

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

---

Proposition d'un protocole de  
communication multi-utilisateurs dans les  
réseaux WLAN à haute efficacité

---

Présenté par : M<sup>lle</sup> MOUZAIA Fadila

Devant le jury composé de :

Président	M. MOKTEFI	Mohand MAA	U. A/Mira Béjaia.
Rapporteurs	M. YAZID	Mohand MCA	U. A/Mira Béjaia.
	M <sup>lle</sup> BRAHMI	Saloua Doctorante	U. A/Mira Béjaia.
Examinatrice	M <sup>lle</sup> MAMMERI	Souhila MCB	U. A/Mira Béjaia.

Promotion 2021/2022.

---

## - Remerciements -

*Je tiens à remercier en premier lieu DIEU le tout puissant, pour ses faveurs et ses grâces, et de m'avoir donné le courage, la santé et la patience d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Mes plus profonds remerciements vont à mes parents. Pour leur soutien et encouragements tout au long de mon cursus.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de M. YAZID Mohand et M<sup>lle</sup> Brahmi Saloua qui m'ont permis de bénéficier de la qualité de leur encadrement. Je les remercie très chaleureusement pour les judicieux conseils qu'ils m'ont prodigués et qui ont contribué à l'alimentation de ma réflexion, je les remercie également pour leur rigueur et leur disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

*Je tiens à remercier également l'ensemble des membres du jury pour avoir examiné ce travail. Je voudrai exprimer ma reconnaissance envers mes amis proches qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de mon démarche.*

---

## *- Dedicaces -*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :*

### *A mes chers parents*

*Pour tous leurs sacrifices, leur patience, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études*

### *A mes chères sœurs*

*Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral*

### *A mon cher frère*

*Qu'ils puissent trouver dans ce modeste mémoire l'expression de mon attachement et de ma profonde reconnaissance*

### *A toute la famille et à tous mes chers amis*

*Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de mon profond respect et reconnaissance*

# Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iii
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
<b>1 Réseaux sans fils et le standard IEEE 802.11</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation des réseaux sans fil	3
1.2.1 Transmission par les ondes infrarouges	3
1.2.2 Transmission par les ondes radios	4
1.2.3 Intérêts et problèmes des réseaux sans-fil	4
1.2.4 Les différentes catégories de réseaux sans fil	5
1.3 Présentation du standard IEEE 802.11	6
1.3.1 Les caractéristiques d'IEEE 802.11	6
1.3.2 L'architecture d'IEEE 802.11	6
1.4 Principe de fonctionnement du standard IEEE 802.11	8
1.4.1 La couche physique	9
1.4.2 La couche MAC	12
1.5 Évolutions principales de la norme IEEE 802.11	17
1.6 IEEE 802.11e (QoS)	18
1.6.1 Limitations de QoS de la couche MAC 802.11	19
1.6.2 Architecture de la couche MAC 802.11e	19
1.6.3 La méthode EDCA	20
1.6.4 Le mécanisme EDCA dans IEEE 802.11e	22
1.6.5 La méthode HCF Controlled Channel Accès	23
1.7 IEEE 802.11n	23
1.7.1 E/S multicanaux (MIMO)	23
1.7.2 Agrégation de trames	24
1.7.3 Accusé de réception de bloc (BA)	25
1.8 IEEE 802.11ac	26
1.8.1 Modulation d'ordre supérieure 256-QAM	26
1.8.2 Technique Multi-User MIMO (MU-MIMO) et le DL MU-MIMO	26
1.8.3 BeamForming	27

1.8.4	Agrégation de trames . . . . .	28
1.8.5	TXOP Sharing . . . . .	28
1.9	Conclusion . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Présentation de la norme IEEE 802.11ax</b>	<b>30</b>
2.1	introduction . . . . .	30
2.2	La norme 802.11ax . . . . .	30
2.2.1	OFDMA . . . . .	31
2.2.2	DL et UL OFDMA . . . . .	32
2.3	Technologie DL/UL MU-MIMO . . . . .	34
2.3.1	OFDMA VS MU-MIMO . . . . .	35
2.4	Réutilisation spatiale . . . . .	35
2.4.1	BSS color . . . . .	35
2.5	modulation d'ordre supérieur (1024-QAM) . . . . .	36
2.6	Nouveaux formats PPDU . . . . .	36
2.7	Target Wake Time (TWT) — économie d'énergie . . . . .	38
2.8	Synthèse sur les travaux OFDMA . . . . .	38
2.9	Problématique . . . . .	42
2.10	conclusion . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Proposition et évaluation de performances</b>	<b>44</b>
3.1	Introduction . . . . .	44
3.2	Proposition . . . . .	44
3.3	Les Paramètres de simulation . . . . .	45
3.4	Résultats de simulation . . . . .	46
3.4.1	Débit UL . . . . .	46
3.4.2	Taux de perte en bits de bourrage . . . . .	47
3.5	Conclusion . . . . .	47
	<b>Conclusion générale</b>	<b>48</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>49</b>

# Table des figures

1.1	Techniques des ondes infrarouges. . . . .	4
1.2	Domaines d'applications des ondes radios. . . . .	4
1.3	Les catégories de réseaux sans fil. . . . .	5
1.4	Mode infrastructure. . . . .	7
1.5	Architecture de réseau wifi en mode infrastructure. . . . .	7
1.6	Mode ad-hoc. . . . .	8
1.7	Modèle en couche de la norme 802.11. . . . .	9
1.8	Étalement de spectre par saute de fréquence. . . . .	10
1.9	Récapitulatif de l'architecture des couches physiques IEEE 802.11. . . . .	11
1.10	Accès au canal en mode DCF. . . . .	14
1.11	Problème de la station cachée (hidden node problem) [24]. . . . .	14
1.12	Transmission en utilisant les trames RTS/CTS. . . . .	15
1.13	Alternance des modes PCF et DCF. . . . .	16
1.14	Architecture MAC d'IEEE 802.11e. . . . .	19
1.15	Modèle d'implémentation de référence d'EDCA. . . . .	21
1.16	Priorité du trafic basée sur AIFS. . . . .	22
1.17	Flux simultanés dépendant de nombre d'antennes. . . . .	24
1.18	Un niveau d'agrégation de trames A-MSDU et A-MPDU. . . . .	25
1.19	Différence entre transmission SU MIMO et MU MIMO. . . . .	27
1.20	fonctionnement de la technologie BeamForming. . . . .	27
1.21	illustration du mécanisme TXOP sharing. . . . .	28
2.1	Allocations de RUs en utilisant OFDM et OFDMA. . . . .	31
2.2	Positions des RUs dans la bande passante de 20 MHz. . . . .	32
2.3	Le processus du DL-OFDMA. . . . .	32
2.4	Le processus du UL-OFDMA. . . . .	33
2.5	MU DL OFDMA et MU UL OFDMA dans les WLANs. . . . .	34
2.6	Utilisation de BSS Coloring entre deux points d'accès avec 802.11ax. . . . .	35
2.7	Différence 256/1024 QAM par symbole. . . . .	36
2.8	HE PPDU formats. . . . .	37
2.9	Le champ HE-SIG-B. . . . .	38
2.10	Procédure OMAX. . . . .	39
2.11	Protocole H-MAC. . . . .	40
2.12	Fonctionnement du protocole DRA-OFDMA. . . . .	41
2.13	La procédure de transmission UL. . . . .	42
3.1	Protocole UE-RUs. . . . .	45
3.2	Débit UL . . . . .	46

3.3 Taux de perte en bits de bourrage. . . . . 47

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les deux bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz. . . . .	12
1.2	La différence entre PCF et DCF. . . . .	16
1.3	Dimensions des performances Qos de l'application . . . . .	18
1.4	Relation entre les priorités et les catégories d'accès dans EDCA. . . . .	20
1.5	Valeurs standard des paramètres EDCA. . . . .	21
2.1	Comparaison entre OFDMA et MU-MIMO. . . . .	35
3.1	Paramètres de simulation . . . . .	45



# Liste des abréviations

- A-MPDU** Aggregate MAC Protocol Data Unit.  
**A-MSDU** Aggregate MAC Service Data Unit.  
**AC** Access Category.  
**ACK** Acknowledgement.  
**AIFS** Arbitration IFS.  
**AIFSN** Arbitration IFS Number.  
**AP** Access Point.
- BA** Block Acknowledgment.  
**BSR** Buffer Status Report.  
**BSRP** BSR Poll.  
**BSS** Basic Service Set.  
**BSSID** Basic Service Set Identifier.
- CCK** Complementary Code Keying.  
**CFP** Contention Free Period.  
**CP** Contention Period.  
**CRU** Clear-to-Receive-with-UL-request.  
**CSMA/CA** Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance.  
**CTS** Clear To Send.  
**CW** Contention Windows.
- DCF** Distributed Coordination Function.  
**DIFS** DCF Inter-Frame Spacing.  
**DL** Down-Link.  
**DRA-OFDMA** Double Random Access Based QoS Oriented OFDMA.  
**DS** Distribution Systems.  
**DSSS** Direct-Sequence Spread Spectrum.
- EDCA** Enhanced Distributed Channel Access.  
**EDCAF** EDCA Function.  
**ESS** Extentend Service Set.  
**ESSID** Extentend Service Set Identifier.

- FDM** Frequency Division Multiplexing.
- FHSS** Frequency-Hopping Spread Spectrum.
- GPRS** General Packet Radio Service.
- GSM** Global System for Mobile Communications.
- HCCA** HCF-Controlled Channel Access.
- HCF** Hybrid Coordination Function.
- HEW** High-Efficiency WLAN.
- HiTRAS** High Throughput Resource Unit Assignment.
- HMAC** Hybrid MAC.
- HR** High Rate.
- IBSS** Independent Basic Service Set.
- IEEE** Institute of Electrical and Electronics for Engineers.
- IFS** Inter Frame Spacing.
- LLC** Logical Link Control.
- MAC** Medium Access Control.
- MBA** Multi-sta Block Acknowledgment.
- MCS** Modulation and Coding Scheme.
- MIMO** Multiple Input Multiple Output.
- MPDU** MAC Protocol Data Unit.
- MSDU** MAC Service Data Unit.
- MU** Multi-User.
- NAV** Network Allocation vector.
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- OFDMA** OFDM Access.
- OMAX** Multiple Access for IEEE 802.11ax.
- OSI** Open System Interconnection.
- PC** Point Coordinator.
- PCF** Point Coordination Function.
- PIFS** PCF Inter-Frame Spacing.
- PPDU** PHY Protocol Data Unit.
- PSDU** PHY Service Data Unit.
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation.
- QoS** Quality of Service.
- QSTA** QoS-enabled STAtion.
- RA** Random Access.
- RMD** Request-to-Multiple-DL.

**RMU** Request-to-Multiple-UL.  
**RTS** Request To Send.  
**RU** Ressource Unit.  
**SIFS** Short Inter Frame Space.  
**SIG** SIGnal.  
**SISO** Single Input Single Output.  
**STA** STAtion.  
**SU** Single User.  
**TB** Trigger Based.  
**TDM** Time Division Multiplexing.  
**TF** Trigger Frame.  
**TWK** Traditional Wireless Networks.  
**TWT** Target Wake Time.  
**TXOP** Transmission (TX) Opportunity.  
**UE-RUs** Utulisation Efficace des RUs.  
**UL** Up-Link.  
**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System.  
**UP** User Priority.  
**VHT** Very High Throughput.  
**WiFi** Wireless Fidelity.  
**WiMax** WorldWide InteroperabilityMicrowave acces.  
**WLAN** Wireless Local Area Networks.  
**WMAN** Wireless Metropolitan Area Networks.  
**WPAN** Wireless Personal Area Networks.  
**WWAN** Wireless Wide Area Networks.

## 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 [5].

Le Wi-Fi est un système qui connecte des terminaux et des points d'accès via un réseau local sans fil (WLAN). Il est basé sur IEEE 802.11, cette norme 802.11 a connu six itérations depuis sa création, permettant l'amélioration du débit, tel que 802.11a/b/g/n/ac/ax, dont chacun indique un progrès par rapport au précédent. À partir de 1999, lorsque le Wi-Fi a été introduit pour la première fois, Les normes 802.11a sont destinées aux entreprises, tandis que 802.11b destinée aux particuliers [14]. Cette dernière fonctionne sur la bande 2,4 GHz en utilisant la modulation DSSS et a un débit théorique de 11 Mb/s. Le WiFi a utilise la bande 5 GHz et une modulation OFDM qui lui permettent d'atteindre 54 Mb/s. En 2003 au même débit, la norme 802.11g est adoptée l'utilisation de l'OFDM dans la bande 2,4 GHz tout en maintenant la rétrocompatibilité avec les appareils préexistant [8].

En passant par la norme 802.11e, sortie en 2005 pour répondre aux besoins des applications multimédias en proposant la fonction EDCA, qui classe le trafic dans le réseau [32]. En 2009, Le Wi-Fi a été révolutionné par le 802.11n, Il a parfaitement fourni un débit élevé et des vitesses rapides en utilisant les deux bandes de fréquences 2,4 et 5 GHz. Cette norme a amené de nouvelles technologies : la technologie MIMO et le la technologie de regroupement de canaux de 20 MHz et la méthode d'agrégation de trames.

La nouvelle norme 802.11ac (VHT), assez similaire au WiFi n, qui a été lancé en 2014. Il utilise la bande des 5 GHz et améliore les processus de transmission en introduisant la technologie MU MIMO [27], qui augmente la bande passante jusqu'à 80 et 160 MHz par le regroupement de canaux [22] et augmenter le nombre de flux spatiaux dans MIMO à 8, doubler la modulation à 256-QAM et atteindre des vitesses de données de 6,9 Gb/s.

Arrivant à la nouvelle norme dernièrement ratifiée en février 2021 et qui succède a la norme 802.11ac est la norme 802.11ax, cette norme permet d'utiliser efficacement les technologies existantes sur les bandes de transmission 2,4 et 5 GHz tout en conservant une compatibilité ascendante. Ceci est généralement réalisable en développant l'un des objectifs fondamentaux de la norme, comme l'OFDMA, qui permet à plusieurs utilisateurs d'accéder au même canal de transmission en même temps sur différentes unités de ressources. Cette norme a un débit de données allant jusqu'à 9,6 GHz/s.

La technologie OFDMA 11ax utilisée par les réseaux LTE/cellulaires est l'ajout le plus important à la norme 802.11ax, permettant d'améliorer les performances, la fiabilité et la flexibilité, un haut niveau d'efficacité. L'avantage de cette technique dépend principalement de l'allocation des ressources entre les nombreux utilisateurs.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu général des réseaux locaux sans fil, avec un focus sur le réseau Wifi et la norme IEEE 802.11 dédié à ce dernier, ainsi que des exemples de son architecture et de son fonctionnement. Dans un second temps, nous verrons l'évaluation que la norme IEEE 802.11 a subie afin d'améliorer les performances du réseau.
- Le deuxième chapitre sera consacré à une présentation des principales technologies utilisées dans la nouvelle norme IEEE 802.11ax, suivie d'une synthèse des projets de recherche basés sur la technologie OFDMA ainsi qu'une définition d'une problématique liée à l'affectation des ressources RU de la liaison montante UL OFDMA.
- Dans le dernier chapitre, une méthode d'accès est proposée pour améliorer le débit tout en optimisant l'utilisation des unités de ressources, suivie d'une partie de proposition et résultats de simulation.

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

# Réseaux sans fils et le standard IEEE 802.11

## 1.1 Introduction

Les réseaux sans fil traditionnels (Traditional Wireless Networks TWK), tels que GSM (Global System for Mobile Communications) et l'UTMS (Universal Mobile Telecommunications System), ont longtemps été l'exemple type des réseaux de télécommunications conçus pour la transmission de la voix. Une nouvelle technologie sans fil appelée les réseaux locaux sans fil (Wireless Area Network WLAN), conçue pour le transfert de données, est apparue à la fin des années 90. De nos jours cette technologie est en plein essor, en effet, les ordinateurs portables, un nombre croissant de téléphones mobiles, les consoles de jeux et même les véhicules sont dotés de cette technologie ainsi que tous les fournisseurs d'accès à Internet qui proposent des solutions domestiques sans fil.

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

## 1.2 Présentation des réseaux sans fil

Un réseau sans fil (en anglais wireless network) est un réseau dans lequel au moins deux terminaux peuvent communiquer sans liaison filaire. Grâce aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de "mobilité". Les réseaux sans fil sont basés sur une liaison utilisant des ondes radioélectriques (radio et infrarouges) en lieu et place des câbles habituels. Il existe plusieurs technologies se distinguant par la fréquence d'émission utilisée ainsi que le débit et la portée des transmissions. Il existe principalement deux méthodes pour la transmission dans les réseaux sans fils [15] :

### 1.2.1 Transmission par les ondes infrarouges

La transmission par les ondes infrarouges nécessite que les appareils soient en face l'un des autres et aucun obstacle ne sépare l'émetteur du récepteur (car la transmission est directionnelle). Cette technique est utilisée pour créer des petits réseaux de quelques dizaines de mètres (Télécommande de : télévision, les jouets, voitures...) (voir la figure1.1).

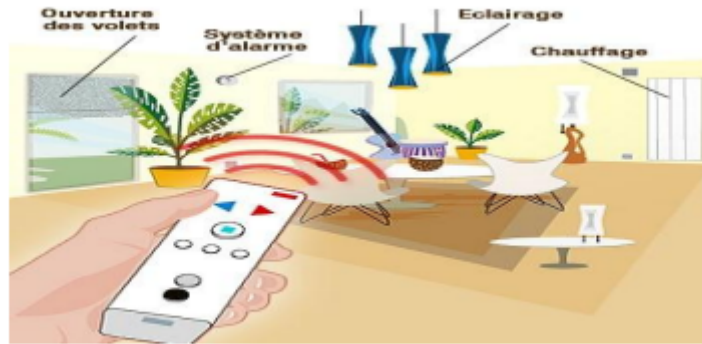


FIGURE 1.1 – Techniques des ondes infrarouges.

### 1.2.2 Transmission par les ondes radios

La transmission par les ondes radios est utilisée pour la création des réseaux sans fil qui a plusieurs kilos mètres. Les ondes radios ont l’avantage de ne pas être arrêtés 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 (voir la figure 1.2).



FIGURE 1.2 – Domaines d’applications des ondes radios.

### 1.2.3 Intérêts et problèmes des réseaux sans-fil

L’utilisation des réseaux sans fil procure plusieurs avantages, notamment :

- La mobilité.
- L’usage facile dans les endroits à câblage difficile.
- La réduction du temps de déploiement et d’installation.
- L’augmentation de la connectivité (évolutivité).

D'autres part les réseaux sans fil souffrent de problèmes tel que :

- la sécurité.
- les interférences des ondes électromagnétiques.
- Débit et portée faibles.
- détection des collisions.

### 1.2.4 Les différentes catégories de réseaux sans fil

Les réseaux informatiques sans fil sont fréquemment classés en quatre catégories, comme le montre la figure 1.3 :

- **les réseaux personnels (WPAN)** : Ils concernent l'entourage immédiat d'une personne (quelques mètres), par exemple la technologie Bluetooth, zigbee.
- **les réseaux locaux (WLAN)** : Ils concernent un environnement de vie plus étendu que les réseaux personnels comme une maison, une entreprise ou un campus (quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres), par exemple WiFi, hipervlan2.
- **les réseaux métropolitains (WMAN)** : Ils visent à couvrir une région étendue comme une ville (Plusieurs kilos mètres), par exemple WiMAX.
- **les réseaux étendus (WWAN)** : ils visent à couvrir une zone très vaste comme un pays, une région du globe ou toute la planète. Par exemple GSM, GPRS, UMTS.

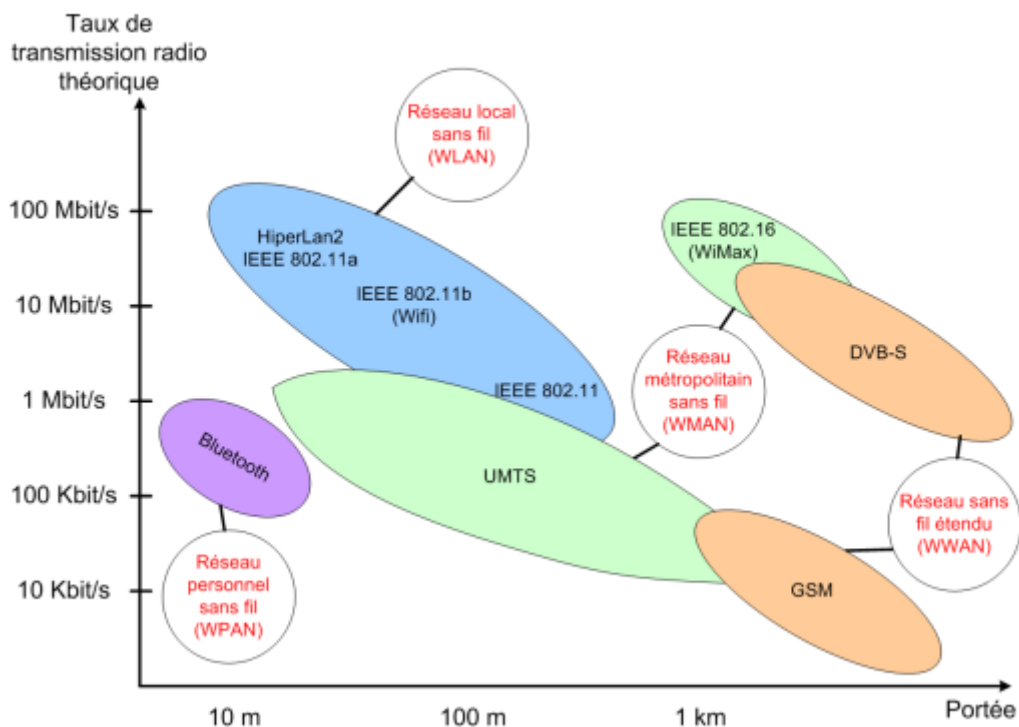


FIGURE 1.3 – Les catégories de réseaux sans fil.



## 1.3 Présentation du standard IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 est le standard qui décrit les caractéristiques des réseaux sans fil et elle est l'équivalente de la norme IEEE 802.3 (Ethernet) pour les réseaux filaires. La première version de la norme IEEE 802.11 a été ratifiée en 1997. Le standard IEEE 802.11 et ses différentes extensions ont été conçus à l'origine, afin d'offrir un support de communication fiable, robuste et flexible pour bâtir des réseaux locaux sans fil WLAN, administrés par une ou plusieurs stations de base. Grâce à son large déploiement et son faible coût, ce standard est devenu une solution incontournable dans le monde des réseaux locaux sans fil [16].

### 1.3.1 Les caractéristiques d'IEEE 802.11

La norme 802.11 fournit les fonctionnalités des couches MAC et PHY pour une connectivité sans fils des postes fixes, portables et mobiles, se déplaçant à une vitesse piétonnière ou véhiculaire dans une zone locale. 802.11 prend en considération les différences suivantes qui existent entre un réseau filaire et un WLAN [16] :

- **Gestion de l'alimentation** : La plupart des interfaces réseaux sans fils se trouvent sous forme de cartes PCMCIA, ceci permet aux équipements mobiles et portables d'avoir un accès aux WLAN. Cependant, ces dispositifs doivent souvent dépendre des batteries afin d'alimenter leurs composantes électroniques. L'un des objectifs du groupe de travail 802.11, était de trouver des solutions pour économiser l'alimentation par batterie, en introduisant des techniques permettant aux cartes réseaux sans fil, de passer au mode de veille périodiquement, et lorsqu'une activité de transmission n'est pas envisageable. La station en veille sera ensuite réveillée pour récupérer l'information manquée.
- **Bande Passante** : Afin d'optimiser l'utilisation de la bande passante, 802.11 offre, par exemple, des mécanismes de compression des données transmises offrant ainsi une meilleure exploitation de la bande passante disponible.
- **Sécurité** : Afin de déployer la sécurité, le groupe de travail 802.11 travaillait en coopération avec le comité des standards 802.10 responsable du développement des mécanismes de sécurité pour toute la série 802.
- **Adressage** : La topologie d'un réseau sans fil est dynamique. Autrement dit, l'adresse de destination ne correspond pas toujours à l'emplacement de la destination. Ceci soulève un problème de routage des paquets, à travers le réseau vers la destination. La norme 802.11f fournit le protocole Inter Access Point Protocol (IAPP) permettant de remédier à ce problème.

### 1.3.2 L'architecture d'IEEE 802.11

La norme d'IEEE 802.11 décrit deux types de fonctionnements selon le mode de communication :

#### ● Mode infrastructure

En mode infrastructure chaque station (notée STA) se connecte à un 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 ensemble de services de base (BSS) et constitue une cellule. 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 du point d'accès, la Figure 1.4 présente ce type d'architecture [4].

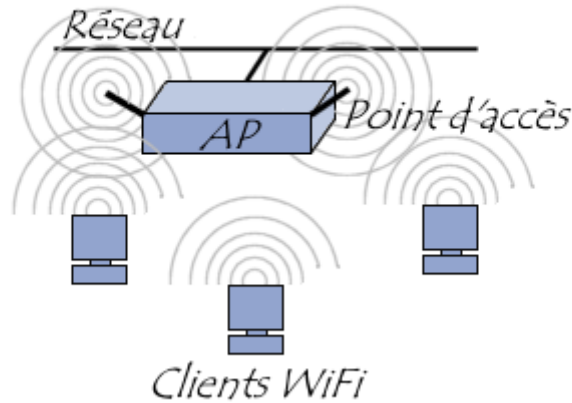


FIGURE 1.4 – Mode infrastructure.

Il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux (ou plus exactement plusieurs BSS) par une liaison appelée système de distribution (notée DS pour Distribution System) afin de constituer un ensemble de services étendu (Extendeds Service Set ou ESS). Le système de distribution (DS) peut être aussi bien un réseau filaire : un câble entre deux points d'accès ou bien même un réseau sans fil comme le montre la Figure 1.5.

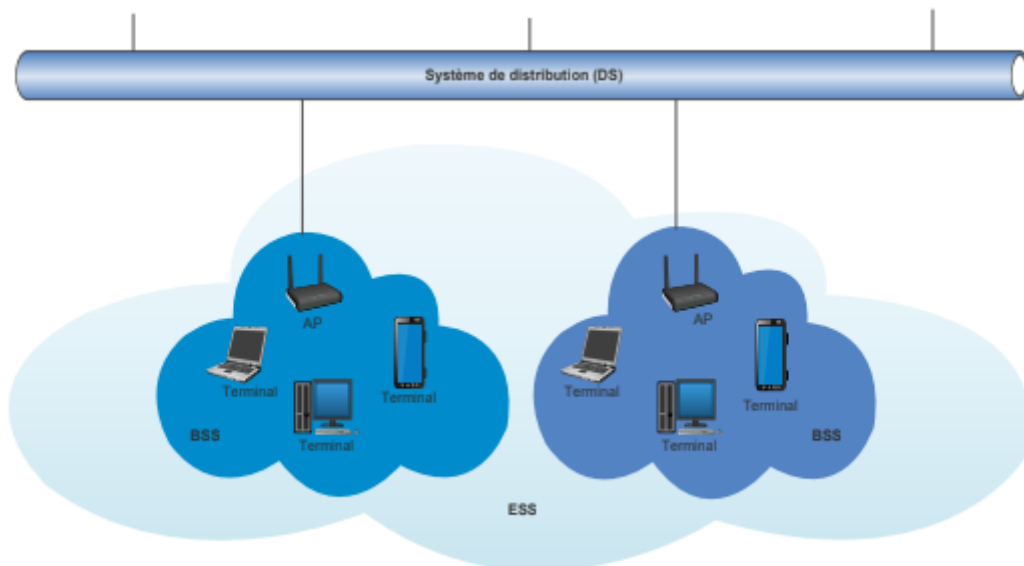


FIGURE 1.5 – Architecture de réseau wifi en mode infrastructure.

Lorsqu'un utilisateur nomade passe d'un BSS à un autre lors de son déplacement au sein de l'ESS, l'adaptateur réseau sans fil de sa machine est capable de changer de point d'accès selon la qualité de réception des signaux provenant des différents points d'accès [13]. Un ESS est identifié par un nom ESSID (ou simplement le SSID) de 32 octets correspondant au nom du

réseau et représente en quelque sorte un premier niveau de sécurité : la connaissance du SSID est nécessaire pour qu'une station se connecte au réseau étendu.

### • Mode Ad-hoc

Dans les réseaux de type Ad Hoc, chaque station communique directement avec les stations situées à sa portée, sans passer par un point d'accès afin de constituer un réseau point à point (peer to peer en anglais), c'est à dire un réseau dans lequel chaque machine joue en même temps le rôle de client et le rôle de point d'accès. L'ensemble formé par les différentes stations est appelé IBSS (Independant Basic Service Set). L'IBSS constitue donc un réseau provisoire permettant à des personnes géographiquement proches d'échanger des données. Il est identifié par un SSID (Service Set Identifier) comme l'infrastructure. Comme il n'y a pas de point d'accès, les stations n'intègrent qu'un certain nombre de fonctionnalités, telles les trames utilisées pour la synchronisation.



FIGURE 1.6 – Mode ad-hoc.

Dans un réseau Ad-hoc, la portée du BSS est déterminée par la portée de chaque station. Cela signifie que si deux des stations du réseau sont hors de portée l'une de l'autre, elles ne pourront pas communiquer, même si elles "voient" d'autres stations. En effet, contrairement au mode infrastructure, le mode Ad hoc ne propose pas de système de distribution capable de transmettre les trames d'une station à une autre. Ainsi un IBSS est par définition un réseau sans fil restreint [13].

## 1.4 Principe de fonctionnement du standard IEEE 802.11

La figure 1.7 illustre le fonctionnement de la couche 802.11. Le standard IEEE 802.11 définit les deux premières couches du modèle OSI (Open System Inter connection), 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. Ces sous couches, sont détaillées dans les sections suivantes.

Le module wifi est constitué d'une antenne, cette dernière va prendre les ondes radio propager d'abord, ensuite va capter le signal analogique. A la réception nous trouvons la couche physique, cette couche physique va convertir le signal en fonction de la fréquence utilisée, elle gère la démodulation ou d'une somme de modulation et le décodage de l'information pour enfin avoir un décodage canal, puis on récupère l'information numérique, et sera dirigé vers la couche liaison de données, qui est séparé en deux sous couches la première c'est la sous couche MAC son travail c'est de gérer l'accès et la transmission du type de trames (CSMA CA), puis les

trames récupérés vont être dirigés vers la sous couche standard 802.2 LLC (logical link control) qui gère les modes d'association, la procédure d'authentification, fragmentation, pour finalement les trames peut extraire le paquet, donc le paquet va être redirigés vers la couche trois de modèle OSI.

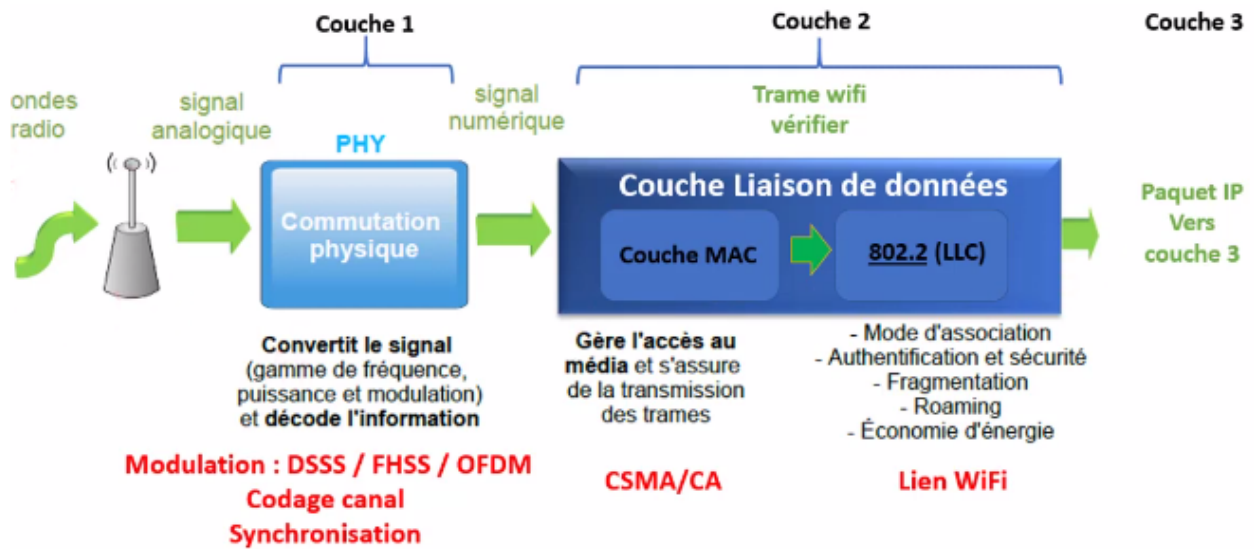


FIGURE 1.7 – Modèle en couche de la norme 802.11.

### 1.4.1 La couche physique

Le standard 802.11 d'origine a défini trois couches physiques de base qui sont FHSS, DSSS, IR auxquelles la version IEEE 802.11a a ajouté OFDM. Ces couches se sont des techniques de modulation que nous allons détailler brièvement dans la sous section suivante.

- **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) [14] [33].

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

La technique FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum, en français étalement de spectre par saut de fréquence) consiste à découper la large bande de fréquence en un minimum de 75 canaux (hops ou sauts d'une largeur de 1MHz), puis de transmettre en utilisant une combinaison de canaux connue de toutes les stations de la cellule. Dans la norme 802.11, la bande de fréquence

2.4 - 2.4835 GHz permet de créer 79 canaux de 1 MHz. Cette technique de modulation permet un débit physique de 1 ou de 2 Mbit/s.

Le FHSS est désormais utilisé dans le standard 802.11 de telle manière à réduire les interférences entre les transmissions des diverses stations d'une cellule.

Le FHSS offre une possibilité d'avoir plusieurs communications en même temps sur la même bande de fréquence comme le montre la figure 1.8.

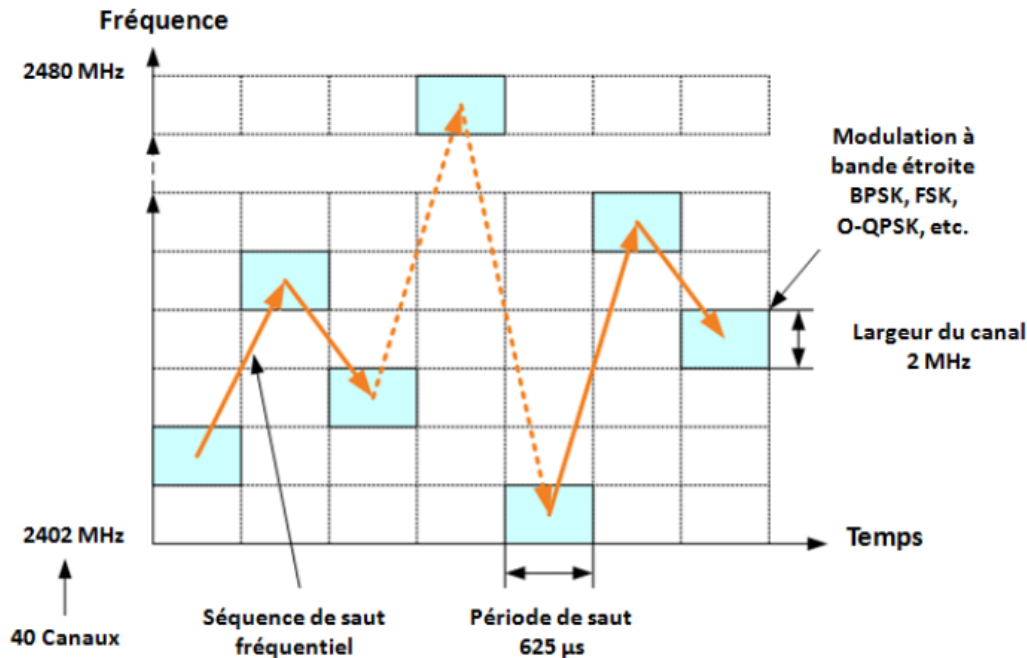


FIGURE 1.8 – Etalement de spectre par saut de fréquence.

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

Est une technique d'étalement de spectre, mais contrairement au FHSS, aucun saut de fréquence n'a lieu : la modulation DSSS provoque des transitions d'état très rapides (chip-ping) qui tendent à étaler le spectre du signal et ceci en provoquant artificiellement un débit très élevé. Pour ce faire, l'émetteur envoie une séquence de plusieurs bits, appelés des "chips", pour chaque bit d'information à transmettre. Le 802.11 a divisé la bande des 2.4 GHz en 14 canaux de 22 MHz chacun. Pour communiquer, l'émetteur et le récepteur doivent se mettre d'accord sur un canal fixe à utiliser. Cette technique permet un débit physique de 1 Mbit/s ou 2 Mbit/s [14]. Le DSSS 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. L'avantage fondamentale de ce code est de corriger les erreurs de transmission.

- **HR/DSSS (High Rate / Sequence Spread Spectrum) :**

Pour 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.

- **IR (Infra Rouge) :**

Les infrarouges sont utilisés pour le transport des données. Cette méthode impose que les distances entre émetteurs/récepteurs soient limitées. Elle offre un débit de 1 Mbps. Le support Infrarouge fait partie de la norme IEEE 802.11. Il utilise une longueur d'onde de 850nm à

950nm pour le signal. Cette longueur d'onde est proche de la bande du visible par l'homme. C'est une lumière infrarouge diffusée.

Le seul inconvénient de ce support, est qu'il ne traverse aucun mur et difficilement une fenêtre.

- **OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) :**

Cette technique est considérée la plus puissante des modulations précédentes car elle permet à la fois les débits les plus importants (54Mbs), la meilleure résistance au multipath, et une grande capacité de partage du spectre.

L'OFDM repose sur le principe du multiplexage, permettre la transmission simultanée de plusieurs communications sur une même bande de fréquences. Il existe deux types de multiplexage :

1. TDM (Time Division Multiplexing) : chaque communication dispose de sa tranche de temps pour émettre des données et peut utiliser l'ensemble du spectre.
2. FDM (Frequency Division Multiplexing) : en partageant les différentes communications par fréquences, un spectre assez large est divisé en de multiples sous-porteuses (sub-carriers) et les données sont émises simultanément sur chaque sous-porteuse [14].

Pour résoudre les problèmes d'interférences entre les sous-porteuses, l'OFDM utilise une fonction mathématique assez complexe pour rendre les sous-porteuses orthogonales, les porteuses sont placées dans le spectre de fréquences de telle sorte que les pics de puissance d'une porteuse donnée correspondent aux zéros des autres porteuses.

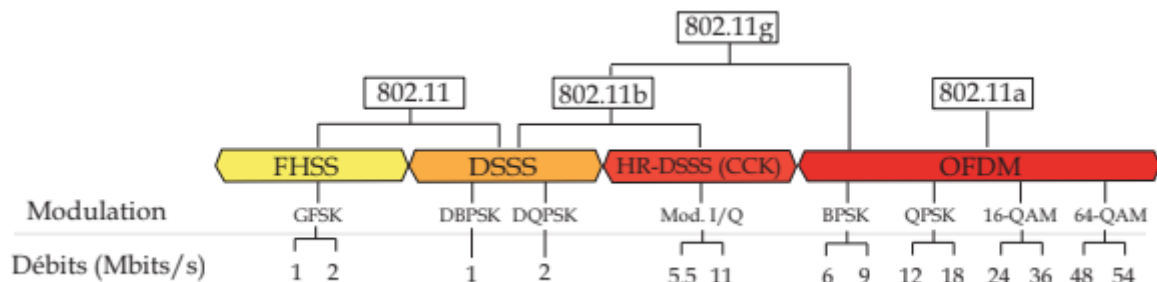


FIGURE 1.9 – Récapitulatif de l'architecture des couches physiques IEEE 802.11.

- **Bandes de fréquences IEEE 802.11 :**

Pour émettre et recevoir des données, les appareils Wi-Fi utilisent des bandes de fréquences hertziennes précises afin de limiter les interférences avec d'autres équipements. Les bandes de fréquence les plus couramment utilisées sont la bande des 2,4 GHz (meilleure portée) avec une largeur de bande de 83.5 MHz et la bande des 5 GHz (meilleur débit) avec une largeur de bande de 300 MHz. En effet, plus une fréquence est basse, plus elle porte loin. A l'inverse, plus une fréquence est élevée, plus les débits sont élevés mais sur une plus courte distance. Le tableau 1.1 montre les différences entre les deux bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz [12].

Bande de fréquence	2,4 GHz	5GHz
Liberté d'usage	Libre	Libre
Plage de fréquence	2400 MHz à 2483,5 MHz	5,150 MHz à 5,350 et 5,470 à 5,725 MHz
Coût	gratuite	payante
Canaux libres	3	19
Modulation	FHSS, DSSS et HR-DSSS	OFDM
Débit théorique	54 Mbps	1 Gbps
Normes qui utilisent	802.11 b/g/n	802.11 a/n/ac
Porté	longue porté	faible porté
Interférences	Élevées	Faibles
Bande passante	Normale	Haute

TABLE 1.1 – Comparaison entre les deux bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz.

### 1.4.2 La couche MAC

La couche MAC (Medium Access Control) est une sous couche appartenant à la deuxième couche du modèle OSI. Elle fournit des services pour les couches supérieures, elle est le cerveau du wifi. La couche MAC intègre 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 et encore la sécurité. L'une des fonctionnalités les plus importantes de la couche MAC est la gestion d'accès au médium, pour cela, le groupe IEEE a défini deux méthodes de base pour le standard 802.11 qui sont [24, 29, 8] :

1. **le mode DCF** (Distributed Coordination Function) : Un mode d'accès au canal dit à compétition qui propose un accès équitable au canal radio sans aucune centralisation de la gestion de l'accès (mode totalement distribué). Ce mode peut aussi bien être utilisé en mode ad-hoc qu'en mode infrastructure.
2. **le mode PCF** (Point Coordination Function) : Fondée sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux, ou polling, sous le contrôle du point d'accès, la méthode PCF est conçue 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. Il ne peut être utilisé pour des réseaux ad-hoc multi-sauts puisqu'il n'y a pas de nœud fixe qui puisse prendre en charge la coordination du réseau.

#### • Description du mode d'accès DCF :

Le DCF est la technique d'accès générale utilisée pour permettre des transferts de données asynchrones en best-effort. D'après le standard, toutes les stations doivent la supporter. Le DCF s'appuie sur le CSMA/CA. Dans les réseaux sans-fil la détection des collisions n'est pas possible, la transmission couvre la réception de signaux sur la même fréquence et ne permet pas à la station d'entendre la collision : les liaisons radio ne sont jamais full-duplex. La technique d'accès de Wi-Fi doit tenir compte de ce phénomène. Pour pallier ces problèmes, 802.11 utilise un mécanisme d'évitement de collision associé à un système d'accusé de réception (le CSMA/CA). Les autres éléments importants sont les espaces inter-trames IFS (Inter Frame Spacing) qui correspondent à un intervalle de temps entre la transmission de deux trames et le temporisateur d'émission. Il en existe trois types selon 802.11 [24] :

- **SIFS** (Short Initial inter-Frame Spacing) : représente le plus court des IFS et permet

de séparer deux trames d'un même dialogue (envoi de données, Ack, etc.)

- **PIFS** (PCF IFS) : utilisé par le point d'accès pour bénéficier d'une priorité supérieur, dans le cas de réseaux à accès au support mixte DCF/PCF.
- **DIFS** (DCF IFS) : utilisé en DCF (c'est à dire en CSMA/CA) lorsqu'une station veut initier une communication.

$$\text{SIFS} < \text{PIFS} < \text{DIFS}$$

La temporisation d'émission, appelé NAV (Network Allocation Vector) est un timer qui détermine l'instant auquel la trame peut être transmise avec succès, il permet d'éviter les collisions en retardant les émissions de toutes les stations qui détectent que le support est occupé [24].

**L'algorithme de CSMA/CA :** Les terminaux d'un même BSS peuvent écouter l'activité de toutes les stations qui s'y trouvent [24, 8].

- Lorsqu'une station envoie une trame, les autres stations l'entendent et, pour éviter une collision, mettent à jour un timer, appelé NAV (Network Allocation Vector), permettant de retarder toutes les transmissions prévues. Le NAV est calculé par rapport à l'information située dans le champ durée de vie, ou TTL, contenu dans les différentes trames (données, ACK, etc.).
- Quand une station veut émettre, elle écoute le support, si le support est libre durant un temps spécifique (DIFS), la station attend une période de durée aléatoire supplémentaire appelée backoff puis transmet ses données immédiatement. Si le support est encore occupé, elle continue de l'écouter jusqu'à ce qu'il soit libre. Quand le support devient disponible durant un temps spécifique (DIFS) elle retarde encore sa transmission en utilisant l'algorithme de back-off puis transmettre ses données.
- Si les données envoyées sont bien reçues, la station destination attend pendant un temps équivalent à un SIFS et émet un ACK pour confirmer leur bonne réception.
- Si la station émettrice reçoit l'acquiescement alors la trame est correctement reçue et aucune collision n'a eu lieu.
- Sinon doit retransmettre la trame.
- Lorsque la station source transmet ses données, les autres stations mettent à jour leur NAV, en incluant le temps de transmission de la trame de données, le SIFS et l'ACK.

**L'algorithme de Backoff :** Cet algorithme permet de résoudre le problème de l'accès au support lorsque plusieurs stations veulent transmettre des données en même temps. Dans Wi-Fi, le temps est découpé en tranches (SlotTime) qui sont un peu plus petit que la durée de transmission minimale d'une trame. Le temps de backoff est calculé de la façon suivante :

$$\text{BackoffTime} = \text{Random}() \times \text{aSlotTime}.$$

La quantité aSlotTime représente la durée d'un slot de temps défini par la couche physique qui vaut par exemple 20 s en DSSS. Random() représente un nombre aléatoire choisi entre 0 et la taille de la fenêtre de contention CW.

La taille de la fenêtre de contention CW varie avec le nombre de retransmissions de paquets. Sa valeur initiale est aCWmin et s'il y a échec de transmission d'un paquet, CW est multipliée



par 2. La valeur du backoff est alors tirée au sort dans une plus grande fenêtre. L'augmentation de la taille CW est bornée par la valeur  $aCW_{max}$ . Si au bout de  $nbEssaisMax$  le paquet n'est pas transmis avec succès, il est abandonné et la station traite le paquet suivant dans sa file d'attente.

Grâce à cet algorithme, les stations ont la même probabilité d'accéder au support. Son seul inconvénient est de ne pas garantir un délai minimal et donc de compliquer la prise en charge d'applications temps réel telles que la voix ou la vidéo [24, 8] .

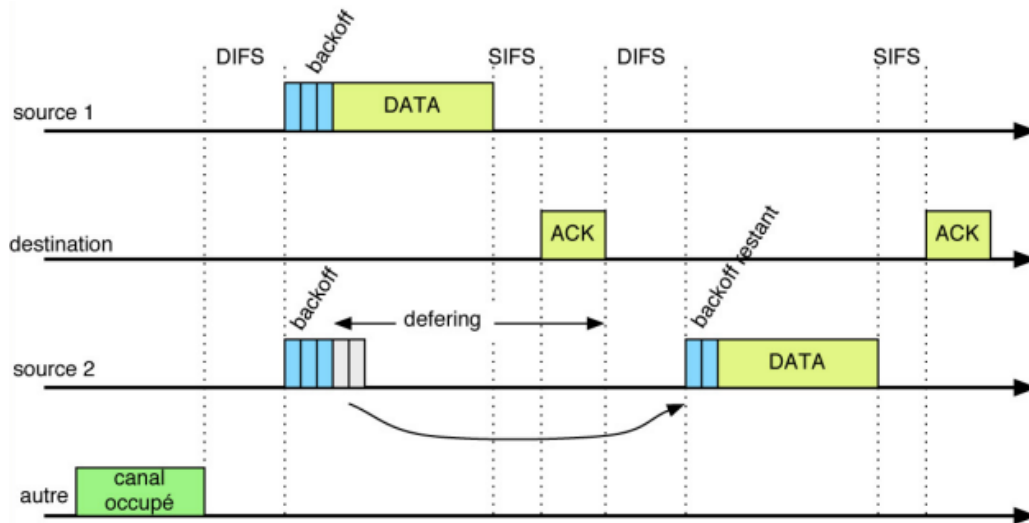


FIGURE 1.10 – Accès au canal en mode DCF.

**Le mécanisme RTS/CTS :** Un des problèmes des réseaux sans fil est celui de la station cachée (hidden node problem). 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 à l'autre du fait que la distance entre les deux est trop grande ou qu'un obstacle les empêche de communiquer entre elles [24].

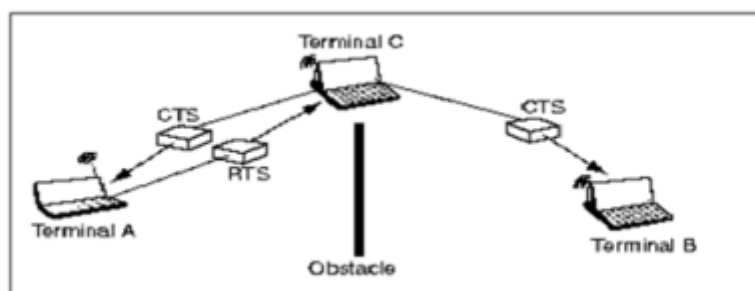


FIGURE 1.11 – Problème de la station cachée (hidden node problem) [24].

La figure 1.11 montre une station A cachée de la station B mais pas de la station C. Si A transmet des informations à C et que B désire faire de même, il y aura une collision car B n'a pas détecté la transmission entre A et C [24]. Le mécanisme de réservation fondé sur l'envoi de trames RTS/CTS (Request to Send/Clear to Send) entre une station source et une station destination avant tout envoi de données. Ce mécanisme de réservation RTS/CTS permet de résoudre le problème de la station cachée [24, 8] :

- Une station source qui veut transmettre des données envoie un petit paquet RTS contenant la durée de la transmission (combien de temps le canal sera réservé) après avoir attendu un temps DIFS et un temps aléatoire.
- Toutes les stations du BSS entendant le RTS lisent le champ TTL du RTS et mettent à jour leur NAV.
- La station destination ayant reçu le RTS répond, après avoir attendu pendant un SIFS, en envoyant un petit paquet CTS.
- Les autres stations entendant le CTS lisent le champ TTL du CTS et mettent à nouveau à jour leur NAV.
- Après réception du CTS par la station source, cette dernière est assurée que le support est stable et réservé pour sa transmission de données.

Cela permet à la station source de transmettre ses données ainsi que de recevoir l'ACK sans collision.

Lorsque les trames à envoyer sont petites c'est CSMA/CA qui est utilisé (car utilisation du RTS/CTS nécessite l'envoi de deux trames avant de pouvoir émettre de l'information). Dans le cas où les trames sont plus grandes qu'un certain seuil (RTS Threshold), c'est alors RTS/CTS qui est utilisé (Comme les trames RTS/CTS réservent le support donc il est habituellement utilisé pour envoyer de grosses trames) [24].

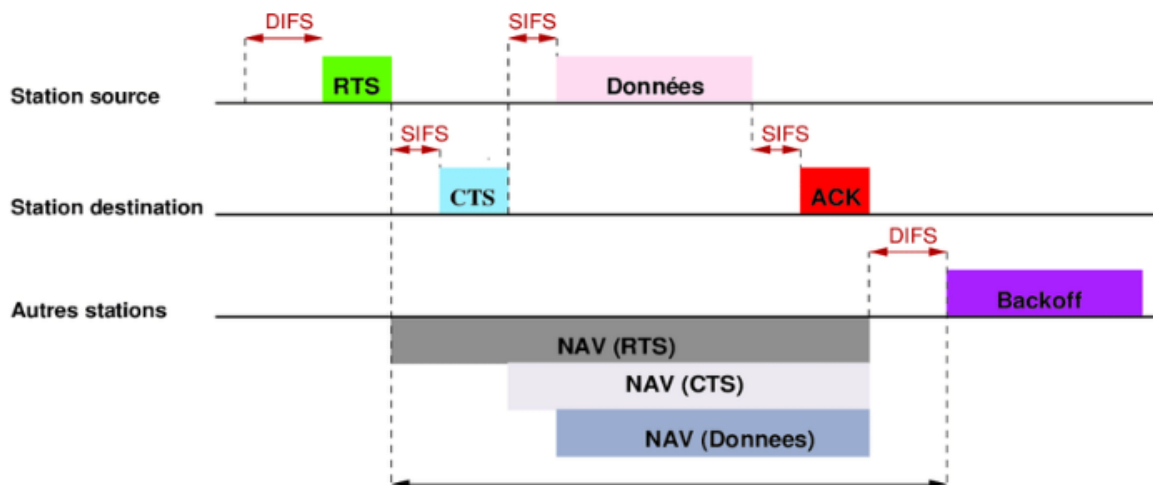


FIGURE 1.12 – Transmission en utilisant les trames RTS/CTS.

En conclusion, le CSMA/CA permet de partager l'accès. Le mécanisme de réservation RTS/CTS évite les problèmes de la station cachée. Tous ces mécanismes entraînent toutefois l'ajout aux trames Wi-Fi d'en-têtes, que les trames Ethernet ne possèdent pas. C'est pourquoi les réseaux Wi-Fi montrent toujours des performances plus faibles que les réseaux locaux Ethernet [24].

- **Description du mode d'accès PCF :**

Nous avons vu que le mode DCF permettait un fonctionnement totalement distribué de l'ac-

cès au média, mais que, afin de limiter le nombre des collisions, CSMA/CA avait recours à une durée aléatoire avant l'émission de chaque paquet. Le temps passé à attendre représente autant de débit effectif perdu. Aussi 802.11 propose en option un mécanisme centralisé qui permet d'obtenir un meilleur taux d'utilisation du canal, c'est le mode basé sur la Point Coordination Function (PCF), qui requiert l'utilisation de stations de base et de mobiles l'implémentant.

Le principe de base de PCF est de centraliser la gestion de l'accès au médium d'une cellule. C'est le point d'accès qui indiquera à chacun des mobiles qui lui sont rattachés quand ils doivent émettre leurs paquets. Le backoff aléatoire devient ainsi en partie inutile. Durant toute la phase où la station de base impose l'ordre des transmissions, il n'y a pas de contention pour l'accès au canal, nous parlons de Contention Free Period (Fig.1.13).

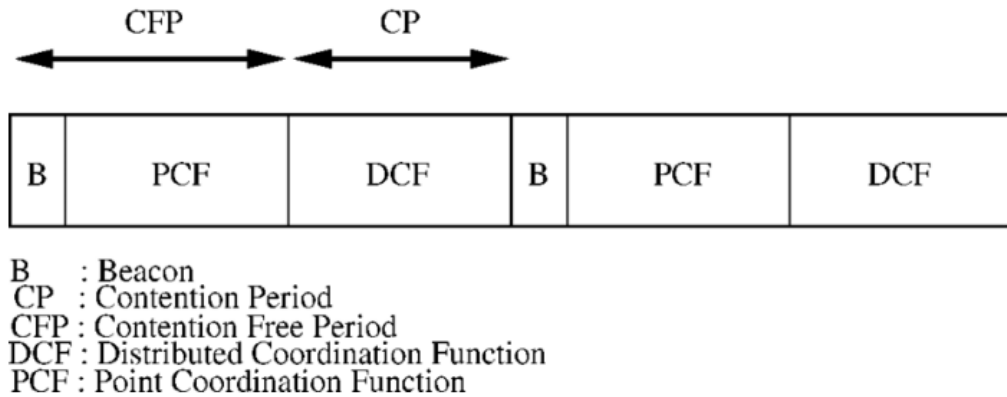


FIGURE 1.13 – Alternance des modes PCF et DCF.

De plus, afin de préserver la compatibilité, dans chaque cycle de la PCF, une période de DCF est conservée et permet aux mobiles n'implémentant pas la PCF de continuer à accéder au canal. C'est la Contention Period (Fig.1.13). La cohabitation entre les mobiles implémentant la PCF et ceux ne l'implémentant pas est assurée grâce au temporisateur PIFS (PCF Inter Frame Spacing). Durant la période sans contention, les trames ne sont en effet séparées que de périodes PIFS (ou SIFS suivant les cas) qui sont toutes les deux plus courtes que DIFS. Grâce à ces temporisateurs, un mobile n'implémentant pas la PCF ne risque donc pas de prendre la main durant la période gérée par la station de base en mode PCF.

La méthode du Polling est une méthode PCF (Point Coordination Function), elle nécessite un point de coordination (PC, Point Coordination). Le point de coordination est un point d'accès, le Polling ne fonctionne donc pas dans un réseau ad hoc. Le Polling, contrairement à CSMA/CA et RTS/CTS, permet de garantir la qualité de Service, de ce fait il est utilisé pour la transmission des données temps réel, telles que la voix ou la vidéo [24, 34]. Les différences entre le mode PCF et DCF sont résumées dans le tableau ci-dessous.

<b>PCF</b>	<b>DCF</b>
Mode infrastructure	Mode ad hoc et infrastructure
Données synchrone (Données sensibles)	Données asynchrone
Peu implémenté	C'est la plus utilisé
Optionnelle	Techniques par défaut (obligatoire)
Priorité d'accès supérieure	Priorité d'accès basse
Sans collision	Possibilités de collision
contrôle par le point d'accès	Possibilité broadcast et multicast

TABLE 1.2 – La différence entre PCF et DCF.

## 1.5 Évolutions principales de la norme IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 a donné naissance à la génération des réseaux sans fil Wi-Fi. Cette norme offre des débits de 1 ou 2 Mbits/s. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit c'est le cas des normes 802.11a, 802.11b, 802.11g, les spécifications de ces normes du standard 802.11 sont les suivantes [31].

**802.11 (norme initiale) :** dans sa version initiale de 1997, 802.11 proposait trois couches physiques : Radio à étalement de spectre par utilisation de séquences directes (DSSS), débit bande de base 1 Mbits/s et 2 Mbits/s, Radio à étalement de spectre par utilisation de sauts de fréquences (FHSS) à 1,6 Mbits/s, Infrarouge, 1 ou 2 Mbits/s.

**802.11a (wifi 1) :** en 1999, la norme 802.11a propose 8 canaux dans la bande de 5 GHz au lieu de 2,4 GHz, modulation radio de type OFDM, débit maximal théorique de 54 Mb/s sur une portée d'environ 20m. La norme IEEE-802.11a possède un avantage dans la mesure où elle subit moins d'interférence. Cependant, cette fréquence élevée pénètre plus difficilement les murs et réduit la zone de couverture des appareils.

**802.11b (wifi 2) :** propose une amélioration de la norme initiale en introduisant la modulation CCK pour atteindre ce qu'on appelle le DSSS à haute vitesse ou HR DSSS dans la bande des 2,4 GHz. Deux nouveaux débits sont alors disponibles : 5,5 Mbits/s et 11 Mbits/s sur une portée de quelques dizaines de mètres environ. Ratifiée en septembre 1999, 802.11b est l'amendement de 802.11 qui a donné sa popularité au Wifi. Bien que 802.11b soit encore largement utilisé.

**802.11g (wifi 3) :** apparue en 2003, constitue une amélioration directe de 802.11b en proposant un débit bande de base de 54 Mbits/s sur la bande des 2,4 GHz. Ce gain en débit est réalisé en reprenant le concept de l'étalement de spectre par OFDM utilisé dans 802.11a. Toutefois, 802.11g garde une compatibilité avec 802.11b, ce qui signifie que des matériels conformes à la norme 802.11g peuvent fonctionner en 802.11b.

### • Notion de qualité de service :

La qualité de service est la capacité à véhiculer, dans de bonnes conditions, un type de trafic donné, en termes de disponibilité, débit, délai de transmission, gigue, taux de perte de paquets. Appliquée aux réseaux à commutation de paquets (réseaux basés sur l'utilisation de routeurs) la QoS désigne l'aptitude à pouvoir garantir un niveau acceptable de perte des paquets, défini contractuellement, pour un usage donné (voix sur IP, vidéoconférence, etc.) [20].

Les exigences de QoS peuvent être classées en trois dimensions principales : la bande passante (Bandwidth), le retard et la perte de données. Le tableau 1.3 présente ces dimensions [11].

#### 1. La bande passante :

C'est la quantité de données pouvant être transmise durant un laps de temps. Le plus souvent, elle est mesurée en nombre de bits/seconde (bits par seconde, bps) où un de ses ordres de grandeur : kilobits par seconde ou Kbps (10<sup>3</sup> bps), mégabits par seconde ou Mbps (10<sup>3</sup>Kbps), gigabits par seconde ou Gbps (10<sup>3</sup>Mbps), etc. La bande passante est un paramètre clé de la vitesse de transmission des données : plus la bande passante est élevée, plus la transmission d'un fichier sera rapide. Ce paramètre est également crucial pour les applications temps réel. Par exemple, la vidéo en direct nécessite une bande

passante plancher sous laquelle on ne doit pas descendre pour garantir une transmission en temps réel des images. La contrainte de bande passante est donc une valeur seuil de bande passante disponible sous laquelle il ne faut pas descendre [17].

## 2. Le Retard :

C'est le temps qui sépare l'émission d'un paquet de données de l'arrivée à sa destination. Il est mesuré en secondes où un de ses ordres de grandeur (de quelques millisecondes pour les transmissions nécessitant une très grande réactivité à plusieurs minutes pour les applications tolérantes aux délais). Une contrainte de délai définit un temps maximum à ne pas dépasser pour tous les paquets. Les applications temps réel et interactives sont très sensibles au délai. Par exemple un jeu vidéo en ligne nécessite un délai très court (non perceptible par les joueurs) pour garantir la fluidité de l'interaction entre les joueurs et avec le jeu [17]. Des retards importants détruisent gravement les performances de ces applications.

## 3. La Perte de données :

Elle caractérise le retard entre l'émission et la réception d'un paquet. La plupart des applications multimédias sont classées comme sensibles à la bande passante et au retard car elles nécessitent des garanties strictes de bande passante et de retard, mais sont généralement tolérantes aux pertes car elles peuvent tolérer une certaine quantité de pertes de données. La perte de données dans ces applications entraîne une qualité de sortie légèrement réduite, mais peut être négligée dans une certaine mesure. Les effets de ces pertes de données sur la qualité de l'application et le montant des pertes tolérables dépendent de l'application et du schéma de codage utilisé [23]. D'un autre côté, les applications orientées données telles que le transfert de fichiers et le courrier électronique sont considérées comme sensibles aux pertes. Ils peuvent tolérer des retards et des variations de bande passante mais nécessitent un transfert de données fiable.

Performance Dimension			
Application	Bande passante	Retard	perte de données
VoIP	Faible	Haute	Moyenne
Vidéo conférence	Haute	Haute	Moyenne
Transaction client / serveur	Moyenne	Haute	Haute
E-mail	Faible	Faible	Haute
Transfert de fichier	Moyenne	Faible	Haute

TABLE 1.3 – Dimensions des performances QoS de l'application

## 1.6 IEEE 802.11e (QoS)

Le support sans fil a des caractéristiques fondamentalement différentes d'un support filaire. Nous devrions noter que le MAC essaye de fournir des garanties de service de QoS dans ce support qui est par sa nature imprévisible et dont la largeur de bande et le temps d'attente ne peuvent pas être garantis comme dans un système filaire, particulièrement dans un spectre non autorisé (hors License, comme la bande de 2.4 GHz et de 5 GHz). Pour résoudre ce problème, le comité d'IEEE 802.11 a formé le comité du groupe de travail IEEE (802.11e) pour définir des perfectionnements au MAC 802.11 original [23].

### 1.6.1 Limitations de QoS de la couche MAC 802.11

DCF n'a aucune garantie de supporter la QoS. Tout le trafic de données est traité par une stratégie FIFO (First In First Out) de façon de meilleur effort. Tout les STAs dans le BSS contestent pour le support sans fil avec la même priorité. Ceci entraîne le débit asymétrique entre la liaison montante et la liaison descendante, car l'AP a la même priorité que les autres STAs mais avec beaucoup d'exigence de haut débit. Aussi, Il n'y a aucune différenciation entre les flux de données pour supporter le trafic avec des exigences de QoS. Quand le nombre de STAs dans un BSS augmente, la probabilité des collisions devient plus haute et a comme conséquence les retransmissions fréquentes. Par conséquent la QoS diminue comme le débit global dans le BSS. Bien que PCF ait été conçu pour supporter le trafic avec temps limité, beaucoup d'insuffisances ont été identifiées. Celles-ci incluent des retards imprévisibles de balise ayant pour résultat la diminution significative de CFP, et la durée inconnue de transmission de STA voté la rendant très difficile pour que le PC (Point Coordinator ) prévoie et contrôle le programme d'interrogation pour le reste de la CFP [23].

En outre, il n'y a aucune interface de gestion définie pour mettre et contrôler des opérations de PCF. Par conséquent il est impossible de mettre des règles pour PCF selon les exigences des protocoles des couches plus élevées. Également il n'y a aucun mécanisme pour STAs de communiquer des exigences de QoS à l'AP, qui est essentiel pour optimiser la performance de l'algorithme de vote dans le PC [23].

En résumé, ni DCF ni PCF fournis un service suffisant pour soutenir le trafic avec des exigences de QoS.

### 1.6.2 Architecture de la couche MAC 802.11e

Les perfectionnements ajoutés à la norme 802.11e consiste à ajouter une nouvelle fonction de

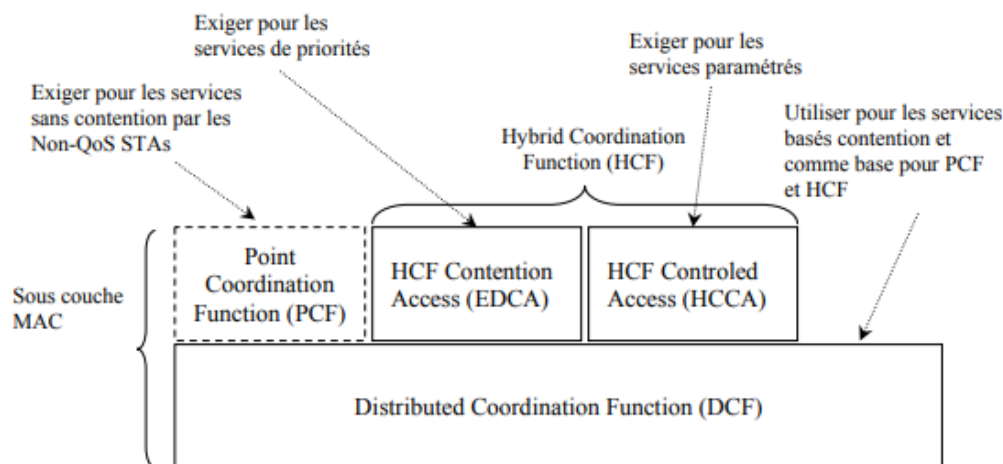


FIGURE 1.14 – Architecture MAC d'IEEE 802.11e.

coordination hybride « HCF » (en anglais Hybrid Coordination Function), dans laquelle deux mécanismes d'accès au média sont définis (voir Fig.1.14). Semblable aux deux mécanismes d'accès dans 802.11, ceux-ci sont de type d'accès au média basé contention (contention-based channel access), référé en tant que EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), et HCCA (HCF Controlled Channel Access).

Dans la suite nous décrivons les deux fonctions de coordination et ces mécanismes de QoS introduits. La Fig.1.14 illustre l'architecture de 802.11e et ces fonctions.

### 1.6.3 La méthode EDCA

EDCA améliore le DCF original pour fournir la QoS de niveau priorité, c'est à dire QoS basé sur la priorité de l'accès au support sans fil. Dans EDCA, le support de la QoS est obtenu en introduisant plusieurs catégories d'accès (AC) dans chaque station prenant en charge la QoS (QSTA).

EDCA définit quatre AC différents ont des priorités différentes et desservent différents types de trafic.

• **Catégories d'accès (AC) :** EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) qui définit quatre catégories d'accès aux canaux ou priorités :

- une priorité à la voix.
- une priorité à la vidéo.
- une priorité dite "Best Effort" pour les applications standards.
- une priorité dite "Background" lorsque le trafic est faible.

Chaque trame de la couche supérieure arrive à la couche MAC avec une valeur de priorité. On distingue au total huit niveaux de priorités des utilisateurs (User Priority ou UP) allant de 0 à 7. La relation entre les UPs et ACs est montrée dans le Tableau 1.4.

UP	Classe de trafic	AC
0	Background	BK
1	Background	BK
2	Best Effort	BE
3	Best Effort	BE
4	Video	VI
5	Video	VI
6	Voix	VO
7	Voix	VO

TABLE 1.4 – Relation entre les priorités et les catégories d'accès dans EDCA.

Chaque station QSTA implémente quatre files d'attente, une pour chaque AC et quatre EDCAFs (Enhanced Distributed Channel Access Function) indépendantes, chaque EDCAF est une version amélioré du DCF avec les mêmes principes d'accès au médium (CSMA/CA, backoff) mais basé sur des paramètres spécifiques pour chaque AC. Une illustration du modèle d'implémentation est démontrée dans la Figure 1.15.

Les paramètres suivants associés à un AC définissent la manière dont EDCAF recherche le support.

- **Nombre de l'espace arbitraire inter-trame (AIFSN) :** L'intervalle minimum du temps entre le temps où le média sans fil devient libre et le début de la transmission d'une trame.
- **CWmin, CWmax :** est la valeur minimale/maximale de de la fenêtre de contention utilisée pour le mécanisme de backoff.
- **TXOP Limit :** La durée maximale pour laquelle une QSTA peut transmettre après l'obtention d'un TXOP. La TXOP (Transmit Opportunity) est un intervalle de temps durant lequel une station qui a gagné l'accès au médium peut transmettre le plus possible de trames au récepteur.

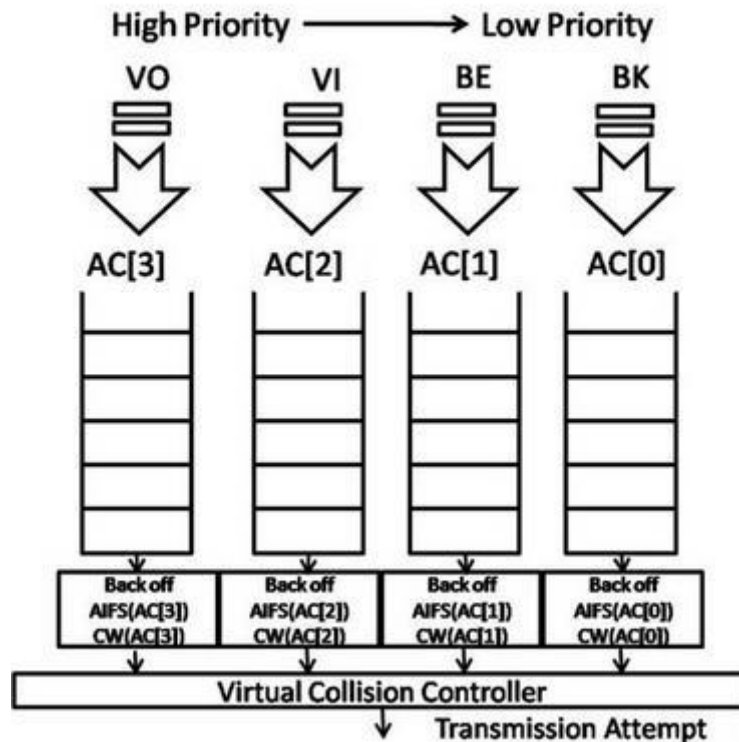


FIGURE 1.15 – Modèle d'implémentation de référence d'EDCA.

Comme le montre le tableau 1.5 [11], chaque AC possède ses propres paramètres et son propre comportement EDCA Function (EDCAF), les AC de priorité plus élevée (voix et vidéo) attendent une courte période d'AIFS, tandis que les AC de priorité inférieure (pour background et best effort) doivent attendre une plus longue période d'AIFS avant d'accéder au support. La taille du CW est différente, donc l'AC avec une priorité plus élevée sélectionnera la valeur backoff à partir du CW plus petit au lieu de l'AC avec une priorité plus faible. Le dernier paramètre de différenciation TXOPLimit permet d'augmenter le débit des ACs, il est donc utile d'avoir une grande valeur de ce paramètre pour les applications gourmandes en bande passante. Ceci justifie le choix des TXOPLimit par défaut du standard dans le Tableau 1.5, ou VI qui nécessite une bonne part de la bande passante se voit attribuer la plus grande valeur de TXOPLimit. Fondamentalement, pour les ACs à haute priorité, les AIFS, CWmin et CWmax

AC	CWmin	CWmax	AIFSN	TXOP (ms)
VO	$(aCW_{min}+1)/4 - 1$	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	2	1.504
VI	$(aCW_{min}+1)/2 - 1$	$aCW_{min}$	2	3.008
BE	$aCW_{min}$	$aCW_{max}$	3	0
BK	$aCW_{min}$	$aCW_{max}$	7	0

TABLE 1.5 – Valeurs standard des paramètres EDCA.

ont des valeurs plus petites, tandis que la limite TXOP a des valeurs plus grandes. Les valeurs des paramètres EDCA sont parfois appelées AIFS [AC], CWmin [AC], CWmax [AC] et TXOP Limit [AC].

Fondamentalement, la principale différence entre DCF et EDCAF est que EDCAF utilise des valeurs de paramètres spécifiques pour chaque AIFS AC [AC], CWmin [AC] et CWmax [AC], tandis que DCF utilise des valeurs fixes DIFS, CWmin et CWmax.



• **AIFS (Arbitration Interframe Space)** : La période minimale pendant laquelle le support doit être détecté au repos avant que QSTA ne commence la transmission ou l'interruption. Il s'agit d'une valeur variable et dépend de AC. Pour assurer la bonne différenciation, au lieu d'utiliser une valeur DIFS fixe, un AIFS est appliqué pour chaque AC selon l'équation suivante :

$$\text{AIFS} = \text{aSIFSTime} + \text{AIFSN} \times \text{aSlotTime}.$$

AIFSN est un nombre déterminé pour chaque AC, spécifique pour le paramètre AIFS, aSlotTime est la durée d'un slot de temps. La valeur minimale d'AIFSN est égale à 2 et sa valeur maximale est égale à 15. Les AC à haute priorité utilisent des valeurs AIFSN plus petites que les AC à basse priorité. Le tableau 1.4 montre les valeurs AIFSN par défaut pour les quatre AC.

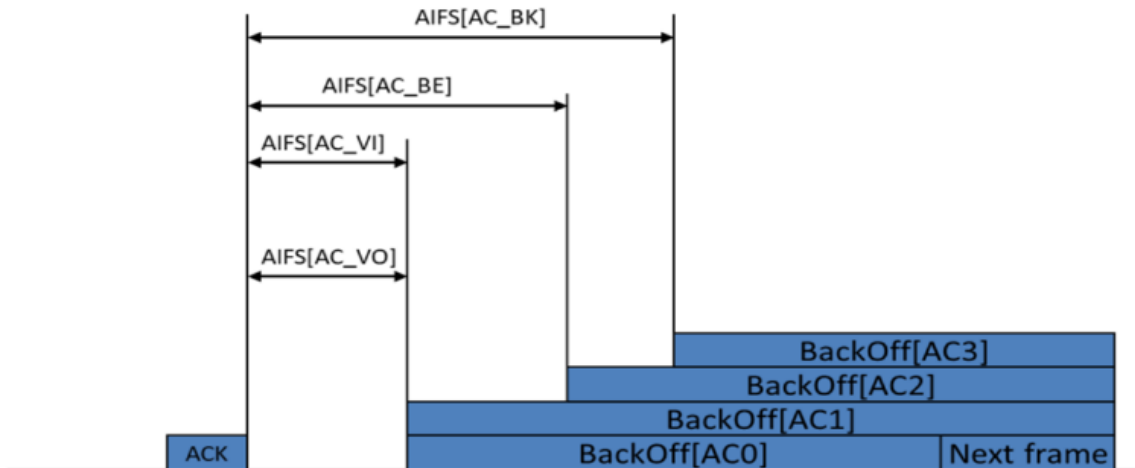


FIGURE 1.16 – Priorité du trafic basée sur AIFS.

La figure 1.16 montre comment attribuer la priorité de transmission à différents AC en fonction de la période AIFS. Pour les AC de priorité plus élevée, une valeur AIFSN plus petite oblige leur EDCAF à attendre un temps plus court avant de pouvoir commencer la transmission où le compte à rebours de son temporisateur d'interruption par rapport à l'EDCAF pour un AC de faible priorité. Ainsi, les AC plus prioritaires auront une plus grande part de la bande passante. De plus, la longueur AIFS plus courte garantit que les AC de priorité plus élevée ne subiront pas de retards plus longs [10].

#### 1.6.4 Le mécanisme EDCA dans IEEE 802.11e

EDCA s'appuie sur le concept de « catégories d'accès » (AC) et ses entités indépendantes de backoff. La station QoS (QSTA) implémente quatre AC. Chaque AC a un ensemble de paramètres EDCA associés. Ces paramètres incluent l'espace d'arbitrage entre les trames (AIFS), la fenêtre de contention (CW) et leurs valeurs minimale et maximale respectives CWmin et CWmax. Chaque AC de chaque station est en concurrence avec d'autres AC pour obtenir une opportunité de transmission (TXOP). Pour ce faire, il démarrera indépendamment un temporisateur de coupure après avoir détecté que le canal est inactif pendant l'intervalle AIFS. La période d'interruption (backoff) de chaque AC est sélectionnée en fonction de la distribution uniforme sur  $[0, CW[AC]]$ . Une valeur CWmin a été initialement affectée à la taille CW, et elle sera doublé lorsque la transmission a échoué jusqu'à CWmax. Plus le CWmin [AC] est petit, plus le temps d'accès au canal de la priorité correspondante est court, donc pour une condition de trafic donnée, il y a de meilleures chances d'accéder au média. En fonction de chaque type de trafic généré (notamment audio, vidéo et texte), le trafic provenant d'une application est associé à certains paramètres de QoS [18].

Si les compteurs de backoff de deux ou plus d'ACs concurrentes dans une station s'écoulent en même temps, un scheduler à l'intérieur de la station traite l'événement comme une collision virtuelle. Le TXOP est donné à l'AC avec la priorité la plus élevée parmi les ACs entrant en collision, et les autres ACs heurtées reportent et essayent de nouveau plus tard comme si la collision s'est produite dans le vrai support [18].

### 1.6.5 La méthode HCF Controlled Channel Accès

HCCA est un composant de HCF et fournit le support de paramétrage de QoS. Il hérite certaines règles du PCF traditionnel, et il introduit beaucoup d'extensions. Semblable à PCF, HCCA fournit l'accès élu au support sans fil. Mais à la différence de PCF, le Polling (l'élection) de QoS peut avoir lieu pendant le CP et l'ordonnancement des paquets est basé sur les TSPECs admises. Le concept central de HCCA est la phase d'accès contrôlée (CAP : Controlled Access Phase) qui est un intervalle du temps limité et il est formé en enchainant une série de HCCA-TXOPs. Le scheduling de HCCA-TXOP et la formation de CAP sont effectués par le HC. Le HC gagne l'accès au media sans fil puisque il utilise des paramètres d'accès plus courts que celui des autres stations, cela donne au HC la plus haute priorité pour l'accès au média [23].

802.11e introduit un certain nombre de nouveaux sous-types de trame de QoS. Pour HCCA-TXOP, la trame QoS CF-Poll est utilisée pour allouer le TXOP, et alors le transfert des données commence en utilisant des trames de données QoS. Les trames QoS-Null peuvent être utilisées pour terminer un HCCA-TXOP par nonAP QSTA s'il n'a aucune donnée à envoyer, ou le transfert des données s'est terminé. Les nombreux différents types des trames de données QoS et de leurs règles d'utilisation associées augmentent l'efficacité du MAC 802.11e, bien qu'il augmente aussi la complexité de l'ordonnanceur de HCCA [23].

## 1.7 IEEE 802.11n

En 2009, l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a approuvé l'amendement appelé IEEE 802.11n. Le 802.11n peut fonctionner dans l'une des bandes 2,4 ou 5,0 GHz en utilisant OFDM comme technique de modulation. Cet amendement apporte des améliorations par rapport aux générations précédentes comme le 802.11a ou le 802.11g. il permet d'augmenter le débit théorique maximum de transfert de données à 600 Mbps, une augmentation de plus de dix fois celle de la norme 802.11a/g à 54 Mbps. Cela est dû à l'utilisation de plusieurs antennes, avec une technologie MIMO, l'agrégation de trames et d'autres fonctionnalités qui seront détaillées dans les sections suivantes.

La base de la norme 802.11n :

- Augmentation du taux de transfert de données.
- Augmentation de la couverture du réseau.
- Fiabilité accrue de la transmission du signal.
- Augmentation de la bande passante du canal.

### 1.7.1 E/S multicanaux (MIMO)

L'un des points forts de la norme 802.11n est la prise en charge de la technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Les versions précédentes de l'IEEE n'utilisaient qu'une seule antenne. Un pour le dispositif de réception et un autre pour le dispositif d'émission. Cette configuration est appelée SISO pour Single-Input Single-Out.

La technologie MIMO permet la réception/transmission simultanée de plusieurs flux de données via plusieurs antennes au lieu d'une seule antenne.

La norme 802.11n définit différentes configurations d'antenne «  $M \times N$  » de «  $1 \times 1$  » à «  $4 \times 4$  ». Le premier nombre ( $M$ ) définit le nombre d'antennes émettrices, et le second nombre ( $N$ ) définit le nombre d'antennes réceptrices. Bien évidemment, il faut que l'émetteur et le récepteur disposent du même nombre d'antennes pour profiter au mieux du MIMO (voir la Figure 1.17). Si l'émetteur a trois antennes et le récepteur en a deux, alors avec (802.11n) l'émetteur se limitera automatiquement à deux flux simultanés. On parle dans ce cas de MIMO  $3 \times 2 \times 2$  : trois antennes à l'émission, deux antennes à la réception et deux flux simultanés.

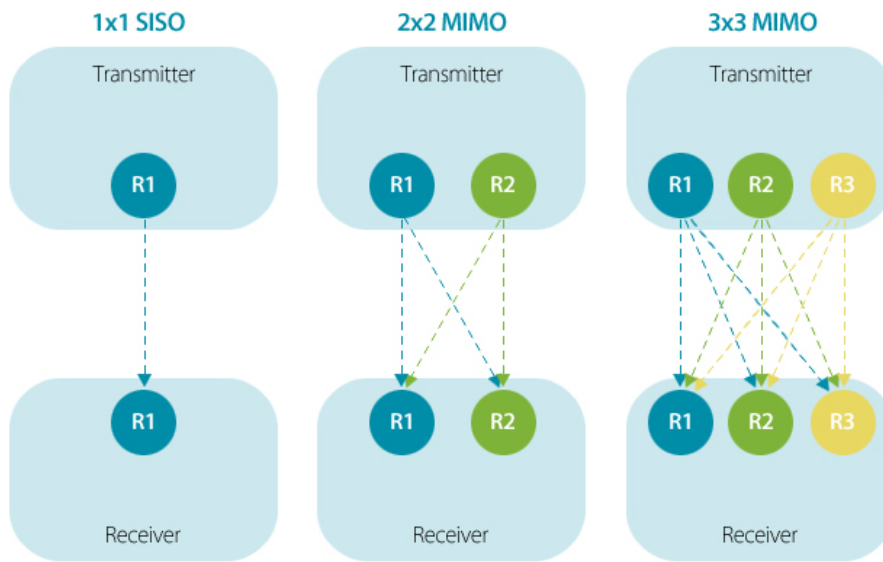


FIGURE 1.17 – Flux simultanés dépendant de nombre d'antennes.

La norme 802.11n intègre deux techniques MIMO : le multiplexage spatial et la formation de faisceaux. Le multiplexage spatial divise les données en plusieurs flux et les envoie simultanément sur plusieurs chemins dans le canal. Ces flux sont recombinaés dans le récepteur pour obtenir les données d'origine.

La formation de faisceaux est une technique qui utilise plusieurs éléments d'antenne directionnels pour façonner spatialement l'onde électromagnétique émise afin de transmettre l'énergie dans le récepteur sur un chemin optimal. La formation de faisceau nécessite que les stations d'émission et de réception effectuent un sondage de canal pour optimiser la forme et la direction du faisceau.

Comme décrit dans les sections précédentes (concernant les améliorations de la couche physique), les changements techniques apportés avec le 802.11n apportent des capacités de débit bien supérieures aux générations précédentes. Cependant, ces améliorations ne seront utiles que si des améliorations sont également réalisées sur la couche MAC. Afin d'améliorer les performances et de profiter de celles offertes par les améliorations de la couche physique, le 802.11n apporte différentes solutions. L'une de ces solutions est l'agrégation de trames.

## 1.7.2 Agrégation de trames

L'agrégation de trames est une fonctionnalité qui peut atténuer l'impact sur les performances en envoyant plusieurs paquets de données en une seule transmission 802.11. L'utilisation de

l'agrégation diminue le nombre de périodes de contention, d'espaces intertrames et d'en-têtes de protocole, augmentant ainsi le débit.

L'agrégation de trames est utilisée au niveau du protocole MAC, pour agréger plusieurs Protocol Data Units (PDUs) provenant de la couche supérieure. Comme nous le verrons, il existe deux manières de réaliser une agrégation de trames : A-MSDU et A-MPDU.

1. **Agrégation MSDU** : Le concept d'A-MSDU est de permettre l'envoi de plusieurs MSDU vers le même récepteur concaténés dans un seul MPDU. Cette fonction de support pour A-MSDU dans 802.11n est obligatoire au niveau du récepteur. Étant donné que l'adresse de destination et l'adresse de l'expéditeur dans l'en-tête de sous-trame doivent correspondre à la même adresse de récepteur et à l'adresse de l'émetteur dans l'en-tête MAC, A-MSDU ne peut pas être utilisé pour la diffusion et la multidiffusion [1].
2. **Agrégation MPDU** : Le concept d'agrégation A-MPDU consiste à joindre plusieurs sous-trames MPDU avec un seul en-tête PHY principal. Une différence essentielle par rapport à l'agrégation A-MSDU est que l'A-MPDU fonctionne après le processus d'encapsulation d'en-tête MAC. Cette méthode offre un débit MAC plus élevé que l'A-MSDU. La figure 1.18 montre ces deux méthodes d'agrégation de trames utilisées dans la norme de protocole 802.11n [1].

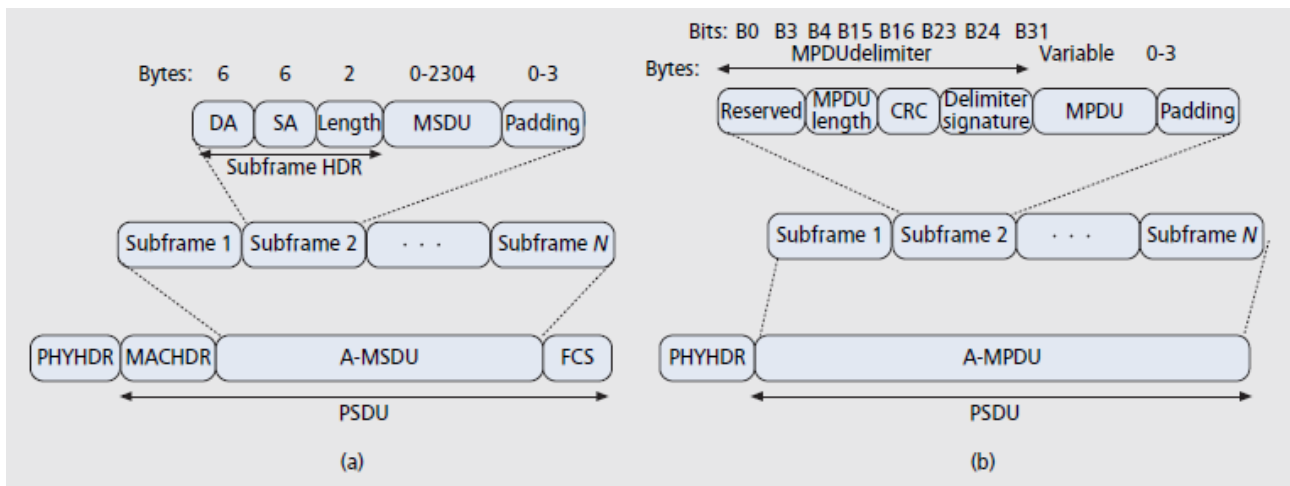


FIGURE 1.18 – Un niveau d'agrégation de trames A-MSDU et A-MPDU.

### 1.7.3 Accusé de réception de bloc (BA)

802.11n introduit l'accusé de réception de bloc (BA) qui permet l'accusé de réception de plusieurs paquets reçus avec une seule trame BA. Cette nouvelle technologie n'est pas appliquée avec les A-MSDU car une trame d'accusé de réception normale accuse réception de toutes les A-MSDU. Cependant, avec les A-MPDU, chaque sous-trame doit être reconnue individuellement. C'est le défaut de l'A-MSDU. Parce qu'un bit d'erreur peut se produire sur une seule sous-trame, laissant les autres sous-trames propres. Mais comme la détection d'erreur se fait grâce au FCS, général à l'ensemble du paquet agrégé, l'ensemble du paquet doit être réémis ce qui réduit considérablement la bande passante. Ce problème n'existe pas avec l'utilisation de A-MPDU et BA. Un BA est constitué d'un bitmap pour indiquer sélectivement lesquelles des trames transmises ont été perdues. Ces indications permettent à l'émetteur de ne réémettre que les trames perdues, un BA peut accuser réception de 64 trames au maximum [3].

## 1.8 IEEE 802.11ac

IEEE 802.11ac a été introduit en janvier 2014 pour améliorer encore la vitesse des réseaux locaux sans fil ainsi que la vitesse de liaison entre les smartphones, les téléviseurs compatibles Wi-Fi, les consoles de jeux et une foule d'autres appareils électroniques compatibles Wi-Fi. La norme IEEE 802.11ac a fourni ce que l'on a appelé un très haut débit, des vitesses de transfert de données VHT d'un minimum de 1 Gbps et des vitesses maximales de 7 Gbps.

La norme sans fil 802.11ac utilise uniquement la bande de fréquence 5 GHz. En raison du grand nombre d'appareils fonctionnant dans la bande 2,4 GHz, le signal dans la bande 5 GHz est moins sensible à divers types d'interférences. L'utilisation de la bande 5 GHz offre un spectre radio plus libre, ce qui se traduit par une connexion plus stable et plus rapide. Dans IEEE 802.11ac, un certain nombre de fonctionnalités clés ont été introduites, et pour atteindre les vitesses maximales mentionnées, celles-ci devaient être activées avant que les débits de données à très haut débit puissent être atteints sur le WLAN ou la liaison de communication sans fil.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principales améliorations physique et MAC qui permettent à cet amendement d'atteindre ces très hauts débits.

Principales améliorations de la couche physique cite : l'utilisation des canaux larges de 80/160 MHz, l'introduction de la nouvelle technique de codage haute densité 256-Quadrature Amplitude Modulation (QAM), l'augmentation du nombre d'antennes a huit (Mu-MiMo), et le Down-Link (DL) Multi-User MIMO (MU-MIMO).

### 1.8.1 Modulation d'ordre supérieure 256-QAM

Le nouveau système de modulation 256-QAM aux performances supérieures de la norme 802.11ac offre une augmentation du débit sans fil. La modulation 256-QAM par rapport à la modulation 64-QAM (sur 802.11n) augmente considérablement (jusqu'à environ 33%) le taux de transfert de données. Par exemple, sur 802.11ac avec une largeur de canal de 40 MHz, en utilisant 1 flux spatial et une modulation 256-QAM, la vitesse maximale dans le canal est de 200 Mbps, et sur 802.11n avec les mêmes paramètres, mais la modulation 64-QAM est de 150 Mbit/s.

### 1.8.2 Technique Multi-User MIMO (MU-MIMO) et le DL MU-MIMO

La technologie MIMO implémentée dans la norme 802.11n permet la réception/transmission simultanée de données entre les appareils du réseau. Mais à un moment donné, un seul appareil peut recevoir et envoyer des données tandis que d'autres attendent leur tour. La norme 802.11ac améliore considérablement cette situation. La technologie MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input, Multiple-Output) a été implémentée dans la norme. MU-MIMO crée un canal de transmission multithread dans lequel les autres appareils n'attendent pas leur tour.

Les appareils compatibles MU-MIMO peuvent transmettre simultanément jusqu'à quatre flux de données (figure 1.19). Cela permet une utilisation plus efficace du réseau sans fil et réduit la latence qui se produit lorsque le nombre de clients dans le réseau augmente de manière significative.

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 supportant un seul flux spatial. Ces clients SISO 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 Mu MIMO). Un point d'accès donné de



FIGURE 1.19 – Différence entre transmission SU MIMO et MU MIMO.

transmettre de groupes indépendants de flux de données simultanément à de multiples stations réceptrices dans la même bande de fréquences et en même temps [28].

### 1.8.3 BeamForming

Le 802.11ac prend en charge la technologie de mise en forme du signal directionnel Beamforming (parfois appelée technologie directionnelle adaptative Transmit Beamforming ou Tx Beamforming). Cette technologie résout le problème d'une chute de puissance du signal causée par sa réflexion sur divers objets et surfaces.

La technologie Beamforming fonctionne comme suit : l'émetteur transmet à pleine puissance un signal en cercle autour de lui, captant les récepteurs dans toute la zone et laissant d'autres zones « mortes » qui font elles-mêmes des interférences inutiles. Le principe du « Beamforming » est de toujours diffuser en cercle mais dès détection du récepteur de concentrer un signal directionnel vers lui (figure 1.20).



FIGURE 1.20 – fonctionnement de la technologie BeamForming.

Grâce à ces changements dans le fonctionnement et la méthode de diffusion du signal, le

WiFi 802.11ac sera moins perturbé, plus rapide, plus intense et par conséquent réduira la consommation des appareils équipés.

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.

### 1.8.4 Agrégation de trames

Comme nous l'avons déjà vu, la norme 802.11n propose deux types d'agrégation des trames, à savoir A-MSDU, A-MPDU. Le 802.11ac a augmenté la taille des trames agrégées A-MSDU et A-MPDU, respectivement à 11454 octets et 1048575 octets, et il ne recommande d'utiliser que l'agrégation A-MPDU [9].

### 1.8.5 TXOP Sharing

Le mécanisme TXOP a été introduit en 2005 par le groupe de travail 802.11e, son objectif principal était d'assurer une qualité de service (Qos) aux réseaux IEEE 802.11. Alors, le mécanisme TXOP offre à une catégorie d'accès (AC) donnée un accès sans contention pendant une période limitée, durant laquelle elle peut transmettre autant de trames qu'elle veut, à condition que la période TXOP ne soit pas dépassée.

Les règles de fonctionnement définies dans la TXOP 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 catégorie d'accès sont transmises. De cette manière, plusieurs trames appartenant aux autres catégories d'accès ne sont pas autorisées à être transmises simultanément. D'où l'utilisation de la technique DL-MIMO devient très limitée.

Pour remédier à ces anomalies, le 802.11ac adopte le TXOP Sharing comme solution. L'idée de base, comme illustré dans la figure 1.21, est que chaque EDCAF d'une station donnée cherche à gagner la contention avec ses propres paramètres EDCA. Une fois qu'une EDCAF obtient une TXOP, elle devient l'AC primaire. Les autres ACs deviennent automatiquement des ACs secondaires. L'AC primaire peut alors décider si elle peut partager sa période TXOP avec les autres ACs secondaires pour des transmissions simultanées.

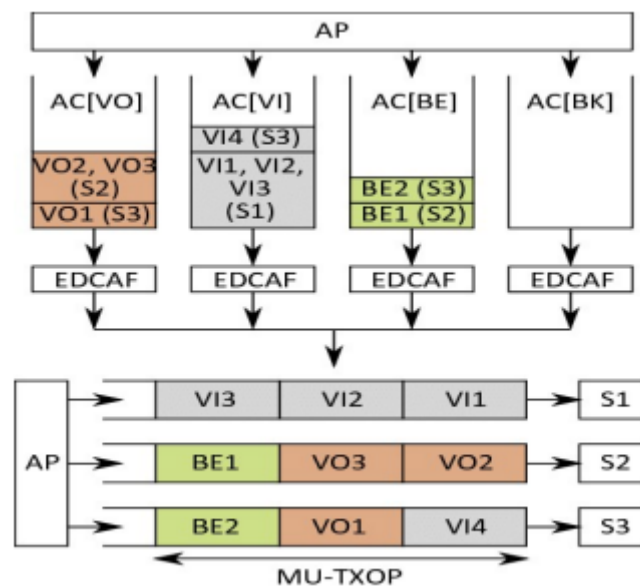


FIGURE 1.21 – illustration du mécanisme TXOP sharing.

Si elle décide de le faire, alors une ou plusieurs ACs secondaires vont être capable de transmettre durant la TXOP obtenue. La transmission DL MU-MIMO peut alors être réalisée [33].

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève description des réseaux sans fil, et ses intérêts et ses problèmes, ainsi que la classification selon la distance et l'infrastructure. Ensuite nous avons présenté les spécification du standard IEEE 802.11, notamment le fonctionnement de la couche physique et MAC, et ses différents amendements de la première version à IEEE 802.11ac.

Comme décrit dans ce chapitre, la norme IEEE 802.11 a subi plusieurs améliorations et modifications dans la couche physique et la couche Mac pour améliorer la qualité de service et le débit, et répondre aux besoins des utilisateurs.

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier en détail le fonctionnement d'une future génération de WiFi (norme IEEE 802.11ax) appelée High Efficiency WLAN (HEW).



## Présentation de la norme IEEE 802.11ax

### 2.1 introduction

La popularité et l'acceptation plus large des WLAN basés sur IEEE 802.11 ont entraîné leurs déploiements denses dans divers environnements. Alors que ce déploiement massif peut potentiellement augmenter la capacité et la couverture, la détection de porteuse physique actuelle de l'IEEE 802.11 ne peut pas limiter l'interférence globale induite et ne peut pas non plus assurer une simultanéité élevée entre les transmissions. Pour cela, l'IEEE a lancé le groupe de recherche Task Group AX (TGax) afin de développer un nouvel amendement appelé 802.11ax.

Au cours de ce chapitre, nous allons premièrement, présenter la norme 802.11ax, ses caractéristiques et objectifs, ainsi que les différentes améliorations introduites. Deuxièmement, donner une synthèse sur les travaux de recherche publiés traitant la technologie OFDMA, suivie et enfin une conclusion.

### 2.2 La norme 802.11ax

La norme 802.11ax, également connue sous la dénomination HEW (High-Efficiency WLAN) est conçue pour augmenter la capacité jusqu'à quatre fois, principalement en amélioration de l'efficacité spectrale. Cela procurera des avantages à la fois les bandes 2,4 GHz et 5 GHz dans une variété d'environnements, y compris entreprises, écoles, aéroports et gares, stades, salles de concert, et même la maison. 802.11ax permet à des dizaines d'appareils de communiquer simultanément avec chaque point d'accès radio [7].

Les objectifs de la norme 802.11ax comprennent :

- Amélioration des performances d'un réseau sans fil lorsque de nombreux appareils y sont connectés.
- Amélioration du fonctionnement dans la bande 2,4 GHz et 5 GHz.
- Améliorer l'efficacité de la gestion du trafic dans une variété d'environnements.
- Augmenter le débit moyen par station d'au moins quatre fois dans des scénarios de déploiement dense.
- Maintenir ou améliorer l'efficacité énergétique des stations.

La norme 802.11ax se concentre sur des composants principaux d'amélioration qui sont :

- Accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) liaison montante et liaison descendante (UL/DL).
- Multi-utilisateurs multi-entrées multi-sorties (MU-MIMO)  $8 \times 8$  et UL/DL.
- réutilisation spatiale, également appelée coloration BSS.
- Target Wake Time (TWT) — économie d'énergie.
- Nouveaux en-têtes PHY.
- Modulation d'amplitude en quadrature 1024 (1024-QAM).

### 2.2.1 OFDMA

OFDMA est une version multi-utilisateur de la technologie de modulation numérique par multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) qui permet à plusieurs utilisateurs de partager la bande passante disponible et transmettre simultanés, avec OFDM plusieurs utilisateurs ont été séparés dans le domaine temporel seul, chaque point d'accès peut communiquer avec un seul appareil à la fois donnant à un seul utilisateur toute la bande passante quelle que soit la taille du paquet ou canal, par conséquent il peut y avoir un spectre gaspillé si la taille de la charge utile du paquet client est petite.

Contrairement à l'OFDMA le point d'accès permet de communiquer simultanés avec plusieurs appareils en divisant chaque canal en sous canaux plus petits appelés unités de ressources (RU) également appelées tonalités, permettant à un point d'accès de synchroniser la communication (uplink et downlink) avec plusieurs clients individuels affectés à des RUs spécifiques. la taille minimale d'un RU est de 26 tonalités ce qui équivaut environ 2 mégahertz, par conséquent un canal de 20 MHz peut desservir jusqu'à 9 utilisateurs.

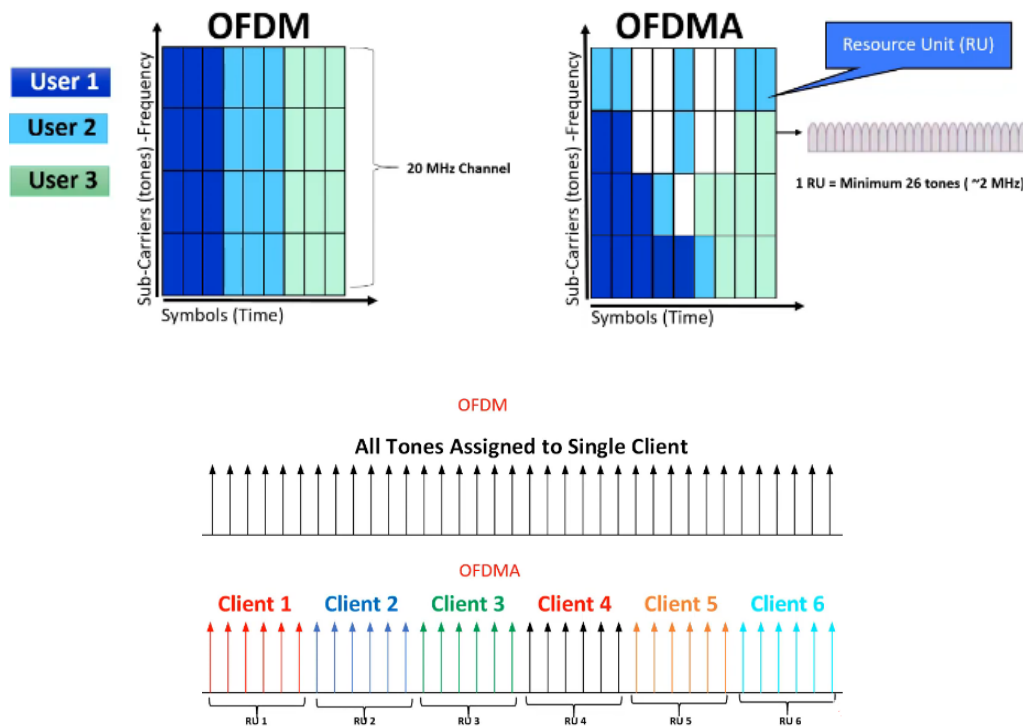


FIGURE 2.1 – Allocations de RUs en utilisant OFDM et OFDMA.

La figure 2.2 présente le positionnement des RUs dans la bande passante de 20 MHz, un canal OFDMA de 20 MHz se compose d'un total de 256 sous-porteuses, ces sous-porteuses ou tonalités sont regroupées dans des sous-canaux plus petits connus sous le nom d'unités de ressources (RU) avec une taille minimale de 26 pouvant accueillir jusqu'à 9 utilisateurs pour

chaque bande passante de 20 MHz, par exemple lors de la subdivision d'un canal de 20 MHz, un point d'accès désigne 26,52,106 ou toutes les 242 unités de ressource de sous-porteuse, ce qui équivaut à environ 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz et les canaux de 20 MHz respectivement.

Un point d'accès dicte comment de nombreux RU sont utilisés dans un canal de 20 MHz et différentes combinaisons peuvent être utilisées et différentes tailles peuvent être attribuées à chaque client en fonction de ses besoins en bande passante.



FIGURE 2.2 – Positions des RUs dans la bande passante de 20 MHz.

### 2.2.2 DL et UL OFDMA

Le principal changement dans la norme 802.11ax réside dans le lancement de la technologie OFDMA en liaisons descendantes DL (Downlink) de l'AP vers plusieurs STAs et en liaisons montantes UL (Uplink) à partir de plusieurs STA vers l'AP.

Comme détaillé dans la Figure 2.3, le processus de liaison descendante DL-OFDMA commence par le point d'accès, en lice pour l'espace aérien, puis l'AP envoie une trame de demande d'envoi multi-utilisateur (MU-RTS) sur l'ensemble du canal de 20 MHz pour que les appareils

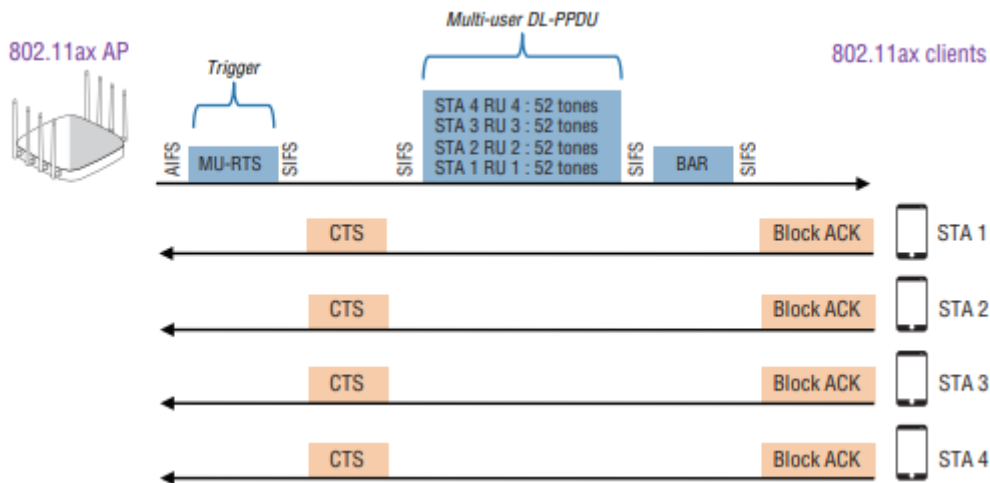


FIGURE 2.3 – Le processus du DL-OFDMA.

hérités comprennent que ce déclencheur fournit des affectations RU à la station qu'il a l'intention d'envoyer (indique au STA sur lesquelles les RUs doivent être écoutées) tout en fournissant une synchronisation pour tous les STAs pour la transmission de données suivante. Une fois reçue par les STAs identifiés, chacune envoie des réponses CTS (clear-to-send) en parallèle à renvoyer

à l'AP sur leurs RU attribuées, l'AP transmettra ensuite les données à chaque station, une fois que les stations reçoivent leurs données via leurs RU assignées, l'AP envoie une trame de demande d'accusé de réception de Block (BAR), à laquelle les STA répondent par des accusés de réception de bloc en parallèle [6].

UL-OFDMA est plus complexe que DL-OFDMA car dans la liaison montante, le trafic doit être transmis simultanément de plusieurs stations au point d'accès, et l'AP agit en tant que coordinateur des opérations et de la transmission, il s'agit aussi d'une transmission basée sur la programmation. Peut nécessiter l'utilisation de jusqu'à trois trames de déclenchement. Chaque trame de déclenchement est utilisée pour solliciter un type de réponse spécifique de la part des stations. Le processus UL commence par un point d'accès qui s'occupe de l'espace aérien, l'AP envoie d'abord une trame BSRP (buffer status report poll) pour demander aux stations des informations sur leur besoin d'envoyer des données sur la liaison montante (permet d'évaluer quelle allocation RU doit être fait pour répondre aux besoins de chaque station). Les stations répondent ensuite par des rapports d'état de la mémoire tampon (BSR). L'AP utilise ces informations pour décider comment allouer au mieux les RU aux stations pour les transmissions de la liaison montante. Une fois que les STAs répondent avec leur BSR, l'AP envoie une trame de demande d'envoi multi-utilisateur (MU-RTS) qui fonctionne comme un deuxième type de trame de déclenchement, l'AP utilise le MU-RTS pour allouer des unités de ressources (RU). Après les STAs envoient des réponses CTS en parallèle en utilisant leurs RU assignées. Une troisième trame de déclenchement de base est nécessaire pour indiquer aux stations de commencer la transmission de leurs données sur la liaison montante avec leurs RU assignées, chaque STA doit envoyer des données au même moment et également avec la même durée. Cela peut amener certains stations qui n'ont pas le p pdu de même taille à ajouter un rembourrage à la fin de la trame afin d'assurer qu'il transmet la même durée comme le montre la figure 2.4, ce rembourrage est identifié et rejeté par le point d'accès. Une fois que les données de la liaison montante sont reçues des stations, l'AP envoie un seul bloc ACK multi-utilisateur aux stations en utilisant le canal complet de 20 MHz [6].

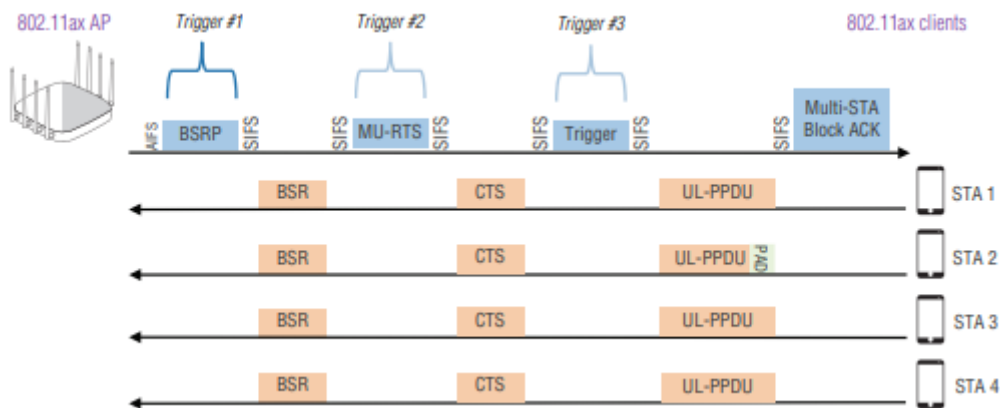


FIGURE 2.4 – Le processus du UL-OFDMA.

Pour résumer l'échange de trames UL-OFDMA dont nous venons de parler, les trois trames de déclenchement (Trigger) suivantes ont été utilisées [6] :

- **Trigger 1 :** BSRP demande aux stations des rapports sur l'état de la mémoire tampon.
- **Trigger 2 :** MU-RTS pour allouer les RUs et définir la NAV de chaque station.
- **Trigger 3 :** déclencheur de base pour signaler aux stations qu'ils doivent commencer leurs transmissions parallèles sur la liaison montante.

## 2.3 Technologie DL/UL MU-MIMO

MU-MIMO utilise la diversité spatiale des canaux pour transmettre des flux de données indépendants sur la même bande passante. Contrairement à l'OFDMA, tous les utilisateurs utilisent toutes les bandes passantes, ce qui apporte des gains de multiplexage. Limité par la taille de l'antenne, un terminal ne prend généralement en charge qu'un ou deux flux spatiaux (antennes), ce qui est inférieur au nombre de flux spatiaux (antennes) sur un point d'accès. Par conséquent, la technologie MU-MIMO est introduite pour permettre à un point d'accès de transmettre des données avec plusieurs terminaux en même temps, ce qui améliore considérablement le débit. MU-MIMO a été introduit depuis 802.11ac, mais seul MU-MIMO DL 4x4 est pris en charge. Dans 802.11ax, le nombre de MU-MIMO est encore augmenté et DL 8x8 MU-MIMO est pris en charge. La technologie DL OFDMA peut être utilisée pour effectuer simultanément une transmission MU-MIMO et allouer différentes RU pour une transmission à accès multiple multi-utilisateurs, ce qui augmente la capacité d'accès simultané du système et équilibre le débit [2].

UL MU-MIMO est une fonctionnalité importante introduite dans 802.11ax. Semblable à UL SU-MIMO, UL MU-MIMO utilise les mêmes ressources de canal pour transmettre des données sur plusieurs flux spatiaux en utilisant la technologie multi-antenne de l'émetteur et du récepteur. La seule différence est que plusieurs flux de données d'UL MU-MIMO proviennent de plusieurs utilisateurs. 802.11ac et les normes 802.11 antérieures utilisent UL SU-MIMO, c'est à dire qu'un utilisateur peut recevoir des données d'un seul utilisateur, ce qui est inefficace dans les scénarios multi-utilisateurs simultanés. Une fois que 802.11ax prend en charge UL MU-MIMO, la technologie UL OFDMA est exploitée pour permettre la transmission MU-MIMO et la transmission multi-utilisateurs à accès multiple en même temps. Cela améliore l'efficacité de la transmission dans les scénarios simultanés multi-utilisateurs et réduit considérablement le délai d'application [2].

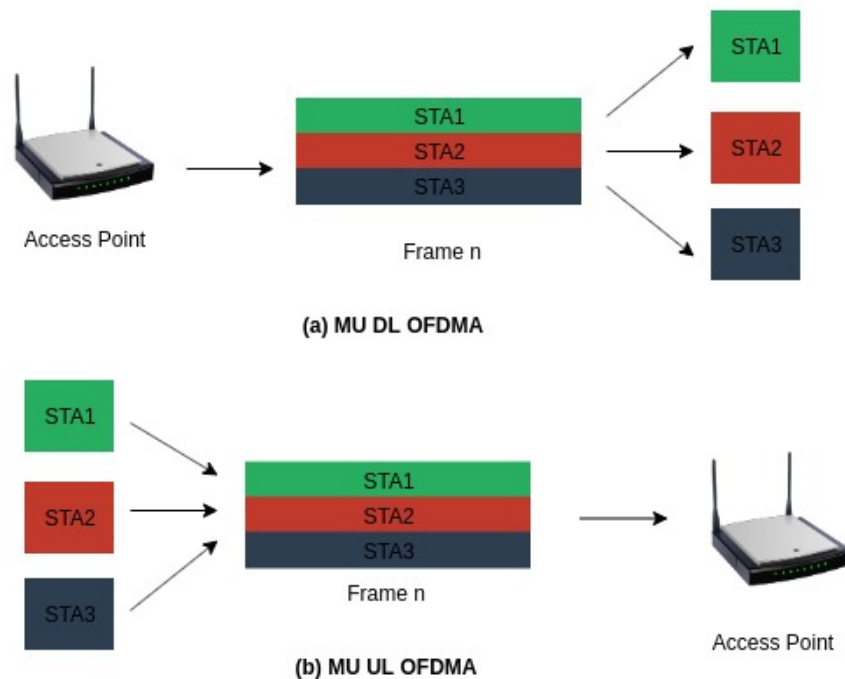


FIGURE 2.5 – MU DL OFDMA et MU UL OFDMA dans les WLANs.

### 2.3.1 OFDMA VS MU-MIMO

Bien que 802.11ax permette à OFDMA et MU-MIMO de fonctionner en même temps, mais ils sont différents. L'OFDMA permet à plusieurs utilisateurs de subdiviser les canaux (sous-canaux) pour améliorer l'efficacité de la simultanéité. MU-MIMO permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser différents flux spatiaux pour augmenter le débit. Le tableau suivant répertorie la comparaison entre OFDMA et MU-MIMO [2].

OFDMA	MU-MIMO
Améliorer l'efficacité	Améliorer la capacité
Réduire la latence	Augmenter le taux de chaque utilisateur
Convient le mieux aux applications à faible bande passante	Convient le mieux aux applications à large bande passante
Convient le mieux à la transmission de petits paquets	Convient le mieux à la transmission de gros paquets

TABLE 2.1 – Comparaison entre OFDMA et MU-MIMO.

## 2.4 Réutilisation spatiale

C'est un nouveau concept proposé dans l'IEEE norme 802.11ax pour surmonter l'utilisation excessive de WLAN. Il consiste à allouer le même canal radio ou la même RU à plusieurs stations. Ceci est possible par au moyen de la technique de couleur BSS (Basic Service Set)[30].

### 2.4.1 BSS color

Le 802.11ax introduit un nouveau mécanisme d'identification de transmission co-fréquence appelé coloration BSS sert à minimiser les interférences des réseaux sans fils à proximité. Le champ de couleur BSS est ajouté à l'en-tête du paquet PHY pour colorer les données de différents BSS et attribuer une couleur à chaque canal [2].

La couleur identifie un BSS qui ne doit pas être interféré. Le récepteur peut identifier les signaux d'interférence dans le même canal et arrêter de les recevoir à un stade précoce, évitant ainsi une perte de temps de l'émetteur-récepteur. Si les couleurs sont identiques, les signaux d'interférence sont considérés comme étant dans le même BSS et la transmission du signal est retardée. Si les couleurs sont différentes, aucune interférence n'existe entre les deux appareils Wi-Fi. Ils peuvent alors transmettre des données sur le même canal et à la même fréquence. Dans ce mode, les canaux de même couleur sont éloignés les uns des autres [2].



FIGURE 2.6 – Utilisation de BSS Coloring entre deux points d'accès avec 802.11ax.

Ainsi, lorsque nous avons deux routeurs wifi côte à côte (deux point d'accès AP1 et AP2) comme le montre la figure 2.6, les signaux des deux réseaux peuvent se chevaucher et provoquer des interférences avec l'autre signal, mais avec la coloration BSS. Il colore ou marque des réseaux pour pouvoir distinguer un autre réseau de sien. Il marque les trames des réseaux à proximité afin que le routeur les ignore, ce qui rend le routeur wifi plus efficace, car moins un routeur est distrait, plus il peut être réactif.

## 2.5 modulation d'ordre supérieur (1024-QAM)

La norme 802.11ax vise à augmenter la capacité du système, à réduire la latence et à améliorer l'efficacité dans les scénarios haute densité multi-utilisateurs. Cependant, le rendement élevé n'est pas mutuellement exclusif avec la vitesse rapide. 802.11ac utilise 256-QAM et chaque symbole transmet des données 8 bits ( $2^8=256$ ). Le 802.11ax utilise la modulation d'amplitude en quadrature 1024-QAM et chaque bit de symbole transmet des données de 10 bits ( $2^{10}=1024$ ) [2].

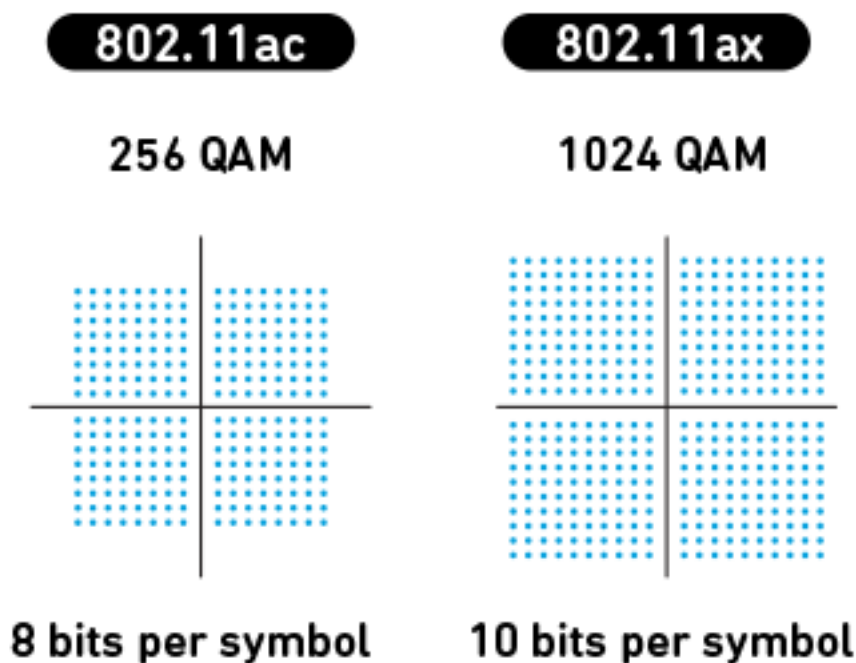


FIGURE 2.7 – Différence 256/1024 QAM par symbole.

Par conséquent, par rapport au 802.11ac, le 802.11ax augmente le débit de données d'un seul flux spatial de 25%. L'application réussie de la modulation 1024-QAM dans 802.11ax dépend des conditions du canal. Les points de constellation denses nécessitent une grande amplitude de vecteur d'erreur (EVM) (utilisée pour quantifier les performances du récepteur ou de l'émetteur radio en précision de modulation) et la sensibilité du récepteur. De plus, la qualité du canal doit être supérieure à celle des autres types de modulation [2].

## 2.6 Nouveau formats PPDU

Pour prendre en charge les différentes technologies et scénarios ajoutés, et pour garantir une comptabilité 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). Les quatre PPDUs 802.11ax sont les suivantes [6] :

**HE SU (Single User)** Le PPDU mono-utilisateur à haut rendement est utilisé lorsqu’il y a une transmission mono-utilisateur.

**HE MU (Multi-User)** Le PPDU multi-utilisateurs à haute efficacité est utilisé pour la transmission à un ou plusieurs utilisateurs. Ce format PPDU contient le champ HE-SIG-B, qui est nécessaire pour à la fois MU-MIMO ou MU-OFDMA et allocation d’unité de ressource. Le PPDU HE MU n’est pas utilisé comme réponse à un déclencheur, ce qui signifie que ce format PPDU est utilisé pour les trames de déclenchement ou transmissions descendantes.

**HE ER SU** Le format PPDU mono-utilisateur à portée étendue et à haut rendement est destiné à un seul utilisateur, cependant les champs d’entraînement HE-SIG-A et HE sont amplifiés de 3 dB. Le champ HE-SIG-A est deux fois plus long que les autres PPDU HE. Ce format PPDU est destiné à améliorer les communications extérieures et la portée.

**HE TB (Trigger Based)** Le PPDU basé sur un déclencheur à haut rendement est destiné à une transmission qui répond à une trame de déclenchement. En d’autres termes, ce format PPDU est utilisé pour les communications montantes.

Le champ HE-SIG-A dans ces quatre en-têtes PHY (Figure 2.8) contient les informations nécessaires pour interpréter les PPDU HE. Divers bits dans ce champ d’en-tête PHY sont utilisés comme indicateurs de ces informations. Par exemple, le champ SIG-A peut indiquer si la transmission est en liaison montante ou descendante. Les informations de modulation et de schéma de codage(MCS), les informations de couleur BSS, la taille de l’intervalle de garde, etc. sont toutes contenues dans ce champ d’en-tête PHY. Les informations d’allocation RU sont communiquées aux clients au niveau des couches PHY et MAC. Les informations d’attribution RU peuvent être trouvées dans le champ HE-SIG-B de l’en-tête PHY d’une PPDU HE MU.

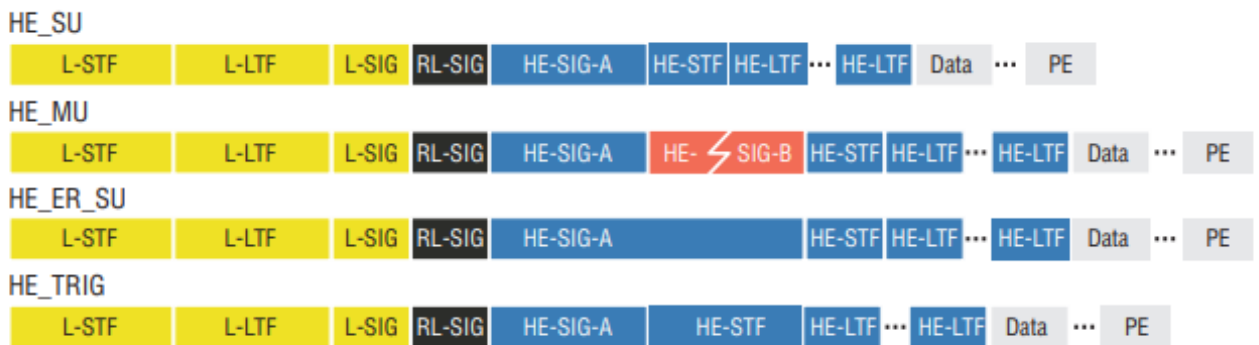


FIGURE 2.8 – HE PPDU formats.

Le champ HE-SIG-B est utilisé pour communiquer les affectations RU aux clients. Comme le montre la Figure 2.9, le champ HE-SIG-B se compose de deux sous-champs : le champ commun et le champ spécifique à l'utilisateur. Un sous-champ du champ commun est utilisé pour indiquer comment un canal est partitionné en plusieurs RU. Par exemple, un canal de 20 MHz peut être subdivisé en une RU de 106 tonalités et cinq RU de 26 tonalités. Le champ spécifique à l'utilisateur comprend plusieurs champs utilisateur qui sont utilisés pour communiquer à quels utilisateurs sont affectés chaque RU individuelle [6].



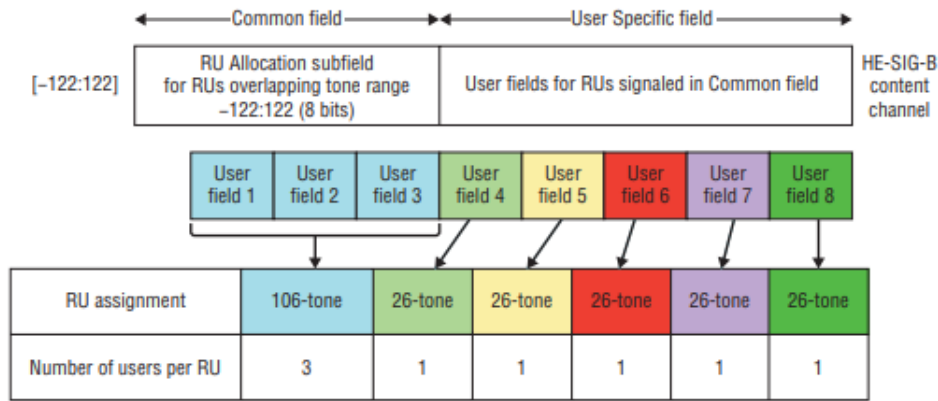


FIGURE 2.9 – Le champ HE-SIG-B.

## 2.7 Target Wake Time (TWT) — économie d'énergie

Le temps de réveil cible (TWT) est une importante fonction de planification des ressources prise en charge par le 802.11ax. Il permet aux STA de négocier avec les points d'accès l'horaire de réveil, puis d'envoyer ou de recevoir des données. Les points d'accès peuvent regrouper les STAs en différentes périodes TWT pour réduire le nombre d'appareils qui se disputent simultanément le support sans fil après le réveil. De plus, le TWT augmente le temps de veille de l'appareil. Pour les STAs alimentés par batterie, la durée de vie de la batterie s'est considérablement améliorée [2].

Un point d'accès 802.11ax peut négocier avec les STAs participantes l'utilisation de la fonction TWT pour définir une heure spécifique ou un ensemble d'heures pour que les STAs individuelles accèdent au support. Les STAs et l'AP échangent des informations qui incluent une durée d'activité prévue. Cela évite les conflits et les chevauchements entre les STAs. Les STAs 802.11ax peuvent utiliser le TWT pour réduire la consommation d'énergie, en entrant dans un état de veille jusqu'à ce que leur TWT arrive. La norme appelle cette procédure opération "Broadcast TWT" [2].

## 2.8 Synthèse sur les travaux OFDMA

Les réseaux Wi-Fi peuvent désormais offrir une connectivité à haut débit même dans des endroits peuplés selon IEEE 802.11ax. La tâche d'augmenter le débit est la plus difficile dans ce contexte car la norme IEEE 802.11ax garantit une augmentation du débit moyen par station de quatre fois. Cette section fournit une description de certaines études sur la norme IEEE 802.11ax, basée sur la technologie OFDMA.

**Q. Qu et al (2015) [25]** : Les principaux défis de l'adoption de l'OFDMA dans la norme IEEE 802.11ax sont la synchronisation et la réduction de l'overhead. Pour cela, **Q. Qu et al [25]** proposent dans cet article un protocole d'accès multiple basé sur l'OFDMA pour IEEE 802.11ax (OMAX) afin de résoudre les deux défis ci-dessus. L'idée principale d'OMAX est d'adopter une détection du canal physique sur l'ensemble du canal et un processus de backoff rapide pour garantir la synchronisation entre les différents STAs, et d'utiliser un Mécanisme RTS/CTS amélioré et une structure de trame pour réduire l'overhead. Le fonctionnement du protocole OMAX est décrit comme suit :

1. Les STAs détectent l'ensemble du canal selon la détection de la porteuse physique dans

- le DCF jusqu'à ce que le canal soit libre pour l'espace intertrame distribué (DIFS).
2. Les STAs effectuent le processus de backoff en utilisant les mêmes règles de backoff que dans le DCF de l'IEEE 802.11, en espérant que le compteur de backoff dans les STA soit diminué de 4 pour chaque créneau libre puisqu'il y en a quatre sous-canaux dans la figure 2.10.
  3. Après l'achèvement du backoff, les STA choisissent aléatoirement un sous-canal pour transmettre la demande d'envoi (RTS), et l'AP transmette un groupe d'autorisation d'émettre (G-CTS) pour indiquer les informations d'attribution des sous-canaux en fonction des besoins de services des différentes STAs.
  4. Les STAs transmettent les données en fonction des informations contenues dans les G-CTS, et l'AP répond par un accusé de réception de groupe (G-ACK).

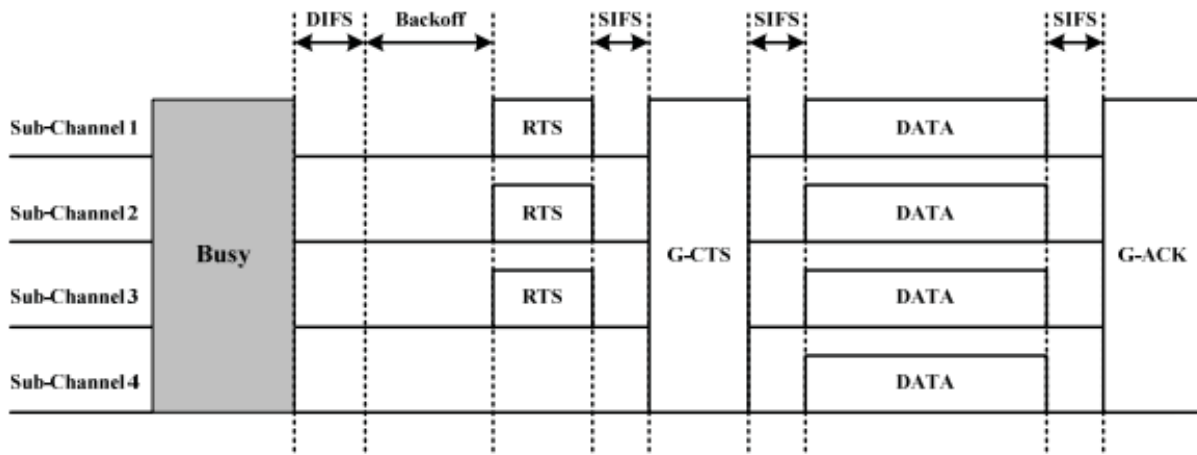


FIGURE 2.10 – Procédure OMAX.

**J.Lee et al (2016) [19]** : Le protocole Hybrid MAC (H-MAC) proposé dans cet article est basé sur un mélange d'accès centralisé contrôle et accès aléatoire distribué pour maximiser le canal utilisation dans OFDMA. il introduit trois messages de contrôles : Request-to-Multiple-DL (RMD), Clear-to-Receive-with-UL-request (CRU) et Request-to-Multiple-UL (RMU). Le rôle de ces trois types de messages est le suivant : RMD utilise l'ensemble du canal pour identifier chaque station candidate pour DL de plus il joue un rôle de signal de synchronisation pour CRU. Lors de la réception RMD, les stations DL désignées peuvent répondre en utilisant des sous-canaux correspondants dans CRU, les stations non désignées peuvent accéder de manière aléatoire à l'un d'entre eux dans CRU pour signaler leurs demandes UL. AP recueille les demandes UL en utilisant le CRU. RMU n'est rien d'autre qu'un déclencheur pour les transmissions UL.

Comme détaillé dans la Figure 2.11, H-MAC fonctionne en quatre phases comme suit : dans la première phase nommé **control période**, le point d'accès émet RMD sur l'ensemble du canal. Si AP a des données à transmettre, AP répertorie les stations candidates pour DL avec sous-canaux alloués à chacun d'eux en RMD. En réponse à RMD, les stations répertoriées dans RMD peuvent transmettre leur propre CRU utilisant un sous-canal chacun dans l'ordre apparu dans RMD. Si elles sont prêtes à recevoir DL sur les sous-canaux alloués. Les sous-canaux non alloués pour CRU sont ouverts au stations qui ne sont pas incluses dans la liste de RMD, mais qui ont Données UL. Dès réception de RMD, ils sont autorisés à accéder aléatoirement l'un des sous-canaux non forme comme illustré à la Figure 2.11, STA A, B et C recevront des

données DL puisque ils transmettent CRU en réponse à RMD. Les sous-canaux restants pour l'emplacement CRU sont remplis de manière aléatoire avec les CRU de STA D, E, F et G qui ont des données UL. Ce type d'accès aléatoire peut provoquer des collisions qui retardent le fonctionnement UL.

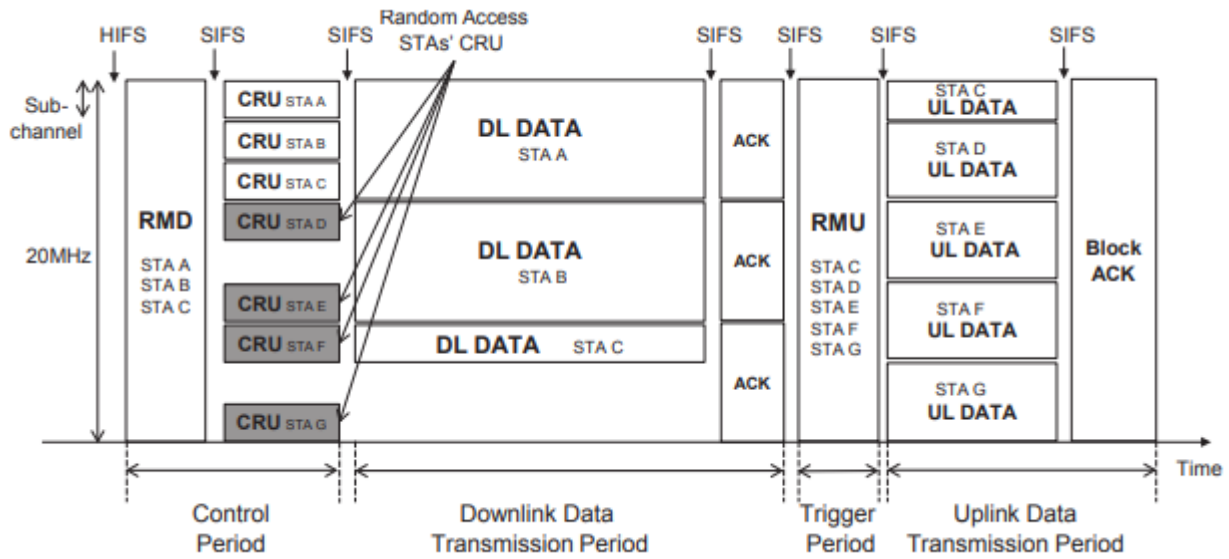


FIGURE 2.11 – Protocole H-MAC.

Ensuite le point d'accès décode CRU et transmet ses données après les stations acquittent la bonne réception des données DL en envoyant des ACK chacune. Durant une deuxième phase qualifiée dans H-MAC par **Downlink Data Transmission période**, après avoir recueilli les demandes UL via CRU, le point d'accès programme les transmissions UL en utilisant un signal de déclenchement RMU. Les stations qui transmettent des demandes avec succès trouveront leur adresse et les sous-canaux alloués à l'accueil de RMU pendant la troisième phase **trigger période**, pour qu'enfin les stations transmettent leurs données UL et l'AP les acquitte par un Block ACK (BA) dans la dernière phase **Uplink Data Transmission Period**.

**R.Zhou et al (2019) [26]** : Avec la diversité croissante des services sans fil et la croissance explosive du trafic, le réseau local sans fil (WLAN) est devenu le principal transporteur de trafics sans fil. Par conséquent, comment assurer les exigences de qualité de service (QoS) de les trafics hautement prioritaires est l'une des cibles importantes du WLAN de prochaine génération pour cela, dans cet article les auteurs proposent un protocole OFDMA MAC à un double accès aléatoire orienté QoS nommé DRA-OFDMA dans la liaison montante (UL), Le but de ce protocole n'est pas seulement de garantir les exigences de QoS pour le trafic hautement prioritaire, mais aussi rendre le trafic de faible priorité plus équitable possibilités de transmission sans introduire d'aérien. Comme le montre la Figure 2.12, la conception du protocole est principalement divisé en trois phases comme suit :

**phase d'accès aléatoire** : Tous les utilisateurs du BSS adoptent le traditionnel Distributed Fonction de coordination (DCF) et les utilisateurs effectuent le processus de backoff. Une fois le backoff terminé, un sous-canal est sélectionné de manière aléatoire et indépendante par l'utilisateur pour la transmission de la trame Buffer State Report (BSR) de chaque STA.

**Phase d'allocation des ressources** : Lorsque la première phase d'accès aléatoire est terminée. Les STAs, qui sont les utilisateurs de vidéo ou les utilisateurs d'arrière-plan, sont traités

de la même manière et les ressources de sous-canal leur sont allouées par l'AP. Afin d'assurer l'équité, le même nombre de sous-canaux est attribué à tous les utilisateurs qui reçoivent leur BSR. Pour plus de simplicité, cet article alloue un sous-canal pour tous les utilisateurs ayant réussi à envoyer leur BSR avec succès. Après l'allocation de sous-canal, 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 liaison montante, après une durée (SIFS), PA diffuse la trame TF sur le canal complet. Tous les utilisateurs UL qui ont envoyés des trames BSR reçoivent cette trame. Tout d'abord, chaque STA vérifié si sa propre adresse est contenue dans le champ d'adresse de la trame TF. Si la trame TF porte sa propre adresse, l'utilisateur obtient son propre sous-canal selon le résultat d'attribution de sous-canal de la trame TF. Sinon, le premier accès aléatoire a échoué.

**Deuxième d'accès aléatoire et transmission de données :** Sur la base des informations d'allocation de sous-canal dans la trame TF, les STAs qui sont obtenus dans le premier accès aléatoire transmettent avec succès leurs données sur le sous-canal spécifié après le temps SIFS. pour le reste des STAs qui ont 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 la 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 de 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 Bloc 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.

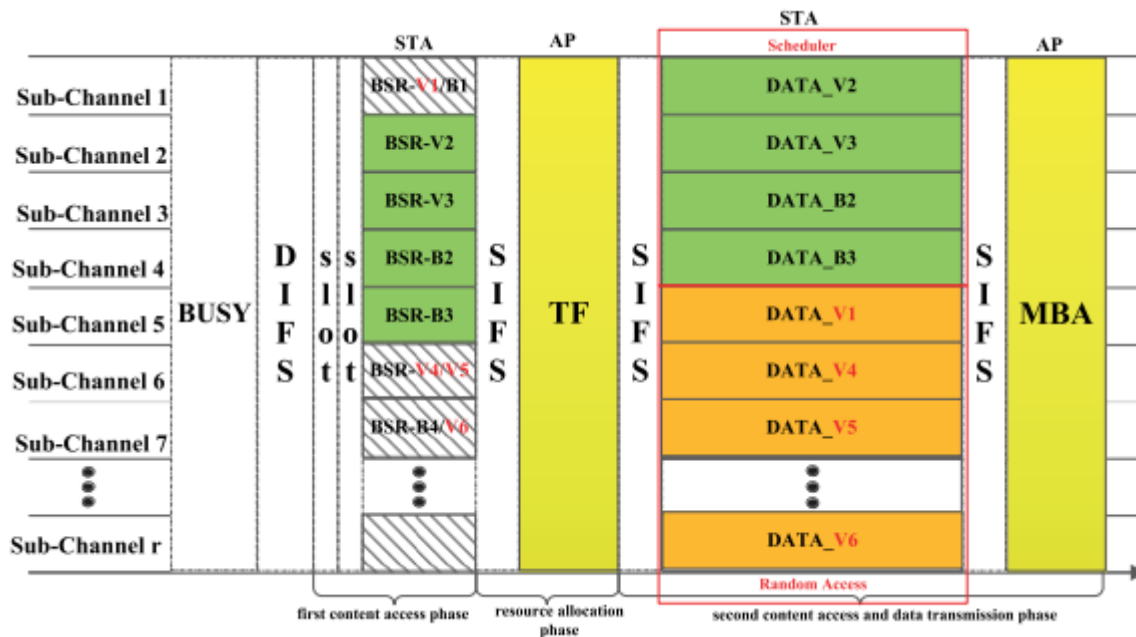


FIGURE 2.12 – Fonctionnement du protocole DRA-OFDMA.

M.Wu et al (2019) [21] : Ces auteurs proposent un schéma d'affectation de RU à haut

débit (HiTRAS), qui vise un haut débit pour le WLAN basé sur 802.11ax. Le HiTRAS est appliqué dans l'AP pour assigner les RUs d'accès aléatoire (RA-RUs) disponibles aux STAs de sorte que les STAs puissent transmettre leur trafic UL à l'AP simultanément au niveau de leurs RA-RUs respectives dans le cadre du mécanisme OFDMA. Comme illustré dans la Figure 2.13, le processus de transmission du trafic UL peut être divisé en deux phases : « BSR poll and RU allocation phase », au cours de AP collecte les BSR et attribue les RUs, et « UL transmission and ACK phase », pendant laquelle les STAs transmettent le trafic UL et l'AP accuse réception. Les principales étapes contenues dans le processus peuvent être décrites comme suit :

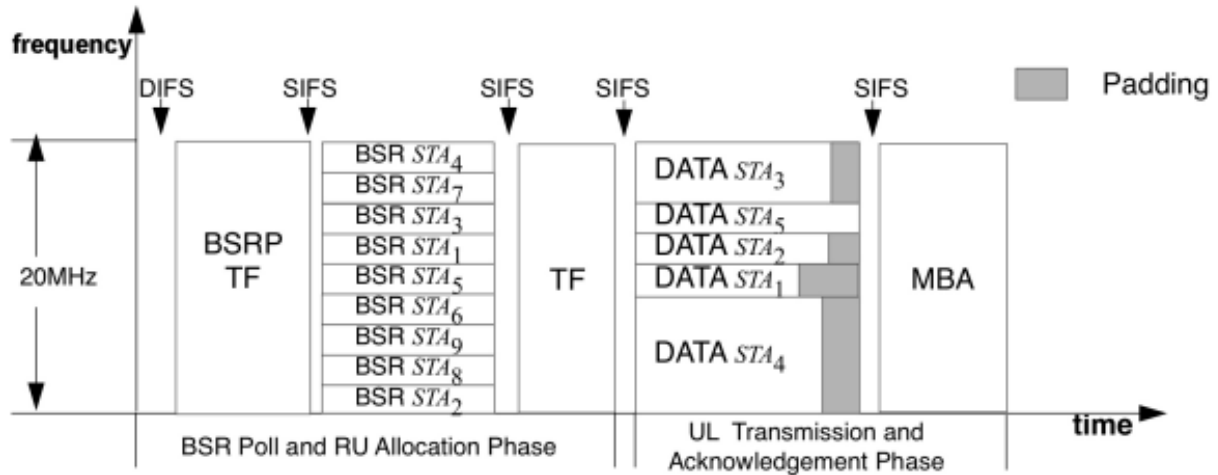


FIGURE 2.13 – La procédure de transmission UL.

**Etape 1 :** L'AP utilise la procédure BSRP pour collecter les BSR des STAs associés en diffusant un BSRP TF aux STAs. Avant d'initier la procédure BSRP, l'AP détecte le canal pendant la période d'inactivité de DIFS.

**Etape 2 :** Après avoir reçu le BSRP TF, chaque STA ayant un trafic UL répond avec son BSR dans l'une des RUs d'accès aléatoire disponibles (un backoff est nécessaire) ou dans la RU prédésignée par le AP. Par exemple, la figure 2.13 indique que les STA1, STA2, ..., et STA9 réussissent à obtenir les RA-RUs pour envoyer leurs BSR en réponse au BSRP TF de l'AP.

**Etape 3 :** L'AP adopte le HiTRAS proposé, pour attribuer les RUs, ce qui fournit à chaque STA avec la paire optimale d'indice MCS et de tonalité (par exemple, 26 tonalités, 52 tonalités, 106 tonalités ou 242 tonalités). Ces paires sont contenues dans une autre TF, qui est diffusée aux STA concernés.

**Etape 4 :** Chacune des STAs qui gagne l'une des RUs attribuées par le point d'accès transmet son trafic UL dans son RU (par exemple, STA1, STA2, ..., et STA5 à la figure 2.13).

**Etape 5 :** L'AP accuse réception du trafic UL en utilisant l'accusé de réception de bloc (ACK) ou l'accusé de réception de bloc multi-utilisateur (MBA).

## 2.9 Problématique

Dans la nouvelle norme IEEE 802.11ax l'OFDMA est la technologie innovante qui permet un accès simultané de plusieurs utilisateurs sur un canal de 20 MHz. Pour cela plusieurs travaux scientifiques ont été publiés parmi eux les travaux cités dans la section précédente sur la conception des méthodes MAC permettant la gestion d'accès aux RUs tout en optimisant le débit et l'efficacité de l'utilisation du canal de transmission radio. En effet la majorité des travaux non pas pris en considération la synchronisation de la transmission simultanés des différents

flux de données (les données arrivent en même temps) ainsi que l'utilisations des différents RUs qui compose le canal de transmission. Par conséquent, il est crucial de concevoir le protocole HiTRAS [21] qui attribue efficacement les RUs à plusieurs STA afin que les STAs puissent transmettre simultanément dans différentes RUs sous l'OFDMA, améliorant ainsi le débit du WLAN c'est le seul protocole qui pensé a la synchronisation de la transmission simultanés des différentes flux de données. Les longueurs de données générées par l'AP dans ce protocole HiTRAS [21] sont de tailles variables et prédéterminées et utilise des RUs de différentes tailles.

Une quantité de bits de bourrage est utilisée pour s'assurer qu'il n'y a pas de variabilité dans le temps de transmission des différents flux de données tout en maintenant la synchronisation du réseau. Pour cela, l'inclusion d'un mécanisme de gestion des données à transférer est nécessaire afin de réduire la quantité de bits de bourrage primordial pour mieux utiliser les RUs tout en améliorant le débit et assurant la synchronisation.

## 2.10 conclusion

Ce chapitre est organisé en deux parties. Dans la première partie, nous avons présenté la norme 802.11ax connue sous la dénomination HEW (High-Efficiency WLAN), où nous avons fourni les portées, le fonctionnement et les principales caractéristique technologique telles qu'OFDMA, modulation à l'ordre de 1024-QAM, MU-MIMO, etc. Dans la deuxième partie, nous avons étudié les travaux de recherches et les propositions existants basées sur la technologie OFDMA de la norme IEEE 802.11ax.

Dans le troisième chapitre et le dernier, nous proposons une méthode d'accès pour améliorer le débit de transmission et réduire la quantité de bits de bourrage utilisée tout en assurant la synchronisation. Afin d'augmenter la vitesse de transmission et d'utiliser moins de bits de bourrage tout en maintenant la synchronisation, nous proposons une technique d'accès.

# Proposition et évaluation de performances

## 3.1 Introduction

L'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) introduit dans l'amendement IEEE 802.11ax promet d'améliorer l'efficacité spectrale en regroupant les sous-porteuses en unités de ressources (RU). Il est important de concevoir l'affectation des RUs pour améliorer le débit du WLAN basé sur l'OFDMA.

Dans ce chapitre, nous allons proposer une méthode d'accès OFDMA afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des sous-canaux et donc d'augmenter le débit de transmission. Tout d'abord, nous présenterons une explication détaillée de la méthode proposée en premier. Une simulation et évaluation de performance de la méthode proposée sera décrite en second.

## 3.2 Proposition

Afin de répondre à la problématique citée auparavant dans le chapitre 2 section 2.9, dans cette partie nous proposons une méthode d'accès UE-RUs (Utilisation Efficace des RUs) au médium basée sur l'OFDMA qui est l'amélioration de la méthode présentée par M.Wu et al (2019)[21].

La méthode HiTRAS [21] présente un inconvénient majeur qui l'ajout des bits de bourrage aux nombreuses trames de données diffusées sur les sous-porteuses d'un canal de 20 MHz pour assurer la cohérence de la longueur de trame, ce qui se traduira à une sous-utilisation de la capacité spectrale des sous-porteuses.

D'autre part, notre proposition consiste à utiliser le principe d'agrégation des trames de données envoyées en UL pour réduire la quantité de bits de bourrage envoyés.

La méthode d'accès UE-RUs proposée apporte des modifications au niveau de la phase de transmission de données UL dans la méthode HiTRAS[21], dans le but d'améliorer le débit de transmission en exploitant les RUs efficacement. L'amélioration en fait, consiste à introduire le mécanisme d'agrégation des trames de données à la méthode HiTRAS.

Comme détaillé dans la figure 3.1 notre proposition est divisé en deux phase, dans la phase de signalisation, L'AP collecte les BSR des STAs liées en utilisant le processus BSRP. Avant de diffuser un BSRP TF aux STAs, l'AP identifie le canal pendant l'intervalle d'inactivité DIFS avant de commencer l'opération BSRP. Après la réception de BSR, on procède pour l'agrégation de données pour profiter pleinement des RUs allouées, ensuite on rajoute des bits de bourrage s'il y a lieu pour synchroniser la phase de transmission UL.

Dans la phase de transmission de donnée UL, l'envoi de trames PPDU est effectuée par la gestion du point d'accès. Voici les spécificités de cette gestion :

- Après avoir reçu les trames BSR, le point d'accès charge la première donnée à envoyer dans chaque file d'attente pour chaque station et recherche la donnée ayant longueur maximale MAX. Il affect les différents RUs aux STAs qui ont réussi à envoyer leur BSR, puis il calcule le temps de transmission UL.
- Après SIFS l'AP informe les STAs de leur RUs allouer ainsi que le temps de transmission UL en envoyant la trame TF sur tous le canal de 20 MHz.
- La réception de la trame TF (target frame), les STAs concernés envoient leur données plus agrégations de données et aussi ajout de bit de bourrages s'il y a lieu pour synchroniser la transmission simultanée de différents flux de données UL. A la fin de la transmission l'AP acquitte les différents flux de données en envoyant un bloc ACK.

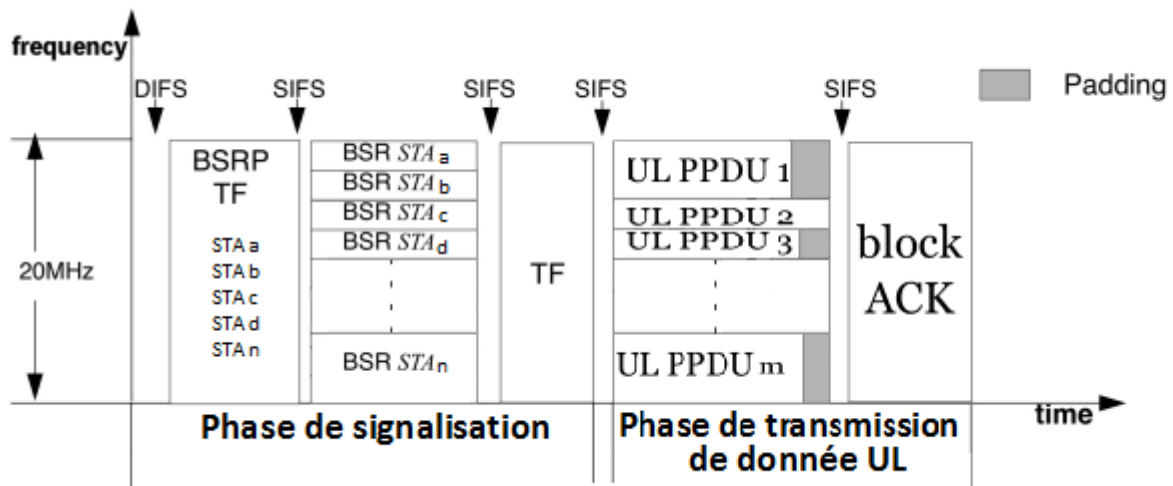


FIGURE 3.1 – Protocole UE-RUs.

### 3.3 Les Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation que nous avons utilisé pour calculer nos métriques d'évaluation des performances sont définis dans le tableau 3.1. Nous avons conçu nos simulations en utilisant un canal de transmission de 20 MHz pouvant gérer jusqu'à 9 utilisateurs simultanés. Et les Paramètres de simulation qu'on a utilisé sont présenté dans le tableau 3.1.

Paramètre	Signification	Valeur
Channel Bandwidth	largeur de la bande passante	20 MHz
Control Packet PHY rates (Mb/s)	vitesse de transmission d'entête PHY	0.9, 1.8, 3.8, 8.6
Data Packet PHY rates (Mb/s)	vitesse de transmission des données	11.8, 23.5, 50, 114.7
Short Inter-Frame Space (SIFS)	le temps inter-trame	16 $\mu$ s
Guard interval	garantir que des transmissions distinctes n'interfèrent pas entre elles	0.8 $\mu$ s
OFDMA symbol duration	la rapidité de modulation OFDMA, 6 bits forment un symbole	3.6 $\mu$ s

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation



### 3.4 Résultats de simulation

Les métriques que nous avons calculés pour évaluer les performances de notre proposition UE-RUs sont : le débit UL (quantité de données envoyer par cycle) et le taux de perte en bits de bourrage (la quantité de bit de bourrage rajouter par cycle). Puisque, la méthode proposée UE-RUs est une amélioration de la méthode HiTRAS, les résultats de la simulation des paramètres d'évaluation de performances de la méthode UE-RUs sont comparés aux résultats de HiTRAS.

Le logiciel que nous avons utilisé pour appliquer notre méthode UE-RUs, est le langage MATLAB sous le système Windows. Le nom MATLAB est la contraction du terme anglais Matrix Laboratory, ce logiciel est spécialement conçu pour le calcul scientifique et la manipulation de vecteurs et de matrices. MATLAB est à la fois un langage de programmation et un environnement de développement, développé et commercialisé par la société américaine MathWorks. MATLAB est utilisé dans les domaines de l'éducation, de la recherche et de l'industrie pour le calcul numérique mais aussi dans les phases de développement de projets.

#### 3.4.1 Débit UL

Une simulation est utilisée dans la méthode HiTRAS et la méthode UE-RUs pour évaluer le débit des transmissions UL dans le réseau.

D'après les résultats présentées ci-dessous, on constate que la méthode UE-RUs surpasse la méthode HiTRAS à mesure que le nombre de stations augmente. Le débit UL peut atteindre 152 Kbits/cycle dans HiTRAS par contre 248 Kbits/cycle dans UE-RUs, une amélioration de 96 Kbits/cycle ( $248-152=96$  Kbits/cycle) est de bénéfice, ces résultats révèlent l'efficacité UE-RUs dans les réseaux encombrés. On remarque egalemet, dans la figure 3.2 le débit UL dans les deux méthodes de 5 jusqu'à 15 stations augmente en fonction d'augmentation de nombre de stations en revanche de 20 jusqu'à 50 stations le débit UL dégrade cette dégradation du débit est dû au collision de l'envoi des BSR, les stations ont pas pu accéder au canal pour envoyer leurs données.

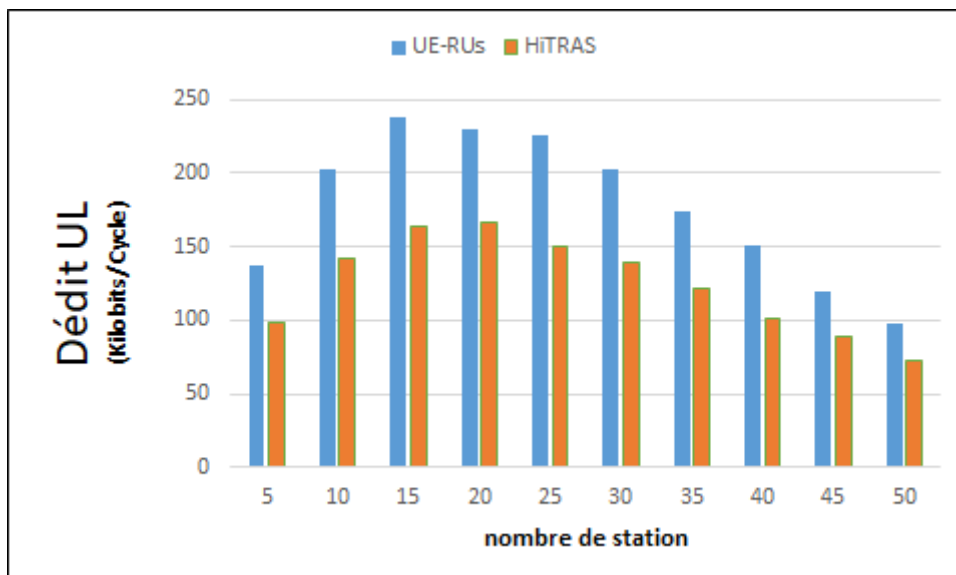


FIGURE 3.2 – Débit UL

### 3.4.2 Taux de perte en bits de bourrage

Pour synchroniser les transmissions, une quantité considérable de bits est envoyée en utilisant la méthode HiTRAS et la méthode UE-RUs. En mettant en œuvre notre proposition UE-RUs la charge en bits de bourrage est réduite, la figure 3.3 montre la différence entre le taux de perte en bits de bourrage en utilisant la méthode HiTRAS et la méthode UE-RUs.

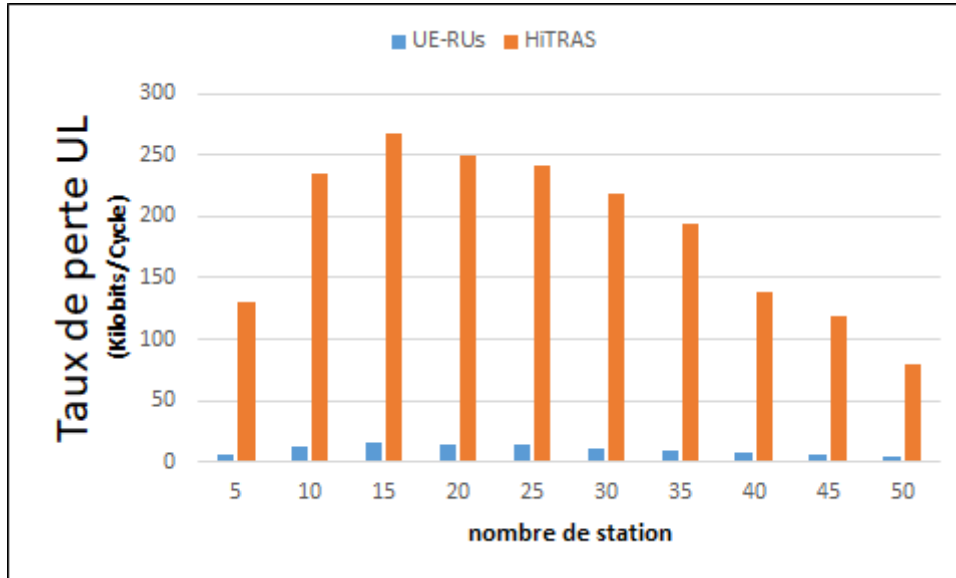


FIGURE 3.3 – Taux de perte en bits de bourrage.

Dans la méthode HiTRAS, un taux de perte en bits de bourrage peut atteindre 254 Kbits/cycle, comme le montre la Figure 3.3. D'autre part, le taux de perte maximal en bits de bourrage dans UE-RUs ne dépasse pas 13 Kbits/cycle, ce qui se traduit par un avantage de 244 Kbits/cycle ( $254-10=244$  Kbits/cycle) en données est offert en utilisant UE-RUs. Ces résultats garantissent l'efficacité de la méthode UE-RUs à minimiser le taux de perte en bits de bourrage. On remarque dans la méthode HiTRAS La quantité de bits de bourrage suit le débit UL, quand le débit UL augmente le taux de perte en bits de bourrage va augmenter par exemple dans la figure 3.2 le débit UL est de 152 Kbits/cycle où le nombre de station est 15, et dans la figure 3.3 le taux de perte en bits de bourrage est de 254 Kbits/cycle. Par contre notre méthode UE-RUs rajoute peu de bits de bourrage peu importe l'augmentation du débit (dans la figure 3.2 le débit UL est de 248 Kbits/cycle où le nombre de stations est 15, et dans la figure 3.3 le taux de perte en bits de bourrage est de 13 Kbits/cycle).

## 3.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, le fonctionnement de la méthode proposée a été décrit en détail et également ce chapitre présente la méthode UE-RUs comme une amélioration de la méthode HiTRAS décrivant les différences entre les deux méthodes et incluant un composant de simulation pour démontrer l'utilité de la proposition. De toute évidence, les résultats de la simulation montrent que la méthode proposée UE-RUs est plus efficace que HiTRAS en termes d'amélioration du débit de transmission et de réduction le taux de perte en bits de bourrage.

## Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous avons présenté les généralités sur les réseaux sans fils, et on a décrit la norme IEEE 802.11, cette norme est l'une des technologies les plus couramment utilisées pour les réseaux WLAN, et offre des instructions détaillées pour leur bon fonctionnement. Elle a défini nombreuses évolutions des normes sous les noms IEEE 802.11 b/a/g/n/ac/ax. Nous avons concentré dans ce travail sur la dernière norme IEEE 802.11ax, dédiée aux réseaux denses.

En passant par la norme HEW, cette norme propose un ensemble de clés spécifiques qui lui permettent d'œuvrer à l'atteinte de ses objectifs. En conséquence, chacun de ces objectifs est confronté à un certain nombre de défis. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'OFDMA, qui est l'un des objectifs clés de la norme IEEE 802.11ax.

Selon des recherches sur plusieurs problèmes résolus par l'introduction de l'OFDMA, nous avons pu proposer une méthode d'accès UE-RUs. Notre proposition est basée sur la notion d'agrégation de trames. En conséquence, nous augmentons le débit de transmission tout en améliorant l'utilisation optimale des RUs et en assurant la synchronisation. Pour ce faire, nous avons développé un mécanisme de gestion des trames agrégées pour les transmissions UL OFDMA tout en réduisant le nombre de bits de bourrage utilisé pour la synchronisation et en augmentant le débit utilisateur.

Ensuite, des comparaisons sont faites entre le débit produit par des trames de données de longueurs variables et les trames de données agrégées. Selon les résultats de la simulation notre méthode UE-RUs améliore le débit UL.

Les perspectives suivantes sont générées par ce travail :

- Proposition d'une méthode d'accès UE-RUs permettant l'amélioration de débit de transmission UL OFDMA.
- Etude comparative des débits offerts par l'adoption du principe de regroupement de canaux de 20 MHz pour UL OFDMA en utilisant l'agrégation de trames.

# Bibliographie

- [1] <https://mrncciew.com/2013/04/11/a-mpdu-a-msdu/>. consulté le 17/05/2022.
- [2] <https://support.huawei.com/enterprise/fr/doc/EDOC1100102755?fbclid=IwAR3d5L-1/>. consulté le 28/05/2022.
- [3] <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/remi/MacLayer/>. consulté le 15/05/2022.
- [4] A. Belabdelli and M. Ouakaz. *Dimensionnement D'un Réseau Sans Fil Wifi*. Université AbouBekrBelkaid Tlemcen, Faculté de Technologie, Mémoire de master, 2012.
- [5] M. Brahma. *Etude de la QoS dans les réseaux ad hoc : intégration du concept de l'ingénierie du trafic. Réseaux et télécommunications [cs.NI]*. Français.fftel-00132114f, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2006.
- [6] David D. Coleman and David A. Westcott. 802.11ax : High efficiency (he). *Certified Wireless Network Administrator Study Guide : Exam CWNA-107, Fifth Edition*, pages 796–809, 2018.
- [7] D.Coleman and Lawrence C. Miller. *802.11ax For Dummies*. Aerohive Special Edition.
- [8] D. Dhoutaut. *Etude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2003.
- [9] L. Chaari E. Charfi and L. Kamoun. phy/mac enhancements and qos mechanisms for very high throughput wlans : A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, pages 1714–1735, 2013.
- [10] Lee et al. Dynamic traffic prioritization and txop allocation,. Octobre 2013.
- [11] Radwan et al. Performance evaluation of power management, engineering sciences series. 38 :2, 2016.
- [12] C. Fares and K. Imad. *Proposition et Simulation d'une méthode MAC multi-canaux dans les Réseaux très haut débits IEEE 802.11ac, Mémoire de master, Département d'informatique*. Univ-Bejaia, Algérie, 2014.
- [13] L. Fedoua. *Qualité de Service dans les réseaux locaux sans fil de type IEEE 802.11*. PhD thesis, Université AbouBekrBelkaid, Tlemcen, 2010.
- [14] A. Géron. *Wifi Professionnel : La norme 802.11, le déploiement, la sécurité*. 3nd édition, Dunod, paris, 2009.
- [15] HADDACHE. *Les réseaux sans fil (Wireless Networks)*. 2010/2011.
- [16] H.NOUI. *Les Réseaux sans fils IEEE 802.11*. 2010.
- [17] M. Lamali. *Qualité de service et calcul de chemins dans les réseaux inter-domaine et multicouches*. PhD thesis, Université deVersailles Saint-Quentin, 2015.
- [18] S. Laouar. *Évaluation des performances du protocole IEEE 802.11e, Mémoire de master*. Univ-Saad Dahlab – Blida1, 2020.

- [19] J. Lee and C. Kim. An efficient multiple access coordination scheme for ofdma wlan. *IEEE Communications Letters*, 21(3) :596–599, Mars 2017.
- [20] D. Loïc. *Quel est l'effet de la QoS sur des petits réseaux de labo*. PhD thesis, Haute école d'ingénierie et d'architecture fribourg, 2018.
- [21] Y. Zhu M. Wu, J. Wang. High throughput resource unit assignment scheme for ofdma-based wlan. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2019.
- [22] E. W. Knightly O. Bejarano and M. Park. Ieee 802.11ac : from channelization to multi-user mimo. *IEEE Communications Magazine*, 51(10) :84–90, Octobre 2013.
- [23] N. Ouazene. *Pour une QoS au niveau de la Couche MAC dans les Réseaux Sans fil*. Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar BATNA,, 2009.
- [24] G. Pujolle. *les réseaux*. Eyrolles.
- [25] M. Yang Q. Qu, B. Li and Z. Yan. An ofdma based concurrent multiuser mac for upcoming ieee 802.11ax. In *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, page 136–141, Mars 2015.
- [26] Z. Ya A. Yang R. Zhou, B. Li and M. 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, May 2019.
- [27] G. Redieteb. *Cross-layer Optimization for Next Generation Wi-Fi*. PhD thesis, National Institute of Applied Sciences (INSA), Rennes, Octobre 2012.
- [28] RUCKUS. *802.11ac : Very High Throughput*. février 2013.
- [29] K. Runser. *Méthodologies pour la planification de réseaux locaux sans fil*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2005.
- [30] M. YAZID S. BRAHMI and M. OMAR. Multiuser access via ofdma technology in high density ieee 802.11ax wlans : A survey.
- [31] S. BOUCHENAK. *Étude et mise en œuvre de protocoles de sécurité des réseaux Wi-Fi : Application au réseau de l'université de Tlemcen», Mémoire de Magistère*,. Université A-bouBekrBelkaid, Tlemcen, Faculté de Technologie, 2017.
- [32] N. C. Taher. *Analytical modeling and admission control in 802.11e EDCA for Quality of Service control in 802.11e wireless networks*. PhD thesis, Université d'Evry-Val d'Essonne, Mars 2009.
- [33] M. Yazid. *Evaluation et optimisation des performances des réseaux locaux sans fil IEEE 802.11*. PhD thesis, Univ-Bejaia, Algérie, 2015.
- [34] F. Zidani. *Solution d'authentification et de gestion de clés pour le standard 802.11 i des réseaux WiFi*. PhD thesis, 2018.

## RÉSUMÉ

En raison de l'accessibilité croissante aux réseaux sans fils 802.11 et leur utilisation ont créé une multitude de nouveaux défis. Ceci est spécifiquement dans les zones encombrées où les performances des utilisateurs est une préoccupation. À cet égard, la norme IEEE 802.11ax ou HEW a été introduite. Cette norme offre une efficacité et un débit amélioré dans des environnements denses en utilisant les capacités PHY et MAC en présentant de nouvelles technologies tels que OFDMA. La technologie de modulation OFDMA permet de communiquer simultanés avec plusieurs appareils en divisant chaque canal en sous canaux plus petits appelés unités de ressources (RU), la taille minimale d'un RU est de 26, un canal de 20 MHz peut desservir jusqu'à 9 utilisateurs. Dans ce mémoire, nous avons d'abord présenté les réseaux sans fils et la norme IEEE 802.11, puis nous avons mis en évidence les problèmes clés et les avancées technologiques de la norme IEEE 802.11ax, et à la fin nous avons proposé une méthode d'accès UE-RUs basée sur OFDMA en utilisant le concept d'agrégation de trames pour augmenter le débit des utilisateurs dans les endroits encombrés. Notre proposition est accompagnée de résultats de simulation qui montrent l'augmentation du débit qu'elle fournit.

**Mots clés** : WLAN, IEEE 802.11ax, OFDMA, UE-RUs.

## ABSTRACT

Due to the increasing accessibility of 802.11 wireless networks and their use have created a multitude of new challenges. This is specifically in congested areas where user performance is a concern. In this regard, the IEEE 802.11ax standard or HEW was introduced. This standard provides improved efficiency and throughput in harsh environments. dense environments using PHY and MAC capabilities by showcasing new technologies such as OFDMA. OFDMA modulation technology enables simultaneous communication with multiple devices by dividing each channel into smaller sub-channels called units of resources (RU), the minimum size of a RU is 26, a 20 MHz channel can serve up to 9 users. In this thesis, we first presented the wireless networks and the IEEE 802.11 standard, then we highlighted key issues and technological advances. gics of the IEEE 802.11ax standard, and at the end we proposed an access method UE-RUs based on OFDMA using the concept of frame aggregation to increase the throughput of users in congested places. Our proposal is accompanied by results of simulation that show the increased throughput it provides

**Key words** : WLAN, IEEE 802.11ax, OFDMA, UE-RUs.