

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira-Bejaia

---

Faculté des Sciences Exactes  
Département Informatique

---



## PROJET FIN DE CYCLE

OPTION : ADMINISTRATION ET SÉCURITÉ DES RÉSEAUX

## T H È M E

---

*La Radio Full Duplex dans les réseaux HEW  
(High Efficiency Wlan's)*

---

PRÉSENTÉ PAR :

BOUALIT *Abdelkrim*

BOUCHERIF *Younes*

MEMBRES DE JURY :

PRÉSIDENT	M <sup>R</sup> MOKETFI <i>Mohand</i>	MCB UNIVERSITÉ DE BÉJAIA.
EXAMINATRICE	M <sup>ME</sup> MAMMERI <i>Souhila</i>	MCB UNIVERSITÉ DE BÉJAIA.
EXAMINATRICE	M <sup>ME</sup> BRAHMI <i>Saloua</i>	DOCTORANTE UNIVERSITÉ DE BÉJAIA.
ENCADRANT	M <sup>R</sup> YAZID <i>Mohand</i>	PROFESSEUR UNIVERSITÉ DE BÉJAIA.
CO-ENCADRANTE	M <sup>ME</sup> HOCINI <i>Kenza</i>	MAB UNIVERSITÉ DE BÉJAIA.

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2022/2023

---

# DÉDICACES

---

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenue tout au long de mes études et qui ont contribué à ma réussite, que dieu les bénisse et leur donne une longévité.*

*Mes deux frères **Said** et **Mohamed**.*

*Toute ma famille **BOUALIT**.*

*Mon ami **Danyl** et tous ceux que j'ai pas pu cité en nom.*

*Finalement,*

*Je dédie ce mémoire à mon binôme **Younes**, avec qui j'ai partagé de merveilleux souvenirs.*

**Abdelkrim.**

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenue tout au long de mes études et qui ont contribué à ma réussite, que dieu les bénisse et leur donne une longévité.*

*Mes frères **Mohammed** et **Hicham** ainsi que ma soeur **Sarah**.*

*Toute ma famille **BOUCHERIF**.*

*Finalement,*

*Je dédie ce mémoire à mon binôme **Abdelkrim**, avec qui j'ai partagé de merveilleux souvenirs.*

**Younes.**

---

# REMERCIEMENT

---

*Tout d'abord, nous tenons à remercier, le Dieu miséricordieux qui nous a donné la force et le courage d'achever cette réalisation.*

*À nos chers parents, qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toute la période de nos études jusqu'à atteindre ce stade de notre formation, nous disons simplement merci.*

*Nous souhaitons également adresser nos sincères remerciements à notre encadrant, **M<sup>r</sup> YAZID. M** et **M<sup>me</sup> HOCINI. K** pour leurs soutien scientifique et moral. Leurs conseils éclairés nous ont permis de progresser et d'atteindre notre objectif.*

*Nous aimerions également adresser nos remerciements à tous les membres du jury, qui ont accepté d'évaluer notre travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont participé à notre formation, leur contribution a été essentielle et nous leurs sommes profondément reconnaissants.*

---

# TABLE DES MATIÈRES

---

REMERCIEMENT

LISTE DES ABRÉVIATIONS VI

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

**I Les réseaux locaux sans fil à haute efficacité 3**

I.1 Introduction . . . . . 3

I.2 L'évolution du WIFI . . . . . 4

I.3 Aperçu de la norme IEEE 802.11ax . . . . . 5

I.4 L'objectif de la WiFi 6 . . . . . 6

I.5 Domaines d'applications . . . . . 7

I.6 Principales améliorations du IEEE 802.11ax . . . . . 9

I.6.1 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 9

I.6.2 MU-MIMO . . . . . 10

I.6.3 1024Q-AM . . . . . 11

I.6.4 Coloration BSS (Basic Service Set) : . . . . . 13

I.6.5 Full-Duplex : . . . . . 14

I.6.6 Efficacité énergétique « TWT » : . . . . . 15

I.6.7 Débit amélioré : . . . . . 16

I.6.8 La réutilisation spatiale : . . . . . 16

I.7 Tableau comparatif entre la norme 802.11 (n, ac et ax) . . . . . 18

I.8	Conclusion . . . . .	18
<b>II</b>	<b>Etat de l'art de la technique full duplex dans IEEE 802.11ax</b>	<b>19</b>
II.1	Introduction . . . . .	19
II.2	Travaux existants . . . . .	20
II.2.1	Synthèse des travaux FD basé MU-MIMO . . . . .	20
II.2.2	Synthèse des travaux FD basé sur OFDMA . . . . .	25
II.3	Synthèses sur les différents travaux . . . . .	29
II.4	Problématique . . . . .	29
II.5	Conclusion . . . . .	30
<b>III</b>	<b>Proposition et Evaluation de performance</b>	<b>31</b>
III.1	Introduction . . . . .	31
III.2	Motivations et objectifs . . . . .	32
III.3	Proposition . . . . .	32
III.3.1	Description de fonctionnement du protocole proposé . . . . .	32
III.3.2	Exemple de fonctionnement du protocole proposé . . . . .	35
III.4	Evaluation des performances . . . . .	39
III.4.1	Logiciel utilisé . . . . .	39
III.4.2	Paramètres de simulation . . . . .	40
III.4.3	Les valeurs numériques des paramètres de simulation . . . . .	41
III.4.4	Résultats de simulation . . . . .	41
III.5	Conclusion . . . . .	47
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>48</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>49</b>
	<b>RÉSUMÉ</b>	<b>51</b>
	<b>ABSTRACT</b>	<b>52</b>

---

## TABLE DES FIGURES

---

I.1	La wifi [4]. . . . .	5
I.2	La nouvelle approche du 802.11ax [7]. . . . .	6
I.3	Les domaines d'applications de la WiFi 6 [10]. . . . .	8
I.4	Allocations de sous-porteuses en utilisant OFDM et OFDMA [11]. . . . .	10
I.5	Transmission MU-MIMO [13]. . . . .	11
I.6	256/ 1024 QAM [18]. . . . .	12
I.7	La différence entre la 11ac et 11ax [20]. . . . .	13
I.8	Coloration BSS [21]. . . . .	14
I.9	Half-duplex vs Full-duplex [22]. . . . .	15
I.10	TWT's Works [23]. . . . .	16
I.11	La différence de la vitesse de données entre (ax, ac) [11]. . . . .	16
I.12	L'évolution du spectre radio électrique [25]. . . . .	17
II.1	La structure de la trame FD-MUMAC [26]. . . . .	20
II.2	Exemple des quatre cas de collision dans FDCR : (a) collision FD-FD, (b) collision FD-LE, (c) collision AP-FD, et (d) collision AP-LE [29]. . . . .	22
II.3	La structure de la trame TFMAC [28]. . . . .	23
II.4	Le fonctionnement du protocole HyFDMAC [27]. . . . .	24
II.5	Fonctionnement du protocole Asym-FDMAC (a : AP à des données à envoyer & b : AP n'a pas de données à envoyer) [31]. . . . .	26
II.6	Les opérations détaillés du protocole ECC-FDCR [30]. . . . .	28

III.1	Schéma illustratif d'un cycle du protocole MU-UL-FDR. ....	33
III.2	Trame d'allocation du protocole MU-UL-FDR. ....	34
III.3	Phase de transmission du protocole MU-UL-FDR. ....	35
III.4	Illustration du réseau et les liaisons entre ses différents composants. ....	36
III.5	Détection des stations cachées. ....	37
III.6	Trame de gestion correspondant à l'exemple. ....	38
III.7	Illustration de la phase de transmission. ....	38
III.8	Débit UL Vs Nombre de stations. ....	42
III.9	Taux de service Vs Nombre de stations. ....	43
III.10	Taux de perte Vs Nombre de stations. ....	44
III.11	Débit UL Vs Nombre de MPDUs. ....	45
III.12	Taux de service Vs Nombre de MPDUs. ....	45
III.13	Taux de perte Vs Nombre de MPDUs. ....	46

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

I.1	L'évolution du WIFI. . . . .	4
I.2	Description des normes 802.11 (n, ac et ax). . . . .	18
II.1	Caractéristiques des protocoles traités. . . . .	29
III.1	Tableau illustrant les calculs effectués par la trame de gestion. . . .	38
III.2	Paramètres de simulation. . . . .	40
III.3	Les valeurs numériques des paramètres de simulation. . . . .	41

---

# LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

## A

**ACK** : *acquiescement.*

**AMPDU** : *Aggregated Mac Protocol Data Units.*

**AP** : *Point d'accès.*

**AP-FD** : *Point d'accès – Full Duplex .*

**AP-LE** : *Point d'accès – non Full Duplex.*

**ASC/DESC** : *Ascendant/Descendant.*

**Asym-FDMAC** : *Asymmetric Full-Duplex MAC.*

**ATS** : *Accepted To Send.*

## B

**BFD** : *Bidirectional Full-Duplex.*

**BSS** : *Basic Service Set.*

## C

**CSI** : *Cancellation Self Interference.*

**CSMA/CA** : *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance.*

**CW** : *Contention Window.*

**C/RTS** : *Clear/Request To Send.*

## D

**DCF** : *Distributed Coordination Function.*

**DL** : *Down Link.*

**DLHD** : *Down Link Half Duplex.*

**DR** : *Dummy Rts.*

## E

**ECC-FDCR** : *Efficient and Coordinated Control protocol of Full-Duplex Radio Communications.*

**EDCA** : *Enhanced Distributed Channel Access.*

## F

**FD** : *Full Duplex.*

**FDCR** : *Full-Duplex Collision Resolution.*

**FD-FD** : *Full Duplex – Full Duplex.*

**FD-LE** : *Full Duplex – non full duplex.*

**FD-MUMAC** : *Full Duplex – Multi User MIMO MAC.*

**FD-STA** : *Full Duplex – Station.*

**FRTS** : *new Frame Request To Send.*

## F

**G-CTS** : *Group-Clear To Send.*

## H

**HD** : *Half Duplex.*

**HyFDMAC** : *Hybrid Full Duplex MAC.*

## I

**IBFD** : *In Band Full Duplex.*

**IEEE** : *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

**IoT** : *Internet of Things.*

**IUI** : *Inter-User Interference.*

## I

**LE-STA** : *Legacy Station.*

## M

**MAC** : *Media Access Control.*

**MIMO** : *Multiple Input Multiple Output.*

**MPDU** : *Mac Protocol Data Units.*

**MU** : *Multiple User.*

**MU-MIMO** : *Multi User - Multiple Input Multiple Output.*

**M-ACK** : *Multiple – ACK.*

## O

**OBSS** : *Overlapping Basic Service Set.*

**OBSS-PD** : *Overlapping Basic Service Set Preamble Detection.*

**OFDM** : *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

**OFDMA** : *Orthogonal Frequency Division Multiple Access.*

## O

**PDIP** : *Packet-length declaration and interference prevention.*

**P-SIG** : *Primary – Signalization phase .*

## Q

**Q-AM** *Quadrature - Amplitude Modulation.*

## R

**RU** : *Ressource Unit.*

## S

**SIC** : *Self Interference Concellation.*

**SNR** : *Signal to Noise Ratio.*

**SR** : *Spatial Reuse.*

**SRP** : *Spatial Reuse Protocol.*

**STA** : *Station.*

**S-SIG** : *Secondary – Signalization phase.*

## T

**TFMAC** : *Throughput-Fairness Tradeoff MAC.*

**TF-FD** : *Throughput-Fairness – Full Duplex.*

**TWT** : *Target Wake Time.*

**TXOP** : *Transmission Opportunity.*

**T-SIG** : *Tertiary – Signalization phase.*

## U

**UFD** : *Unidirectional Full Duplex.*

**UL** : *Up Link.*

**ULHD** : *Up Link Half Duplex.*

**UT** : *User Terminal.*

# W

**WBT** : *Wait Before Transmit.*

**WLAN** : *Wireless Local Area Network.*

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

La norme Wi-Fi est une technologie de communication sans fil qui permet la transmission de données sur de courtes distances. Elle est devenue omniprésente dans notre vie quotidienne, offrant une connectivité sans fil pour une multitude d'appareils, tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs portables, les objets connectés et bien d'autres.

Avec l'avènement des nouvelles générations et l'émergence des technologies de pointe, les attentes en matière d'efficacité de débit et de capacité multi-utilisateur dans les réseaux sans fil sont en constante évolution. Dans ce contexte, les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network) basés sur la norme 802.11, également connus sous le nom de Wi-Fi, ont suscité un intérêt croissant en raison de leur capacité à répondre à ces attentes grandissantes.

L'évolution de la technologie Wi-Fi au fil des années a été marquée par des améliorations continues visant à offrir des débits de données plus rapides, une meilleure fiabilité et une expérience utilisateur améliorée. Les normes précédentes, telles que 802.11n (Wi-Fi 4) et 802.11ac (Wi-Fi 5), ont apporté des améliorations significatives par rapport à leurs prédécesseurs, permettant des débits plus élevés et une meilleure utilisation du radio spectre.

Cependant, les attentes des nouvelles générations en matière de connectivité sans fil vont au-delà des capacités offertes par les normes précédentes. Avec la prolifération des appareils connectés, l'essor de l'Internet des objets (IoT) et l'utilisation croissante d'applications gourmandes en bande passante, les utilisateurs exigent des réseaux plus rapides, plus fiables et capables de gérer efficacement de nombreux utilisateurs simultanément.

C'est dans ce contexte que la norme 802.11ax est apparue, offrant des fonctionnalités avancées pour répondre aux attentes des nouvelles générations. L'une des principales caractéristiques de la norme 802.11ax est l'utilisation de la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), qui permet de diviser les canaux sans fil en sous-canaux plus petits, appelés tonalités, pour une transmission plus efficace des données. Cette approche améliore le débit global et l'efficacité du réseau, tout en offrant une meilleure expérience utilisateur.

De plus, la norme 802.11ax intègre la technologie MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output), qui permet aux points d'accès sans fil de communiquer simultanément avec plusieurs appareils. Cela permet de gérer plus efficacement la connectivité multi-utilisateur, en utilisant les temps de latence et en améliorant les performances globales du réseau.

En outre des améliorations de l'efficacité de débit et à la capacité multi-utilisateur, cette norme a introduit la technologie Full Duplex, qui permet une transmission simultanée en duplex intégral. Contrairement aux normes précédentes où la communication se faisait en Half-Duplex, c'est-à-dire alternativement entre l'émission et la réception, le Full-Duplex permet une transmission bidirectionnelle simultanée sur le même canal. Cela permet d'améliorer l'utilisation spectrale et d'augmenter les performances globales du réseau.

La technologie Full Duplex dans les réseaux 802.11 ax offre une connectivité plus efficace et réduit les temps d'attente, ce qui est essentiel pour répondre aux attentes des nouvelles générations. Elle permet une communication plus fluide, réduit les interférences et améliore l'expérience utilisateur, tant pour les activités en ligne que pour les applications critiques nécessitant une latence minimale.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présentera l'évolution et l'aperçu de la norme 802.11, le standard IEEE 802.11ax, ses objectifs ainsi que les domaines d'utilisation, puis viendra l'énumération des différentes technologies utilisé sur la WIFI 6.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de la technologie Full Duplex dans la norme IEEE 802.11ax, suivi d'une synthèse sur les travaux de recherches fondés sur cette technologie et les technologies multi-utilisateur OFDMA et MU-MIMO.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation du protocole MAC MU-UL-FDR pour but d'améliorer le débit, le nombre d'utilisateurs tout en réduisant le taux de pertes, cela suivi d'un exemple, ainsi qu'une évaluation de performance du protocole MU-UL-FDCR par rapport à un autre protocole reconnu qui est le protocole ECC-FDCR.

Ce mémoire s'achèvera par une conclusion et des perspectives de recherche induites par notre travail.

---

# LES RÉSEAUX LOCAUX SANS FIL À HAUTE EFFICACITÉ

---

## I.1 Introduction

Les réseaux locaux sans fil, ou WLAN, ont acquis une importance capitale dans notre société interconnectée, en permettant une connectivité sans fil à haut débit et une mobilité accrue. Ces réseaux jouent un rôle essentiel dans la mise en place d'environnements numériques flexibles et dynamiques, tant au sein des entreprises que dans les espaces publics et domestiques. Cependant, face à la demande croissante en bande passante, au nombre exponentiel d'appareils connectés et aux défis de performance, les réseaux WLAN doivent continuellement évoluer pour répondre aux besoins émergents.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter l'évolution ainsi qu'un aperçu sur la norme 802.11ax en premier. On parlera aussi sur les domaines d'application de la WiFi 6 ainsi que les techniques utilisées en deuxième, et on finira par un tableau récapitulatif ainsi qu'une conclusion.

## I.2 L'évolution du WIFI

Le WiFi a connu cinq lancements importants depuis 1999 et se trouve au seuil de sa mise à jour la plus significative de son histoire. On peut dire que les versions WiFi 1 à 5 ont apporté des améliorations incrémentielles à la norme 802.11 originale. WiFi 6 est la première norme WiFi conçue spécifiquement pour un monde où tout est connecté tout le temps, et où l'on s'attend à ce que les vitesses de téléchargement et de téléversement soient symétriques. Les versions antérieures de WiFi supposaient que l'utilisation était peu fréquente et occasionnelle, et s'attendaient à ce qu'il y ait beaucoup plus de téléchargements de données que de téléversements [1], [2].

STANDARD		DATE	FREQUENCY (GHZ)	MAXIMUM DATA RATE
WiFi 1	802.11b	1999	2.4	11 Mbps
WiFi 2	802.11a	1999	5.0	54 Mbps
WiFi 3	802.11g	2003	2.4	54 Mbps
WiFi 4	802.11n	2009	2.4/5.0	600 Mbps
WiFi 5	802.11ac (Wave 1)	2013	5.0	1.73 Gbps
	802.11ac (Wave 2)	2015	5.0	3.46 Gbps
WiFi 6	802.11ax	2018	2.4/5.0	9.60 Gbps

TABLE I.1 – L'évolution du WIFI.

La terminologie "WiFi 6" est un terme nouveau dans le domaine de la technologie. L'Alliance WiFi a récemment émis de nouveaux noms pour le WiFi dans le but de faciliter la compréhension pour le grand public. Ainsi, "WiFi 6" se réfère à la norme IEEE 802.11ax, tandis que "WiFi 5" est la norme 802.11ac, et ainsi de suite.

Le tableau précédent illustre l'évolution de la technologie sans fil depuis le WiFi 1 jusqu'au WiFi 6. Bien que le WiFi 5 ait été une grande avancée en termes de vitesse, il a été conçu en gardant à l'esprit certaines suppositions héritées. Par exemple, il est courant que le WiFi fonctionne bien dans une arène, une installation de conférence ou tout autre lieu avant un événement.

Cependant, une fois que l'événement commence et que des centaines, voire des milliers de personnes, commencent à publier des photos, des tweets ou à utiliser d'autres fonctions, le réseau devient souvent si lent qu'il est inutilisable. Le problème n'est pas la vitesse du WiFi, car les normes 802.11n et ultérieures ont une bande passante plus que suffisante. Le plus grand problème avec le WiFi est la façon dont il gère la congestion à mesure que le réseau se remplit. Le WiFi 6 résout de nombreux problèmes du WiFi traditionnel en redessinant complètement le fonctionnement de la technologie et en utilisant de nombreuses pratiques des réseaux 4G/LTE.

### I.3 Aperçu de la norme IEEE 802.11ax

À l'heure où le monde est de plus en plus connecté, la norme IEEE 802.11ax, appelé aussi Wi-Fi 6 représente la dernière norme de communication sans fil offrant une connectivité plus rapide, plus fiable et plus efficace que jamais auparavant. Cette technologie a été spécifiquement conçue pour répondre aux besoins croissants de connectivité des utilisateurs dans des environnements denses, tels que les foyers, les entreprises, les établissements d'enseignement, les centres commerciaux et les lieux publics. Grâce à des améliorations significatives en termes de vitesse, de fiabilité et de capacité, la Wi-Fi 6 offre une expérience de connexion améliorée aux utilisateurs, avec des temps de latence plus courts, des téléchargements plus rapides et des connexions plus stables.

De plus, elle est plus économe en énergie, ce qui permet d'améliorer la durée de vie de la batterie des appareils électroniques. Ainsi, de nombreuses entreprises et institutions adoptent déjà la Wi-Fi 6 pour améliorer leur efficacité et offrir une connectivité sans fil de qualité supérieure à leurs utilisateurs [2], [4].



FIGURE I.1 – La wifi [4].

La norme 802.11ax est retro compatible, ces équipements sont conçus pour être compatibles avec les équipements existants et peuvent fonctionner avec les anciennes normes de réseau sans fil (par exemple, 802.11n, 802.11ac). Cependant, pour bénéficier de la technologie HEW, il est recommandé d'utiliser du matériel compatible avec la norme 802.11ax.

## I.4 L'objectif de la WiFi 6

La norme WiFi 6 a pour objectif de fournir une connectivité sans fil plus rapide, plus fiable et plus efficace pour les utilisateurs dans divers environnements, des réseaux domestiques aux espaces publics. Elle permet aux utilisateurs de connecter simultanément plusieurs appareils à un point d'accès WiFi, sans que cela ne compromette la qualité de la connexion ou ne ralentisse le réseau. En utilisant des techniques avancées telles que le MU-MIMO, le OFDMA et le beamforming, WiFi 6 offre une bande passante plus large, une plus grande capacité et une meilleure gestion de la congestion, ce qui permet une expérience de navigation plus fluide et une meilleure qualité de vidéo en streaming. Dans l'ensemble, la norme IEEE 802.11ax améliore l'état du réseau lorsque de nombreux appareils sont connectés en même temps, offrant ainsi une expérience utilisateur améliorée et une plus grande satisfaction [5], [6].

En résumé, la norme IEEE 802.11ax a pour objectif d'améliorer l'état du réseau lorsque de nombreux appareils sont connectés en même temps. C'est un avantage qui arrive à point nommé.

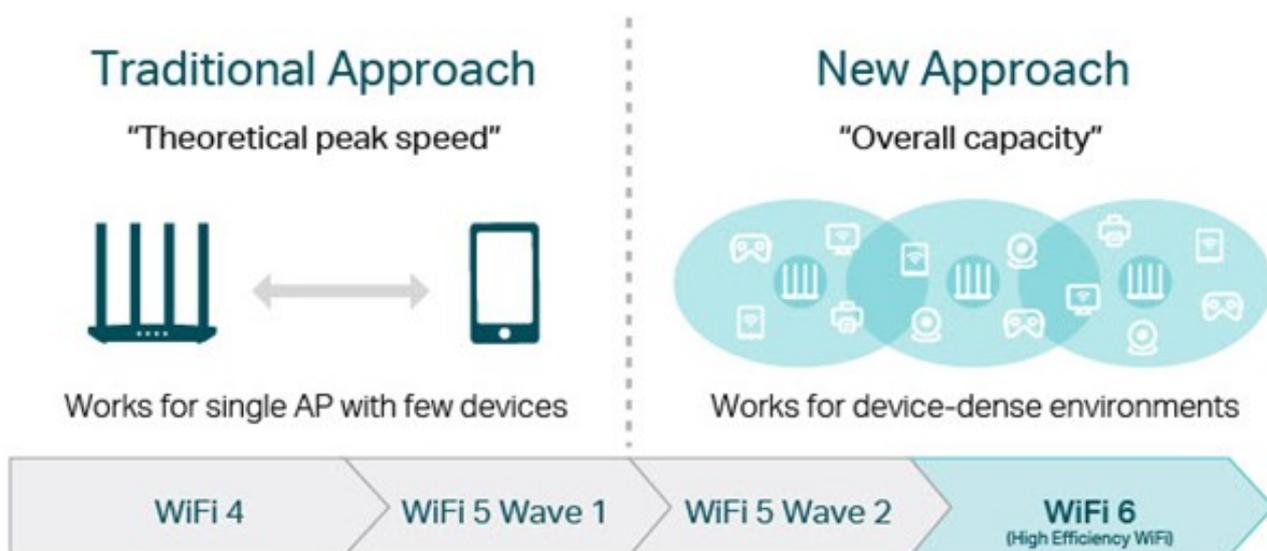


FIGURE I.2 – La nouvelle approche du 802.11ax [7].

La figure I.2 montre la différence entre l'approche traditionnelle dans les normes précédentes comparée à la nouvelle approche de la WiFi 6 qui aura une capacité beaucoup plus importante.

## I.5 Domaines d'applications

La norme IEEE 802.11ax, ou Wi-Fi 6, a de nombreuses applications potentielles dans différents domaines. Voici quelques exemples de domaines d'application de la Wifi 6 :

- **Réseaux domestiques** : La norme Wi-Fi 6 est idéale pour les réseaux domestiques, car elle offre une vitesse de connexion plus rapide, une meilleure capacité à gérer plusieurs appareils connectés simultanément, une latence réduite et une meilleure efficacité énergétique. Les utilisateurs peuvent bénéficier d'une expérience de streaming vidéo en haute définition, de jeux en ligne sans décalage, de téléchargements rapides et d'une connectivité fiable pour leurs appareils domestiques connectés.
- **Entreprises** : Les entreprises peuvent bénéficier de la norme Wi-Fi 6 pour améliorer la connectivité sans fil de leurs employés, clients et visiteurs. La norme Wi-Fi 6 permet une meilleure gestion des réseaux avec de nombreux appareils connectés simultanément, une latence réduite, une efficacité énergétique améliorée et une sécurité renforcée, offrant ainsi une meilleure expérience utilisateur dans les environnements professionnels.
- **Établissements d'enseignement** : Les établissements d'enseignement, tels que les écoles, les collèges et les universités, peuvent bénéficier de la norme Wi-Fi 6 pour offrir une connectivité sans fil rapide et fiable à un grand nombre d'utilisateurs simultanément. La norme Wi-Fi 6 permet également une gestion plus efficace des réseaux dans les salles de classe, les bibliothèques et les campus universitaires, où il y a souvent une forte demande en matière de connectivité.
- **Transports** : Les transports tels que les avions, les trains et les bus peuvent également bénéficier de la norme Wi-Fi 6 pour offrir une connectivité sans fil à leurs passagers. La norme Wi-Fi 6 permet une meilleure gestion des réseaux avec de nombreux utilisateurs simultanément et une efficacité énergétique améliorée, ce qui peut aider à prolonger la durée de vie des batteries des appareils mobiles des passagers.
- **Secteur de la santé** : Le secteur de la santé peut également bénéficier de la norme Wi-Fi 6 pour offrir une connectivité sans fil rapide et fiable dans les hôpitaux, les cliniques et les cabinets médicaux. La norme Wi-Fi 6 peut aider à améliorer la qualité des soins en permettant une communication rapide et fiable entre les médecins, les infirmières et les patients, ainsi qu'en permettant une meilleure gestion des dossiers médicaux électroniques.
- **Secteur manufacturier** : Les entreprises manufacturières peuvent utiliser la norme Wi-Fi 6 pour connecter des appareils et des capteurs sans fil à leur réseau, améliorant ainsi la communication entre les machines et les systèmes. La norme Wi-Fi 6 permet également de connecter des robots et des véhicules autonomes sans fil, ce qui peut améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations de production.

- **Événements en direct** : Les organisateurs d'événements en direct tels que les concerts, les festivals et les conférences peuvent utiliser la norme Wi-Fi 6 pour offrir une connectivité sans fil rapide et fiable à un grand nombre de participants simultanément. La norme Wi-Fi 6 permet également de fournir des services tels que le streaming vidéo en direct, les applications mobiles d'événement et les réseaux sociaux, offrant ainsi une expérience utilisateur plus interactive et engageante.
- **Villes intelligentes** : Les villes intelligentes peuvent bénéficier de la norme Wi-Fi 6 pour connecter des capteurs, des caméras de surveillance et d'autres appareils sans fil à leur réseau, permettant ainsi une collecte de données plus efficace et une communication en temps réel pour les services urbains tels que la gestion du trafic, l'éclairage public, etc.

En somme, la norme IEEE 802.11ax, ou Wi-Fi 6, a un large éventail de domaines d'application potentiels, allant des réseaux domestiques et d'entreprise aux transports, à la santé, à l'hôtellerie, à l'industrie manufacturière, aux événements en direct et aux villes intelligentes [8], [9].



**FIGURE I.3** – Les domaines d'applications de la WiFi 6 [10].

## I.6 Principales améliorations du IEEE 802.11ax

Les techniques et les améliorations apportées par la norme 802.11ax :

### I.6.1 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)

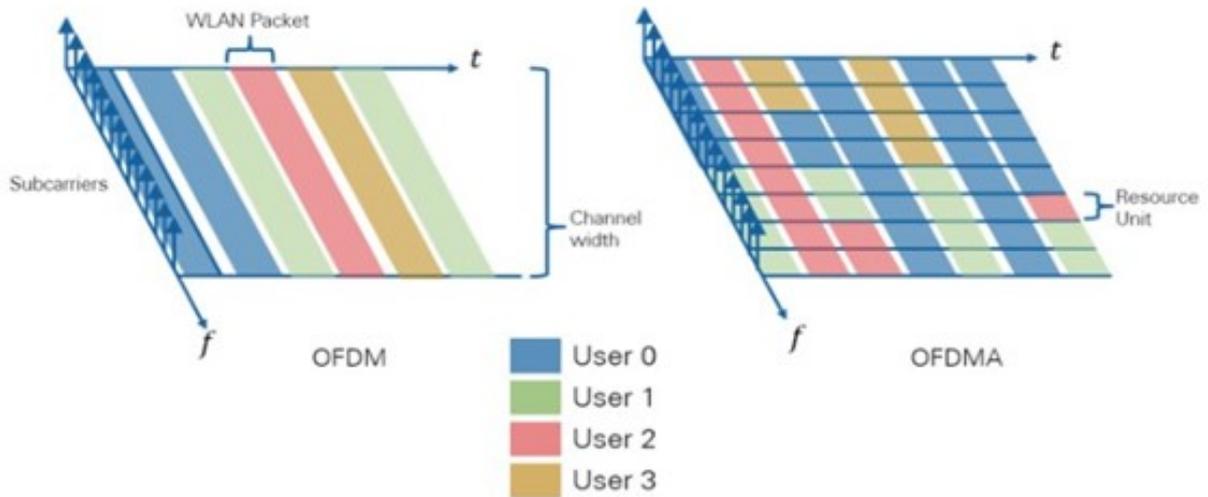
OFDMA est une technologie utilisée dans la norme Wi-Fi 6 pour permettre à plusieurs utilisateurs ayant des besoins de bande passante différents d'accéder au réseau en même temps.

OFDMA fonctionne en divisant chaque canal en plusieurs sous-ensembles de sous-porteuses, appelés unités de ressource (RU). Les RU peuvent avoir une taille minimale de 26 sous-porteuses (2 MHz) ou une taille maximale de 996 sous-porteuses (77,8 MHz). Cela permet une utilisation plus efficace du spectre disponible et une réduction de la latence pour les utilisateurs.

L'OFDMA est une méthode pour ajouter plusieurs utilisateurs dans un système OFDM en attribuant des sous-ensembles de sous-porteuses à différents utilisateurs. Cette technique est utilisée dans le protocole 802.11ax. Pour cela, le concept d'unité de ressource temps-fréquence (RU) est défini. Les unités de ressources temps-fréquence sont orthogonales les unes par rapport aux autres. Dans l'OFDM traditionnel, un utilisateur occupe toutes les sous-porteuses et envoie des paquets de données, mais dans l'OFDMA, un utilisateur alloue des ressources de canal selon un bloc de ressources temps-fréquence RU [15], [16].

Voici une illustration du fonctionnement de l'OFDMA par rapport à l'OFDM : Supposons qu'il y ait trois utilisateurs, à savoir USER1, USER2 et USER3, qui utilisent simultanément l'accès Web, le streaming multimédia et les messages instantanés. Dans un système OFDM traditionnel, chaque utilisateur monopolise tout le canal, quel que soit le volume de trafic qu'il génère. Par conséquent, sur le même canal, il n'est possible de transmettre que les données d'un utilisateur à la fois, ce qui conduit à une utilisation peu efficace du canal.

Dans le système OFDMA on remarque que le canal a bien été occupé d'une manière efficace et qu'il est possible de transmettre les données des trois utilisateurs à la fois, ce qui implique une meilleure occupation du canal.



**FIGURE I.4** – Allocations de sous-porteuses en utilisant OFDM et OFDMA [11].

Auparavant, nous avions la technologie OFDM dans laquelle la distribution des données avec les différents clients wifi n'était pas optimisée, mais avec OFDMA, nous voyons que l'affectation est beaucoup plus efficace.

## I.6.2 MU-MIMO

MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) est une technologie qui permet à plusieurs appareils d'envoyer et de recevoir des données en même temps en utilisant plusieurs antennes. Avec MU-MIMO, un routeur Wi-Fi peut communiquer avec plusieurs appareils simultanément plutôt que de communiquer avec un seul appareil à la fois.

La nouvelle fonctionnalité DL/UL MU-MIMO (Down Link/Up Link MU-MIMO) apportée par le Wi-Fi 6 permet de prendre en charge davantage de flux de données en même temps, offrant ainsi des performances plus rapides et plus fiables pour plusieurs utilisateurs.

Avec la technologie MU-MIMO, un AP peut prendre en charge jusqu'à huit utilisateurs, et chaque utilisateur peut recevoir jusqu'à quatre flux de données différents (appelés flux spatio-temporels), chacun transmis simultanément sur une antenne différente. Cela permet une utilisation plus efficace de la bande passante disponible et peut augmenter le débit de données pour chaque utilisateur.

Cependant, il y a une limite au nombre total de flux spatio-temporels disponibles pour tous les utilisateurs. Dans le Wi-Fi 6, le nombre maximum de flux spatio-temporels pris en charge est huit. Cela signifie que si l'AP prend en charge huit utilisateurs, chacun peut recevoir jusqu'à quatre flux spatio-temporels simultanément, mais le nombre total de flux spatio-temporels ne peut pas dépasser huit [12].

# Multi-User MIMO

## Multiple downlink Tx at same time

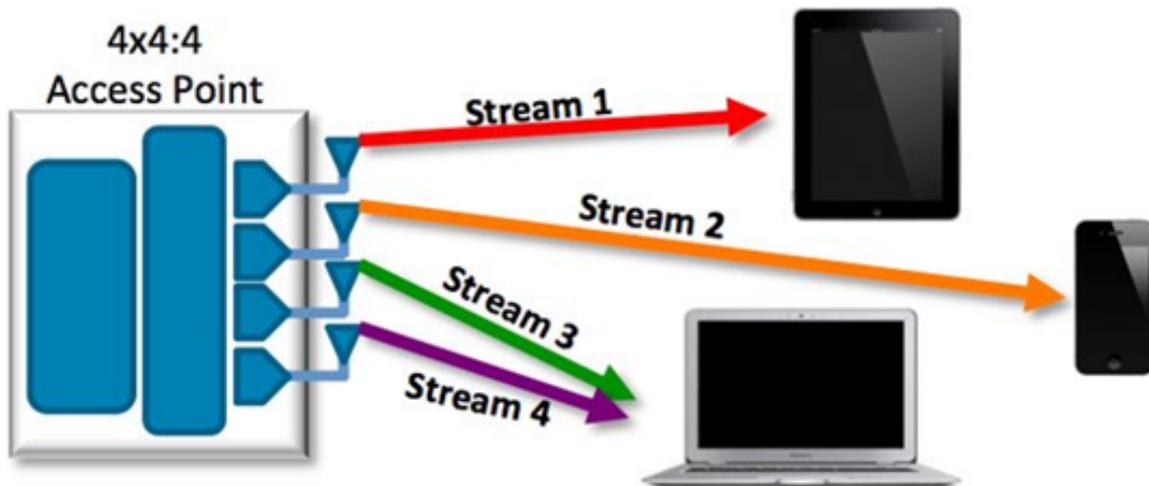


FIGURE I.5 – Transmission MU-MIMO [13].

La figure I.5 montre qu'avec MU-MIMO un point d'accès peut servir plusieurs utilisateurs en même temps.

UL MU-MIMO est une fonctionnalité ajoutée dans le standard IEEE 802.11ax pour améliorer le débit global d'un réseau Wi-Fi en parallélisant plusieurs transmissions sur l'UL (Up Link). Cela peut être très utile pour les longues transmissions de paquets en provenance de plusieurs STA (stations) et pour réduire la probabilité de collision dans le cas d'un grand nombre de STA. Cependant, cela ajoute de la complexité au système en termes de synchronisation du temps, de la fréquence et de la puissance nécessaires à ces transmissions.

En comparaison avec UL OFDMA, UL MU-MIMO convient mieux aux STA proches d'un AP (point d'accès) ayant une bonne valeur de SNR (rapport signal sur bruit) de réception et une bonne condition de canal, et un AP étant plus sensible à la différence de puissance reçue lors de l'utilisation de l'UL MU-MIMO [14].

### I.6.3 1024Q-AM

802.11ax est une technologie sans fil commerciale révolutionnaire qui est capable de fournir des vitesses Gigabit impressionnantes avec une seule antenne et un seul flux, grâce à une technique de modulation appelée 1024 QAM.

Cette technique utilise la Modulation d'Amplitude en Quadrature (QAM), qui consiste à envoyer deux signaux décalés à 90 degrés et ayant la même fréquence sur le même canal. Cela permet de transmettre l'information à la fois dans l'amplitude et la phase du signal, offrant

ainsi plusieurs avantages, notamment une meilleure immunité au bruit et aux interférences, des économies d'énergie, une capacité accrue d'envoi d'informations, des transmissions de meilleure qualité et une sécurité accrue dans la transmission.

## QAM – 256 to 1024

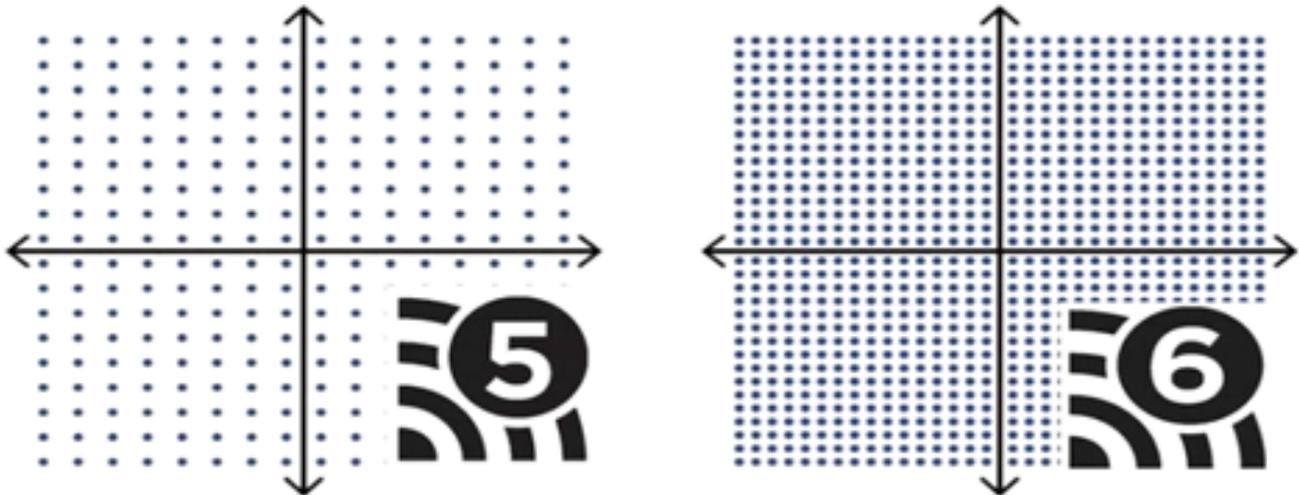


FIGURE I.6 – 256/ 1024 QAM [18].

Dans le cas de 1024-QAM, le nombre 1024 représente le nombre de combinaisons de taille et de phase que chaque signal individuel peut avoir, ce qui permet d'envoyer une plus grande quantité d'informations sur une bande passante donnée. En somme, plus le nombre qui accompagne QAM est élevé, plus la quantité d'informations que nous pouvons envoyer sur une certaine bande passante est grande [19].

1024-QAM de IEEE 802.11ax permet en effet de transporter 10bits par symbole, ce qui représente une amélioration significative par rapport à la modulation 256-QAM de l'IEEE 802.11ac qui ne transporte que 8 bits par symbole, ce qui peut entraîner une augmentation de 25% du débit de transmission (voir la figure I.7).

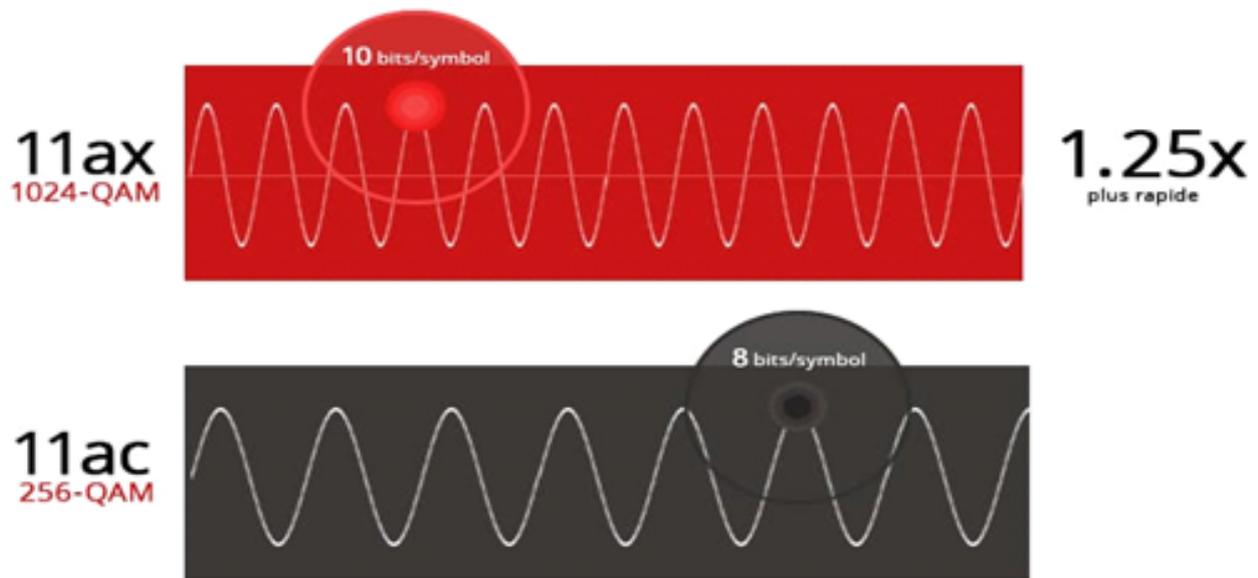


FIGURE I.7 – La différence entre la 11ac et 11ax [20].

#### I.6.4 Coloration BSS (Basic Service Set) :

Au cas où ces nouveautés vous sembleraient peu nombreuses, 802.11ax a ajouté un concept appelé Color.

Cette nouveauté a pour but d'aider à résoudre le problème des interférences entre les différents routeurs partageant le même canal, qui est souvent à l'origine des difficultés de communication instable entre les points d'accès (AP) et les appareils clients.

Cette fonctionnalité attribue un code couleur unique à chaque AP et client qui souhaite établir une communication sur un canal donné. Ce code couleur est un numéro entre 0 et 7, également appelé "couleur". La raison pour laquelle on utilise spécifiquement un nombre entre 0 et 7 est liée à la manière dont la coloration BSS est implémentée dans le protocole Wi-Fi 6. Dans le cadre de la conception du protocole, huit bits (0 à 7) sont utilisés pour représenter les différentes couleurs BSS possibles.

Avant de pouvoir communiquer sur le canal, les AP qui sont ensemble sur le même canal doivent être configurés pour utiliser des couleurs différentes. Chaque réseau attribue une couleur BSS différente à son point d'accès et à ses clients. Cela permet aux appareils clients de savoir qu'ils font partie du même réseau et de coordonner leurs transmissions pour éviter les collisions avec d'autres appareils sur des réseaux Wi-Fi voisins.

Il convient de noter que pour bénéficier pleinement de la coloration BSS, tous les appareils impliqués, y compris le point d'accès et les clients, doivent prendre en charge la norme Wi-Fi 6 et la fonctionnalité de coloration BSS.

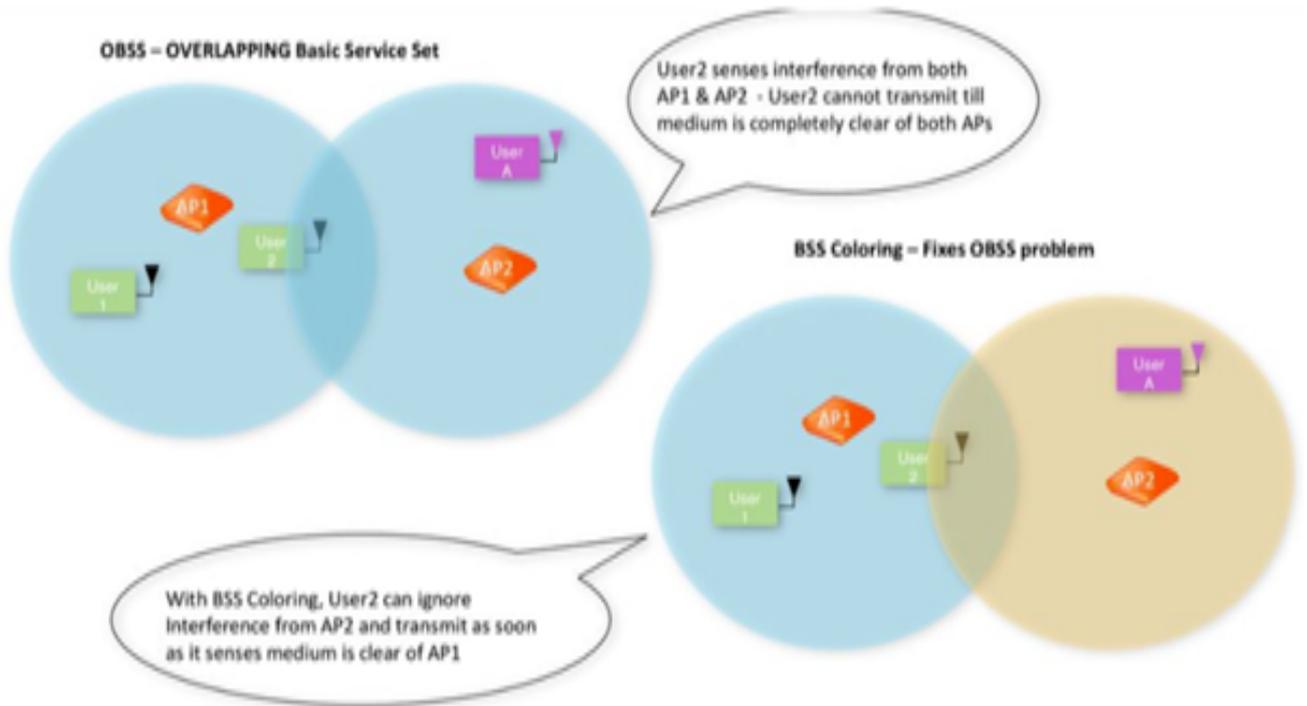


FIGURE I.8 – Coloration BSS [21].

En résumé, la Coloration BSS est une fonctionnalité clé de 802.11ax qui permet d'éviter les interférences entre les différents routeurs sur le même canal en attribuant une "couleur" unique à chaque AP et client.

### I.6.5 Full-Duplex :

Contrairement à la 802.11ac qui utilise le Half-Duplex, La technique Full-Duplex est une technique de transmission radio où un émetteur peut envoyer et recevoir des signaux en même temps sur une même bande de fréquences. Cette technique est rendue possible grâce à des antennes spécifiques appelées SIC (Self-Interference Cancellation) qui annulent automatiquement les interférences possibles entre les flux de données descendantes (DL) et ascendantes (UL) envoyées et reçues respectivement par le point d'accès. Cette technique permet d'améliorer considérablement l'efficacité de gestion de la bande passante sans utiliser la technique de regroupement des canaux ni la technique de multiplexage spatial. En outre, les retards temporels et les surcharges liés à la gestion de la transmission radio sont significativement réduits, ce qui permet de doubler la quantité de données transmises via un accès à canal unique en comparaison avec la technique Half-Duplex (HD) en transmission [22].

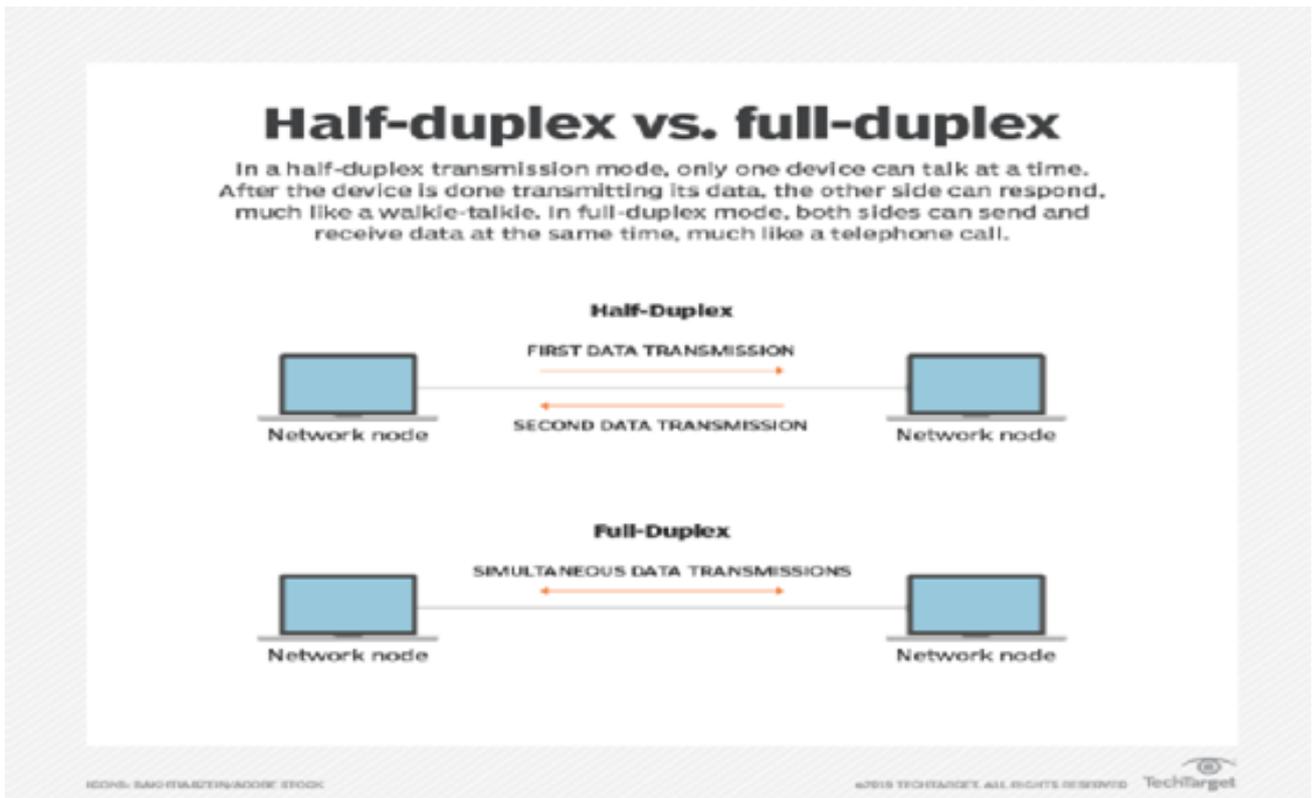


FIGURE I.9 – Half-duplex vs Full-duplex [22].

### I.6.6 Efficacité énergétique « TWT » :

La technologie Target Wake Time (TWT) optimise la consommation de la batterie lorsque les appareils mobiles sont inactifs, prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie des smartphones et autres appareils portables.

Auparavant, dans les protocoles hérités, le périphérique client restait avec le Wi-Fi désactivé et se connectait périodiquement pour voir s'il y avait des flux (généralement un multiple de 102,4 ms). Avec TWT, il n'y a plus de relation fixe entre les balises établies par le routeur et le temps de veille de l'appareil. Le point d'accès peut demander un horaire de réveil à tout moment [23].

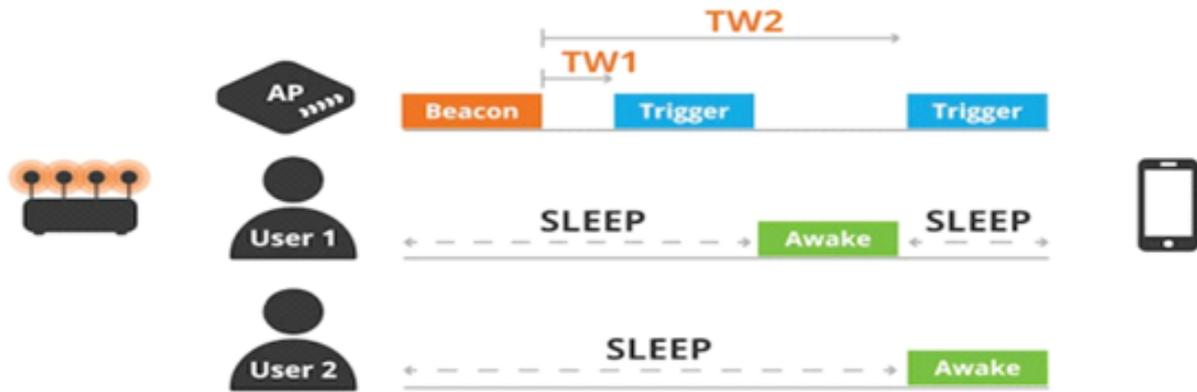


FIGURE I.10 – TWT's Works [23].

Le résultat TWT est une économie d'énergie significative pour les appareils alimentés par batterie.

### I.6.7 Débit amélioré :

Le WiFi 6, également connu sous le nom de 802.11ax, offre une vitesse de connexion accrue par rapport à la norme précédente, le WiFi 5 (802.11ac). Le WiFi 6 peut fonctionner sur deux bandes de fréquences différentes, à la fois la bande 2,4 GHz et la bande 5 GHz, offrant une portée plus large et une couverture plus étendue lors de l'utilisation des réseaux. En outre, le WiFi 6 utilise une technologie de modulation plus avancée qui permet des vitesses de données plus élevées allant jusqu'à 9,6 Gbit/s, soit plus de deux fois la vitesse maximale de la norme WiFi 5. Cela signifie que les utilisateurs peuvent profiter d'une expérience de navigation plus rapide et plus fluide, ainsi que d'une meilleure qualité de streaming vidéo et audio [4].

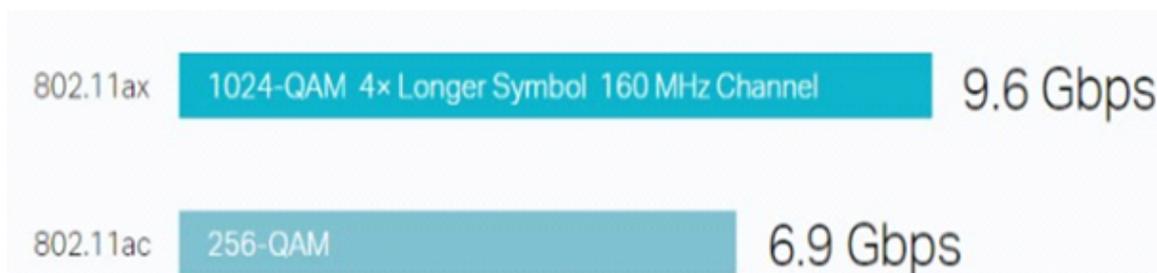


FIGURE I.11 – La différence de la vitesse de données entre (ax, ac) [11].

### I.6.8 La réutilisation spatiale :

La réutilisation spatiale (SR) est une technique conçue par la norme IEEE 802.11ax pour améliorer l'efficacité du spectre radioélectrique dans les environnements OBSS (Overlapping Basic Service Set), où plusieurs réseaux sans fil se chevauchent et partagent le même canal.

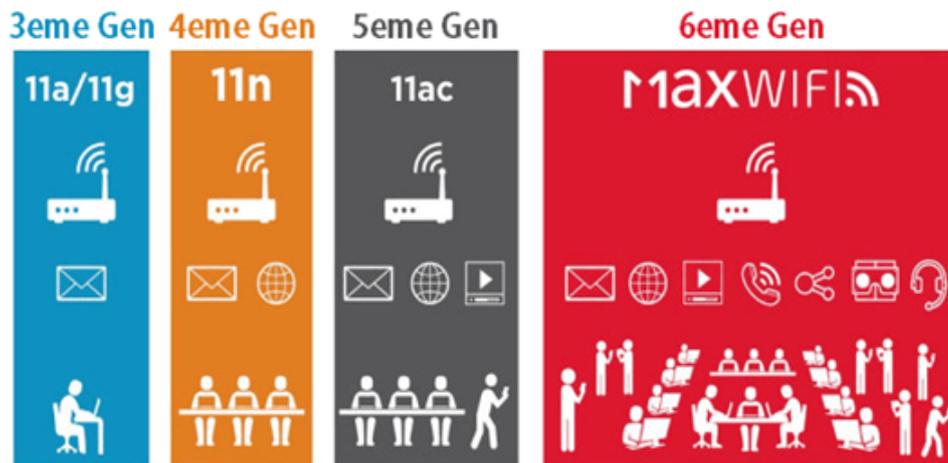
En utilisant la réutilisation spatiale, une station Wi-Fi peut émettre des données même si elle détecte une transmission en cours à partir d'un autre BSS (Basic Service Set) sur le même canal, à condition que la nouvelle transmission n'affecte pas la transmission en cours. Cette technique permet donc une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique et peut améliorer le débit de données dans les environnements OBSS.

La réutilisation spatiale comprend deux mécanismes principaux : la détection de préambule OBSS (OBSS-PD, Overlapping Basic Service Set Preamble Detection) et le protocole de réutilisation spatiale (SRP, Spatial Reuse Protocol) [24].

On vous explique les deux mécanismes :

La détection de préambule OBSS permet à une station Wi-Fi de détecter les signaux de préambule d'autres réseaux Wi-Fi se chevauchant sur le même canal. Si un signal de préambule OBSS est détecté, la station Wi-Fi doit attendre un certain temps avant d'émettre des données, afin de permettre aux autres réseaux de transmettre leurs données.

Le protocole de réutilisation spatiale permet quant à lui à une station Wi-Fi de transmettre des données tout en minimisant l'impact sur les transmissions en cours dans les autres réseaux Wi-Fi se chevauchant sur le même canal. Ce protocole utilise des techniques de formation de faisceau (beamforming) pour concentrer la puissance de transmission de la station Wi-Fi vers les clients cibles, tout en minimisant les interférences vers les autres réseaux Wi-Fi se chevauchant sur le même canal.



**FIGURE I.12** – L'évolution du spectre radio électrique [25].

En résumé, la réutilisation spatiale est une technique de la norme IEEE 802.11ax qui permet d'améliorer l'efficacité du spectre radioélectrique dans les environnements OBSS, en permettant à une station Wi-Fi de transmettre des données tout en minimisant l'impact sur les transmissions en cours dans les autres réseaux Wi-Fi se chevauchant sur le même canal, grâce à la détection de préambule OBSS et au protocole de réutilisation spatiale SRP.

## I.7 Tableau comparatif entre la norme 802.11 (n, ac et ax)

	<b>802.11n</b>	<b>802.11ac</b>	<b>802.11ax</b>
<b>Channel Bandwidth (MHz)</b>	20, 40	20, 40, 80, 80+80, 160	20, 40, 80, 80+80, 160
<b>Subcarrier Spacing (KHz)</b>	312.5	312.5	78.125
<b>Symbol Time (us)</b>	3.2	3.2	12.8
<b>Cyclic Prefix (us)</b>	0.8	0.8, 0.4	0.8, 1.6, 3.2
<b>MU-MIMO</b>	No	Downlink	Uplink and Downlink
<b>Modulation</b>	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
<b>Data Subcarrier Modulation</b>	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM
<b>Coding</b>	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)

TABLE I.2 – Description des normes 802.11 (n, ac et ax).

## I.8 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les principales caractéristiques de la norme 802.11ax, plus communément appelée WiFi 6. Après avoir retracé l'évolution du WiFi depuis ses débuts, nous avons défini les objectifs de la norme WiFi 6, notamment en termes de performances, de sécurité et d'efficacité énergétique.

Nous avons également examiné les domaines d'application de cette norme, qui incluent notamment les réseaux d'entreprise, les réseaux domestiques et les réseaux publics.

Enfin, nous avons présenté les techniques utilisées par la norme WiFi 6 pour atteindre ses objectifs, telles que la modulation OFDMA, la MU-MIMO.

En résumé, la norme WiFi 6 représente une avancée significative dans le domaine des réseaux sans fil, offrant des performances améliorées pour les utilisateurs finaux tout en répondant aux besoins des entreprises et des organisations en matière de sécurité et d'efficacité énergétique.

Dans le chapitre suivant, le deuxième, nous allons parler sur les différents travaux existants sur la technique full duplex dans la norme IEEE 802.11ax.

---

# ETAT DE L'ART DE LA TECHNIQUE FULL DUPLEX DANS IEEE 802.11AX

---

## II.1 Introduction

La norme IEEE 802.11ax, également connue sous le nom de WiFi 6 ou HEW, a introduit une fonctionnalité majeure dans sa couche physique : la transmission radio Full-Duplex. Cette avancée technologique permet à un émetteur WiFi de transmettre et de recevoir des données simultanément sur le même canal radio, augmentant ainsi la capacité et l'efficacité spectrale du réseau. Cependant, l'exploitation optimale de cette technique nécessite de relever plusieurs défis liés à la couche MAC, tels que la configuration des communications Full-Duplex, la gestion des relations cachées et l'équilibrage des flux de données.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter une synthèse sur les travaux de recherche traitant la technique de transmission radio Full-Duplex, ainsi qu'un tableau récapitulatif sur les différentes caractéristiques de chaque article de recherche, et nous terminons avec une problématique suivie d'une conclusion.

## II.2 Travaux existants

La communication full duplex dans les réseaux sans fil est un domaine de recherche en constante évolution. Depuis les premières études sur cette technologie, de nombreux articles scientifiques ont été publiés dans des revues spécialisées. Les recherches portent sur divers aspects de la communication full duplex, tels que la modélisation mathématique, la conception de systèmes, l'optimisation de la performance, la gestion de l'interférence, etc. Voici quelques exemples d'articles pertinents classés en deux catégories :

### II.2.1 Synthèse des travaux FD basé MU-MIMO

1. **Yazeed Alkhrijah et al.** [26] : année 2020, proposent dans leur article un nouveau protocole de contrôle de l'accès au support (MAC), appelé Full Duplex Multiuser MIMO MAC Protocol (FD-MUMAC), conçu pour les réseaux multi-utilisateurs multi-entrées multi-sorties (MIMO) en Full-Duplex (FD) qui vise à maximiser le débit dans les réseaux sans fil à haute densité de nœuds. Le protocole a pour objectif d'accroître l'efficacité spectrale en permettant aux nœuds de transmettre et de recevoir simultanément en utilisant une seule bande de fréquence. Le protocole détermine conjointement la sélection des utilisateurs de liaison montante et descendante tout en contrôlant le débit de transmission en considérant le beamforming de transmission et de réception, l'état du canal et l'interférence multi-utilisateurs.

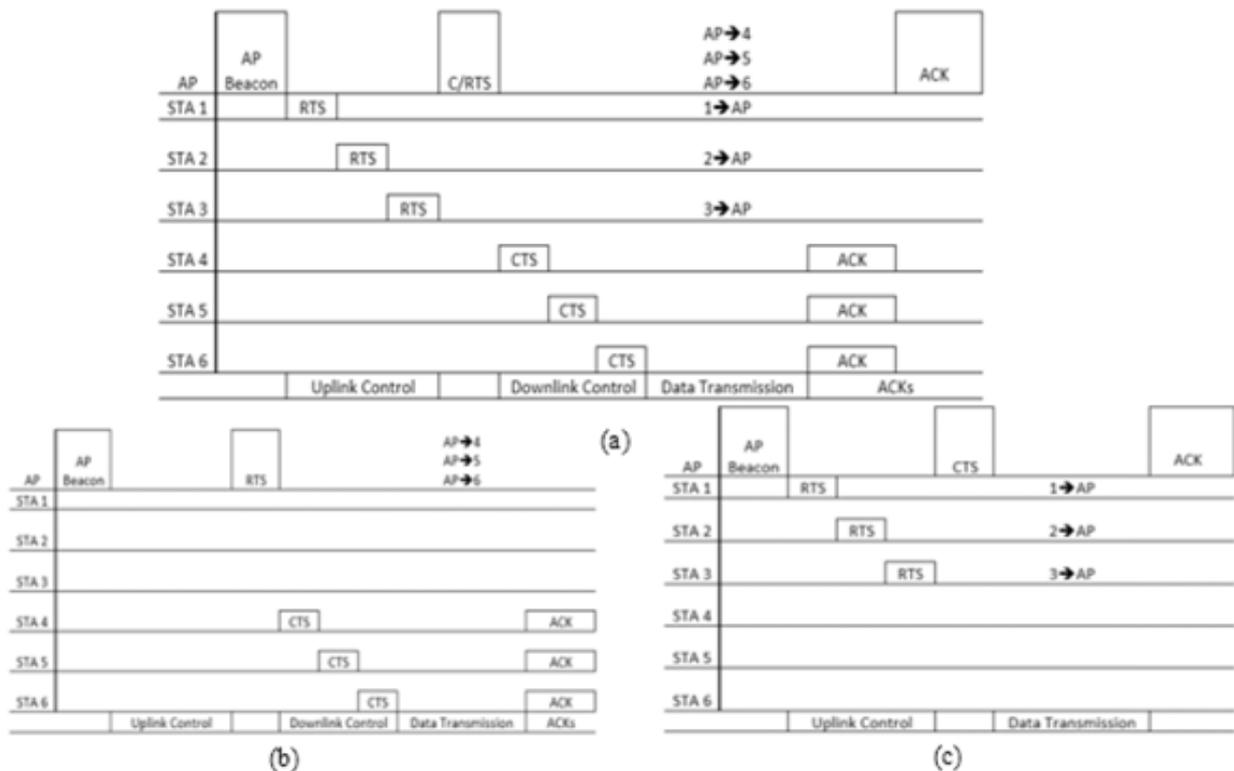


FIGURE II.1 – La structure de la trame FD-MUMAC [26].

La trame FD-MUMAC est un protocole multicouche où l'AP contrôle la longueur de chaque couche en fonction du 802.11 DCF. Dans la première couche, l'AP sélectionne provisoirement les utilisateurs de downlink disponibles à partir des  $M$  utilisateurs disponibles. Ensuite, l'AP diffuse une balise à tous les utilisateurs pour les informer du début et de la durée de la couche de contention. Ensuite, chaque utilisateur uplink sélectionne un minuteur de back-off au hasard entre 1 et  $2CW$ , où  $CW$  est sa fenêtre de contention qui varie de 4 à 10.

Dans la deuxième couche, les utilisateurs uplink contendent pour les  $N$  flux uplink disponibles en envoyant une trame de demande de transmission (RTS) après l'attente du minuteur de back-off et la détection d'un canal inactif. L'AP acquiert CSI de l'utilisateur uplink lors de sa transmission RTS tandis que les autres utilisateurs considèrent cette transmission comme une IUI possible si l'AP sélectionne cet utilisateur uplink. La troisième couche consiste à sélectionner l'utilisateur uplink et downlink à l'aide de la trame C/RTS, sur la base desquelles les utilisateurs sélectionnés peuvent transmettre leurs données. La longueur de la troisième couche est déterminée par l'AP en fonction du nombre de demandes RTS reçues.

Les résultats de simulation montrent que le protocole FD-MUMAC atteint un gain de débit de 59%, 177% et 94% par rapport à un protocole MAC FD à antenne unique et à deux protocoles MU-MIMO à half-duplex. Pour illustrer l'utilité du protocole proposé, les auteurs introduisent un algorithme de sélection d'équité conjointe qui garantit à chaque utilisateur une allocation équitable de temps pour utiliser le canal tout en équilibrant son trafic entre les directions de liaison montante et descendante. Les auteurs comparent les performances de FD-MUMAC avec plusieurs protocoles MAC et fournissent un ensemble étendu de résultats de simulation.

La plupart des travaux du document de Yazeed Alkhrijah et al ne considèrent que les clients HD (Half-Duplex) en raison des défis liés à la mise en œuvre d'une annulation complexe de l'auto-interférence sur les nœuds mobiles, en plus on constate bien la non prise en charge de la communication Bidirectional Full-Duplex (BFD) et de l'asymétrie.

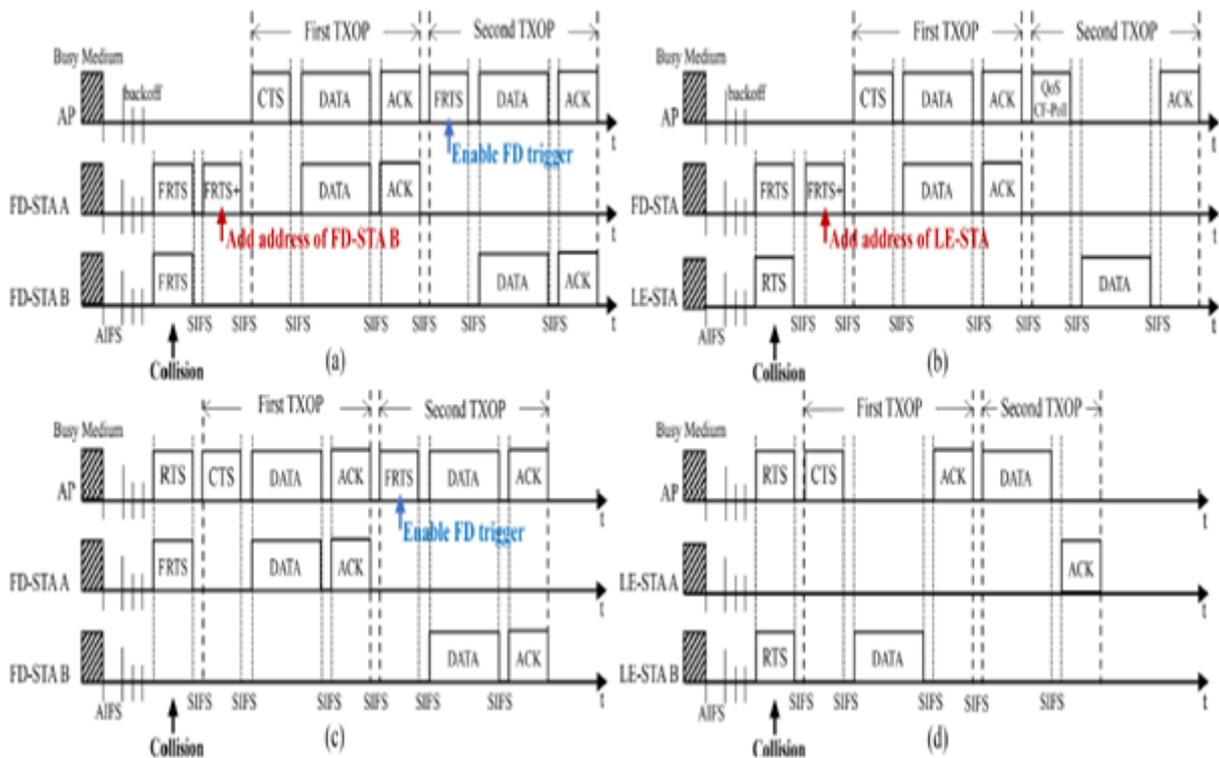
**2. Hyeongwoo Jo and al. [27]** : année 2021, proposent un nouveau système de contrôle d'accès moyen, appelé FDCR (Full-Duplex Collision Resolution), qui résout les collisions entre les stations full-duplex et les stations non full-duplex. FDCR fournit une détection et une résolution de collision sans modifier la norme 802.11 des LE-STA (stations non full-duplex). Lorsqu'une collision se produit, la FD-STA (station full-duplex) rapporte des informations sur les stations en collision au point d'accès. Ensuite, la possibilité de transmission leur est accordée.

Ce système assure la compatibilité des stations full-duplex avec les anciennes stations. FDCR est basé sur CSMA/CA et prend en charge à la fois l'accès amélioré aux canaux distribués (EDCA) et la fonction de coordination distribuée (DCF). Le FDCR peut résoudre non seulement les collisions de trames transmises à partir de stations full-duplex, mais aussi les collisions de trames transmises à partir d'une FD-STA et d'une LE-STA. Par conséquent, le FDCR amé-

liore le débit du système en réduisant les frais généraux de collision et fournit des gains de débit même aux stations non FD.

Pour déterminer la proportion de collisions entre deux stations qui peuvent être résolues par FDCR dans le nombre total de collisions, Hyeongwoo Jo and al ont mesuré le nombre de collisions à l'aide du simulateur 802.11ac, dans des conditions de réseau saturé, et le nombre de collisions a été mesuré en augmentant le nombre de STA de 4 à 52. Ils ont constaté qu'au fur et à mesure que le nombre de STA augmente, la proportion de collisions entre trois STA ou plus augmente progressivement.

La procédure de résolution des collisions du FDCR se compose de deux étapes : 1- la collision et la déclaration, 2- la transmission de données. Lorsqu'une collision se produit, la FD-STA impliqué dans la collision signale sa propre adresse et celle du STA impliqué dans la collision à l'AP par l'intermédiaire d'un FRTS+. Ensuite, l'AP répond en envoyant un CTS. Au stade de la transmission des données, l'AP accorde séquentiellement la première opportunité de transmission (TXOP) et la deuxième TXOP aux deux STA impliqués dans la collision. La STA qui signale la collision par le FRTS+ devient le premier TXOP STA, et l'autre STA devient le deuxième TXOP STA. Comme la montre la figure ci-dessous.



**FIGURE II.2** – Exemple des quatre cas de collision dans FDCR : (a) collision FD-FD, (b) collision FD-LE, (c) collision AP-FD, et (d) collision AP-LE [29].

Les résultats de cette étude d'analyse et de simulation montrent que le FDCR a obtenu des performances de débit améliorées par rapport aux schémas MAC conventionnels.

Si la capacité du récepteur de collisions est réduite en raison de l'auto-interférence résiduelle, la communication full-duplex peut être effectuée à un débit de données inférieur au Half-Duplex, ou la communication Full-Duplex peut devenir impossible dans le FDCR.

**3. Yazeed Alkhrijah et al.** [28] : année 2022, ont proposé un protocole de contrôle d'accès au support de transmission multi-utilisateurs pour un point d'accès IBFD, avec un algorithme de sélection conjoint de liaison montante et descendante pour maximiser le débit tout en maintenant un niveau d'équité prédéfini. Le protocole est appelé TFMAC et offre la structure de trame requise pour obtenir les informations nécessaires sur l'état du canal et atténuer les interférences inter-utilisateurs. Le protocole en question est le TFMAC et il a six étapes, tel que présenté dans la figure suivante.

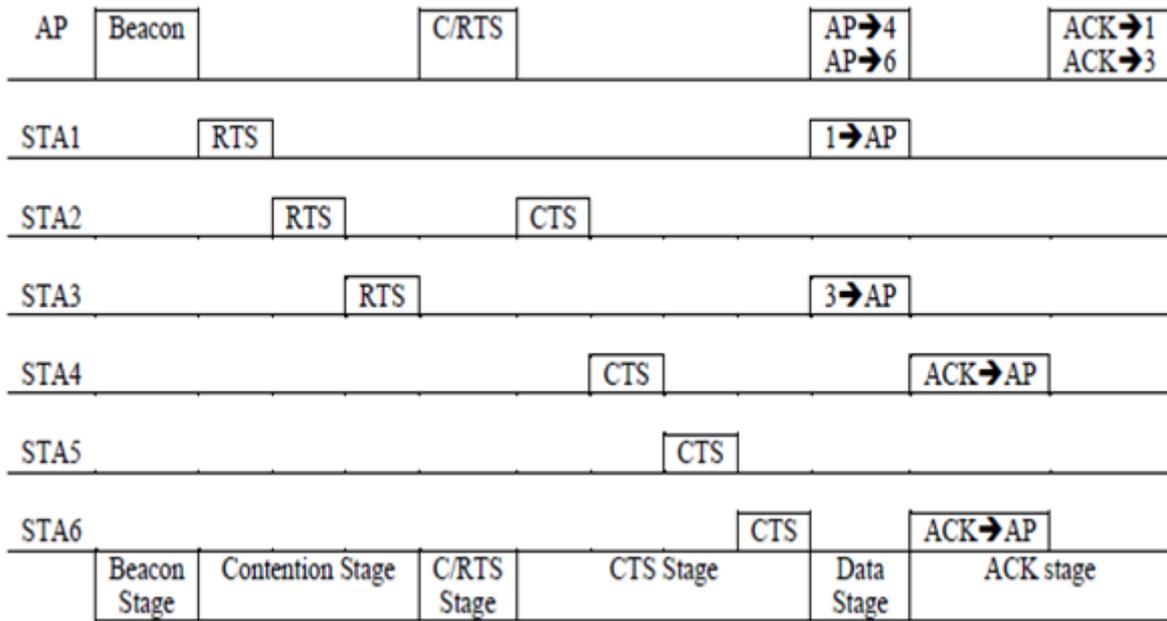


FIGURE II.3 – La structure de la trame TFMAC [28].

Dans la première étape, l'AP envoie un frame de balise (Beacon) à tous les utilisateurs pour les informer du début et de la durée de la phase de contention. Ensuite, les utilisateurs commencent à concourir pour le Up Link en envoyant un RTS après l'expiration de leurs back off pendant la deuxième étape. À la fin de la phase de contention, l'AP reçoit plusieurs trames RTS. Le nombre de trames RTS reçues peut dépasser N, qui est le nombre limite d'utilisateurs que l'AP peut desservir pour la transmission UL. Par conséquent, l'AP utilise l'algorithme de sélection TF-FD pour sélectionner J utilisateurs d'émission montante parmi ceux qui ont envoyé avec succès un RTS à l'AP.

Ensuite, l'AP envoie un frame C/RTS qui sert de trame claire pour envoyer (CTS) aux J utilisateurs de transmission montants à l'étape quatre du TFMAC. De plus, cette trame C/RTS sert d'RTS pour les utilisateurs DL, ce qui détermine la durée de cette étape. L'étape Cinque c'est la phase de transmission de données et l'étape 6 c'est la phase de confirmation qui permet aux utilisateurs d'envoyer des confirmations des trames de données reçues.

Enfin, Yazeed Alkhrijah et al, ont évalué la performance de TFMAC en utilisant des simulations sur MATLAB. Les résultats montrent que TFMAC est capable d'atteindre un équilibre optimal entre le débit et l'équité de traitement entre les utilisateurs, et propose une augmentation de débit allant jusqu'à 39,25%, 37,65%, et 12,2% dans un système à 10 utilisateurs par rapport aux protocoles MuFuPlex, ENFD-OMAX, et FDMuMAC.

Ce protocole pourrait être une solution intéressante pour les réseaux multi-utilisateurs nécessitant une répartition équitable des ressources tout en maximisant le débit.

**4. Yazeed Alkhrijah et al. [29]** : année 2023, proposent un protocole de contrôle d'accès moyen hybride appelé (HyFDMAC) pour les réseaux sans fil basés sur l'infrastructure. Ce protocole intègre un accès aléatoire et programmé, utilise la fonction de coordination distribuée IEEE 802.11 et permet à un point d'accès en full duplex de collecter des informations sur les canaux et les interférences pour la transmission multi-utilisateurs.

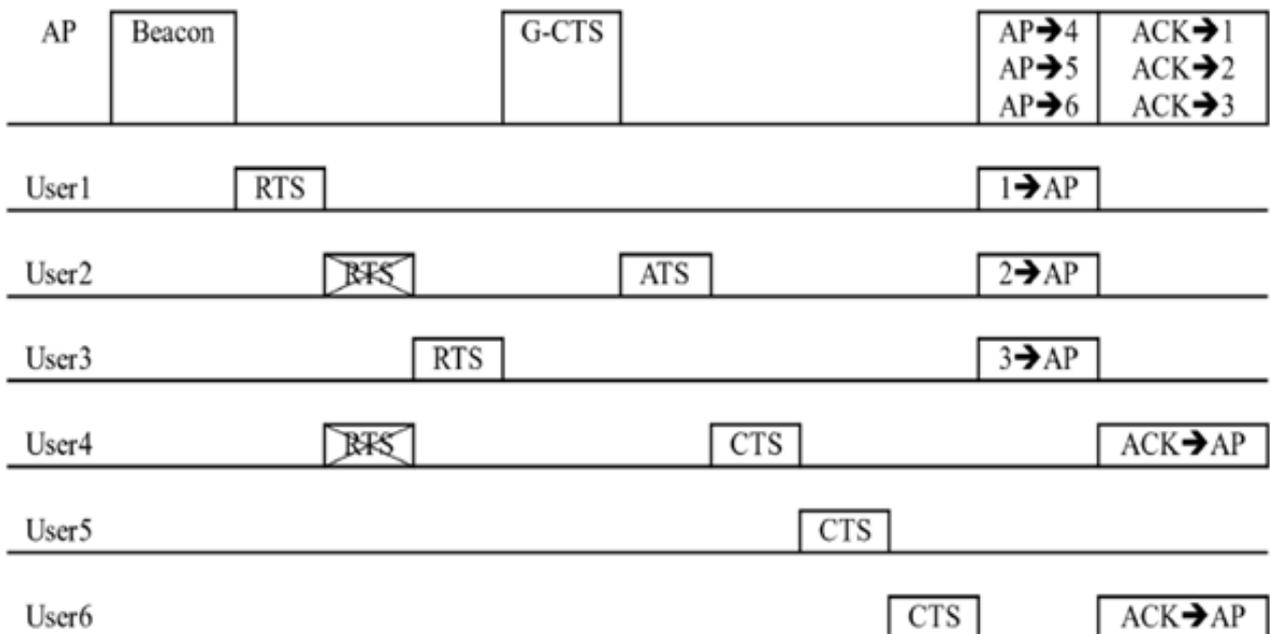


FIGURE II.4 – Le fonctionnement du protocole HyFDMAC [27].

Le protocole HyFDMAC se compose de six étapes, à savoir : la première étape c'est la diffusion d'un cadre de balise appelé (Beacon) par le point d'accès à tous les utilisateurs, pour signaler le début de la contestation pour la transmission par liaison montante et informer les utilisateurs de la durée de la prochaine étape. Dans la deuxième étape, les utilisateurs avec des données de liaison montante s'affrontent pour envoyer une trame de demande d'envoi (RTS) à l'AP pour obtenir une connexion de liaison montante d'où Les utilisateurs 1 et 3 gagnent la contention up Link.

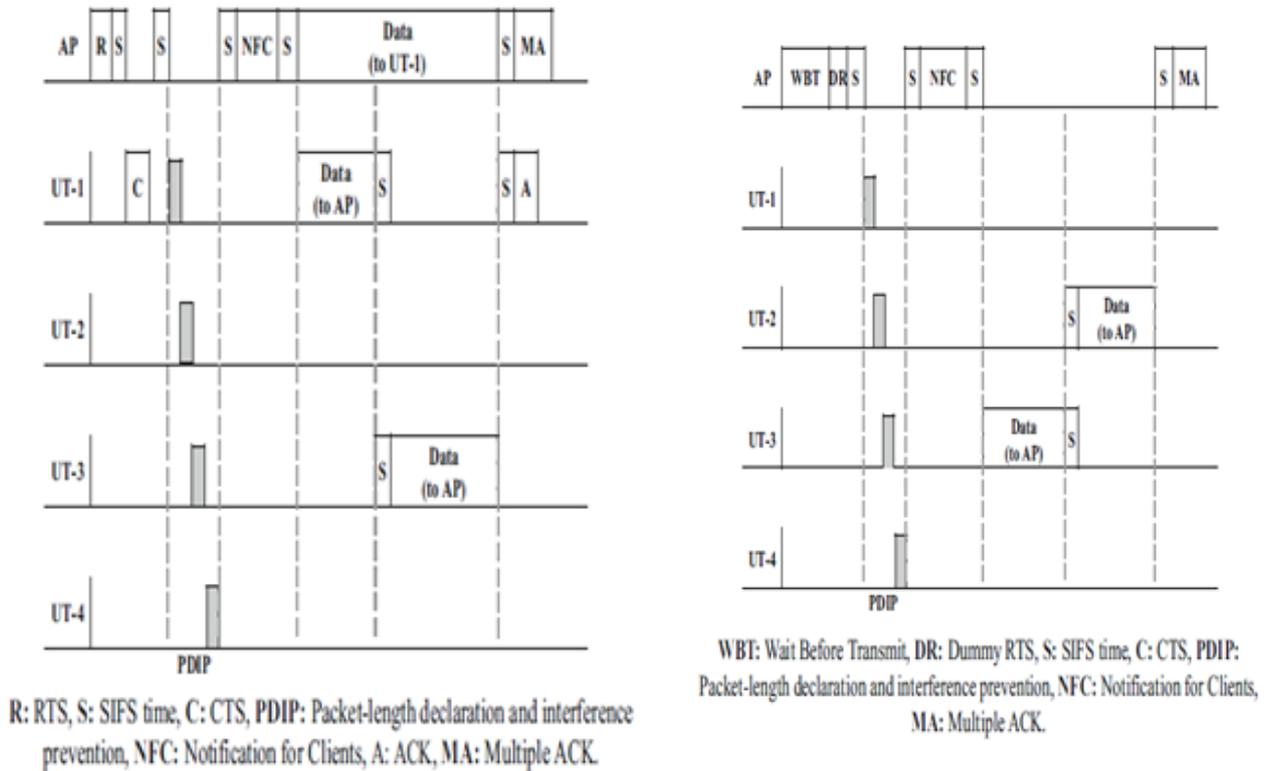
L'AP sélectionne les utilisateurs pour la transmission de données dans la troisième étape, en utilisant un round-robin de déficit pour assurer l'équité d'où l'AP sélectionne l'utilisateur 2 comme utilisateur d'accès programmé. De plus, l'AP sélectionne les utilisateurs 4, 5 et 6 pour la transmission en down Link. Dans la quatrième étape l'AP envoie un cadre de group clear to send (G-CTS) pour les utilisateurs sélectionnés et reçoit des cadres ATS et CTS pour obtenir l'interférence. Dans la cinquième étape, les utilisateurs transmettent des données. Dans la sixième étape, l'AP envoie une trame d'acquiescement (ACK) pour confirmer la réception des données.

Yazeed Alkhrijah et al, ont réalisés des simulations à l'aide de MATLAB pour évaluer les performances de HyFDMAC. Les résultats montrent que le débit HyFDMAC surpasse les mécanismes de pointe de MU-FuPlex et EnFD-OMAX de 18% et 11,3%, respectivement, les résultats montrent aussi que le délai moyen des paquets HyFDMAC est réduit de 30%, et que l'indice d'équité s'est amélioré de 3%. De plus, HyFDMAC augmente le débit de 53% et 45% par rapport à l'accès programmé et aléatoire, respectivement.

## II.2.2 Synthèse des travaux FD basé sur OFDMA

1. **Md. Abdul Alim et al.** [30] : année 2018, proposent un nouveau protocole de contrôle d'accès au support (MAC) en bande Full duplex pour des réseaux locaux sans fil (WLAN) asymétriques avec du trafic montant et descendant. Le protocole appelé Asym-FDMAC a été conçu pour permettre à plusieurs utilisateurs d'envoyer des données au point d'accès (PA) alors que celui-ci transmet une seule trame de liaison descendante. Contrairement aux conceptions MAC traditionnelles, ce protocole permet d'initier la transmission à partir du point d'accès, donc il n'y a pas de période de contention ou de collision. Il prend également en charge le trafic asymétrique ainsi que symétrique pour la liaison montante et descendante et peut supprimer avec succès les interférences entre utilisateurs.

Les figures suivantes illustrent le fonctionnement du protocole :



a) AP a des données à envoyer.

b) AP n'a pas de données à envoyer.

**FIGURE II.5** – Fonctionnement du protocole Asym-FDMAC (a : AP à des données à envoyer & b : AP n'a pas de données à envoyer) [31].

La figure a) représente la séquence temporelle de la communication dans le protocole Asym-FDMAC lorsque le point d'accès (AP) a des données à envoyer à un terminal d'utilisateur (UT). L'AP transmet un RTS pour établir une connexion avec l'UT, suivi d'un CTS en réponse de l'UT. Ensuite, chaque UT envoie un PDIP pour informer l'AP de sa longueur de trame d'ascendance (UFL) en utilisant une séquence temporelle. Cette étape est importante pour minimiser les interférences inter-utilisateurs pendant la transmission de données mixtes ASC/DESC. Après cela, les UTs sont sélectionnés pour transmettre leurs données d'ascendance tandis que l'AP transmet les données de descente. Les ACKs sont envoyés à la fin de la transmission de données et l'AP envoie un M-ACK pour tous les UTs qui transmettent des données à l'AP.

La figure b) présente la séquence de temps pour le protocole Asym-FDMAC dans le cas où le point d'accès (AP) n'a pas de données à envoyer à un utilisateur terminal (UT). Dans ce cas, l'AP attend un temps prédéfini appelé Wait Before Transmit (WBT) avant d'envoyer un faux RTS (DR). Les PDIP sont ensuite transmis par les UT après un temps SIFS et le reste de la procédure est similaire à la description précédente. Cependant, dans ce cas, il s'agit d'une communication Half-Duplex, car l'AP n'a aucune donnée à envoyer en downlink.

Des analyses mathématiques et des simulations ont été menées pour évaluer les performances d'Asym-FDMAC et les comparer aux communications bidirectionnelles pleine bande et à Half-Duplex. Les performances du protocole Asym-FDMAC sont supérieures de 50% et 89% aux communications IBFD et Half-Duplex, respectivement.

Le protocole proposé est suffisamment flexible pour être utilisé pour les réseaux locaux sans fil constitués de points d'accès compatibles IBFD et de terminaux qui peuvent être soit IBFD ou traditionnels Half-Duplex.

**2. Kenza Hocini et al.** [31] : année 2019, proposent un protocole de contrôle efficace et coordonné des communications radio Full-Duplex (protocole ECC-FDRC) dans les WLAN IEEE 802.11ax à haute efficacité. Les auteurs ont présenté une approche qui consiste à contrôler les communications radio Full-Duplex sur la base de deux caractéristiques complémentaires, à savoir la coordination et l'efficacité. La fonction de coordination veillera à ce que toutes les informations de contrôle pertinentes soient échangées entre le point d'accès et les stations qui lui sont associées. Bien que la fonction d'efficacité garantisse que tout échange de données ou d'informations de contrôle sera effectué sans perte de données ni perte de bande passante.

Le but de cette proposition est de fournir un nouveau protocole MAC Full-Duplex pour combler les lacunes des protocoles existants tout en apportant une solution à chacune des lacunes de la technique de transmission tel que : l'identification et planification des différentes configurations des communications radio Full-Duplex (BFD, UFD, DLHD et ULHD), détection et traitement des stations cachées et exposées lors du traitement des communications UFD, prise en compte de l'asymétrie entre les longueurs des flux de données DL et UL, et minimisation des frais généraux causés par la phase de signalisation.

Le protocole proposé est composé de trois étapes principales : la phase de signalement primaire (P-SIG), la phase de signalement secondaire (S-SIG) et la phase de signalement tertiaire (T-SIG). Pendant la phase P-SIG, l'Assistant d'accès envoie des signaux de contrôle pour identifier les types de trames (uplink ou downlink) nécessaires et les stations associées. La phase S-SIG est utilisée pour collecter les besoins en trafic UL en identifiant les stations cachées et en permettant à l'une de ces stations de transmettre sans interférence. La phase de T-SIG est utilisée pour répéter la phase S-SIG jusqu'à ce que la transmission DL soit achevée.

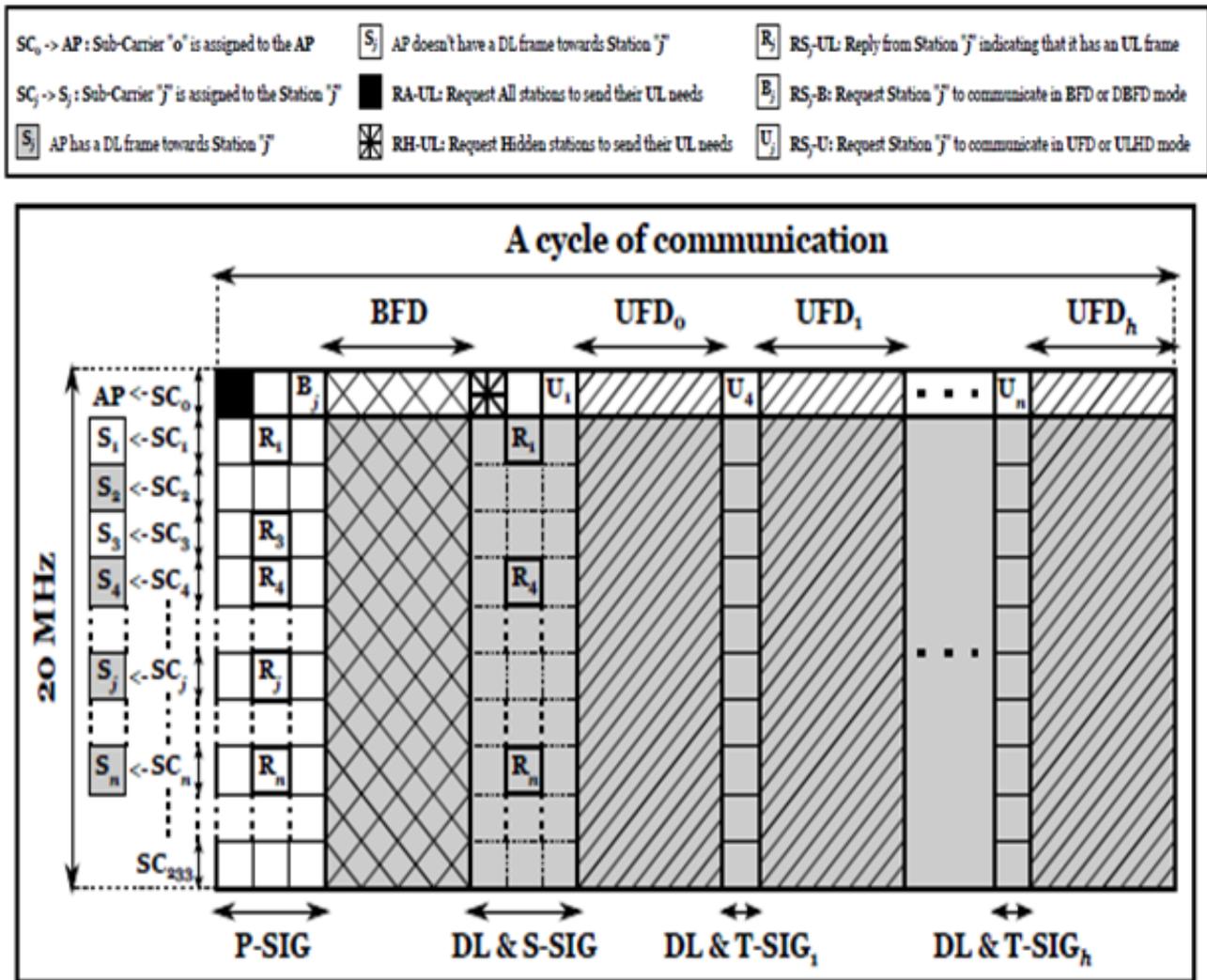


FIGURE II.6 – Les opérations détaillées du protocole ECC-FDCR [30].

Les auteurs ont évalué l'efficacité de leur méthode en réalisant des simulations numériques et ont constaté qu'elle permet d'améliorer significativement la capacité et l'efficacité de la communication full duplex dans les réseaux WLAN IEEE 802.11ax à haute efficacité.

La proposition de Kenza Hocini et al reste tout de même très intéressante et novatrice. Cependant il reste encore des opportunités d'amélioration pour étendre son applicabilité et améliorer ses performances dans différents contextes de réseau. En adaptant le protocole ECC-FDRC pour prendre en charge la liaison de canaux, cela devrait permettre à un plus grand nombre d'utilisateurs de se connecter en même temps au même point d'accès. D'autre part, il serait intéressant d'organiser les transmissions UL en parallèle (au lieu d'être séquentielles) sur la base de la technique de transmission OFDMA (cela devrait augmenter le taux de service et réduire la latence du réseau).

## II.3 Synthèses sur les différents travaux

Dans ce qui suit on notera :

- BFD (Bidirectionnal Full-Duplex)
- UFD (Unidirectional Full-Duplex)
- ULHD (Up-Link Half-Duplex)
- DLHD (Down-Link Half-Duplex)
- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

Article	Types de configuration				Techniques adapted pour le FD		Asymétries DL, UL	Problème des stations cachées	Over Head
	BFD	UFD	ULHD	DLHD	OFDMA	MIMO			
(26)		X	X	X		X		X	
(27)	X	X	X	X		X	X	X	
(28)	X	X	X	X		X	X		
(29)		X	X	X		X		X	
(30)	X	X	X	X	X		X	X	X
(31)	X	X	X	X	X		X	X	

TABLE II.1 – Caractéristiques des protocoles traités.

## II.4 Problématique

L'intégration de la radio full duplex dans les réseaux HEW représente une avancée majeure pour améliorer l'efficacité spectrale et la capacité des communications sans fil. Cependant, cette intégration soulève des problématiques complexes, notamment en ce qui concerne la gestion du Time Out ACK et du MU.

L'objectif principal de la technologie MU dans la norme 802.11ax est donc d'optimiser les performances du réseau sans fil en permettant une communication plus efficace entre les routeurs et les utilisateurs multiples, réduisant ainsi les retards et les interférences pour offrir une connectivité plus rapide et plus stable.

Dans cette section, nous pouvons résoudre les défis et les problèmes liés à la mise en œuvre de la radio full duplex dans la 802.11ax. Voici quelques aspects que nous pouvons proposer :

- Comment développer des stratégies avancées pour gérer le multi-utilisateur dans les réseaux HEW utilisant la radio full duplex, en maximisant les performances du réseau et en garantissant une qualité de service optimale ?
- Comment résoudre le problème du Time Out ACK dans les réseaux HEW exploitant la radio full duplex, tout en prenant en compte les interférences potentielles entre les utilisateurs ?

Une autre question importante à prendre en compte est l'asymétrie du volume et de la fréquence du trafic de liaison montante (UL) et de liaison descendante (DL). Dans de nombreux scénarios d'utilisation courants, tels que la navigation web, le streaming vidéo ou le téléchargement de fichiers, le trafic DL est souvent plus important que le trafic UL. Par exemple, lors du streaming vidéo, les utilisateurs reçoivent des données (trafic DL) provenant d'un serveur distant, tandis que leurs demandes de lecture ou d'interaction (trafic UL) sont relativement petites, d'où on se pose cette question :

- Comment résoudre le problème de l'asymétrie des trafics DL et UL causé par la différence des tailles des paquets DL et UL dans une communication en full-duplex.

## II.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté une brève introduction de la technique Full-Duplex, ainsi qu'une synthèse sur les différents travaux de recherche traitant la technique de transmission radio Full-Duplex, et enfin un tableau qui récapitule les différentes caractéristiques de chaque article de recherche suivie d'une problématique.

En résumé, le Full-Duplex ouvre de nouvelles perspectives pour les réseaux sans fil en augmentant leur capacité et leur efficacité spectrale. Il représente une avancée technologique majeure dans le domaine des communications sans fil et offre des opportunités prometteuses pour les futures générations de réseaux WLAN.

Dans le chapitre suivant, le dernier, nous allons proposer un nouveau protocole, pour but d'améliorer le débit de transmission, le nombre d'utilisateurs et réduire le taux de perte causée par les bits de bourrage.

---

# PROPOSITION ET EVALUATION DE PERFORMANCE

---

## III.1 Introduction

L'utilisation efficace des sous-canaux du canal de transmission dans les réseaux sans fil est cruciale pour réduire les interférences et optimiser les débits de transmission. Dans ce contexte, la conception de méthodes MAC pour les réseaux WLAN est devenue un domaine de recherche concurrentiel depuis l'émergence de la norme IEEE 802.11ax. Cette norme introduit de nouvelles fonctionnalités et améliorations visant à améliorer les débits de transmission dans les réseaux sans fil. L'objectif de ce chapitre est de proposer et d'évaluer les performances d'un protocole MAC Full Duplex dans les réseaux HEW.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter et expliquer notre nouveau protocole qui vise à améliorer l'efficacité d'utilisation des sous-canaux, ainsi d'augmenter le débit de transmission tout en réglant le problème du MU et du time out ack. Nous aborderons en premier une problématique sur le full duplex dans la norme 802.11ax, suivie de nos objectifs et motivations que nous voulons apportée. On donnera aussi une explication détaillée du protocole proposée, suivie d'un exemple d'application. Ensuite, nous allons terminer par une phase d'évaluation de performances de la solution présentée, tout en exposant le logiciel utilisé ainsi que l'ensemble des paramètres d'évaluation de performances que nous avons considérés pour la simulation soutenue par l'exposition des graphes des résultats de simulation. Et enfin une conclusion résumant ce chapitre.

## III.2 Motivations et objectifs

Notre objectif dans ce travail est de proposer un protocole MAC Full Duplex qui répond efficacement aux points mentionnés dans la problématique, notamment pour résoudre les problèmes du multiutilisateur, du time out ack, d'asymétrie des trafics UL et DL et d'optimisation des performances du réseau.

L'élaboration de ce nouveau protocole MAC Full Duplex nécessitera une analyse approfondie des caractéristiques du trafic UL et DL, ainsi que l'exploration de techniques innovantes pour équilibrer la transmission simultanée de ces deux types de trafic. L'objectif ultime est de parvenir à un protocole MAC efficace, capable de garantir des débits élevés, une utilisation optimale de la bande passante et une faible latence, tout en minimisant les coûts liés à la contention d'accès au canal.

## III.3 Proposition

Dans cette section, nous proposons un nouveau protocole MAC appelé "MU-UL-FDR" qui est l'abréviation de Multi-User for Up-Link in Full-Duplex Radio, qui permet d'obtenir une amélioration au protocole MAC Full Duplex (ECC-FDRC) de manière à ce qu'on puisse permettre le multi user en UL et résoudre le problème de l'asymétrie des trafics Uplink et Downlink causé par la différence des tailles des paquets DL et UL dans une communication Full Duplex.

### III.3.1 Description de fonctionnement du protocole proposé

Nous montrons qu'un cycle de communication du protocole MU-UL-FDR se produit sur une bande de fréquences d'une largeur minimale de 20 MHz. Il convient de noter que ce protocole peut également fonctionner avec un comportement similaire dans des bandes de fréquences plus larges, y compris 40, 80 et 160 MHz accessibles par la norme HEW. Pour des raisons de simplicité, de brièveté et de comparabilité, nous décrivons les règles de fonctionnement du protocole MU-UL-FDR dans un canal de 20 MHz.

Ce protocole consiste à gérer l'envoi simultané des données Up Link de toutes les stations émettrices vers le point d'accès sur la même bande de fréquence de 20 MHz que les données Down Link du point d'accès vers les stations. Ce protocole est conçu pour résoudre les défis liés à la gestion des communications Full-Duplex, tels que la détection et la gestion des stations cachées, la considération de l'asymétrie entre les flux de données en liaison descendante (DL) et en liaison montante (UL).

Le protocole MU\_UL\_FDR se déroule dans un canal de transmission de 20 MHz, qui est subdiviser en 256 sous-porteuse (sous couches) de tailles parfaitement égales (chacune ayant une largeur de 78,125 KHz), Parmi les 256 sous-porteuses, 234 sous-porteuses sont allouées pour la transmission de données, et les 22 sous-porteuses restantes sont utilisées pour gérer le canal de transmission (paramétrage). La première sous-porteuses est dédié au point d'accès (AP), et les 233 autres sous-porteuses qui suivent sont dédiés pour les différentes stations du réseau, on s'intéressera au 234 premières sous couches et on décrira le déroulement de ce protocole dans ce qui suit.

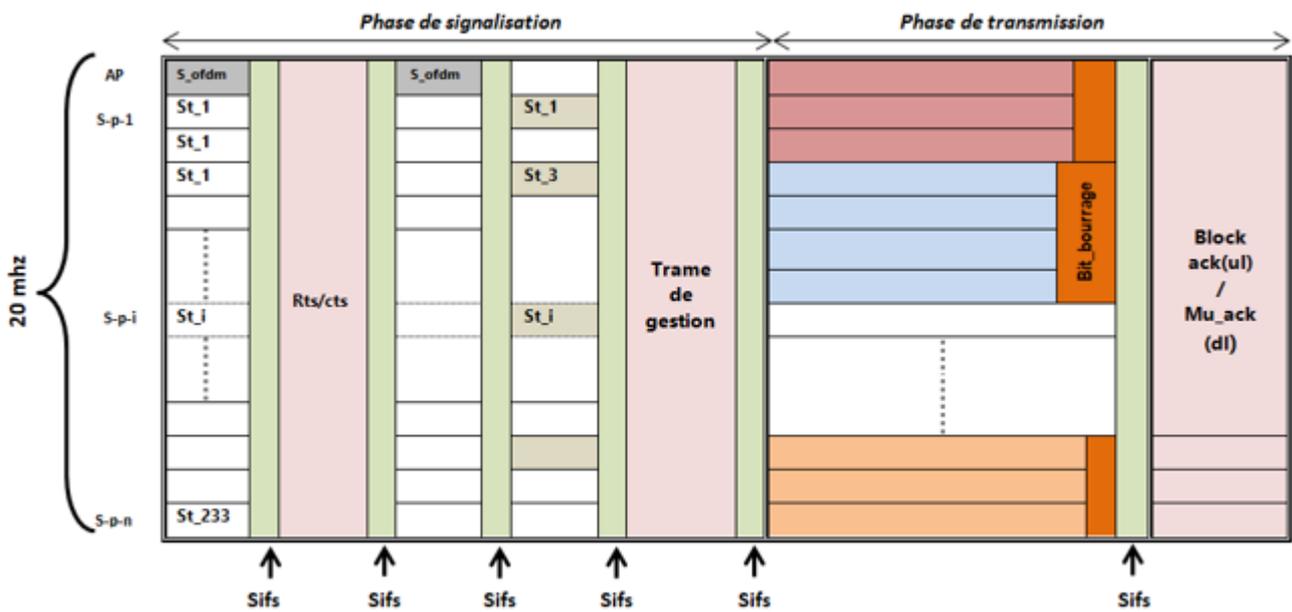


FIGURE III.1 – Schéma illustratif d'un cycle du protocole MU-UL-FDR.

Un cycle de ce protocole MU-UL-FDR se compose principalement de deux phases, une phase de signalisation et une phase de transmission ou on retrouve l'échange de données entre l'AP et les stations concernées d'où le Up Link et le Down Link.

Dans la phase de signalisation : le point d'accès (AP) qui occupe la première sous-porteuse diffuse un symbole ofdm à toute les stations du réseau et en particulier à une seule station désignée par le AP (l'AP choisi aléatoirement une station parmi les stations qui ont un DL à recevoir,). Ce symbole ofdm contient l'identifiant de la station désigné, qui est suivi par un SIFS (qui se trouve d'ailleurs entre chaque étape dans la phase de signalisation, donc on va omettre de le citer à chaque fois). Puis la station choisie fera un échange de trame RTS / CTS avec le point d'accès. Les données de la station désigné d'une taille variable d'AMPDU de 1 à 64 MPDU's et chaque quantité de MPDU varie entre 1 et 11454 octets, cette station sera la seule à recevoir les données DL du point d'accès.

Ensuite l'AP va envoyer un symbole ofdm dans le but d'inviter les stations cachées de la station choisi préalablement à se manifester auprès de l'AP. Une fois les stations cachées seront présentées, elles vont être gérées par la trame de gestion, cette trame va organiser la transmission UL, elle va commencer par sélectionner les stations cachées qui ont un UL à transmettre, ces données sont de taille MPDU.

Tout d'abord on prend la quantité du DL à transmettre et on la divise par le nombre de sous-porteuses soit par 234, on aura la quantité de données max qu'une sous-porteuse peut transporter, la formule est donnée comme suit :

$$qnd\_dl\_hs = qnt\_dl/nbr\_sc$$

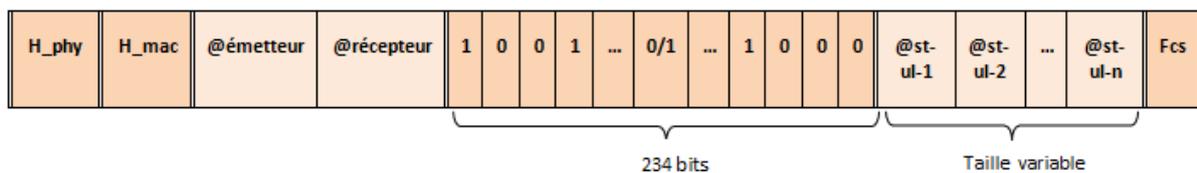
Puis pour chaque station cachée qui a un UL à transmettre, on prend la quantité de donnée et on la divise par la quantité de DL dans chaque sous-porteuse, ce qui nous donnera le nombre de sous-porteuse nécessaire pour transmettre les données UL de la première station cachée, la formule est donnée comme suit :

$$nbr\_sc\_ul(i) = qnd\_dl\_hs/qnt\_ul(i)$$

Ensuite, on compare au fur et à mesure la quantité du DL initial avec la somme des quantités UL des stations cachées, de façon à ce que le maximum de ces dernières puisse transmettre leurs données UL, la formule est donnée comme suit :

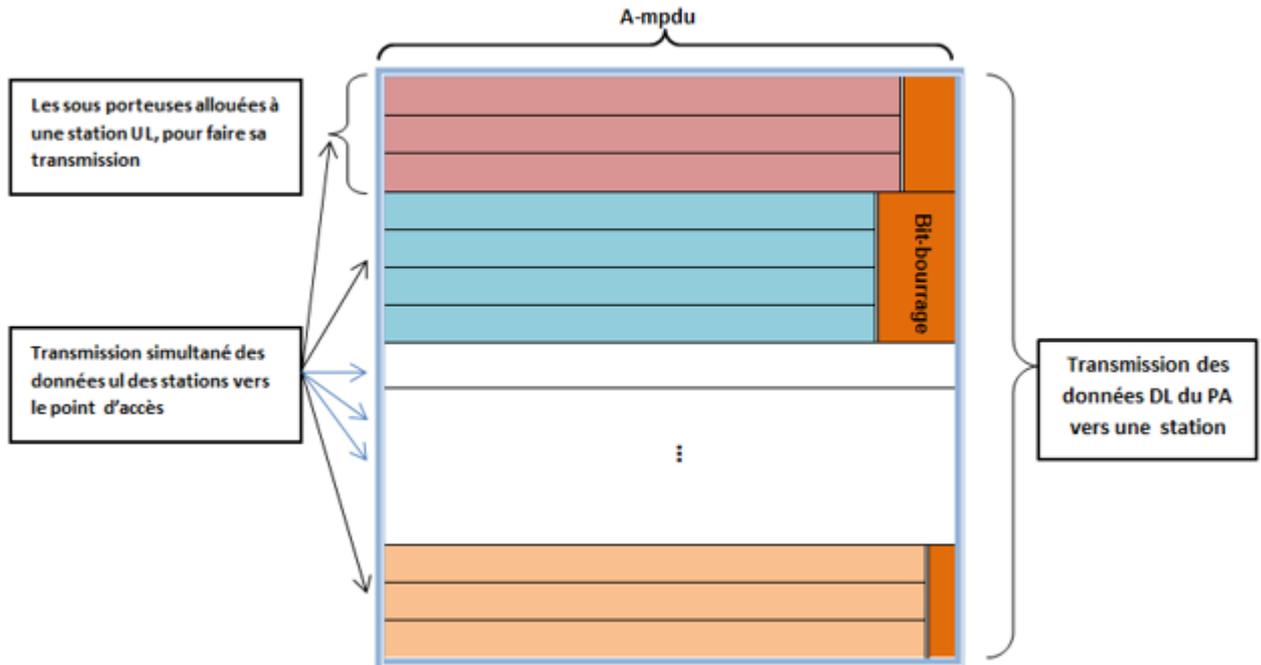
$$qnd\_dl \geq \sum qnt\_ul(i)$$

Après cela, on pourra construire trame de gestion, qui se constitue d'une entête physique, une entête mac, adresse de l'émetteur ainsi que l'adresse du récepteur, un champ de 234 bites qui correspond au nombre de sous-porteuse, le nombre de sous-porteuse nécessaires à une station cachées pour faire la transmission UL correspond au nombre de bites qui lui sont dédiés dans la trame de gestion qui commence par un 1 et le reste c'est des zéros (0), pour différencier les stations entre elles, et le dernier champ correspond au adresse des stations en UL (celles qui ont accéder au canal de transmission), la figure suivante illustre cette trame et ses différents champs. Et avec cela on aura terminé avec la phase de signalisation.



**FIGURE III.2** – Trame d'allocation du protocole MU-UL-FDR.

Dans la phase de transmission : la transmission DL occupe toute la largeur du canal tandis que les transmissions UL se font d'une manière simultanée (MU), sur la même bande de fréquence qui est divisée en 234 sous-porteuses, lors des transmissions UL on aura des pertes dû à la différence de la quantité  $UL(i)$  par rapport au nombre de sous-porteuses dédiée à cette transmission comme illustré ci-dessous.



**FIGURE III.3** – Phase de transmission du protocole MU-UL-FDR.

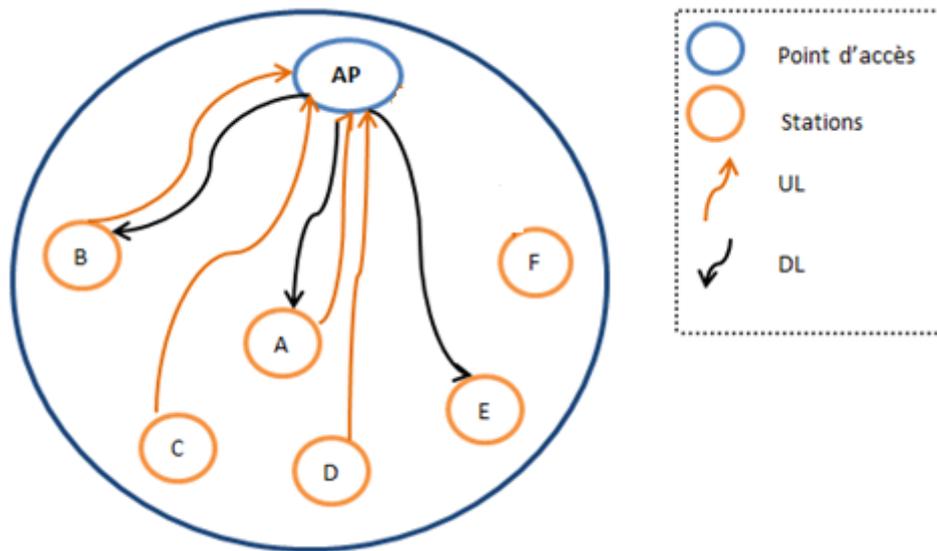
Donc pour remédier à ce problème on a rempli le reste (ce reste représente la différence de la trame UL par rapport à la trame DL en termes de temps), avec des bits de bourrage et ainsi on aura réglé le problème du Time Out Ack, ce qui va permettre d'envoyer un seul block ACK pour acquitter toutes les stations UL qui ont participé à la transmission, et en parallèle, le AP envoie un MU ACK (Multi User Ack) pour toutes les stations émettrices.

### III.3.2 Exemple de fonctionnement du protocole proposé

Nous illustrons comment contrôler l'accès au canal en utilisant un exemple simple, comme illustré sur la figure III.4. Nous supposons qu'on a un réseau qui se compose d'un point d'accès et de 6 stations A, B, C, D, E et F. On suppose que le point d'accès a des données à envoyer aux stations A B et E et que les stations A, B, C, D et F, ont des données à envoyer au point d'accès.

Nous supposons que les paquets à envoyer ont les tailles suivantes :

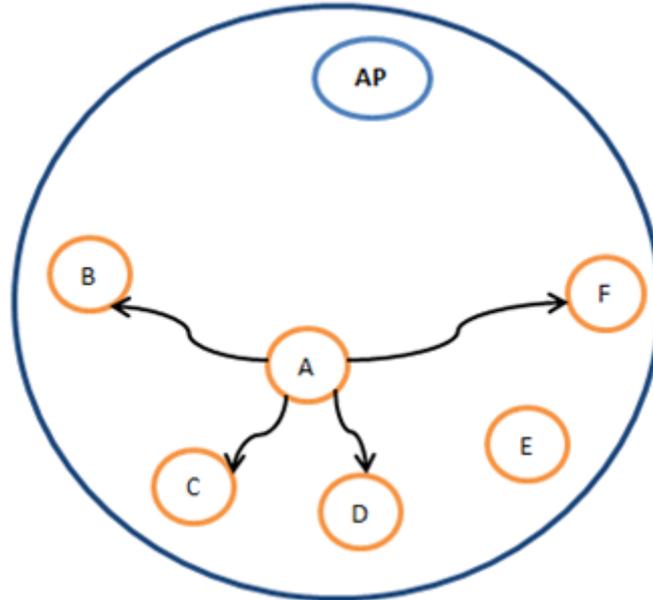
AP  $\rightarrow$  A (8000 octets);  
 AP  $\rightarrow$  B (6000 octets);  
 AP  $\rightarrow$  E (7000 octets);  
 A  $\rightarrow$  AP (1800 octets);  
 B  $\rightarrow$  AP (150 octets);  
 C  $\rightarrow$  AP (200 octets);  
 D  $\rightarrow$  AP (100 octets); La station F n'a ni de données DL à recevoir ni de données UL à émettre.



**FIGURE III.4** – Illustration du réseau et les liaisons entre ses différents composants.

Tout d'abord dans la phase de signalisation : le point d'accès diffuse un symbole ofdm a toutes les stations du réseau (dans cet exemple aux 6 stations du réseau), mais plus précisément à une seule station qui est la station choisie par l'AP. Dans cet exemple c'est la station A qui est choisie par l'AP, d'où le symbole ofdm contient l'identifiant de la station A, qui va donc recevoir les données DL (8000 octets).

Ensuite, le point d'accès diffuse un deuxième symbole ofdm, pour inviter les stations cachées de la station désigné (qui est la station A) à se manifester. On supposera que c'est les stations B, C, D et F. c'est ces dernières qui feront la transmission UL. Comme montré dans la figure suivante :



**FIGURE III.5** – Détection des stations cachées.

On remarque la station F n'a pas de données UL par conséquent elle ne participera pas à la transmission, dans la trame de gestion on prend la quantité du dl de la station A, qui prendra toute la largeur du canal pour sa transmission, et on divise cette quantité sur 200 (on prend 200 au lieu de 234 pour la facilité de calcul et la précision de la figure suivante). Ce qui nous donnera la quantité que peut transporter chaque sous-porteuse, et on aura :  $8000 / 200 = 40$  octets par sous porteuse, on suppose que les stations cachées qui ont un UL à transmettre passeront avec cet ordre, D, B puis C.

$$qnt\_s\_p = qnt\_dl / 200$$

On divise chaque quantité d'UL de chaque station sur les 40 octets pour connaître le nombre de sous porteuses allouées à chaque station pour la transmission UL. On prendra chaque fois le nombre le plus petit, qui est égale ou supérieur au résultat de la division.

$$qnt\_ul\_sp(i) = qnt\_ul(i) / qnt\_s\_p$$

La trame de gestion de cet exemple ressemblera à la figure III.4, Ensuite on calcule la quantité de bourrage pour chaque station avec la formule suivante.

$$brg(i) = (nbr\_s\_p * qnt\_s\_p) - qnt\_ul(i)$$

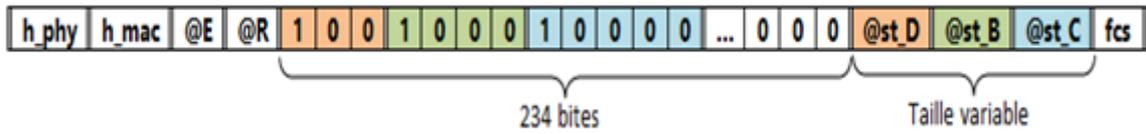


FIGURE III.6 – Trame de gestion correspondant à l'exemple.

Les résultats sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

La station	Sa quantité UL	Le nombre de sous porteuses nécessaires	La quantité de bourrage
D	100	3	20
B	150	4	10
C	200	5	0

TABLE III.1 – Tableau illustrant les calculs effectués par la trame de gestion.

La transmission de la donnée DL se fera sur toute la largeur du canal, et la transmission des données UL des stations B, C et D se feront en parallèle et sur les sous porteuses qui leur sont attribué par la trame de gestion, voici une petite représentation de la phase de transmission pour cet exemple :

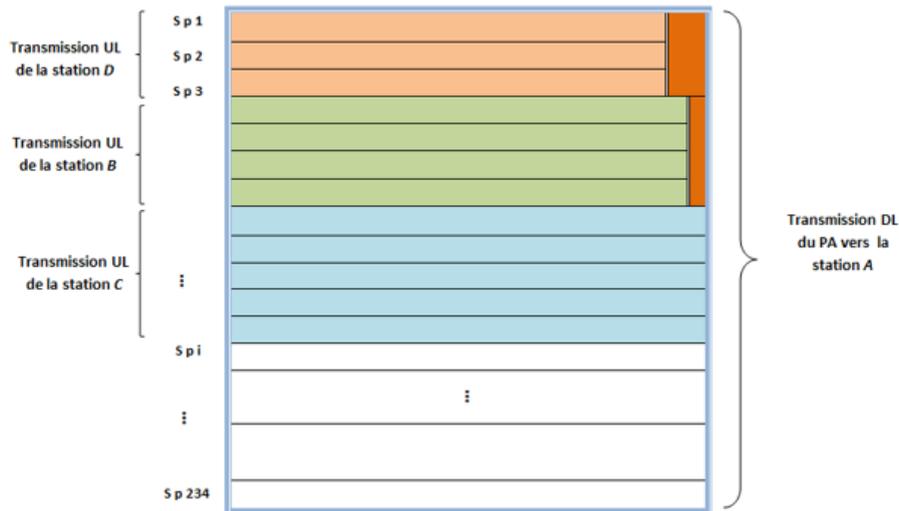


FIGURE III.7 – Illustration de la phase de transmission.

## III.4 Evaluation des performances

Cette section est consacrée à la mise en œuvre, à la simulation et à l'évaluation des performances du protocole MU-UL-FDR. Une comparaison est ensuite faite avec un protocole MAC Full-Duplex bien connu avec ses bonnes performances, qui est le protocole ECC-FDCR de kenza Hocini et al afin d'évaluer l'efficacité de notre protocole.

Ainsi Le logiciel que nous avons exploité, l'ensemble des paramètres d'évaluation de performances que nous avons considérés pour la simulation, soutenus par des graphes de résultats sont détaillés dans cette section.

### III.4.1 Logiciel utilisé

MATLAB est un logiciel développé par la société MathWorks. Il a été créé dans les années 1980 par Cleve Moler, professeur de mathématiques et d'informatique à l'Université du Nouveau-Mexique. MATLAB est un acronyme pour "MATrix LABoratory", ce qui souligne son orientation initiale vers la manipulation des matrices [1].



MATLAB est à la fois un langage de programmation et un environnement de développement qui offre des fonctionnalités avancées pour la simulation, l'analyse et la visualisation de données. Il permet aux utilisateurs de manipuler des tableaux de données, de résoudre des équations mathématiques, d'effectuer des opérations complexes sur les matrices, de créer des graphiques et des visualisations, et bien plus encore.

### III.4.2 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation les plus importants sont énumérés et décrits en détail dans le tableau suivant :

PARAMETRES	DESCRIPTION
Bw	Channel bandwidth.
N	Number of stations in the network.
Ptr	Payload data transmission rate.
Ctr	Control data transmission rate.
Symb_ofdm	Duration of an OFDM symbol.
Rts	Request to send.
Cts	Clear to send.
H_phy	Size of the PHY header.
H_mac	Size of the MAC header.
Pad	Size of the MPDU padding in an A-MPDU frame.
Dlt	Size of the MPDU delimiter in an A-MPDU frame.
Fcs	Size of the frame check sequence.
Mpdu	Size of MAC protocol data units (MAC header, MSDU, and FCS).
N mpdu	Number of MPDUs aggregated in an A-MPDU frame.
A-mpdu	Size of aggregated-MPDUs (all MPDUs, all DLTs, and all PADs).
Sum_users	Number of users served.
Cmax	Maximum number of cycles of a simulation.
Ns	Number of repeats of a simulation.
Ts	Simulation time.
Th	Overall throughput of the network.
Oh	Overhead of the network.
Sr	Service rate.
Sifs	Short interframe space.
Ack	Acknowledgment.
Qnt_dl	DL quantity.
Qnt_ul	UL quantity.
Nbr_sc	Nombre of sub-carrier.

**TABLE III.2** – Paramètres de simulation.

### III.4.3 Les valeurs numériques des paramètres de simulation

Ci-dessous les valeurs importantes des paramètres de simulation :

Parameter	Numerical value	Parameter	Numerical value
BW	20 MHz	fcs	4 bytes
n	233 at most	dlt	4 bytes
Cmax	1000 cycles	pad	bytes at most
Ns	100 times	N mpdu	64 mpdu's at most
ptr	43.4 Mbps	A-mpdu	1048575 bytes at most
ctr	8.6 Mbps	ack	112 bits
Symb_ofdm	12.8 us	rts_cts	20 bytes
H_mac	36 bytes	H_phy	40 us

**TABLE III.3** – Les valeurs numériques des paramètres de simulation.

### III.4.4 Résultats de simulation

Dans cette sous-section, nous évaluons les performances du protocole MU-UL-FDR en utilisant trois mesures clés : le débit UL en mode insaturé, le taux de service et le ratio de perte. L'objectif est de démontrer l'efficacité de notre contribution. Pour une évaluation complète, nous comparons également les performances du protocole MU-UL-FDR avec celles du protocole MAC Full-Duplex (ECC-FDCR), qui présente des principes similaires.

Nous commençons par analyser les performances du protocole MU-UL-FDR en faisant varier la taille du réseau, comme illustré dans les figures (III.8, III.9 et III.10). Les résultats obtenus montrent l'impact de la taille du réseau sur le débit UL en mode insaturé, le taux de service et le ratio de perte. Nous effectuons chaque simulation pendant une période de 1000 cycles et répétons le même scénario de simulation 10 fois pour garantir la fiabilité des résultats.

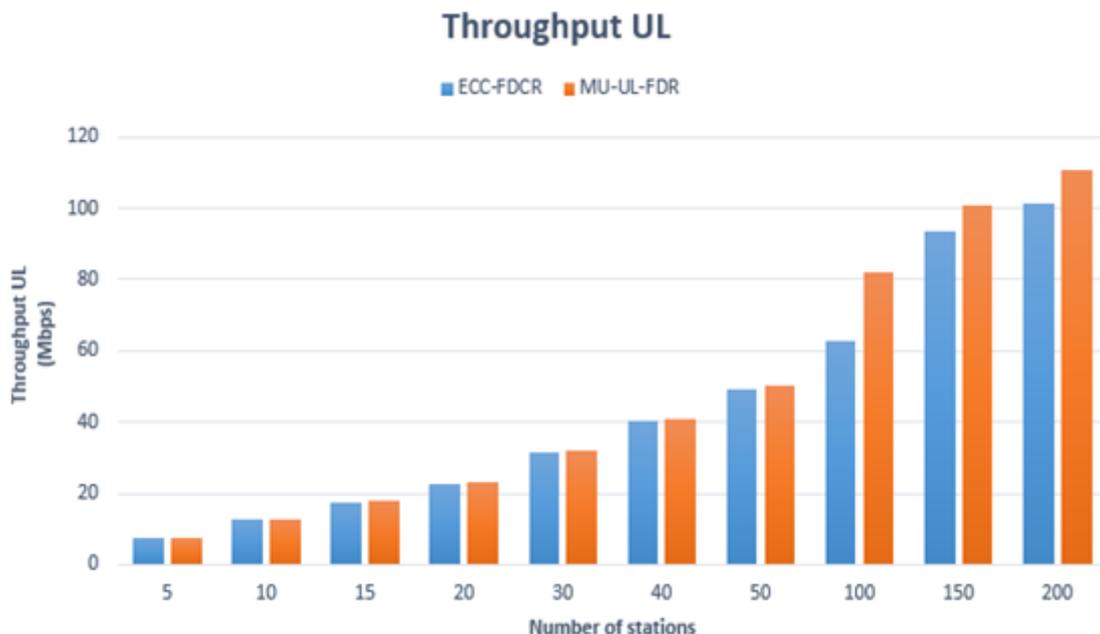
Ensuite, nous étudions l'influence de la longueur de la trame DL sur les performances du protocole MU-UL-FDR, comme représenté dans les figures (III.11, III.12 et III.13). Cette analyse nous permet de comprendre comment le protocole réagit aux variations de la longueur de la trame DL et d'évaluer son efficacité dans différentes configurations. Encore une fois, chaque simulation est exécutée pendant 1000 cycles et répétée 10 fois pour garantir la cohérence des résultats.

Afin de fournir une comparaison significative, nous utilisons le protocole MAC Full-Duplex (ECC-FDCR) comme point de référence. ECC-FDCR est un protocole qui effectue l'identification et la planification des différentes configurations de communications radio Full-Duplex. Il aborde également les problèmes des stations cachées, de l'asymétrie entre les longueurs des trames DL et UL, ainsi que la minimisation des frais généraux. Nous analysons les performances du protocole MU-UL-FDR en le confrontant à ECC-FDCR pour évaluer l'efficacité de notre approche.

Les résultats numériques présentés dans les figures (III.8, III.9, III.10, III.11, III.12 et III.13) sont obtenus en utilisant les paramètres de simulation récapitulés dans le tableau III.3. Chaque mesure de performance est générée en exécutant le même scénario de simulation 10 fois pour assurer la robustesse des résultats.

Cette évaluation des performances du protocole MU-UL-FDR et sa comparaison avec ECC-FDCR nous permettront de mettre en évidence les avantages et les améliorations apportées par notre approche dans les réseaux HEW exploitant la radio full duplex.

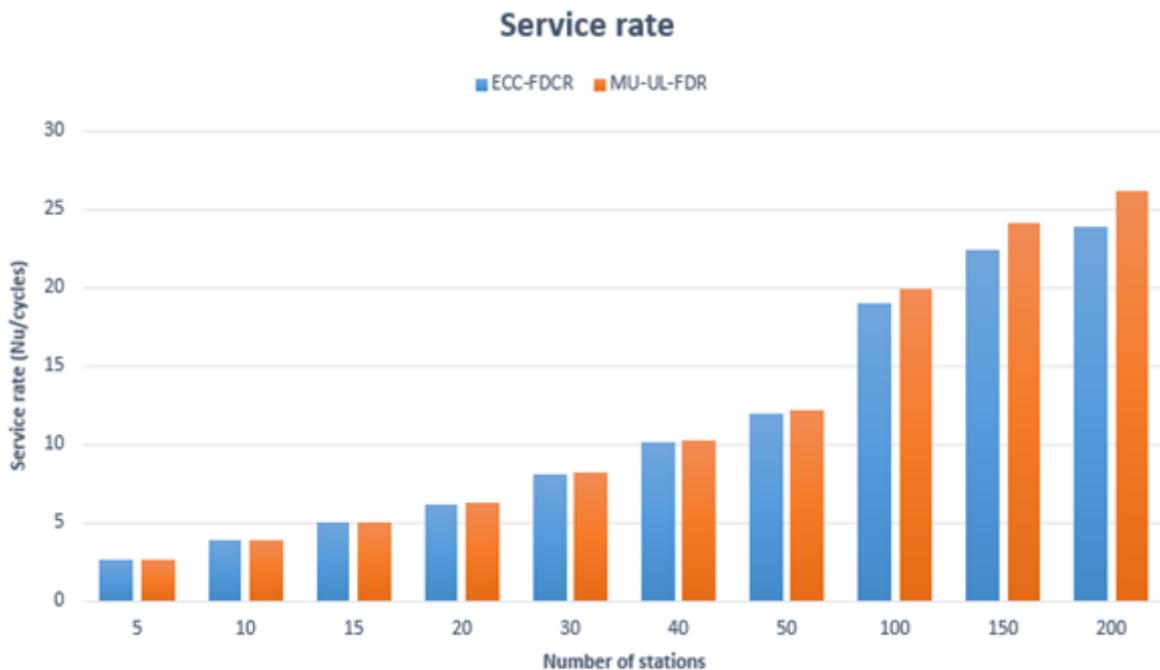
Dans les figures III.8, III.9 et III.10 nous évaluons et comparons respectivement le débit UL (mode insaturé), le taux de service et le rapport de perte du protocole MU-UL-FDR avec le protocole ECC-FDCR, en faisant varier le nombre de stations (taille du réseau).



**FIGURE III.8** – Débit UL Vs Nombre de stations.

Dans la figure III.8 nous observons que le débit UL en mode insaturé obtenus avec les protocoles MU-UL-FDR et ECC-FDCR augmentent proportionnellement à la taille du réseau. En effet, plus le nombre de stations dans le réseau est élevé, plus la quantité de données de charge utile UL transmises est élevée. Lorsque la taille du réseau est inférieure ou égale à 50 stations, les débits UL réalisables avec le protocole MU-UL-FDR sont légèrement plus élevés que ceux du protocole ECC-FDCR. Comme la taille du réseau n'est pas assez grande, donc la quantité de données UL n'est pas importante ce qui induira la quantité importante des bits de bourrages. D'où on peut dire que les deux protocoles se comportent d'une manière presque identique quand le nombre de stations est inférieur à 50.

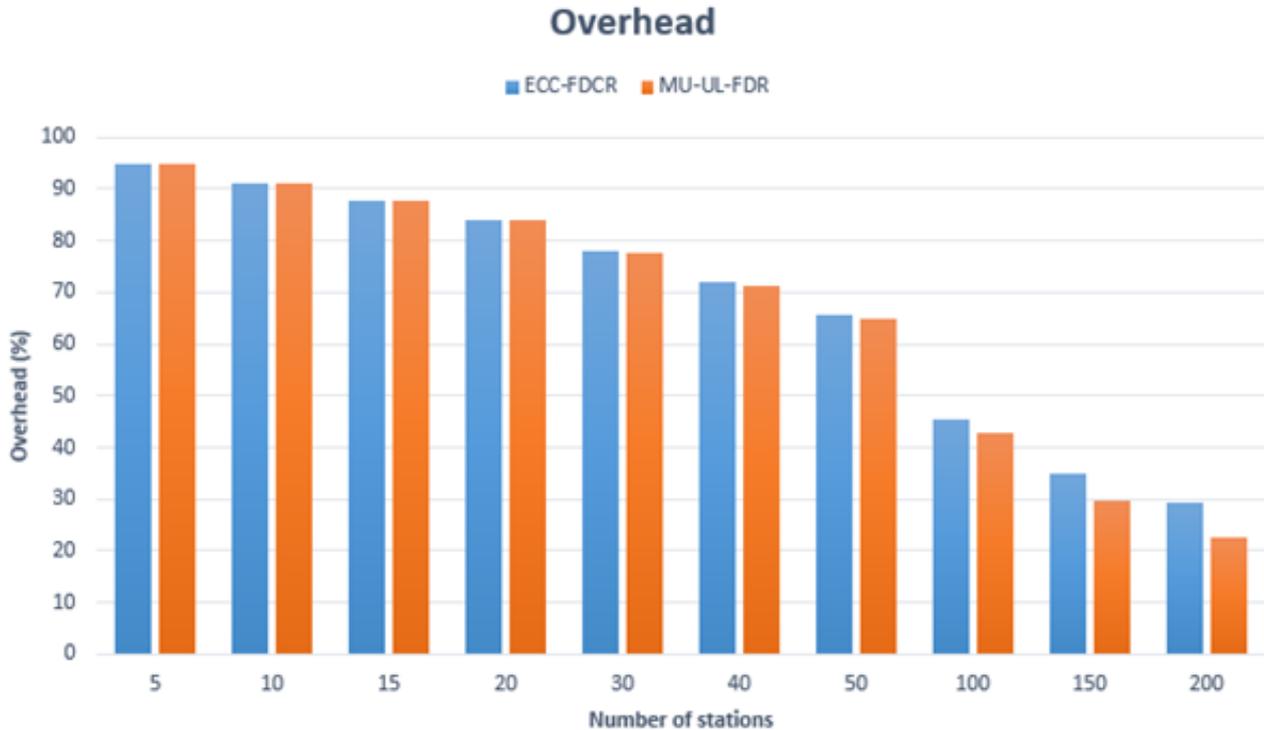
Cependant, dans le cas d'un réseau dense (en particulier plus de 100 stations), nous notons une amélioration significative des débits du protocole MU-UL-FDR par rapport à ceux du protocole ECC-FDCR. Étant donné que le protocole ECC-FDCR est basé sur la technique de transmission OFDMA, d'où les transmissions se font d'une manière séquentielle, le protocole MU-UL-FDR est basé sur le MU ce qui permet des transmissions en parallèle de plusieurs stations en même temps, ce qui augmente la quantité UL à transmettre, ainsi le débit UL augmente.



**FIGURE III.9** – Taux de service Vs Nombre de stations.

Dans la figure III.9 nous montrons que dans les deux cas des protocoles MU-UL-FDR et ECC-FDCR, le taux de service augmente avec l'augmentation de la taille du réseau. Le taux de service du protocole MU-UL-FDR dépasse légèrement celui du protocole ECC-FDCR pour les petits réseaux (50 stations maximum). Cependant, nous constatons pour plus de 100 stations une amélioration plus importante. Ceci revient au fait que le protocole MU-UL-FDR utilise la technique du MU, où plusieurs stations peuvent accéder au canal de transmission en parallèle, ce qui augmentera le nombre d'utilisateurs servis pour une seule transmission. Par contre le

protocole ECC-FDCR utilise la technologie OFDMA, où la transmission pour une seule station occupe toute la largeur du canal de transmission. Par conséquent, le taux de service du protocole ECC-FDCR est considérablement réduit par rapport à celui du protocole MU-UL-FDR.



**FIGURE III.10** – Taux de perte Vs Nombre de stations.

Dans la figure III.10 nous montrons que la surcharge du réseau, induite principalement par l'asymétrie entre les longueurs des flux de données DL et UL, diminue considérablement dans le cas des deux protocoles avec un nombre croissant de stations. Lorsque le réseau n'est pas dense (nombre de stations  $\leq 50$ ), nous notons, comme dans le cas du débit et le cas du taux de service, que la surcharge du protocole MU-UL-FDR est légèrement inférieure à celle du protocole ECC-FDCR. Ceci revient à la quantité de bourrage qui est importante quand le réseau est faible (le nombre de stations est petit) dans le protocole MU-UL-FDR. Cependant, lorsque le réseau est dense (nombre de stations  $\geq 100$ ), nous constatons que le taux de perte du protocole MU-UL-FDR est plus faible que celle du protocole ECC-FDCR. Ceci revient au fait que le temps de bourrage dans le protocole MU-UL-FDR est beaucoup moins importante, ceci est dû à l'augmentation de la taille de données UL, en d'autres terme la différence de taille entre le DL et le UL est réduit avec l'augmentation du nombre de stations. Par contre le taux de perte dans le protocole ECC-FDCR est représenté par le temps d'acquittement (ack + sifs) pour chaque transmission UL qui est plus important que le temps de bourrage du protocole MU-UL-FDR.

Dans les figures III.11, III.12 et III.13 nous évaluons et comparons respectivement le débit UL (mode insaturé), le taux de service et le rapport de perte du protocole MU-UL-FDR avec le protocole ECC-FDCR, en faisant varier le nombre de MPDUs (taille de la trame DL).

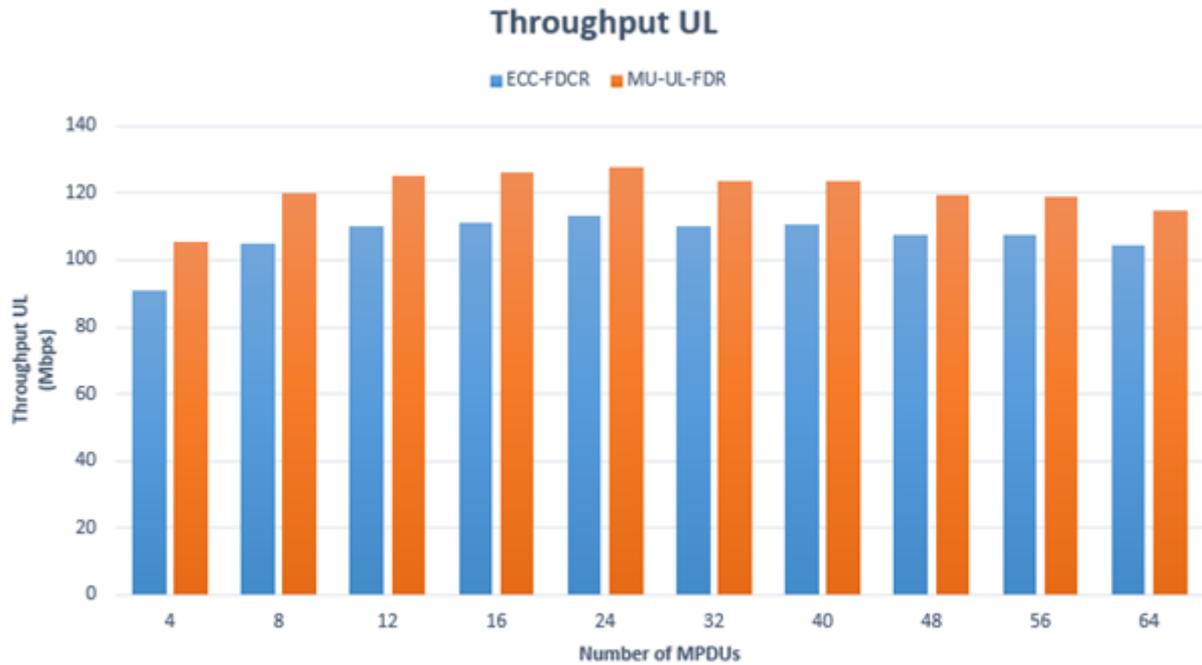


FIGURE III.11 – Débit UL Vs Nombre de MPDUs.

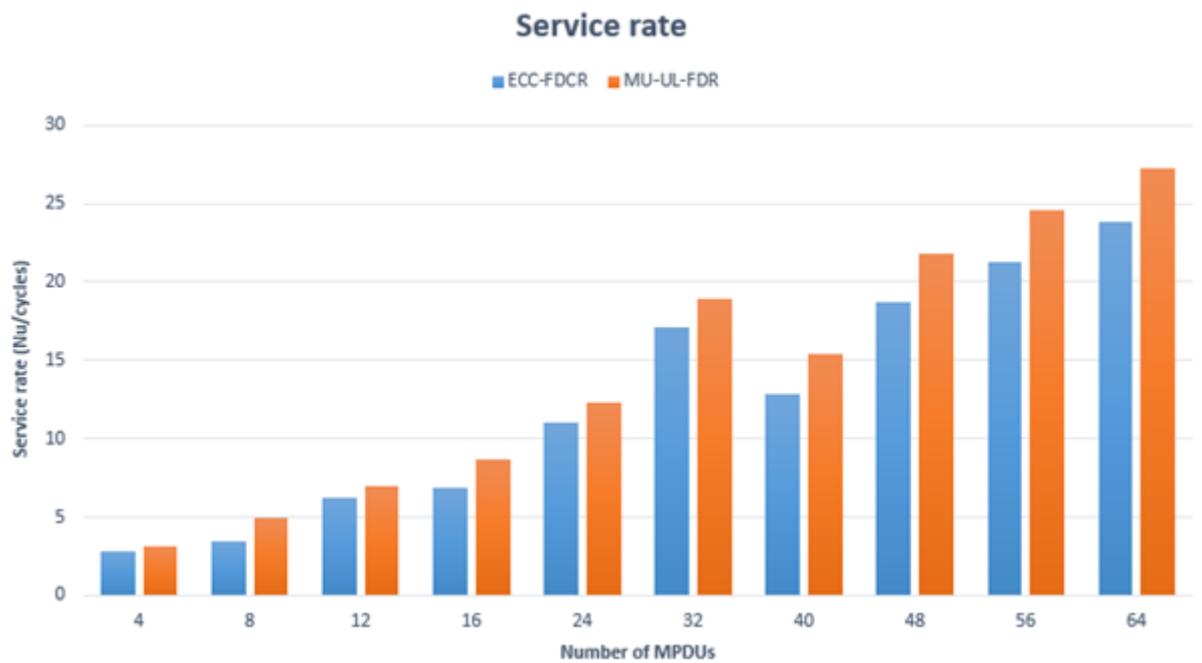
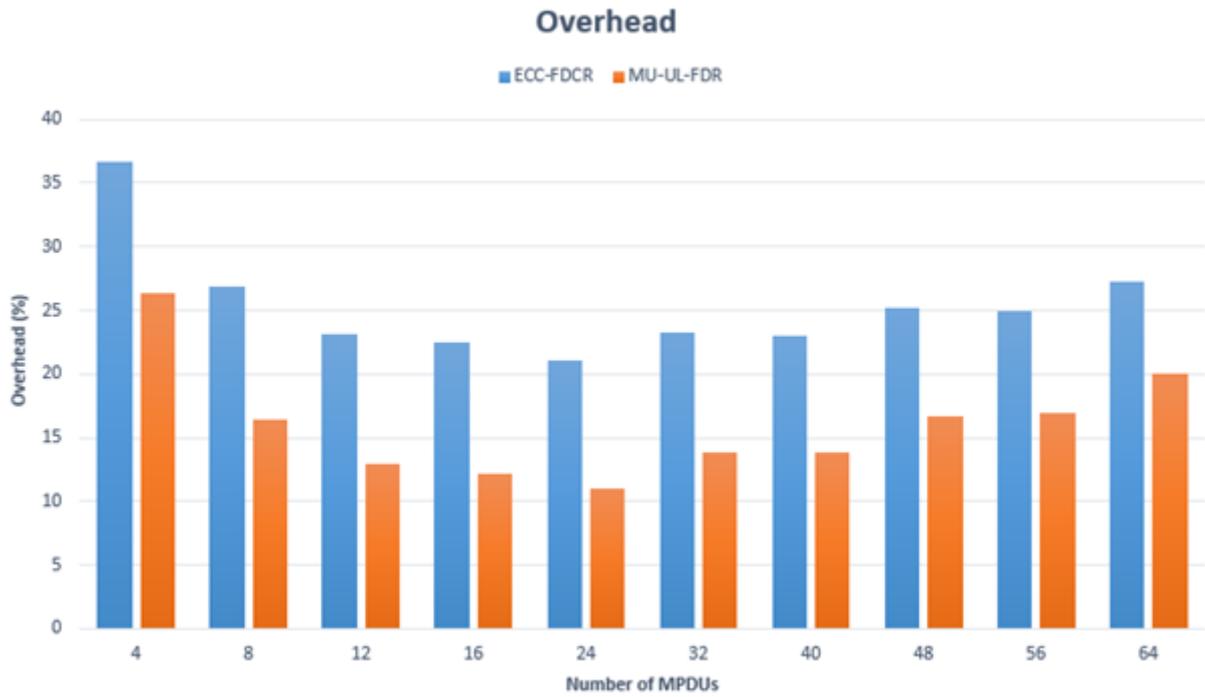


FIGURE III.12 – Taux de service Vs Nombre de MPDUs.

D'après les résultats de la simulation illustrés dans les figures III.11 et III.12, nous pouvons constater aisément que le protocole proposé (MU-UL-FDR) fournit un gain plus important en termes de débit UL et de taux de service par rapport au protocole ECC-FDCR.



**FIGURE III.13** – Taux de perte Vs Nombre de MPDUs.

Nous constatons dans la Figure III.13 que le taux de perte varie selon le nombre de MPDU's, il peut atteindre un taux de 37% de perte pour le protocole ECC-FDCR. En revanche, le taux de perte maximal en bits de bourrage dans MU-UL-FDR ne dépasse pas 26%, ainsi un gain de 11% ( $37\% - 26\% = 11\%$ ) en données est offert en utilisant MU-UL-FDR. La figure 3.9 nous montre aussi que, le taux de perte du protocole MU-UL-FDR est plus faible que celle du protocole ECC-FDCR quel que soit la taille de la trame DL.

## III.5 Conclusion

L'utilisation efficace des sous-canaux d'un canal de transmission dans la norme IEEE 802.11ax permet principalement d'améliorer le débit, le nombre d'utilisateur et le taux de perte. L'objectif du protocole proposé MU-UL-FDR est d'optimiser l'utilisation des sous-canaux en améliorant le protocole ECC-FDCR tout en introduisant la transmission en parallèle de différentes stations pour la technique MU.

Ce chapitre a été consacré à la présentation de notre protocole MAC Full Duplex afin d'apporter des améliorations à la radio full duplex dans la 802.11ax et aux protocoles précédents. Nous avons également présenté notre simulateur que nous avons utilisé pour évaluer les performances de notre protocole. Enfin, nous avons comparé les résultats de simulation de notre protocole avec le protocole ECC-FDCR à travers des histogrammes groupés, ce qui nous a confirmé l'efficacité de notre proposition.

---

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

La future norme IEEE 802.11ax représente une avancée significative dans le domaine des réseaux sans fil, en réponse aux limitations des normes actuelles (IEEE 802.11n/ac) en termes de réutilisation spatiale et de gestion des interférences. Cette norme vise à améliorer le débit et la réutilisation spectrale grâce à des techniques avancées, favorisant un accès multi-utilisateurs plus efficace et réduisant les interférences.

L'un des mécanismes clés de l'IEEE 802.11ax est la transmission full duplex, qui offre une solution essentielle pour améliorer les performances des communications dans les réseaux locaux sans fil (WLANs) de prochaine génération.

Ce travail de Master contribuera ainsi à l'avancement de la recherche dans le domaine des protocoles MAC Full Duplex pour les réseaux sans fil, en fournissant de nouvelles solutions pour résoudre les problèmes de la radio full duplex dans la 802.11ax.

Dans ce mémoire, nous nous sommes essentiellement intéressés aux communications Full Duplex pour norme IEEE 802.11ax, dont nos principales motivations et objectifs ont été : proposition d'un protocole MAC Full Duplex basé sur le MU et l'OFDMA afin d'utiliser pleinement la transmission et la réception simultanées en étant capable de gérer le Time Out Ack, garantir des débits élevés, une utilisation optimale de la bande passante et une faible latence, tout en minimisant les coûts liés à la contention d'accès au canal.

Pour cela, nous avons défini en détails le fonctionnement, l'objectif, défis et problèmes techniques liés à ce mécanisme, ensuite, nous avons proposé un protocole MAC Full Duplex basé sur MU et OFDMA qui permet d'avoir des communications simultanées de liaison montante (UL) et descendante (DL) entre un point d'accès et plusieurs stations associées dans norme IEEE 802.11ax, enfin, nous avons effectué des simulations pour évaluer les performances de notre protocole par rapport au protocole ECC-FDCR.

Sur la base du travail réalisé, nous dressons les perspectives suivantes :

- Proposition d'une méthode d'accès MAC permettant l'amélioration de débit de transmission UL OFDMA ;
- Développement de la proposition pour une meilleure gestion des bits de bourrage ainsi une amélioration du taux de perte.

---

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Livre blanc technique, Document public de Cisco IEEE 802.11ax : "la sixième génération du Wi-Fi".
- [2] <https://www.techradar.com/news/what-is-wi-fi-6-everything-you-need-to-know>. Consulté le : 17/03/23.
- [3] White paper : "802.11ax", aruba a Hewlett Packard Enterprise company, [www.arubanetworks.com](http://www.arubanetworks.com). Consulté le : 17/03/23.
- [4] "The role of Wi-Fi in digital transformation" par Ruckus Networks (un fournisseur de solutions de réseau WiFi).
- [5] Article sur le site de l'Alliance WiFi : "Wi-Fi CERTIFIED delivers new Wi-Fi era" (<https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-certified-6-delivers-new-wi-fi-era>). Consulté le : 19/03/23.
- [6] Article sur CNET : "Wi-Fi 6 : What it is and why it matters" : <https://www.cnet.com/home/internet/wi-fi-6-what-it-is-why-its-better-and-whether-you-should-upgrade/>. Consulté le : 20/03/23
- [7] "WiFi 5 vs WiFi 6 : quelle est la différence? ", Par le groupe éditorial de TP-Link 17-03-2022.
- [8] <https://www.cnet.com/home/internet/what-is-wi-fi-6-and-how-it-will-transform-your-home-network/>. Consulté le : 24/03/23
- [9] <https://www.networkworld.com/article/3430440/wi-fi-6-is-real-and-wi-fi-6e-is-coming-this-year-heres-what-you-need-to-know.html>. Consulté le : 24/03/23
- [10] <https://blog.mediamarkt.be/fr/mobile-digital/quest-ce-que-le-wi-fi-6-et-en-quoi-est-il-important/>. Consulté le : 24/03/23
- [11] <https://gofullbuild.com/post/wifi-6-vs-wifi-5-speed-coverage-and-capacity/>. Consulté le : 24/03/23
- [12] Le document de référence de la Wi-Fi Alliance sur la technologie MU-MIMO : <https://www.wi-fi.org/file/wi-fi-multi-user-mimo-technology>. Consulté le : 24/03/23

- [13] Article : “The newbie’s guide to 802.11ax : The next big wireless standard” de Kenny Yeo - 15 Jun 2019.
- [14] D. Deng, Y. Lin, X. Yang, J. Zhu, Y. Li, J. Luo, and K. Chen. Ieee 802.11ax : Highly efficient wlans for intelligent information infrastructure. IEEE Communications Magazine.
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11ax#OFDMA](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11ax#OFDMA). Consulté le : 24/03/23
- [16] Titre : OFDMA for Future Wireless Communications Auteur(s) : Ying-Chang Liang, Senior Member, IEEE, Zhenqiang Wu, Member, IEEE, and Ye (Geoffrey) Li, Member, IEEE Source : IEEE Journal on Selected Areas in Communications.
- [17] HUAWEI, WiFi 6 - La technologie clé : OFDMA, publié le 2021-3-29 14 :28 :12 par Marwen. Consulté le : 24/03/23
- [18] <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/80211ax-5-things-to-know>. Auteur(s) : Jeff Jones Senior Manager, Applications Engineering
- [19] Publication : “A 1024-QAM WLAN Transmitter for IEEE 802.11ax“.
- [20] <https://www.internetanywhere.fr/wifi-6-ax/>. Postée en 21 juillet 2022, "WiFi 6 : La nouvelle norme WiFi AX et ses nouveautés". Consulté le : 25/03/23
- [21] "Wi-Fi 6 - The Revolutionizer", LUMENCI TEAM en OCTOBRE 2021, de Satyam Kumar.
- [22] "What’s the difference between half-duplex and full-duplex?", De John Burke, Nemertes Research.
- [23] <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/que-es-tecnologia-wifi-6/>. Consulté le : 25/03/23
- [24] J. Mvulla, E. C. Park, M. Adnan, and J. H. Son. Analysis of asymmetric hidden node problem in ieee 802.11ax heterogeneous wlans. In 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), pages 539–544, 2015.
- [25] <https://le-routeur-wifi.com/wifi-6-nouvelle-norme/>. Consulté le : 26/03/23
- [26] Yazeed Alkhrijah, Joseph Camp and Dinesh Rajan. Full Duplex Multiuser MIMO MAC Protocol (FD-MUMAC).
- [27] Hyeongwoo Jo, Hyeongtae Ahn, Eunhyun Kim, and Young-Joo Suh, Senior Member, IEEE. FDCR : A Full-Duplex Collision Resolution Scheme for Next-Generation Wireless LANs.
- [28] Yazeed Alkhrijah, Joseph Camp and Dinesh Rajan. Throughput-Fairness Tradeoff MAC for Multiuser IBFD (TFMAC).
- [29] Yazeed Alkhrijah, Joseph Camp and Dinesh Rajan. HyFDMAC : A Hybrid Access Full-Duplex MAC Protocol.
- [30] Md. Abdul Alim, Shunsuke Saruwatari and Takashi Watanabe. Asym-FDMAC : In-band full-duplex medium access control protocol for asymmetric traffic in wireless LAN.
- [31] Kenza HOCINI, Mohand YAZID and Adlen KSENTINI. Towards an Efficient and Coordinated Control of Full-Duplex Radio Communications in High-Efficiency WLANs.
- [32] <https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>. Consulté le : 17/06/23

---

# RÉSUMÉ

---

Ce mémoire de Master se concentre sur la norme IEEE 802.11ax, également connue sous le nom de Wi-Fi 6, qui présente des améliorations significatives en termes de débits et d'utilisation efficace du spectre radio. Une des avancées clés de cette norme est la communication Full-Duplex, qui permet une transmission bidirectionnelle simultanée sur le même canal.

En effet, la communication Full-Duplex améliore considérablement l'utilisation des ressources spatiales et permet une transmission plus rapide et simultanée des données dans les deux sens. Dans un réseau densément peuplé, cette technologie est particulièrement bénéfique pour résoudre les conflits de transmission et réduire les temps d'attente pour les périphériques clients.

Le protocole MU-UL-FDR basé sur l'OFDMA est une innovation qui étend les capacités de transmission simultanée autant que possible, en particulier pour la transmission de données Up Link. Grâce à cette approche, le problème de l'asymétrie des trames DL et ul sont pris en charge. Les données UL sont envoyées simultanément et en parallèle que la donnée DL, ce qui améliore le débit de transmission.

Nos simulations ont démontré que le protocole MU-UL-FDR proposé offre des performances supérieures aux protocoles existants en permettant une transmission efficace de données en liaison montante (Up Link) dans un environnement multi-utilisateurs tout en résolvant le problème du Time out ack. Grâce à sa capacité à exploiter pleinement les ressources spatiales et à permettre le multi utilisateurs, ce protocole répond de manière optimale aux besoins croissants des utilisateurs en matière de connectivité sans fil, en particulier dans les zones où de nombreux périphériques clients sont présents.

**Mots clés :** IEEE 802.11ax, MU-UL-FDR, Full-Duplex, OFDMA, Downlink, Uplink, Time out ack.

---

# ABSTRACT

---

This Master's thesis focuses on the IEEE 802.11ax standard, also known as Wi-Fi 6, which presents significant improvements in terms of throughput and efficient use of the radio spectrum. One of the key advancements of this standard is Full-Duplex communication, enabling simultaneous bidirectional transmission on the same channel. Indeed, Full-Duplex communication greatly enhances the utilization of spatial resources and enables faster and simultaneous data transmission in both directions. In densely populated networks, this technology is particularly beneficial for resolving transmission conflicts and reducing waiting times for client devices.

The MU-UL-FDR protocol based on OFDMA is an innovative approach that maximizes simultaneous transmission capabilities, especially for Up Link data transmission. By addressing the asymmetry issue between Downlink (DL) and Uplink (UL) frames, UL data is sent simultaneously and in parallel with DL data, resulting in improved transmission throughput.

Our simulations have demonstrated that the proposed MU-UL-FDR protocol outperforms existing protocols by enabling efficient Up Link data transmission in a multi-user environment while resolving the Time out ack problem. With its ability to fully exploit spatial resources and facilitate multi-user communication, this protocol optimally addresses the growing needs of wireless connectivity users, particularly in areas with a high density of client devices.

**Keywords :** IEEE 802.11ax, MU-UL-FDR, Full-Duplex, OFDMA, Downlink, Uplink, Time out ack.