afin d'améliorer la QoS des réseaux sans fil et de faire face aux limitations dans les anciens norme 802.11, le standard IEEE 802.11e intègre plusieurs techniques : la méthode EDCA, la méthode HCCA et le mécanisme d'acquiescement groupé (BA).

1.7.2.2 Méthode d'accès EDCA

L'EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) est une extension de la méthode d'accès DCF par l'introduction de concept de différenciation de service.

EDCA différencie l'accès au médium en utilisant le principe de priorités d'utilisateurs (UP : user priority) et des files d'attente appelées catégories d'accès (AC). 8 Ups de 0 à 7 sont définis et mappés à 4 ACs qui sont :

AC_VO pour le trafic voix avec des valeurs des priorités plus élevées.

AC_VI pour le trafic vidéo.

AC_BE pour le trafic au best-effort.

AC_BK pour le trafic Background avec des valeurs de priorité plus basse.

La table(1.3) présente les différentes ACs et leurs UPs associés :

UP	AC	désignation
0 et 1	AC_BK	Background
2 et 3	AC_BE	Best-Effort
4 et 5	AC_VI	Vidéo
6 et 7	AC_VO	Voix

TABLE 1.3 – Catégories d'accès de la méthode EDCA.

Chaque file d'attente transmet les trames à l'aide d'une fonction d'accès au canal indépendante appelée EDCA Function (EDCAF), et chaque fonction implémente l'algorithme de contention EDCA et possède ses propres paramètres d'accès. Quand une trame de données arrive au niveau MAC, les fonctions de la couche MAC la classent dans l'AC appropriée et la déposent dans la file d'attente de transmission qui lui convient. Dans ce type d'implémentation (Figure 1.16), chaque AC dans une station sera identique à une station virtuelle.

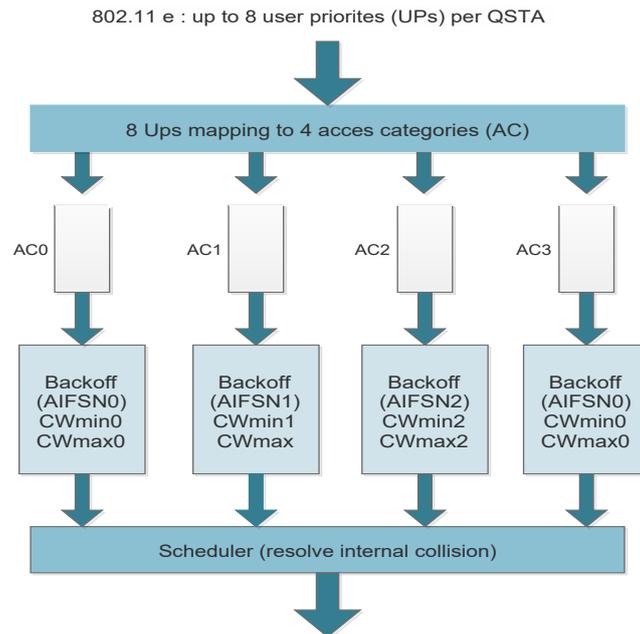


FIGURE 1.16 – Modèle d’implémentation d’EDCA

Les ACs possèdent différents paramètres d’accès qui définissent le fonctionnement d’EDCA et ces paramètres de différenciation sont stockés localement dans chaque QSTA et ils peuvent être modifiés dynamiquement par le QAP pour les quatre ACs puis envoyés par aux QSTAs dans des trames de balise. Ces paramètres sont :

- Le temps d’attente avant la contention (Arbitration IFS ou AIFS) qui est défini comme suit :

$$\text{AIFS}[AC] = \text{SIFS} + \text{AIFSN}[AC] * \text{slotTime}$$

Où, $\text{AIFSN}[AC] = 2 \text{ à } 7$ est le nombre de créneaux horaires qu’il faut attendre après une durée SIFS.

- La fenêtre de contention minimale et maximale (CWmin et CWmax).
- L’opportunité de transmission (Transmission Opportunity ou TXOP) qui représente un intervalle de temps durant lequel une station particulière possède le droit de transmettre en continu sans contention. Durant cet intervalle, une station est autorisée à transmettre de multiples trames de données provenant de la même file d’attente (celle qui a gagné le canal) avec un temps SIFS entre l’acquiescement et la trame suivante (Figure 1.17). La durée de TXOP est spécifiée pour chaque AC, et une valeur nulle de TXOP, signifie qu’une seule trame peut être transmise par cette AC.

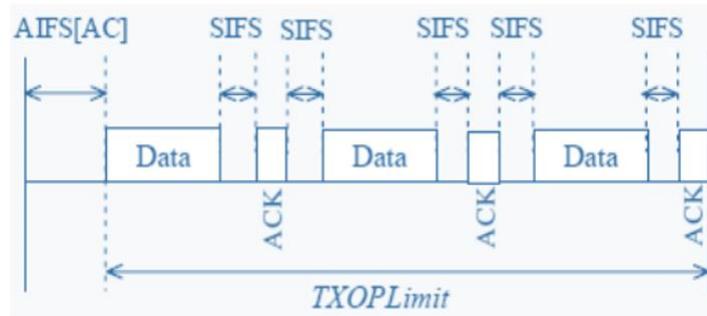


FIGURE 1.17 – TXOP

Pour qu'un AC puisse accéder au médium et transmettre ses paquets de données, il faut qu'elle gagne deux compétitions : une compétition interne entre les files d'attente de la même station et une autre compétition externe entre les files d'attentes des différentes stations. Lorsqu'un AC donné gagne la compétition interne, elle lui reste une autre compétition externe. La station qui gagne l'accès au canal pour une AC donnée, elle bénéficiera d'une opportunité de transmission (TXOP).

1.7.2.3 Méthode d'accès HCCA

Ce mécanisme est similaire au mode PCF, avec quelques modifications. Dans HCCA, PC est appelé HC (Hybrid Coordinator). Ce dernier sert à contrôler les trafics du réseau de telle sorte que chaque flux doit envoyer une demande au HC pour obtenir une permission d'accès au médium. Sa demande décrit explicitement ses besoins de QoS en utilisant un TSPEC (Traffic Specification) qui définit un ensemble de paramètres de QoS :

le délai d'interactivité, le débit moyen, le délai limite, la taille d'une trame MAC, etc. Le HC répond par une trame qui donne QSTAs un temps global maximal d'accès appelé MediumTime. Le HC autorise également aux QSTAs d'envoyer en continu durant un temps limité, HCCA-TXOP, pour qu'elle ne monopolise pas le médium. Les TXOPs allouées sont de différentes durées suivant la QoS demandée par les QSTAs.

Ce mécanisme n'est pas implémenté dans les cartes réseau wifi sans fil, vu sa complexité de gestion des flux et il est considéré comme mécanisme optionnel[8].

1.7.2.4 Mécanisme BA

Le 802.11e a introduit notamment un mécanisme Block ACK (BA) qui est l'une des contributions les plus importantes de ce standard afin d'améliorer l'efficacité et optimiser la couche MAC du WiFi. Il permet de notifier la réception de plusieurs trames de données au lieu de les acquitter une par une à travers une seule trame d'acquiescement ACK groupé[9].

À chaque fois qu'une station WiFi émet un paquet de donnée, elle attend en retour un paquet ACK pour l'acquiescement. Ce paquet occupe donc une part non négligeable de la bande passante. Et avec l'introduction de TXOP, les données peuvent être transmises en bursts, il n'est donc pas efficace pour acquiescer chaque trame de données d'une manière indépendante. L'utilisation de BA est optionnelle et devrait être signalée dans les trames de données qui seront acquiescées, et les numéros de trames doivent être tracés pour la reconnaissance appropriées et la retransmission correcte[10].

L'établissement d'une session BA repose sur trois étapes indispensables, figure(1.18) :

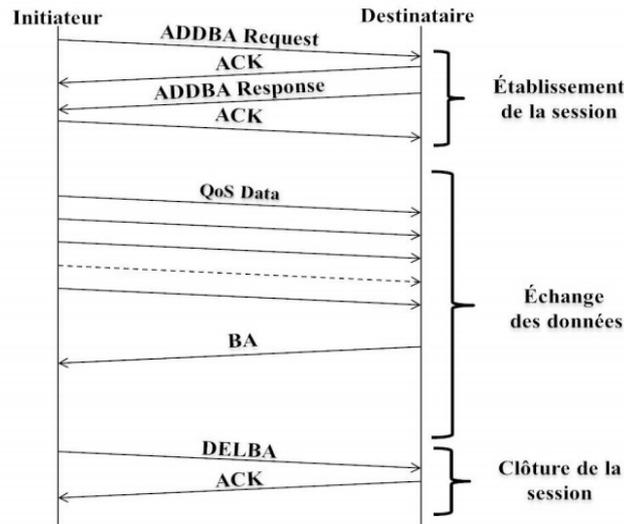


FIGURE 1.18 – Mécanisme d'acquittement par bloc

Établissement de la session : Lors de la première étape, l'initiateur envoie une requête d'établissement de la session BA par le biais d'un échange de trames Add BA Request/Response (ADDDBA Request/Response) et leurs ACK. Elles contiennent les informations utiles au transfert des données : un identifiant de trafic (TID) signalant la catégorie d'accès de la session en cours de négociation, la politique BA adoptée et la taille maximale du bloc de données (buffer). Une fois l'ADDDBA Request correctement reçu, le destinataire notifie sa réception par un ACK et envoie en retour un ADDDBA Response.

L'initiateur répond par un ACK pour confirmer la bonne réception de l'ADDDBA(ADD Block Ack) Response. L'acceptation ou le refus de la session est inclus dans la trame ADDDBA Response.

Échange des données : L'échange des données commence une fois que la session BA est établie. L'initiateur peut alors transmettre ses blocs de QoS data séparés d'un Short Inter Frame Space (SIFS). Pour acquitter ces données, le destinataire configure un champs bitmap (64 bits) envoyé via le BA, renseignant le succès ou l'échec de réception des MPDU, ainsi que le numéro de séquence pris comme référence.

Clôture de la session : Une fois que toutes les données sont envoyées et que l'initiateur ne planifie plus d'envoi, l'une des deux parties peut demander la clôture de la session par la transmission d'une trame Delete BA (DELBA). Une fois que celle-ci est acquittée, la fermeture de la session BA prend effet.

1.7.3 IEEE 802.11n

C'est une norme disponible depuis septembre 2009, représente une évolution de la version 11g et 11a en intégrant un module radio multi-antenne dit MIMO (Multiple-Input, Multiple Output) qui repose sur l'utilisation de plusieurs antennes (MIMO 4*4*4) sur le même canal pour transmettre davantage de données à la fois en exploitant la différence des temps de propagation des signaux.

802.11n utilise les bandes de fréquence 2.4 et 5 GHz en utilisant OFDM comme technique de modulation. Dans cette dernière, il est possible de doubler la largeur de canal exploité (regroupement des canaux), ce qui permet de gagner encore en vitesse [5].

1.7.3.1 Regroupement des canaux

C'est une technique importante en termes de performances introduite avec la norme IEEE 802.11n consiste à augmenter la largeur de bande en combinant deux canaux de 20 MHz adjacents en un seul canal de 40 MHz. Cette capacité représente une augmentation légèrement plus importante que le double, puisque la bande de garde entre les deux canaux peut également être utilisée. Il est généralement reconnu que les canaux 40 MHz ne sont efficaces que dans la bande 5 GHz en raison du grand nombre de canaux non superposés disponibles dans ce spectre. Dans la bande 2,4 GHz, il n'y a que trois canaux 20 MHz non superposés (1, 6 et 11). La combinaison de ces deux canaux non superposés pour créer un canal 40 MHz plus large génère un seul canal 40 MHz non superposé.

L'augmentation du débit et de la portée n'est pas due seulement à la nouveauté apportée par cette norme au niveau de la couche physique mais aussi à la nouveauté apportée dans la sous-couche MAC : l'agrégation des trames et l'amélioration de procédure des acquittements groupés [11].

1.7.3.2 Agrégation de trames

Le principe proposé par 802.11n consiste à accumuler plusieurs sous-trames et les transmettre dans une seule trame, au lieu d'envoyer des petites trames qui peuvent transporter peu de données (peut être que des entêtes), ce qui influence le taux d'exploitation de la bande passante. Afin d'améliorer l'efficacité MAC et d'augmenter le débit.

Deux types d'agrégations sont proposés, (Figure 1.19) : Aggregate MAC Service Data Unit (A-MSDU) et Aggregate MAC Protocole Data Unit (A-MPDU) et en combinant les deux dans une trame, on obtient l'agrégation à deux niveaux (Hybride A-MSDU/A-MPDU).

- **A-MSDU** : elle consiste à regrouper plusieurs trames possédant la même source, la même destination et la même classe de trafic en une longue trame agrégée où les données de ces trames sont collées les unes à la suite des autres (sans leurs en-têtes), puis un seul en-tête et un seul code d'intégrité (CRC) sont associés à la trame agrégée.

La taille d'une trame agrégée A-MSDU peut atteindre 8 kilo-octets (plus les octets nécessaires au cryptage) [12].

- **A-MPDU** : le même principe que A-MSDU mais cette fois les trames sont collées les unes à la suite des autres avec leurs en-têtes. La quantité maximale de données que peut contenir une trame agrégée A-MPDU est de 64 Ko (plus les octets nécessaires au cryptage). Dans ce cas si la trame agrégée est attachée d'erreur, on peut savoir quelle trame parmi les trames constituant la trame agrégée a été attachée de cette erreur, puisqu'elles sont transmises avec leurs en-têtes, ce qui facilite la tâche de détection de cette trame, de la supprimer, puis de demander à l'émetteur de retransmettre seulement cette trame [12].

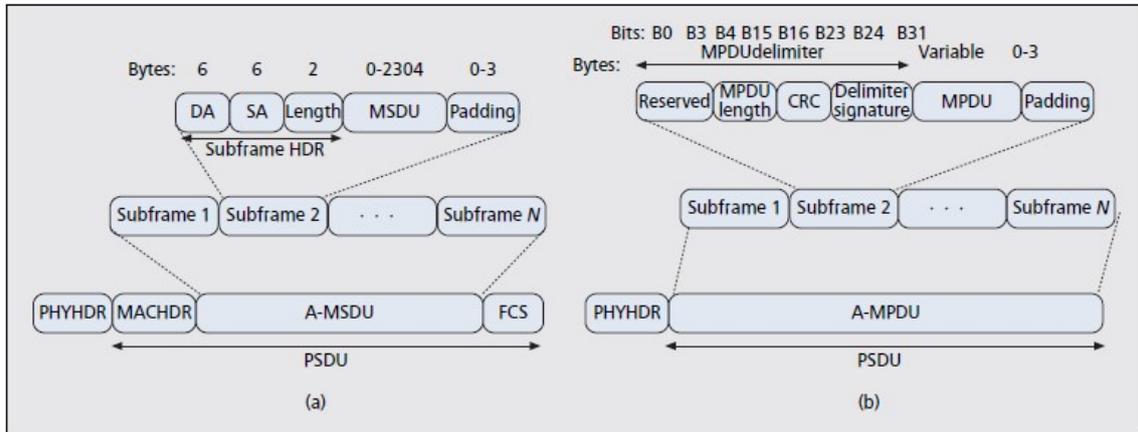


FIGURE 1.19 – Un niveau d’agrégation de trames A-MSDU et A-PSDU

1.7.3.3 Mécanisme BA amélioré

Ce mécanisme a d’abord été introduit dans IEEE 802.11e (partie 1.7.2.4), puis modifié dans IEEE802.11n afin de prendre en charge la fonction d’agrégation A-MPDU. Les trames Block ACK contiennent un champ bitmap qui peut être défini sur 0 ou 1 pour différencier sélectivement les MPDU corrompues et non. La longueur de champs bitmap a été augmenté à 128 octets comme le montre la figure(1.20) et chaque trame est mappée en utilisant deux octets.

C’est la raison pour laquelle seules 64 trames peuvent être prises en charge dans l’agrégation A-MPDU. Une sous-trame corrompue est indiquée par une valeur de bitmap définie par un 0. Lorsqu’une A-MPDU avec des erreurs est détectée, le récepteur transmet un bloc ACK pour accuser réception sélectivement des MPDU non corrompues. Cela réduit la probabilité d’erreurs et de collision par rapport aux transmissions ACK individuelles. L’expéditeur est alors en mesure de retransmettre uniquement les MPDU non acquittées [13].



FIGURE 1.20 – Format d’une trame BA

1.7.4 IEEE 802.11ac

Le standard IEEE 802.11ac a été publié en 2014, il s'agit d'un réseau de très haut débit (Very High Throughput (VHT)), il repose aussi sur l'OFDM comme le 802.11n mais qui utilise exclusivement la bande 5 GHz à la différence de 802.11n qui peut fonctionner dans la bande 2.4 GHz ou 5 GHz.

Le 802.11ac nous a permis d'augmenter le débit théorique jusqu'à 7 Gb/s grâce aux améliorations apportées dans la couche physique et la sous-couche MAC.

Pour la couche physique, le 802.11ac utilise en plus des canaux de largeur 20 MHz et 40 MHz, deux autres canaux de largeur 80 MHz et 160 MHz (facultatif), et il utilise la modulation 256 QAM pour transporter 8 bits par symbole au lieu de 64 QAM utilisés dans le 802.11n qui peut ne transporter que 6 bits par symbole, à augmenter le débit plus de 33 pour cents par rapport à la 802.11n.

Dans le 802.11ac les flux de données peuvent être transmis vers plusieurs récepteurs, à la différence de 802.11n où ces flux peuvent être envoyés vers un seul récepteur, mais dans le cas de ce standard quatre (4) flux de données au maximum peuvent être envoyés vers un seul récepteur. On parle ici de MU-MIMO (Multi-User MIMO).

Et pour la sous-couche MAC le 802.11ax propose une version améliorée de TXOP, connue sous le nom de TXOP sharing. Cette amélioration a pour but de s'adapter au nouveau service offert par le 802.11ac, qu'il s'agit de l'émission de plusieurs flux données à plusieurs stations réceptrices simultanément.

1.7.5 IEEE 802.11ax

Le 802.11ax, surnommé le High Efficiency WLAN (HEW), Il s'appuie sur les points forts du standard 802.11ac, permet aux entreprises et aux opérateurs télécoms de prendre en charge de nouvelles applications sur la même infrastructure WLAN, tout en offrant un niveau de service supérieur aux applications plus anciennes.

Ce scénario ouvre la voie au développement de nouveaux modèles économiques et à une adoption accrue du Wi-Fi.

Le standard IEEE 802.11ax a été conçu pour garantir une compatibilité maximale et assurer une coexistence efficace avec les appareils 802.11a/n/ac.

Le tableau 1.4 suivant résume les caractéristiques des normes 802.11 :

802.11	Réalisé	Fréquence	Bande passante	Débit possible	MIMO	Modulation
1 ^{ère} géné- ration	1997	2.Ghz	22Mhz	1.2 Mbits/s	-	DSSS,FHSS
a	1999	5Ghz	20Mhz	6,9,12,18,24, 36,48,54Mbits/s	-	OFDM
b	1999	2.4 Ghz	22Mhz	1,2,5, 11Mbits/s	-	DSSS
g	2003	2.4 Ghz	20Mhz	6,9,12,18,24,36, 48,54Mbits/s	-	OFDM
n	2009	2.4 ou 5Ghz	20 ou 40Mhz	jusqu'à 300Mbits/s	4	MIMO- OFDMA
ac	2014	5Ghz	20,40,80,160Mhz	jusqu'à 7Gbits/s	8	MIMO- OFDMA
ax	2018	2.4 ou 5Ghz	20,40,80,160Mhz	jusqu'à 10Gbits/s	8	OFDMA

TABLE 1.4 – Tableau récapitulatif des différentes normes 802.11.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève description des réseaux sans fil et les spécifications du standard 802.11 sur laquelle repose un réseau WiFi, notamment le fonctionnement de la couche physique et MAC couvrant par ce standard et leurs mécanismes de base. Et le dernier point présenté, c'est les principales évaluations du standard IEEE 802.11 que nous considérons importantes pour bien comprendre le reste du mémoire.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter la norme 802.11ac et étudier le fonctionnement de la future norme 802.11ax et ses modifications apportées aux deux couche PHY et MAC afin d'améliorer la qualité de service (QoS), le débit et satisfaire les exigences des utilisateurs.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DES NORMES IEEE 802.11AC ET 802.11AX

2.1 Introduction

L'émergence continue de nouvelles applications sans fil conjuguée à la concentration du nombre d'utilisateurs dans certaines zones (aéroports, stades, ...) et les exigences accrues en matière de QoS impose d'améliorer les techniques et les protocoles existants du Wi-Fi déployé dans tels environnements. Pour cela, l'IEEE a lancé le groupe de recherche Task Group AX (TGax) afin de développer un nouvel amendement wifi appelé 802.11ax.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter la norme actuelle 802.11ac et la nouvelle norme 802.11ax, leurs caractéristiques et objectifs, ainsi que les différentes améliorations technologiques introduites dans la 802.11ax. Et nous allons terminer par une synthèse sur les travaux de recherche publiés traitant la QoS dans la norme 802.11ax.

2.2 Norme IEEE 802.11ac

La norme IEEE 802.11ac, aussi connue sous le nom de Very High Throughput(VHT) est une version de wifi commercialisé depuis 2015 proposé pour augmenter le débit de la norme 802.11n et aller au-delà de plusieurs Gbps.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les améliorations physique et MAC apportées à cette norme et qui permettent d'atteindre ces très hauts débits.

2.2.1 Fonctionnement dans la bande de fréquence 5 GHz

La bande de fréquence 2.4 GHz est susceptible à l'interférence par les anciens appareils Wi-Fi, ainsi que de nombreux appareils ménagers. La bande de fréquence 5 GHz a relativement réduit l'interférence car elle est rarement utilisée et propose un nombre plus grand de canaux qui ne chevauchent pas, par rapport à la bande 2.4 GHz(25 canaux sans chevauchement contre 3 canaux aux USA). La norme 802.11ac devrait donc tirer parti de l'interférence réduite et une plus grande flexibilité de multiples canaux disponibles dans la bande de fréquence 5 GHz pour des performances accrues.

l'autre, ce qui les rend plus sensibles au bruit.

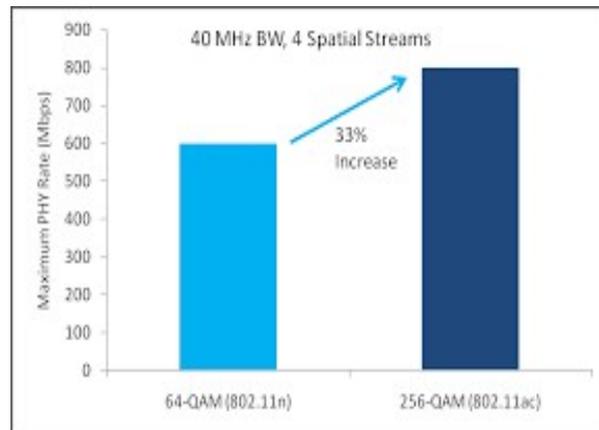


FIGURE 2.2 – Différence entre 64 et 256 QAM en termes de performance

La figure(2.2) montre l'impact de 256-QAM sur la performance. Dans 802.11n, 600 Mbps est le taux de données PHY maximal réalisable en utilisant quatre flux spatiaux et une bande passante de 40 MHz. Cependant, dans 802.11ac ce taux atteint 800 Mbps.

2.2.2.3 Technique Multi-User MIMO et le downlinkMU-MIMO

La technique de transmission multi-utilisateurs MIMO(Multi-User en anglais) a été introduite pour la première fois dans la norme 802.11ac, développe considérablement les fonctionnalités MIMO du standard 802.11n en augmentant le nombre de bits transférés par MHz dans le spectre.

Avec cette technique, un point d'accès peut servir plusieurs stations à la fois, en lui permettant d'envoyer plusieurs paquets simultanément à plusieurs stations en utilisant jusqu'à huit flux spatiaux qui peuvent être divisés entre quatre stations au maximum. Dans une transmission MU-MIMO, chaque station peut avoir au maximum quatre flux spatiaux, (figure 2.3) [15].

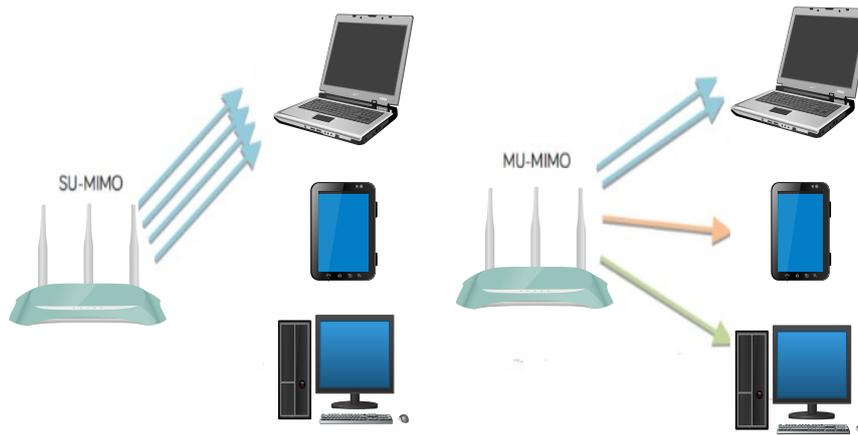


FIGURE 2.3 – Différence entre transmission SU et MU MIMO

Malgré les performances élevées des points d'accès, de nombreux dispositifs Wi-Fi tel que les tablettes et les Smartphones sont des systèmes dotés d'une seule antenne à l'émission et à la réception (Single-input Single-output, SISO en anglais) supportant un seul flux spatial. Ces clients SISO deviennent un goulot d'étranglement radio, exigeant plus de temps pour chaque donnée ce qui influence sur les performances MIMO. Dans ce contexte, les concepteurs du 802.11ac ont introduit le concept révolutionnaire de DL MU-MIMO (DownLink Multi-User MIMO). Un point d'accès (AP) donné de transmettre de groupes indépendants de flux de données simultanément à de multiples stations réceptrices dans la même bande de fréquences et en même temps. Ce qui permet d'atteindre un débit cumulé de 1 Gbps[16].

2.2.2.4 BeamForming

La norme 802.11ac fait appel au beamforming ou formation de faisceau en français. C'est une technique MIMO qui utilise plusieurs antennes en émission synchronisées de façon à former une sorte de faisceau de rayonnement en direction de chaque utilisateur, c'est-à-dire permet de concentrer la puissance d'un signal vers certains appareils, au lieu d'envoyer toute la puissance dans toutes les directions. De quoi augmenter la puissance du signal reçu et ainsi, le débit de terminaux clients.

2.2.3 Principales améliorations de la sous couche MAC

Pour profiter au maximum des améliorations PHY d'autres améliorations ont été apportées à la couche MAC et plusieurs mécanismes proposés : améliorations de l'agrégation des trames et l'adoption de Transmission (TX) Opportunity (TXOP) Sharing.

2.2.3.1 Agrégation améliorée

La norme IEEE 802.11ac améliore cette agrégation en augmentant la taille des A-MSDU et A-MPDU respectivement à 11454 octets et 1048575 octets, et il ne recommande d'utiliser que l'agrégation A-MPDU [17], (voir la table 2.1).

Amendement	Agrégation	Taille Max MPDU	Taille Max PSDU
802.11a/b/g	Non	2,304	2,336 bytes
802.11h	Oui	7,935 bytes	65,535 bytes
802.11ac	Oui	11,454 bytes	1,048,575 bytes

TABLE 2.1 – Longueur des MPDU/PSDU dans IEEE 802.11.

2.2.3.2 Mécanisme TXOP sharing

Le mécanisme TXOP a été introduit par le groupe de travail 802.11e, son objectif principal était d'assurer une qualité de service (QoS) aux réseaux IEEE 802.11.

Les règles de fonctionnement définies dans ce mécanisme peuvent prendre en charge une seule transmission à la fois. Ce qu'il n'est pas le cas dans l'amendement 802.11ac avec l'adoption des communications DL MU-MIMO. En effet, lors d'une TXOP obtenue par une station, seules les trames appartenant à la même AC sont transmises. De cette manière, plusieurs trames appartenant aux autres ACs ne sont pas autorisées à être transmises simultanément. D'où l'utilisation de la technique DL MU-MIMO devient très limitée[4].

Pour remédier à ces anomalies, le 802.11ac adopte le TXOP Sharing, Les principales règles son fonctionnement se présentent dans la figure 2.4 :

1. Chaque EDCAF d'un AP utilise ses propres paramètres EDCA en compétition pour un TXOP.
2. Une fois l'EDCAF gagne une TXOP, elle devient propriétaire de cette TXOP et son AC correspondante devient l'AC primaire et les autres ACs deviennent des ACs secondaires.
3. L'AC primaire peut décider de partager sa TXOP avec les ACs secondaires pour les transmissions simultanées. Si c'est le cas, la TXOP gagnée devient une TXOPmulti- utilisateurs (MU-TXOP).
4. L'AC primaire peut également décider avec quelle (s) AC (s) secondaire (s) partager la TXOP gagnée, et quelle destination à adopter.
5. La durée de la TXOP est déterminée par la TXOP Limit de L'AC primaire, et le temps de transmission est déterminé par la quantité de données à transmettre par l'AC primaire.
6. Une fois que l'AC primaire a terminé sa transmission, le MU-TXOP est terminé même si les ACs secondaires ont encore des trames à envoyer.

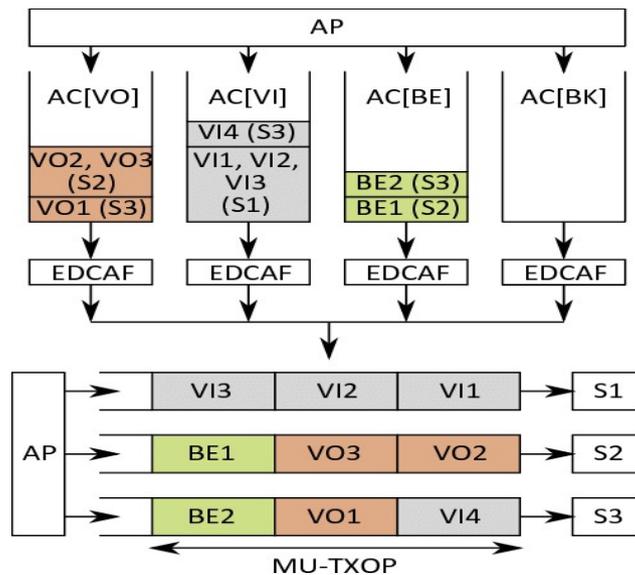


FIGURE 2.4 – Fonctionnement du mécanisme TXOP Sharing

2.3 Norme 802.11ax

La nouvelle norme IEEE 802.11ax, également connue sous la dénomination High-Efficiency WLAN (HEW) a pour but ambitieux de quadrupler le débit moyen par utilisateur dans les zones denses (gares, aéroports, stades, Immeubles d’habitation collective. . .), avec la capacité de connecter plus d’appareils sans perte de performances ou d’interférences. Grâce à cet amendement, plusieurs points d’accès utilisés collectivement dans des environnements denses sont capables de fournir la qualité de service (QoS) requise pour un plus grand nombre de clients et d’offrir une expérience optimisée pour les réseaux LAN sans fil standard. Elle permet également d’améliorer la fiabilité des performances pour des applications avancées telles que la vidéo 4K, 8k, la technologie UHD (Ultra-Haute Définition), wireless office, l’Internet des objets (IoT), etc [18].

2.3.1 Fonctionnement sur les deux bandes 2.4 et 5 GHz

802.11ax est une technologie bi-bande 2.4 GHz et 5 GHz. Il est donc prévu pour être complètement rétro compatible avec l’ensemble des normes précédentes, contrairement au 802.11ac qui ne fonctionnait que sur le 5 GHz. Ainsi, l’idée du 802.11ax est aussi d’étendre au 2,4 GHz les techniques radio et liaison qui ont été mises en place avec le 802.11ac, on pense particulièrement au DL MU-MIMO et les méthodes associées de traitement des paquets multi-utilisateurs simultanés (A-MPDU et Block-ACK), aux modulations allant jusqu’à 256 QAM, ainsi qu’aux flux spatiaux pouvant monter jusqu’à un nombre de 8 [19].

2.3.2 Exigences de la norme 802.11ax

Le groupe de travail TGax vise à améliorer l’efficacité spectrale et le débit réseau dans les déploiements denses avec des centaines de points d’accès et stations en adaptant des nouvelles fonctionnalités comme :

- DL et UL OFDMA
- DL et UL MU-MIMO
- La modulation 1024-QAM
- Les techniques de réutilisation spatiale telles que : le schéma BSS-Color.
- Nouveau format PPDU
- TWT power saving

Sur la base des scénarios susmentionnés et des cas d'utilisation attendus, l'amendement IEEE 802.11 ax doit répondre à certaines exigences clés résumées dans les points suivants [20] :

1. Débit supérieur : L'amélioration à la fois du système et du débit utilisateur dans les déploiements intense. IEEE 802.11ax vise une multiplication par quatre du débit par rapport à IEEE 802.11ac. Utilisation efficace des ressources spectrales : En fournissant des méthodes qui assurent cette utilisation efficace
2. Efficacité énergétique : La cible dans la norme IEEE 802.11ax est, au moins, de ne pas consommer plus d'énergie que les amendements précédents avec une meilleure gestion d'alimentation pour une plus longue durée de vie.
3. Coexistence : Les WLAN fonctionnent comme des appareils sans licence dans les bandes ISM. Par conséquent, L'amendement 802.11ax doit inclure les mécanismes requis pour coexister avec les autres réseaux sans fil qui y opèrent et les appareils sous licence.
4. Rétrocompatibilité : IEEE 802.11ax est compatible pour prendre en charge les communications avec tous les périphériques utilisant IEEE 802.11 existants.

2.3.3 Principales nouveautés de la norme 802.11ax

2.3.3.1 DL et UL OFDMA

La nouveauté la plus importante de la norme 802.11ax est sans doute réside dans le l'utilisation de la technologie multi-utilisateur OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) issue des réseaux radio cellulaires/LTE, en liaisons descendantes (DL : Downlink) de l'AP vers plusieurs STA et en liaisons montantes (UL : Uplink) à partir de plusieurs STA vers l'AP. Il est possible de desservir simultanément plusieurs utilisateurs et de partage de la bande passante disponible sur même canal, au lieu du modèle existant (OFDM) où les utilisateurs se font concurrence pour l'envoi de données et un seul entre eux qui peut émettre sur toute la bande. Cela permet :

- L'amélioration de la performance, car un grand nombre de paquets en particulier ceux qui sont sensibles à la latence comme le trafic vocal peuvent être transmis simultanément.
- Le déterminisme et une efficacité renforcée grâce à la réduction des collisions et de la contention.
- La garantie de la qualité de service (QoS).

Le 802.11ax avec L'OFDMA assigne à chaque utilisateur individuel des sous-ensembles contigus des sous-porteuse (minimum 26, maximum 996). Cela signifie que les canaux 802.11 existants (de largeur 20, 40, 80 et 160 MHz) sont divisés en sous-canaux plus étroits avec un nombre prédéfini de sous-porteuses. Cette quantité partielle est appelée unité de ressource (RU : Resource Unit) et

sont attribuées aux utilisateurs en fonction des conditions du canal et des exigences de service. L'AP détermine l'allocation des canaux de manière à toujours assigner toutes les RU disponibles en liaison descendante. Il peut allouer l'intégralité du canal à un seul utilisateur comme c'est actuellement le cas avec le 802.11ac ou le répartir entre plusieurs utilisateurs de manière simultanée, (figure 2.5).

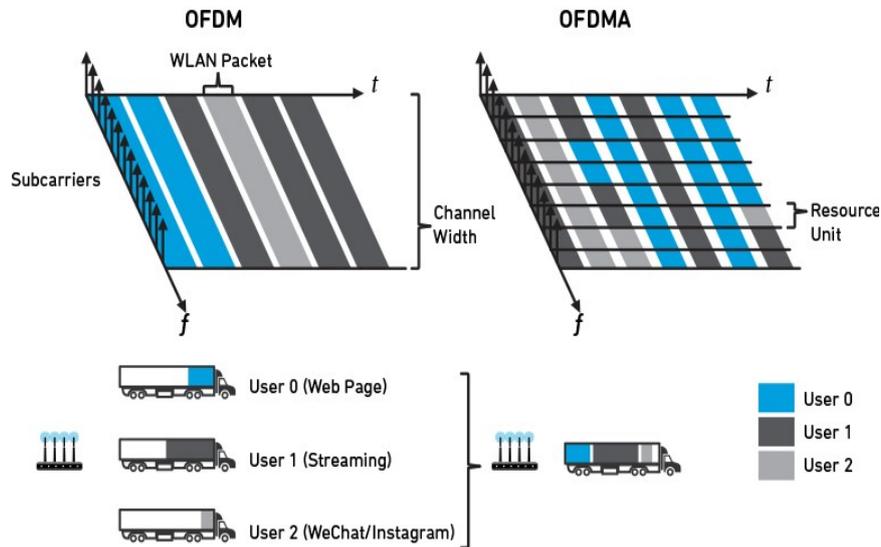


FIGURE 2.5 – Allocation des RUs en utilisant OFDM et OFDMA

Par exemple, les configurations d'unités de ressources possibles pour un canal de 20 MHz. Avec la plus petite taille de RU (RU26), jusqu'à neuf utilisateurs peuvent transmettre simultanément (première ligne de la figure 2.6. La largeur de bande maximale s'élève à 160 MHz, et permet jusqu'à 74 utilisateurs simultanés. Un seul utilisateur actif constitue un cas spécial d'OFDMA. Une seule unité de ressource absorbe alors l'ensemble de la bande passante (RU242) [21].

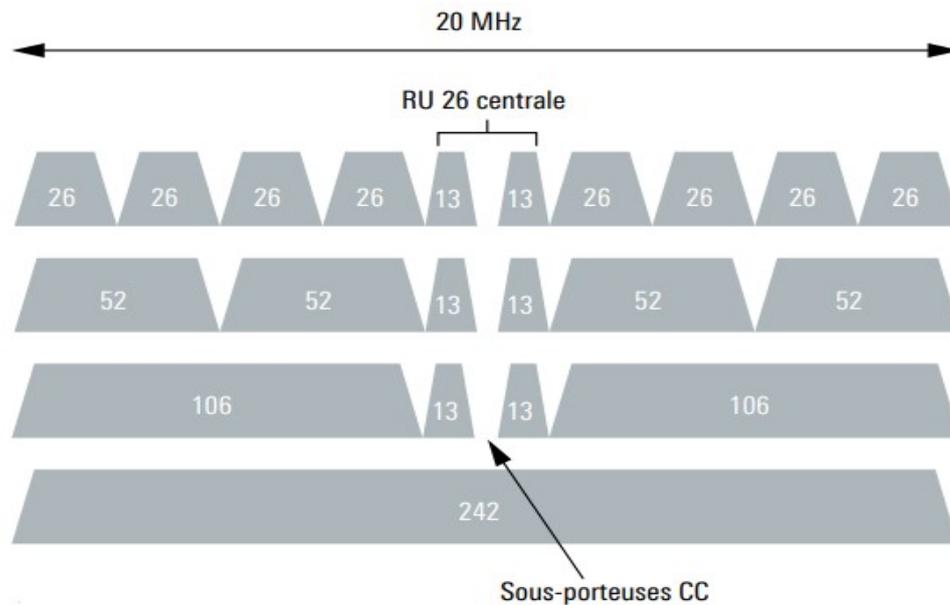


FIGURE 2.6 – Tailles et positions possibles des unités de ressources pour la bande passante de 20 MHz

2.3.3.2 DL et UL MU-MIMO

MU MIMO est un moyen de gérer le trafic provenant de plusieurs périphériques initialement introduit en 802.11ac. En 802.11ax, cette technique a été améliorée pour étendre le nombre de flux de données parallèles possibles de quatre à huit en utilisant un canal dédié par appareil. Cela permet de traiter plus efficacement les gros paquets tels que les vidéos Ultra HD [18].

La transmission en liaison montante (UL MU-MIMO) est la nouvelle caractéristique ajoutée par la norme 802.11ax pour permettre aux APs de recevoir plusieurs flux de données de la part de plusieurs stations. L'AP initie simultanément ce genre de transmission depuis chaque station au moyen d'une trame de déclenchement (TR : trigger frame) [18].

2.3.3.3 Nouveau formats PPDU

Pour prendre en charge les différentes technologies et scénarios ajoutés, et pour garantir une compatibilité maximale et assurer une coexistence efficace avec les appareils 802.11a/g/n/ac, le standard IEEE 802.11ax introduit quatre formats de PPDU (Physical Protocol Data Unit) en fournissant des informations à haute efficacité (HE)[24].

HE SU (Single User) PPDU : est utilisé lors de la transmission à un seul utilisateur (entre AP et une seule STA, et entre une seule STA et une autre STA unique).

HE ER SU PPDU : est utilisé lors de la transmission à un seul utilisateur, mais plus éloigné du point d'accès (AP), comme dans un scénario extérieur, afin d'améliorer la robustesse de la transmission.

HE MU (Multi-user) PPDU : Le format MU permet la transmission simultanée entre les MU via OFDMA et / ou MU-MIMO et les informations d'allocation de ressources pour plusieurs utilisateurs sont indiqués dans ce paquet de donné.

HE TB (trigger-based) PPDU : (Trame de déclenchement) est proposé afin de permettre le fonction-

nement OFDMA et / ou MU-MIMO en liaison montante (UL). Une transmission TB est entièrement contrôlée par l'AP à destination d'un groupe de STAs utilisateurs. Cette trame de indique à chacun d'eux (utilisateurs) le nombre de flux spatiaux et/ou les modalités d'allocation OFDMA (fréquence et tailles de RU). Elle contient également des informations relatives au contrôle de puissance, de sorte que chaque utilisateur adapte la quantité d'énergie qu'il transmet pour équilibrer la puissance totale reçue par l'AP en liaison montante et améliorer la réception de trames transmises par les nœuds plus lointains. L'AP donne à tous les utilisateurs les instructions de démarrage et d'arrêt de transmission [18].

Comme le montre la Figure 2.7, l'AP envoie une trame TB de liaison montante multi utilisateur qui indique à tous les utilisateurs le moment précis auquel commencer la transmission, ainsi que le créneau exact qui leur est alloué afin que toutes les transmissions terminent au même moment. Une fois que l'AP a reçu les trames de tous les utilisateurs, il leur renvoie une trame ACK groupée pour terminer l'opération [22].

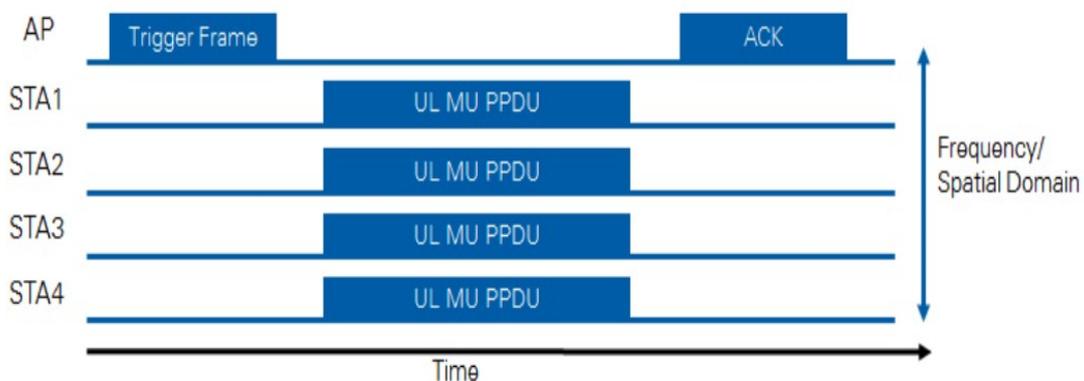


FIGURE 2.7 – Exemple illustratif de transmission d'une TF

2.3.3.4 Modulation 1024-QAM

Les techniques de modulation sont utilisées pour optimiser le débit et la portée. Le nombre de points dans la constellation de modulation détermine le nombre de bits véhiculés avec chaque symbole. 802.11ac utilise 256 QAM qui transfère 8 bits / symbole. 802.11ax prend en charge 1024 QAM, en utilisant 10 bits / symbole, pour une augmentation de 25 pour-cents du débit (Figure 2.8) [23].

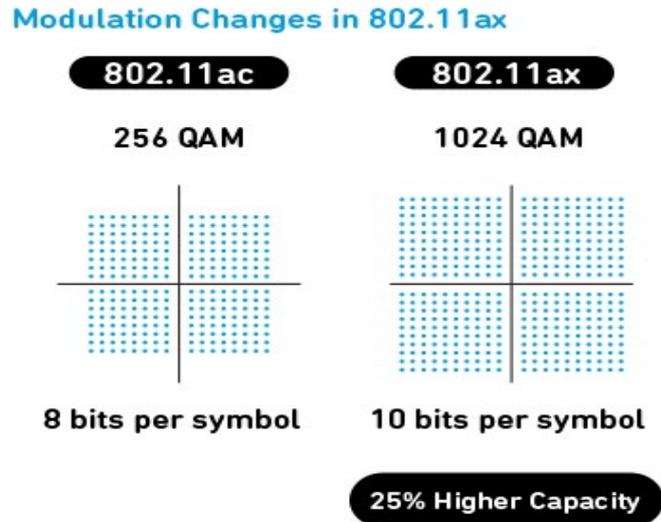


FIGURE 2.8 – Différence entre QAM 802.11ac/ax

2.3.3.5 Réutilisation spatiale (SR)

Dans un ensemble de services de base qui se chevauchent (OBSS : Overlapping BSS), pour améliorer l'efficacité et les performances de la réutilisation spatiale, 802.11ax ajuste l'opération de détection de porteuse en fonction de la couleur du BSS. Selon le BSS à partir duquel le trafic est généré, la station peut utiliser différents seuils de sensibilité pour transmettre ou différer. Cela se traduit par des performances globales plus élevées [23].

Code BSS-Color : Les STAs peuvent détecter les signaux issus de BSS en chevauchement (OBSS) pour gérer les situations de conflit et d'interférence en fonction de ces informations.

Lorsqu'une STA à l'écoute d'un support détecte une trame 802.11ax, elle vérifie les bits de couleur (6 bits) ou l'adresse de contrôle d'accès au support du BSS dans l'en-tête MAC. Si la couleur du BSS dans l'unité de données de protocole de couche physique (PPDU) détectée est identique à celle annoncée précédemment par l'AP associé, la STA considère la trame en question comme une trame intra-BSS. En revanche, si la trame détectée présente une couleur différente de celle de son propre BSS, la STA la considèrera comme une trame inter-BSS issue d'un BSS en chevauchement. La STA traitera ensuite le média comme occupé jusqu'à ce qu'elle confirme que la trame est bien inter-BSS, sans pourtant dépasser la durée correspondant à la longueur des données utiles de la trame, (voir la figure 2.9) [18]. .

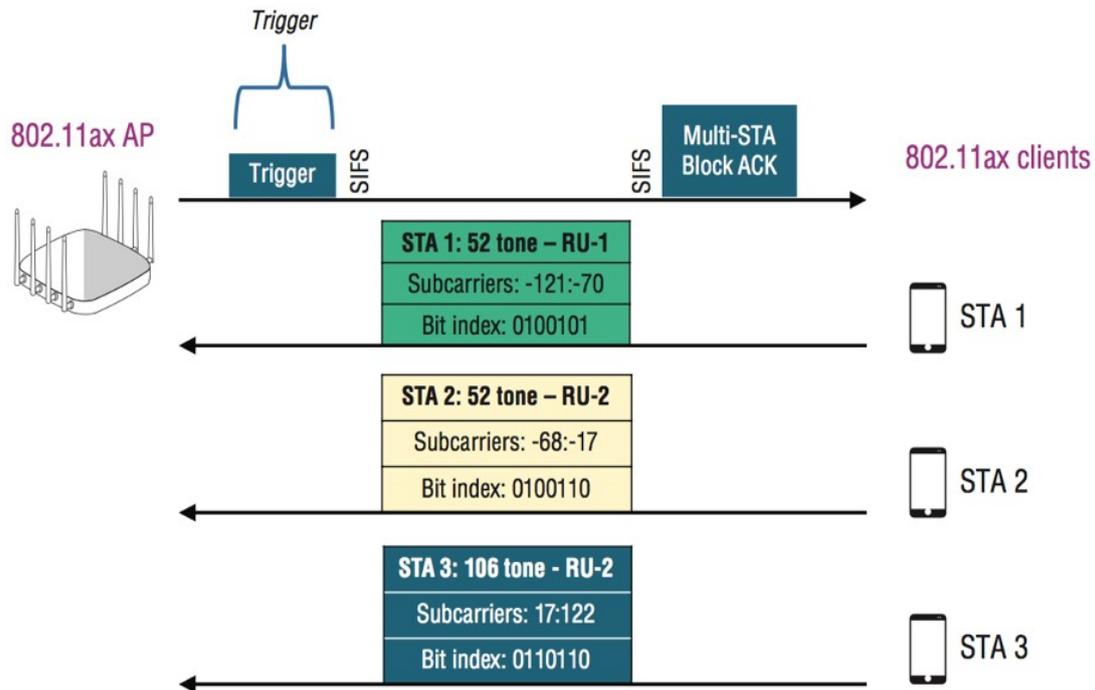


FIGURE 2.9 – Exemple de transmission en utilisant la technique de réutilisation Spatiale BSS-Color

Contrôle du seuil CCA (Clear Channel Assessment) : La norme 802.11ax doit encore établir certains mécanismes destinés à ignorer le trafic de BSS en chevauchement, mais leur mise en œuvre pourrait impliquer d'augmenter la valeur de seuil de CCA. Pour les trames inter-BSS, tout en maintenant une valeur de seuil basse pour le trafic intra-BSS. De cette manière, le trafic de BSS avoisinants ne provoquerait aucun conflit d'accès au canal.

Quand les STA 802.11ax utilisent le code couleur établi selon les spécifications CCA, elles peuvent également ajuster le seuil de valeur de détection de signal OBSS et contrôler l'énergie transmise. De plus, les STA 802.11ax peuvent modifier les paramètres CCA tels que les niveaux de détection d'énergie et de signaux. En plus de la technique CCA pour vérifier la disponibilité d'un support [18].

Multiple NAVs : Le NAV joue un rôle de détection virtuelle de porteuse et permet de réserver le support pour des trames critiques au fonctionnement du protocole 802.11, comme les trames de contrôle, de données et d'acquiescement qui accompagnent un échange RTS/CTS.

Le groupe de travail TGax propose d'inclure deux temporisateurs NAV différents dans la norme 802.11ax. En disposant d'un NAV intra-BSS et d'un second NAV inter-BSS, les stations pourraient parvenir à mieux anticiper le trafic au sein de leur propre BSS, et à transmettre au moment opportun selon l'état du trafic dans les zones de communication en chevauchement[18].

2.3.3.6 Mécanisme de réservation d'énergie TWT

Les conflits entre les appareils et la durée de vie des batteries se sont améliorées grâce à une fonction appelée TWT (Target Wake Time), qui permet aux clients de rester inactifs jusqu'à l'arrivée de leur tour de transmission de données en utilisant un schéma de planification de temps programmé par l'AP, ce qui permet l'économie de la consommation d'énergie, moins de congestion et une meilleure

expérience globale[21].

2.4 Synthèse sur les travaux autour de la QoS pour IEEE 802.11ax

Les modifications apportées à la norme 802.11ax amélioreront le fonctionnement des réseaux Wi-Fi en tirant parti d'une technologie qui augmente considérablement la capacité, offre une meilleure couverture et même réduit la congestion, ce qui se traduit par une meilleure expérience utilisateur en termes de QoS. Dans cette partie, nous présentons une synthèse sur les travaux de recherche, études et propositions publiés traitant à mieux répondre aux besoins des utilisateurs, en matière de bande passante élevée et de faible latence en satisfaisant aux exigences de qualité de service (QoS).

H Zhou, B Li, Z-J Yan et al (2016) [25]

Afin de prendre en charge les exigences du WLAN, de nouvelle génération (802.11 ax) en termes de haut débit et de garantie de QoS pour le trafic vidéo, un nouveau protocole OFDMA MAC est proposé dans cet article sous la dénomination CBQO (Channel Bonding based QoS-aware OFDMA). L'accès au canal multi-utilisateur et la transmission de données multi-utilisateur sont tous les deux mis en œuvre dans ce le protocole, ce qui signifie qu'un certain nombre de stations pourraient accéder au réseau (en envoyant des paquets de demande de transmission améliorée (E-RTS) à l'AP) et transmettre des paquets de données simultanément sur différents sous-canaux.

Le fonctionnement du protocole est résumé en trois phases (figure 2.10), à savoir, la phase d'accès au canal, la phase d'allocation des ressources et la phase de transmission et d'acquiescement.

Phase d'accès au canal : Dans cette phase une STA transmet une (des) trame (s) E-RTS (Enhanced RTS), qui représente une nouvelle structure par rapport à RTS contenant le type de trafic et les besoins en ressources de la STA, sur des sous-canaux sélectionnés au hasard vers l'AP pour demander une opportunité de transmission. Pour être plus précis, pour une station de trafic en Background, il sélectionne au hasard un canal parmi les canaux liés et envoyer un paquet E-RTS à l'AP mais pour une station de trafic vidéo, il adopte un mécanisme d'accès redondant pour améliorer le taux de réussite d'accès.

Phase d'allocation de ressource Dans la phase d'allocation de ressources, l'AP alloue les sous-canaux pour les stations dont les paquets E-RTS ont été reçus avec succès selon un algorithme d'allocation de ressource basé sur la priorité.

Après l'exécution de cet algorithme, l'AP place les résultats d'allocation de chaque station, et le temps de transmission maximal calculé par l'algorithme dans des champs correspondants d'un paquet (E-CTS)(Enhanced CTS). Ensuite, le paquet E-CTS est répliqué $k-1$ fois et transmis sur tous les canaux (primaire ou non primaire).

Phase de transmission et d'acquiescement Après la réception des paquets E-CTS, chaque STA (qui a envoyé des paquets E-RTS) vérifie si l'AP lui a alloué des unités de ressource. Si la station s'est vue attribuer une ressource de sous-canal, elle agrège les paquets de données en fonction du résultat d'allocation de ressource et transmet les paquets agrégés sur les sous-canaux alloués. Sinon, si la station n'a pas reçu de source de sous-canal allouée, elle double la fenêtre de contention et effectue une nouvelle procédure CBQO, car la transmission du paquet E-RTS a échoué ou le paquet E-RTS est ignoré par l'AP en raison de l'algorithme d'allocation de ressources.

L'AP reçoit plusieurs paquets agrégés de tous les sous-canaux et vérifie l'exactitude de tous les paquets. Après cela, il génère un paquet E-ACK (Enhanced-ACK) et met les résultats de transmission dans ce paquet. Ensuite, le paquet E-ACK est répliqué $k - 1$ fois et transmis sur tous les canaux (primaire ou non).

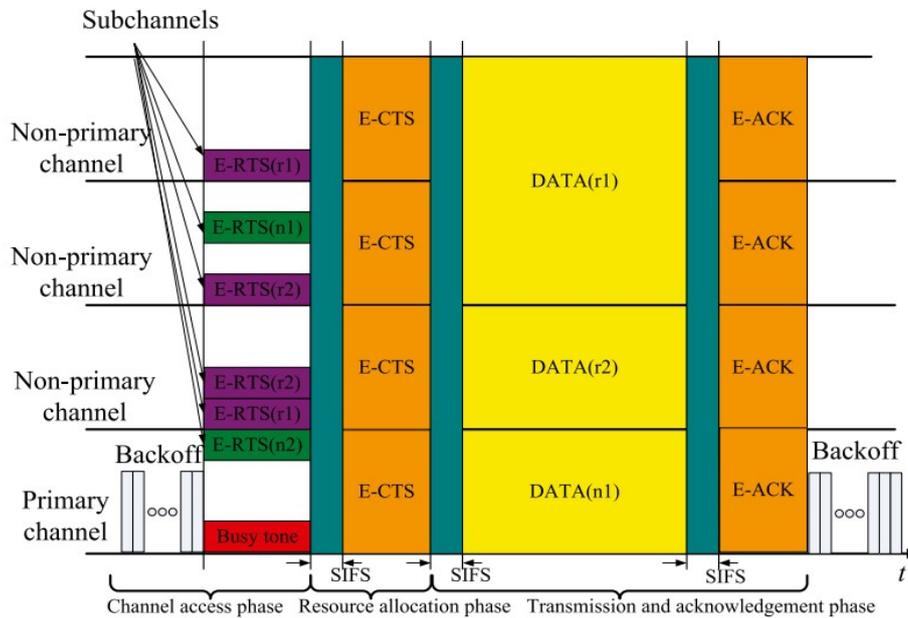


FIGURE 2.10 – Fonctionnement du protocole CBQO

En comparant le protocole MAC utilisé pour 802.11ac et le protocole CBQO (figure 2.11), les auteurs constatent que sur la base du protocole MAC IEEE 802.11ac, une seule station peut accéder au réseau et transmettre des paquets de données à un moment donné. Cependant, plusieurs stations pourraient accéder au réseau et transmettre leurs paquets de données simultanément sur différents sous-canaux dans le protocole CBQO avec une faible surcharge et une faible probabilité de collision, et un débit remarquablement amélioré. De plus la garantie de qualité de service du trafic vidéo qui est obtenue par le mécanisme d'accès redondant dans la phase d'accès au canal et l'algorithme d'allocation de ressources dans la phase d'allocation de ressources.

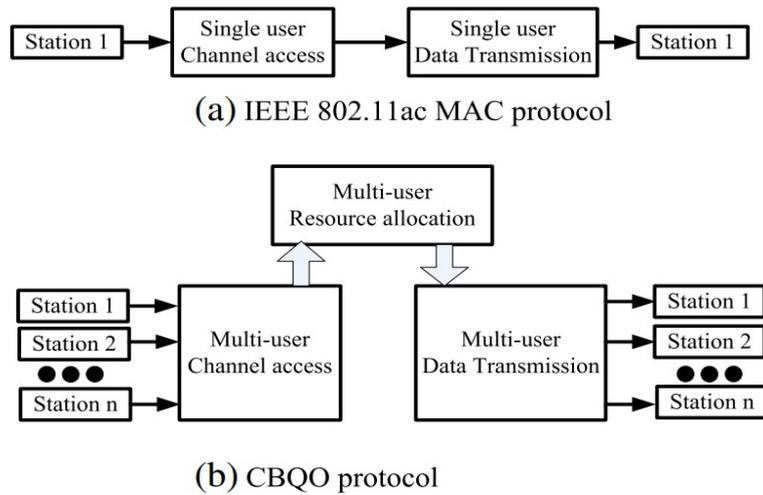


FIGURE 2.11 – Comparaison entre le protocole MAC IEEE 802.11ac et CBQO

Karthik R.M (2018) [30]

L'auteur Kathrik R.M 11ax propose un algorithme d'ordonnancement (OFDMASCH : OFDMA Scheduling) (FIGURE 2.12) dans un système OFDMA pour les réseaux IEEE 802.11ax en utilisant l'adaptation d'accès EDCA IEEE 802.11e. La QoS est réalisée avec l'introduction des catégories d'accès (AC) et de plusieurs entités backoff indépendantes.

L'allocation des unités de ressource (RUs) dans cet algorithme est réalisé en fonction des exigences des STAs, et elle est basé sur les valeurs de la fenêtre de contention (CW) et un RU limit pour chaque STA. Le RU limit représente le nombre de RU à 26 tonalités qui peuvent être allouées de manière contiguë à une STA donnée en un seul passage par l'algorithme d'allocation. Les RUs sont attribués par l'AP au différentes STAs au sein des PPDU particuliers.

```

1: procedure FIRST( $I, R, QoS$ )           ▷ First Stage
2:    $CW_i \leftarrow CW_{\text{initial}}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, I$ 
3:    $RU_{\text{limit}} \leftarrow R_{\frac{r}{|r|}}$ 
4:   Determine  $P$ .
5: end procedure
6: procedure SECOND( $P, r_i$ )           ▷ Second Stage
7:    $rem_i \leftarrow r_i, RU_i, RD_i \leftarrow 0, \forall i, \text{tot} \leftarrow 0$ 
8:   Generate  $\mathbf{C} = I \times R$  matrix of channel gains
9:   for  $t = 1 : PDU$  do
10:    Determine the set  $S$ .
11:    while  $\text{total} < R$  do
12:     if  $rem_i = 0, \forall i$  then
13:      Break;
14:     end if
15:     for  $i^* = 1 : |S|$  do
16:      Pick STA  $i^*$  and  $r_{i^*}$ .
17:       $\text{mini} \leftarrow \min(rem_{i^*}, RU_{\text{limit}}^{(i^*)})$ 
18:      if  $(\text{tot} + \text{mini}) > R$  then
19:        $RU_{i^*} \leftarrow \min(\text{tot} + \text{mini} - R, R - \text{tot})$ .
20:      else
21:        $RU_{i^*} \leftarrow \text{mini}$ .
22:      end if
23:       $RD_{i^*} \leftarrow RD_{i^*} + RU_{i^*}$ 
24:       $\text{tot} \leftarrow \text{tot} + RU_{i^*}$ .
25:       $rem_{i^*} \leftarrow rem_{i^*} - RU_{i^*}$ .
26:     end for
27:    end while
28:     $CW_i \leftarrow \max(CW_i + RU_i - t * R, 0) \forall i$ .
29:     $t = 0$ ;
30:    while  $t < \sum_i RU_i$  do
31:     Determine random permutation of STAs.
32:      $RA_i \leftarrow \sum_{r=t+1}^{RD_i+t} \mathbf{C}(i, r)$ 
33:      $t \leftarrow RD_i + t$ 
34:    end while
35:     $r_i \leftarrow r_i - RA_i, \forall i$ 
36:  end for
37: end procedure

```

FIGURE 2.12 – Algorithme OFDMASCH

Run Zhou, Bo Li, MaoYang (2019) [26]

La manière de garantir les exigences de QoS des trafics à haute priorité est l'une des cibles majeures du WLAN de nouvelle génération tel que 802.11ax. Le mécanisme OFDMA a été introduit en tant que technologie clé. Cependant, les protocoles MAC basés sur cette technologie accordent moins d'attention à QoS et à l'équité garanties. Pour cela les auteurs **Run Zhou, Bo Li et MaoYang** proposent dans cet article un protocole OFDMA MAC à double accès aléatoire orienté QoS, nommé DRA-OFDMA dans la liaison montante (UL)(figure 2.13). Le trafic des utilisateurs dans cette méthode est subdivisé en deux catégories : le Trafic a haute priorité (trafic temps réel, tel que le trafic voix et vidéo) qui nécessite des exigences de QoS plus élevées telles que le délai de transmission ,et le trafic de faible priorité (Background) qui nécessite des exigences de faible QoS, de sorte qu'il peut tolérer certains délais de transmission.

La conception du protocole est principalement divisée en trois phases comme suit.

Phase d'accès aléatoire Tous les utilisateurs du BSS qu'ont des données à envoyer adoptent la méthode DCF traditionnelle et effectuent le processus de backoff. Une fois backoff terminé, un sous-canal est sélectionné par STAs de manière aléatoire et indépendante pour la transmission d'une trame BSR (Buffer State Report) de chaque STA.

Phase d'allocation de ressource Lorsque la première phase d'accès aléatoire termine, et les trames

BSR envoyées à partir de plusieurs STAs sur le sous-canal sont reçues par l’AP avec succès. Les STAs, qui sont des utilisateurs vidéo ou des utilisateurs Background, sont traités de la même manière et le même nombre de ressources de sous-canaux leur sont allouées par l’AP afin d’assurer l’équité. Après l’allocation des sous-canaux, l’AP génère une trame de déclenchement TF contient les informations d’allocation de ressources tel que le temps de transmission calculé, les adresses des utilisateurs (STA) et les résultats d’allocation de sous-canaux de la liaison montante, et après une durée SIFS, AP diffuse la TF sur tout le canal. Tous les utilisateurs de UL qui ont envoyés des trames BSR reçoivent cette trame. Tout d’abord, chaque STA vérifie si sa propre adresse est contenue dans le champ d’adresse de la trame. Si elle porte l’adresse, l’utilisateur obtient son propre sous-canal en fonction du résultat de d’allocation de sous-canal de la trame TF. Sinon, le premier accès aléatoire échoue.

2em Phase d’accès aléatoire et transmission de données

Sur la base des informations d’allocation de sous-canal dans la trame TF, les STA qui sont obtenus dans le premier accès aléatoire transmettent avec succès leurs données sur le sous-canal spécifié après le temps SIFS. Pour les STA qui échouent dans le premier accès aléatoire, si le trafic de la STA est un trafic Background, la transmission en cours échouera, en attendant le cycle suivant. Si le STA est une station de trafic vidéo et qu’il reste plusieurs sous-canaux disponibles après l’allocation des ressources, un deuxième accès aléatoire est effectué. Ainsi, un sous-canal est sélectionné au hasard indépendamment du sous-canal résiduel disponible et les données sont transmises après le temps SIFS. Une fois que l’AP reçoit les paquets de données des différentes STAs, il vérifie si les paquets sont corrects selon les champs de contrôle, et écrit les résultats dans les champs correspondants de la trame d’accusé de réception (MBA : Multi-STA Block Acknowledgment). L’AP diffuse la trame MBA sur tout le canal après avoir attendu un temps SIFS et chaque STA qui reçoit la trame MBA vérifie si son propre paquet de données est transmis avec succès, voir la figure (2.13).[26]

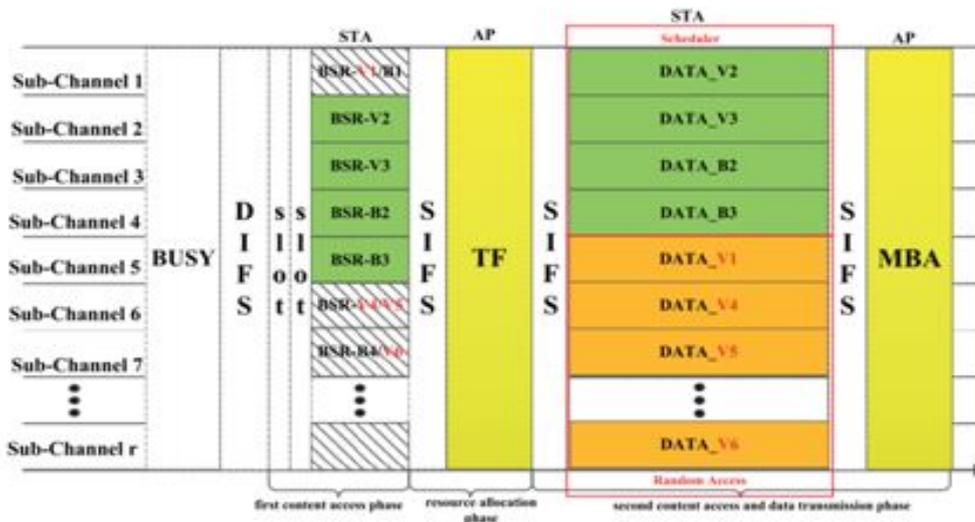


FIGURE 2.13 – Fonctionnement du protocole DR-OFDMA

Les résultats de simulation de ce protocole montrent que par rapport aux autres protocoles déjà proposés (RA-OFDMA [25], OMAX [27]), le débit du trafic vidéo est augmenté de 22,05 % et 89,6 % respectivement et le débit du système est augmenté de 47,39% et 14,53 % respectivement, ainsi que l'équité du trafic de faible priorité est également bien garantie .

K.Abdelalim, G.Redieteb, S.DestouetRoblot, K.Amis (2019) [9]

L'acquittement groupé des trames de données par le biais du bloc d'acquittement (BA) proposé dans 802.11e a permis l'amélioration de l'efficacité des transmissions au sein des réseaux sans fil avec une meilleure QoS comparé à l'acquittement basique (ACK). Néanmoins, le mécanisme BA intègre plusieurs trames de gestion qui peuvent encombrer le réseau notamment en environnement dense provoquant ainsi une latence des transmissions.

Afin de minimiser cette congestion et améliorer à la fois le débit et le retard de transmission, les auteurs **K.Abdelalim, G.Redieteb, S.DestouetRoblot, K.Amis**, ont proposés dans cet article une nouvelle méthode de négociation adaptative de la session d'acquittement par bloc appelé AN-BA (adaptive negotiation of the block acknowledgment session) dans le réseau 802.11ax. Il s'agit d'une optimisation de mécanisme BA qui permet le remplacement des trames de négociation (ADDBA Request/Response, DELBA) par deux bits de contrôle, notés b_1 et b_0 du côté de l'initiateur et b'_1 et b'_0 du côté du destinataire. Insérés au niveau des QoS Data (pour les premiers), et les trames BA ou ACK (pour les seconds). L'information d'établissement de session BA, de configuration de la taille maximale du buffer ou de clôture de session est signalée par ces bits. L'AN-BA repose également comme le BA sur trois phases.

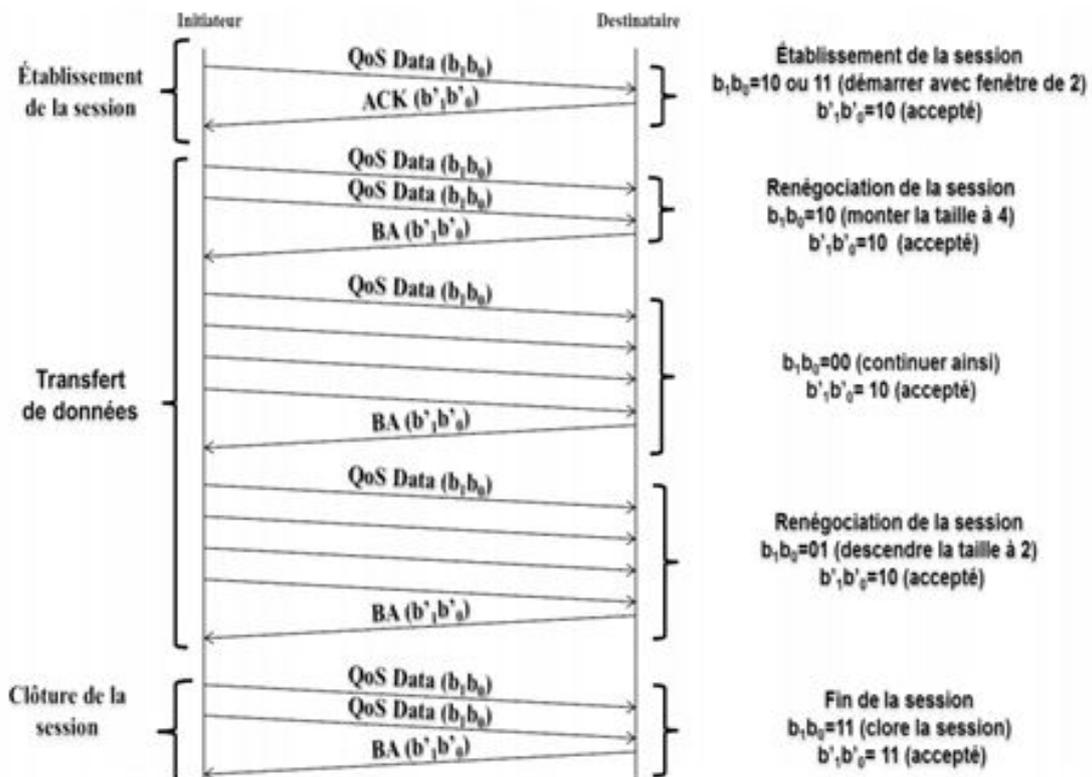


FIGURE 2.14 – Exemple d'établissement de la session d'acquittement par bloc sous l'AN-BA

La simulation d'un réseau utilisant l'AN-BA montre qu'il est plus performant en termes de débit et de délai de transmission qu'un réseau utilisant le BA classique.

Mahmudul Hasan et Mohammad Arifuzzar (2019)[28]

Ce travail a pour but l'amélioration de la QoS dans le réseau 802.11ax pour supporter les différents types de trafic vidéo UHD, 4K, 8K, un meilleur rapport de livraison de paquets, minimiser la latence et augmenter le débit, en proposant un nouveau mécanisme AVAQ-EDCA (Additional Video Access Queue Based EDCA) qu'est une extension de la méthode EDCA conventionnel apporté par la norme IEEE 802.11e.

L'idée principale de cette proposition; est lorsque différents types de trafic vidéo sur le réseau souhaitent accéder au canal en même temps, plusieurs fils d'attente seront fournis pour la transmission, et la priorité d'accès sera donnée au trafic vidéo 8UHD par rapport aux autres trafics vidéo.

Pour cela, les auteurs proposent un algorithme de planification simple, (figure 2.15) pour traiter le trafic vidéo différentiel.

Algorithm 1: Multi queue video transmission algorithm

Let φ_k , φ_d and φ_i represents the Queue for AC_KVI, AC_DVI and AC_VI.

1. Check φ_k , φ_d , φ_i for frames
2. If $\varphi_k \neq 0$ then
3. $frame = \varphi_k.pop()$
4. $transmit \leftarrow frame(\varphi_k)$
5. else if $\varphi_d \neq 0$ then
6. $frame = \varphi_d.pop()$
7. $transmit \leftarrow frame$
8. else if $\varphi_i \neq 0$ then
9. $frame = \varphi_i.pop()$
10. $transmit \leftarrow frame$
11. end if
12. end if
13. end if

FIGURE 2.15 – Algorithme de transmission vidéo multi files d'attente

Ce mécanisme définit sept (7) catégories d'accès (ACs), pour la voix : voix alternative (A VO) et voix (VO), pour le trafic vidéo : vidéo 4K / 8K / UDH (KVI), vidéo HD (DVI) et vidéo basse résolution (VI), pour le trafic Background et pour le trafic Best Effort. En utilisant 4 EDCAF avec leurs propres valeurs CW pour les 7 types de ACs.

Chaque AC est caractérisé par une file d'attente propre à elle et une valeur de priorité différente. Un exemple fonctionnel de AVAQ-EDCA est décrit ci-dessous (figure 2.16)

La table 2.2 résume toutes les catégories d'accès de la méthode AVAQ-EDCA

UP	Catégorie d'accès	Désignation
1	AC_BK	Background
2	AC_BK	Background
0	AC_BE	Best Effort
3	AC_VI	Video (Low Res)
4	AC_DVI	Video (HD)
5	AC_KVI	Video 4H/8K
6	AC_VO	Voice
7	A_VO	Alternate Voice

TABLE 2.2 – Catégories d'accès de la méthode AVAQ-EDCA .

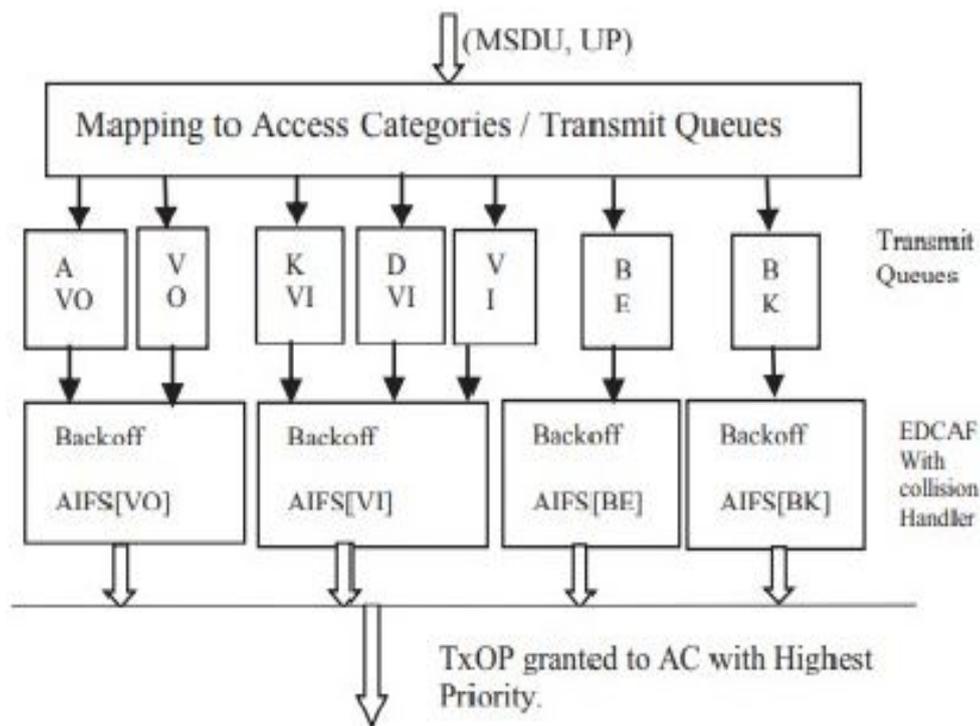


FIGURE 2.16 – Exemple de compétition interne en mode AVAQ-EDCA

Le résultat de la simulation présenté dans cet article pour l'analyse des performances du protocole AVAQ-EDCA proposé par rapport à IEEE 802.11e EDCA et à l'un des récents algorithmes RWCBSA basés sur 802.11a en utilisant le simulateur ns3, montre que méthode AVAQ-EDCA fonctionne très bien pour les réseaux a fort trafic.

B.Palit, SS.Das, Y.Kamavaram (2020) [29]

Dans l'OFDMA, le spectre disponible est divisé en orthogonal unités de ressources (RU) temps-fréquence attribués aux utilisateurs à l'aide d'algorithmes d'ordonnement de paquets, contrôlés par une entité centrale (AP). Une conception efficace de ces algorithmes est impérative pour augmenter la capacité, améliorer la QoS, et minimiser le gaspillage des ressources. Des efforts de recherche importants ont été consacrés à la conception de ces algorithmes. Cependant, très peu de travaux se sont concentrés sur l'évaluation des performances des algorithmes d'ordonnement.

Le travail effectué dans cet article de **B.Palit, SS.Das, Y.Kamavaram** est le développement d'un cadre mathématique basé sur la théorie des files d'attente pour évaluer les métriques de QoS d'un planificateur de paquets à priorité préemptive, dans un réseau multi-ressources de type OFDMA (802.11ax par exemple). Ces métriques dérivées par Continuous Time Markov Chain (CTMC) du système de mise en file d'attente sont utilisées ensuite pour calculer la capacité contrainte de la QoS et contrôler l'admission des utilisateurs dans le système. Deux classes d'utilisateurs sont pris en considération en fonction de leurs besoins en ressources : des utilisateurs principales (PUs) et des utilisateurs secondaires (Sus). Les transmissions SU ne doivent pas interférer avec les PU. Ainsi, les PU bénéficient d'une priorité préventive sur les SU. Les contributions majeures de cet article sont donc :

1. En considérant des tampons de longueur finie, ils dérivent un état CTMC d'un système d'ordonnancement de priorité préemptive et résolvent ses équations d'état stationnaire pour dériver des métriques de QoS, telles que la probabilité de retard de paquet, le délai moyen de paquet, la probabilité d'abandon de paquet, le débit moyen, et probabilité d'empton.

2. Ils utilisent les métriques QoS dérivées en (2) pour déterminer la capacité limitée par la qualité de service du système en termes de nombre maximal d'appels acheminés. Ensuite la capacité dérivée est utilisée pour concevoir une unité de contrôle d'admission.

D.G. Filoso, R. Kubo, K. Hara, S. Tamaki, K. Minami, and K. Tsuji (2020) [22]

Cet article présente un nouvel ordonnanceur d'allocation des RUs pour la planification des accès dans OFDMA. Il est basé sur un contrôleur nommé « closed-loop feedback controller with proportional gain » pour considérer simultanément la priorité et l'équité.

Le planificateur s'exécute dans l'AP et attribue des RUs aux flux de données de liaison montante (UL). Il utilise la quantité de données tamponnées de chaque STA et QoS des données comme entrées, en utilisant des trames de déclenchement appelées BSR (buffer status report) qui permettent d'informer l'AP sur ces informations.

Les simulations montrent que l'ordonnanceur proposé permet une allocation efficace des RU dans des conditions de réseau dense (802.11ax).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu la norme actuelle 802.11ac et ses différentes caractéristiques, ensuite nous avons fourni une vue générale sur la nouvelle norme 802.11ax et les principales améliorations apportées par cet amendement par rapport à ses précédents (802.11n et 802.11ac) telle que UL MU MIMO, QAM1024 et OFDMA, et à la fin nous avons étudié les travaux de recherches et les propositions existants spécifiques concernant l'amélioration de la QoS dans cette norme.

Le troisième chapitre et le dernier dans notre travail sera consacrer à définir la problématique ainsi qu'une proposition d'un pseudo algorithme pour le même but de garantie et d'amélioration de la QoS dans IEEE 802.11ax.

3.1 Introduction

Pour garantir une meilleure QoS dans les réseaux denses, autant de propositions sont apportées par les chercheurs afin d'améliorer les protocoles des couches PHY et MAC, une synthèse sur ces travaux est présentée dans le chapitre 2. A travers l'étude de ces différents travaux nous avons constaté que l'OFDMA représente la caractéristique principale de 802.11ax et que, le gain de cette technique dépend principalement de l'ordonnancement des ressources entre différents utilisateurs.

Dans ce chapitre, nous allons définir quelques limites des ordonnanceurs d'allocation de ressource proposé dans OFDMA en termes de garanti de la QoS, puis nous proposons un pseudo algorithme de planification tout en se basant sur les travaux présentés.

3.2 Problématique et motivation

Plusieurs travaux de la communauté scientifique ont été publiés, qui sont consacrés particulièrement pour assurer une meilleure QoS dans l'IEEE 802.11ax en proposant particulièrement des ordonnanceurs d'allocation efficace et des ressources pour l'OFDMA, dans des conditions de réseau dense et selon les besoins en QoS de chaque utilisateur.

Ces planificateurs doivent prendre en compte les flux de données multimédias, de l'état des buffers, de prendre en compte plusieurs flux destinés à un même utilisateur, d'adresser des objectifs sensibles aux délais et d'élaborer l'allocation très rapidement en utilisant des algorithmes non complexes.

Les problèmes de l'ordonnancement sont très variés, ils diffèrent d'un cas à un autre selon la nature des opérations, les caractéristiques des ressources, les contraintes portant sur les opérations, et les critères à optimiser. Dans le cas de l'ordonnanceur proposé dans [30], l'algorithme d'ordonnancement est complexe, ce qui peut engendrer un retard de transmission à cause de l'allocation tardive des ressources pour les utilisateurs, et un coût élevé en termes de la bande passante, et ça représente une limitation de QoS, et pour la proposition dans [22], la méthode d'ordonnancement efficace en termes de délai et de débit et permet l'équité entre les utilisateurs, par conséquent cette méthode représente un cadre mathématique sans implémentation réelle.

3.3 Proposition

Afin de répondre à la problématique citée auparavant, dans cette partie nous proposons un algorithme simple d'ordonnancement des ressources qui permet d'assurer une latence de transmission, et la maximisation du débit de donnée avec un gain proportionnel tout en respectant les contraintes de QoS des différents utilisateurs, cet algorithme est nommé ScP_OFDMA (scheduler with proportional gain OFDMA).

Notre but par le développement de ce dernier est de faire face à la limite de l'algorithme proposé dans [30] tout en suivant la méthode d'ordonnancement basé sur le contrôleur « closed-loop feedback controller » proposé dans [22].

3.4 Description de la proposition

L'algorithme ScP-OFDMA proposé dans ce mémoire est basé sur une nouvelle approche pour l'IEEE 802.11ax. C'est un algorithme qui attribue des RUs entre tous les STAs connectées à l'AP dans le but d'avoir une communication plus efficace. Il s'exécute dans l'AP et attribue des RUs aux flux de données de liaison montante (UL). Il utilise la quantité de données tamponnée de chaque STA et QoS des données comme entrées.

3.4.1 Considération de système

Certaines considérations sont définies dans ce système d'ordonnancement :

- Dans IEEE 802.11ax, les RUs sont attribuées à un utilisateur, et c'est la taille ou le nombre de tonalités de la RUs qui change. Cependant, pour l'ordonnanceur, le nombre d'RUs disponibles a été considéré comme égal au nombre d'RU à 26 tonalités disponibles.
Après le calcul du nombre de RUs attribuées à un utilisateur, le nombre sélectionné tiendra compte de la taille des RUs. Par exemple, si un utilisateur est affecté à 2 RU, pour IEEE 802.11ax, cela signifie une attribution d'une RU de 52 tonalités.
- La valeur QoS de chaque flux de données peut changer au fil du temps, car un périphérique peut changer le type de données qu'il envoie. Les valeurs possibles de QoS sont définies dans la table 3.1 [22].

Propriété	Type de trafic
1	Requête de sondage (diffusé par chaque station sur canal en indiquant les débits supportés par son adaptateur sans fil)
2	Voix, Vidéo (live Streaming), jeux interactifs
3	Vidéo (Streaming tamponné)
4	Application internet
5	Indicateur de qualité de canal (CQI)

TABLE 3.1 – Valeurs de QoS possible.

- Chaque flux de données est modélisé comme une file d'attente pour le planificateur.

- Chaque fois qu'une RU est affectée à un flux de données, la durée totale de la fenêtre temporelle (TW) est utilisée.
- La même modulation et schéma de codage (MCS : modulation and coding scheme) (table 3.2), et la même bande passante du canal sont utilisés [22].

	MCS	26-tone	52-tone	106-tone	242-tones	484-tones	996-tones
1	BPSK, 1/2	0.8	1.7	3.5	8.1	16.3	34
2	QPSK, 1/2	1.7	3.3	7.1	16.3	32.5	68.1
3	QPSK, 3/4	2.5	5	10.6	24.4	48.8	102.1
4	16-QAM, 1/2	3.3	6.7	14.2	32.5	56	136.1
5	16-QAM, 3/4	5	10	21.3	48.8	97.5	204.2
6	64-QAM, 2/3	6.7	13.3	28.3	65	130	272.2
7	64-QAM, 3/4	7.5	15	31.9	73.1	146.3	306.3
8	64-QAM, 5/6	8.3	16.7	35.4	81.3	162.5	340.3
9	256-QAM, 3/4	10	20	42.5	97.5	195	408.3
10	256-QAM, 5/6	11.1	22.2	47.2	108.3	216.71	453.7
11	1024-QAM, 3/4	-	-	-	121.9	243.8	510.4
12	1024-QAM, 5/6	-	-	-	135.4	270.8	576.1

TABLE 3.2 – Débit de code en différent RUs sous chaque MCS en Mb/s.

3.4.2 Présentation de L'algorithme ScP-OFDMA et son fonctionnement

Le schéma fonctionnel de cet algorithme est défini sur la figure suivante :

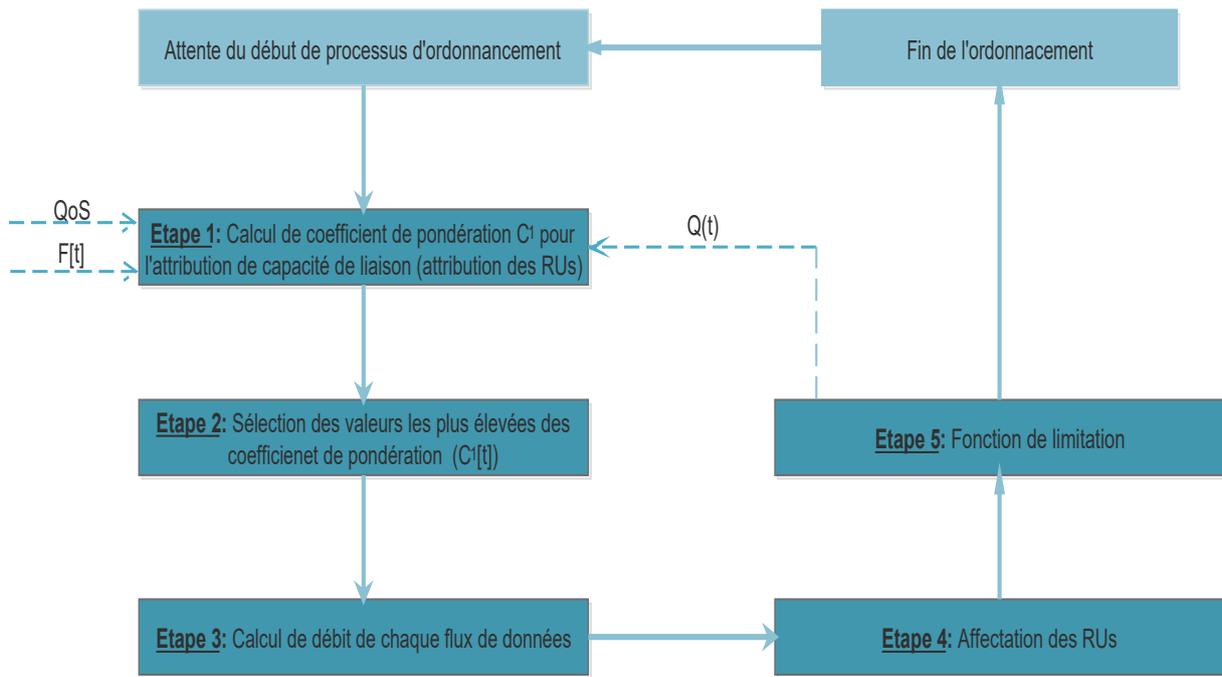


FIGURE 3.1 – Organigramme de fonctionnement de l’algorithme ScP-OFDMA

Notre algorithme est présenté ci-dessous (figure 3.2), et la définition des valeurs utilisées se trouve dans la table 3.3 :

Variable	Définition
t	Échantillon de temps
P	Gain proportionnel
$F[t]$	Longueur de la file d’attente
QoS	QoS
$C_1[t]$	Coefficient de pondération
$C_2[t]$	Coefficient de pondération le plus élevé
$A[t]$	Débit de données affecté
$S[t]$	Ru affecté
$L[t]$	Ru limité affecté
$D_v[t]$	Données envoyées
$D_t[t]$	Données entrantes
$Q[t]$	Coefficient d’équité
Rr_{u1}	Débit de donnée de Ru a 26 tonalités
T_w	Fenêtre temporelle

TABLE 3.3 – Définition des valeurs utilisées.

Algorithme 1 : Pseudo algorithme d'ordonnement de ressources (ScP-OFDMA)

```

1: Initialisé: QoS= {1,2,3,4,5}, i= {1, 2, ..., numSTA}, j= [1, 2, ..., N]
2: Pour chaque STA i faire
3:   Calculer les données tamponnées de chaque station
4:   La valeur de QoS
5:    $P=0.038 * \text{puissance} (QoS - Q, 2) - 0.424 (QoS - Q) + 1,38$ 
6:    $C_1 [t] == \text{Produit\_Hadamard} (F [t], P)$ 
7:    $C_2 [t] == \text{Selection\_function} ( C_1 [t], t, C_2 [t])$ 
8: Fin pour
9: pour chaque flux j faire
10:    $m == \text{somme} (1, N, C_2 [t])$ 
11:    $A[t] == (C_2 [t] / m) * R_T$ 
13:   Calcule de nombre de RUs affectés:  $S[t] = A[t] / R_{RU1} + 0.5$ 
14: Fin pour
15: Vérifier que la somme des RUs affectées < RUs disponibles :  $L(t) == \text{Limitation\_of\_the\_RU} (L(t), t, L(t))$ 
16: Pour chaque STA i faire
17:   Si ( $L_i [t] == 0$ ) faire
18:      $Q[t+1] = Q[t] + 1 / \text{numSTA}$ 
19:   Sinon
20:      $Q[t+1] = 0$ 
21:   Fin Si
22: Fin pour

```

FIGURE 3.2 – Pseudo algorithme d'ordonnement de ressources (ScP-OFDMA)

3.4.3 Fonctionnement de l'algorithme

Dans ce système, L'AP considère N flux de données et la durée de la fenêtre temporelle (TW) représente la période d'échantillonnage (t).

L'algorithme ScP-OFDMA définit cinq phases pour l'ordonnement des RUs qui sont décrites comme suit :

Étape 1 : L'attribution de la capacité de la liaison en utilisant le coefficient de pondération ($C_1[t]$) calculer à l'aide de produit de Hadamard [32], comme suit (3.1) :

$$C_1[t] = F[t] \cdot P \quad (3.1)$$

$F[t]$ représente la longueur de la file d'attente et P le gain proportionnel qui change en fonction de la valeur QoS pour chaque flux de données (3.2).

$$P_i = 0,038(QoS_i - Q_i)^2 - 0,424(QoS_i - Q_i) + 1,38 \quad (3.2)$$

Plus la valeur de QoS est faible, plus le flux de données aura une priorité élevée, suivant les valeurs du tableau (3.1). Les valeurs de $Q[t]$ (coefficient d'équité) réduisent la valeur de QoS, ce qui signifie l'augmentation de la priorité du flux de données, ces valeurs augmentent d'une unité une fois que ses

flux de données ne sont pas sélectionnés autant de fois que le nombre de STA (etape5).

Étape 2 : Pour effectuer une meilleure division proportionnelle de capacité, seules les valeurs les plus élevées des coefficients de pondération ($C1 [t]$) sont utilisées. Si non seulement les valeurs les plus élevées sont utilisées, la capacité pourrait être divisée par un grand nombre de flux de données et le résultat ne serait pas utile, car chaque flux de données n'obtiendrait qu'une petite partie de la capacité totale. Le nombre de valeurs les plus élevées utilisées est le même que celui des RUs disponibles. Si le nombre d'RUs disponibles est de neuf, seules les neuf valeurs les plus élevées des coefficients de pondération sont utilisées.

Un algorithme de sélection (*Selection_function*) est pris en compte pour avoir ces valeurs [22], la sortie de cet algorithme représente les coefficients de pondération les plus élevés .

Étape 3 : Les coefficients de pondération sont utilisés pour diviser la capacité disponible en utilisant la mise en file d'attente pondérée équitable (WFQ :weighted fair queuing) pour obtenir l'affectation du débit de données ($A [t]$) de chaque flux. WFQ est un mécanisme de mise en file d'attente utilisé pour diviser la capacité totale de la liaison en utilisant les coefficients de pondération. La valeur de RT est la capacité totale de la liaison dépend du MCS choisi et de la bande passante utilisée.

En prenant le tableau (3.2), la capacité totale (RT) de la liaison est définie. Par exemple, si le canal est 20 MHz et le MCS utilisé est 16-QAM, 3/4, la valeur de RT est 48,8 Mbps. En utilisant WFQ, le calcul du débit de données se fait comme suit (3.3) [22] :

$$A[t] = \frac{C_2[t]}{\sum_{i=1}^N C_{2i}[t]} R_t \quad (3.3)$$

Étape 4 : Après le calcul du débit de chaque flux de données, il est nécessaire de calculer l'équivalence dans le nombre de RUs, l'affectation RU ($S[t]$). En prenant le débit de données d'une RU à 26 tonalités (RRU1) et en divisant le débit de données qui lui est attribué, le nombre de RU pour chaque flux de données est calculé comme suit (3.4) [22] :

$$S[t] = \frac{A[t]}{R_{RU1}} + 0,5 \quad (3.4)$$

Étape 5 : L'affectation du nombre des RUs pour chaque flux de données ne peut pas être n'importe quel nombre. L'IEEE 802.11ax définit des groupes de 1 (26 tons), 2 (52 tons), 4 (106 tons) ou 9 (242 tons) RU pour un canal de 20 MHz. Au même temps, la somme de toutes les RUs ne peut pas être supérieure aux RUs disponibles, cette étape donc se charge donc de prendre les valeurs maximales calculées et de vérifier qu'elles ne sont pas supérieures au nombre d'RUs disponibles.

Un algorithme (*Limitation_of_the_RU*)[22] permet de créer un vecteur temporel et opère avec lui. Il utilise une boucle while qui dure jusqu'à ce que le nombre des RUs allouées sera inférieur ou égal au nombre des RUs disponibles.

Le vecteur $L [t]$ représente le résultat d'affectation, il dispose donc des informations sur la taille des RUs affectées pour chaque STA. La variable $Q_i [t]$ est la valeur d'équité de STA i , qui dépend de la valeur de $L_i [t]$ (la taille de RU affectée à STA i). La valeur du coefficient d'équité augmente d'une unité une fois que son flux de données n'est pas sélectionné autant de fois que le nombre de STA, numSTA (3.5).

$$Q_i[t + 1] = \begin{cases} Q_i[t] + \frac{1}{numSTA} & L_i[t] = 0 \\ 0 & L_i[t] \neq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

3.5 Conclusion

La fonctionnalité de planification des ressources radio est essentielle pour bénéficier des caractéristiques souhaitées, d'augmentation du débit effectif et de déterminisme et le garanti de QoS.

Ce dernier chapitre est focalisé sur l'ordonnancement des RUs dans le mécanisme OFDMA pour les réseaux 802.11ax, en proposant un pseudo algorithme permettant de faire cette planification efficacement tout en fournissant une QoS acceptable pour les utilisateurs.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous avons présenté les différentes avancées réalisées dans le groupe de travail IEEE 802.11. De nombreuses évaluations ont été apportées au standard par rapport à sa version d'origine lancée en 1997 sous les appellations IEEE 802.11 b/a/g/n/ac/ax. Les nouvelles extensions couvrent des problématiques très larges, allant de l'amélioration des débits physiques à une sécurité renforcée, en passant par une mise en place de QoS et une meilleure gestion de l'utilisation des ressources.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail plus précisément sur la dernière norme en cours de ratification, la norme IEEE 802.11ax dédiée aux réseaux denses, et l'amélioration de la QoS dans celle-ci. Cet amendement maintient une rétrocompatibilité avec les standards précédents, et il est adopté principalement pour le but de satisfaire les exigences des différents utilisateurs dans les zones en concentration (Aéroport, stade, immeubles d'habitation collective . . .), et d'assurer une fiabilité des performances pour les applications avancées telles que la vidéo 4K, 8k, la technologie UHD (Ultra-Haute Définition), l'Internet des objets (IoT).

Plusieurs nouvelles fonctionnalités ont été apportées par ce standard, parmi lesquelles la réutilisation spéciale, UL MU-MIMO, 1024-QAM et encore l'utilisation de la technique d'accès OFDMA, le standard a également conservé plusieurs mécanismes des amendements précédents (802.11n/ac). Ces améliorations ont permis d'atteindre de meilleurs débits en environnement dense.

L'OFDMA est l'un des plus importants mécanismes de l'IEEE 802.11ax qui permet d'utiliser efficacement les ressources spectrales, et cela grâce aux techniques d'ordonnancement des tonalités entre les utilisateurs, pour le but de bénéficier d'augmentation du débit effectif et de déterminisme et la garantie de QoS.

Pour cela, nous avons défini dans ce travail, le fonctionnement et les limites techniques liés à l'ordonnancement de ressources dans la méthode OFDMA en considérant les critères de QoS : délai, efficacité spectrale et débit, ensuite, nous avons proposé un algorithme de planification qui permet de résoudre ce problème.

Les perspectives qui découlent de ce travail sont les suivantes :

- Evaluer les performances de l'algorithme proposé (PS-OFDMA) que nous considérons comme un algorithme qui fait face au problème de planification de ressources avec garantie de QoS aux utilisateurs.

- Développer une méthode d'accès de la couche MAC afin de mieux répondre aux exigences de la QoS.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. Dridi. Spécification du protocole MAC pour les réseaux IEEE 802.11e à différenciation de services sous contrainte de mobilité. Thèse de doctorat. Université Paris-Est, 2011.
- [2] S. BISWAS et al. « Large-scale Measurements of Wireless Network Behavior » : SIGCOMM Comput. London, United Kingdom, ArticleAoût 2015 URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2829988.2787489>.
- [3] A. Géron. Wifi Professionnel : La norme 802.11, le déploiement, la sécurité. 3nd édition, Dunod, paris, 2009.
- [4] M. Yazid. Evaluation et optimisation des performances des réseaux locaux sansfil IEEE 802.11. Thèse de Doctorat. Univ-Bejaia, Algérie, 2015.
- [5] P. ATELIN. Réseaux sans fil 802.11 : Technologie - Déploiement – Sécurisation 2eme edition
- [6] K. Runser. Méthodologie pour la planification des réseaux locaux sans-fil. Thèse de doctorat. Institut National des Science Appliquées de Lyon, 2005
- [7] L. FEDOUA. Qualité de Service dans les réseaux locaux sans fil de type IEEE 802.1. Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2010.
- [8] D. Khaled. Spécification du protocole MAC pour les réseaux IEEE 802.11e à différenciation de services sous contrainte de mobilité, These doctorat, Université Paris Est, 2012
- [9] A. Géron. WiFi Professionnel : La norme 802.11, le déploiement, la sécurité. 3nd édition, Dunod, paris, 2009.
- [10] M. Yazid, A. Ksentini, L. Bouallouche-Medjkoune, and D. Aissani. Performance analysis of the TXOP sharing mechanism in the VHT IEEE 802.11 ac wlans. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2015)
- [11] C. SERVIN. Réseaux et Télécoms, DUNOD, Décembre. 2003.
- [12] M. Moktefi. Proposition et validation d'un protocole MAC pour les futures générations de réseaux WiFi. Mémoire de Magister en Informatique. Univ-Bejaia, Algérie, 2016.
- [13] I. Paudel. QoS provisioning in future wireless local area networks. Other [cs.OH]. Institut National des Télécommunications, 2015. English. ffNNT : 2015TELE0004ff. fftel-01217195f.
- [14] G. PUJOLLE. Les réseaux. 9e édition 2018-2020
- [15] R. V. Nee. Breaking the gigabit-per-second barrier with 802.11ac. IEEE Wireless Communications, 18 :4–4, 2011.

- [16] RUCKUS. 802.11ac : Very High Throughput, février. 2013
- [17] E. Charfi, L. Chaari, and L. Kamoun. Phy/mac enhancements and qos mechanisms for veryhigh throughput wlans. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15 :1714–1735,2013.
- [18] <https://www.ni.com/en-lb/innovations/white-papers/16/introduction-to-802-11ax-high-efficiency-wireless.html> consulté 20/07/2020
- [19] <https://www.generation-nt.com/wifi-802-11ax-evolution-description-caracteristiques-actualite-1941062.html> consulté le 17/07/2020
- [20] B. Bellalta. IEEE 802.11ax : High-efficiency WLANs. In *IEEE Wireless Communications*. (1536-1284), 2016.
- [21] M. Simon. La norme Wi-Fi 802.11ax accélère la communication dans les scénarios multiutilisateurs. *Technologies sans fil, ACTUALITÉS* 217/17.
- [22] D.G. Filoso, R. Kubo, K. Hara, S. Tamaki, K. Minami, and K. Tsuji. Proportional-based Resource Allocation Control with QoS Adaptation for IEEE 802.11ax. *Auckland University of Technology*, 978-1-7281-5089-5/20/ 31.00 ©2020 IEEE.
- [23] B.T. Vijay and B. Malarkodi. Quality of service improvements in IEEE 802.11ax wi-fi, Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirappalli, India 2018.
- [24] Q Qu, M. Yang, Bo Li. Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLAN Standard - IEEE 802.11ax, *Article in Mobile Networks and Applications* May 2019.
- [25] H. Zhou, B Li, Z-J Yan et al. A Channel Bonding Based QoS-Aware OFDMA MAC Protocol for the Next Generation WLAN. *Mobile Networks and Applications* DOI 10.1007/s11036-015-0670-8, 2016.
- [26] R. Zhou, Bo Li, Mao Yang. DRA-OFDMA : Double Random Access Based QoS Oriented OFDMA MAC Protocol for the Next Generation WLAN, *Mobile Networks and Applications* (2019) 24 :1425–1436,2019.
- [27] Q. Qu, Li B, Yang M, Yan Z-J. An OFDMA based concurrent multiuser MAC for upcoming IEEE 802.11ax. In : *Wireless communications and networking conference workshops (WCNCW)*, pp 136–141, 2015.
- [28] M. Hasan et M. Arifuzzar. AVAQ-EDCA : Additional Video Access Queue Based EDCA Technique for Dense IEEE 802.11 AX Networks) *International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)*, 11-12 July, 2019
- [29] B. Palit, S.S. Das, Y. Kamavaram. Multiple QoS provisioning with pre-emptive priority schedulers in multi-resource OFDMA networks *Wireless Networks* (2020) 26 :3451–3470.
- [30] R. M Karthik. Resource Unit (RU) based OFDMA Scheduling in IEEE 802.11ax system, 978-1-5386-5314-2/18/31.00, 2018.
- [31] M. Brahma. Etude de la QoS dans les réseaux ad hoc : intégration du concept de l'ingénierie du trafic. *Réseaux et télécommunications [cs.NI]*. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2006. Français. fftel-00132114f
- [32] <http://www.bibmath.net/dico/index.php?action=affiche&quoi=./p/produitschur.html> consulté le 09/09/2020

RÉSUMÉ

L'évolution des réseaux sans fil et leur utilisation soulève de plus en plus de défis. Cela est particulièrement vrai pour les environnements denses pour lesquels la performance par utilisateur est un problème clé. Le standard IEEE 802.11ax a été lancé dans ce contexte, afin d'améliorer les protocoles des couches PHY et MAC en maintenant la rétrocompatibilité avec les standards précédents, et qui permettra des débits très élevés et une utilisation efficace de spectre ainsi qu'une garantie de QoS pour répondre aux exigences des utilisateurs. Dans ce mémoire nous avons premièrement présenté un aperçu sur la norme IEEE 802.11, ensuite nous avons exposé les principaux défis et améliorations technologiques avancées dans l'amendement IEEE 802.11ax, et à la fin nous avons développé un pseudo-algorithme d'ordonnement des ressources pour le mécanisme OFDMA qui permet l'augmentation de l'efficacité spectrale et l'équité et la QoS dans le réseau.

Mots clés : WLAN, HEW, IEEE 802.11ax, QoS, OFDMA, QoS-aware scheduler.

ABSTRACT

The high growth of wireless applications brings greater challenges to wireless technologies and calls for more improvements and better efficiency. This is particularly true for dense environments for which per user performance is a key issue. IEEE 802.11ax amendment was launched in that context, to improve the PHY and MAC layer protocols of Wi-Fi networks in dense environments while maintaining backward compatibility with previous standards, which will enable very high data rates and efficient use of the spectrum as well as a QoS guarantee to meet users' requirements. In this thesis first of all we have presented an overview of the IEEE 802.11 standard, then we have exposed the main challenges and technological improvements advanced in the IEEE 802.11ax amendment, and finally we have developed a pseudo resource scheduling algorithm for the OFDMA mechanism which allows the increase of spectral efficiency, equity and QoS in the network.

key words : WLAN, HEW, IEEE 802.11ax, QoS, OFDMA, QoS-aware scheduler.