

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



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

Option

Administration et Sécurité des Réseaux

Thème

Accès Multi-Utilisateur dans les réseaux WLANs

Présenté par : M. BOUHALI Abdelhakim

M. BEZGHICHE Micipsa

Devant le jury composé de :

Président	M. MOKTEFI	Mohand	MAA	U. A/Mira Béjaia.
Rapporteurs	M. YAZID	Mohand	MCA	U. A/Mira Béjaia.
	M^{lle} BRAHMI	Saloua	Doctorante	U. A/Mira Béjaia.
Examinatrices	M^{lle} MAMMERI	Souhila	MCB	U. A/Mira Béjaia.
	M^{lle} BENLALA	Wissam	Doctorante	U. A/Mira Béjaia.

Promotion 2022/2023.

Remerciment

Nous remercierons tout d'abord Dieu Tout-Puissant pour sa grâce et sa gratitude et pour nous avoir donné le courage, la santé et la patience pour d'entamer et de terminer ce mémoire. Nos profond reconnaissance a nos parents pour leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de nos études.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas été aussi enrichissant et n'aurait pas été possible sans l'aide et l'encadrement de M. YAZID Mohand et Mlle BRAHMI Saloua, qui nous ont fait bénéficier de la qualité de leur encadrement. On tient à les remercier très chaleureusement pour leurs conseils judicieux, et pour leur contribution rigoureuse et ponctuelle lors de la préparation de ce mémoire.

Ont tiens également à remercier tous les membres du jury pour l'examiation de notre travail. On exprime notre gratitude à nos amis proches qui nous ont soutenus moralement et intellectuellement tout au long de notre parcours.

Dédicaces

On dédie ce travail en signe de respect, de reconnaissance et de gratitude.

À nos chers parents.

À nos chers frères et sœurs.

A toute la famille et nos chers amis.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	v
Introduction générale	1
Chapitre 1: Les réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11	3
1 Introduction	3
2 les réseaux sans fils	3
2.1 Définition	3
2.1.1 Transmission par les ondes infrarouges	3
2.1.2 Transmission par les ondes radio	4
2.2 Les principales catégories des réseaux sans fil	4
2.2.1 Réseau Personnel sans fil - WPAN (Wireless Personal Area Network) . .	4
2.2.2 Réseau Local sans fil - WLAN (Wireless Local Area Network):	4
2.2.3 Réseau Métropolitain sans fil - WMAN (Wireless Metropolitan Area Net- work)	5
2.2.4 Réseau étendu sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network)	5
2.2.5 Réseau Régional sans fil WRAN (Wireless Regional Area Network) . . .	6
3 Le standard IEEE 802.11	6
3.1 Définition	6
3.2 Les générations du standard 802.11	7
3.2.1 Wi-Fi 1 (802.11b)	7
3.2.2 Wi-Fi 2 (802.11a)	7
3.2.3 Wi-Fi 3 (802.11g)	7
3.2.4 802.11e(QoS)	7
3.2.5 Wi-Fi 4 (802.11n)	8
3.2.6 Wi-Fi 5 (802.11ac)	8
3.2.7 Wi-Fi 6 (802.11ax)	8
3.2.8 Wi-Fi 7 (802.11be)	8
4 Conclusion	9
Chapitre 2: La norme IEEE 802.11ax et OFDMA	10
1 Introduction	10
2 Transmissions Multi-Utilisateur	10
2.1 MU-MIMO	10
2.1.1 DL-MIMO	11
2.1.2 UL-MIMO	11
2.2 OFDMA	12
2.2.1 DL-OFDMA	12
2.2.2 UL-OFDMA	13

2.2.3	Les RUs	14
2.2.4	Les Modes d'accès aux ressources unités	16
3	Autres techniques utilisées par la 802.11ax	17
3.1	Full Duplex	17
3.2	La réutilisation spatiale	17
3.3	Target Wake-up Time (TWT)	18
4	Synthèses sur les travaux OFDMA	19
5	Probmématique	25
6	Conclusion	25
Chapitre 3: Proposition et évaluation des performances		26
1	Introduction	26
2	Proposition	26
2.1	Proposition 1	26
2.2	Proposition 2	28
3	Paramètres de simulation	29
4	Résultat de simulation	29
4.1	Proposition 1	30
4.1.1	Le taux d'allocation DL	30
4.1.2	Le débit DL	30
4.1.3	Le taux d'allocation UL	31
4.1.4	Le débit UL	32
4.1.5	Le Overhead	32
4.2	Proposition 2	33
4.2.1	Le taux de collision	33
4.2.2	Le taux de service UL	33
4.2.3	Le débit UL	34
5	Conclusion	35
Conclusion générale		36

Table des figures

1	Les ondes électromagnétiques	4
2	Classification des réseaux sans fil [1]	6
3	DownLink et UpLink	11
4	Downlink-OFDMA	13
5	Uplink-OFDMA	14
6	Transmissions OFDM au fur et a mesure du temps	14
7	Positions des RUs dans un canal de 20 MHz Avec OFDMA	15
8	Transmissions OFDMA au fur et a mesure du temps	16
9	Le full, simple et le half duplex	17
10	Principe du BSS color	18
11	Target Wake-up Time (TWT)	19
12	Protocole H-MAC	19
13	Transmission UL par le Protocole HiTRAS	20
14	Protocole EA-RUs	22
15	Le protocole DRA-OFDMA	23
16	Les trames de contrôle du protocole H-MAC	27
17	Schéma de la première proposition	28
18	Schéma de la deuxième proposition	28
19	Le taux d'allocation DL	30
20	Le débit DL	31
21	Le taux d'allocation UL	31
22	Le débit UL	32
23	Le Overhead	32
24	Le taux de collision	33
25	Le taux de service UL	34
26	Le débit UL	34

Liste des tableaux

1	Les générations du standard IEEE 802.11	9
2	Schéma d'allocation HiTRAS	21
3	Modulation and Coding Schemes	21
4	Schémas d'allocation du protocole EA-RUs	21
5	Schémas d'allocation du protocole NS3	22
6	Caractéristiques des protocoles OFDMA traités	24
7	Schéma d'allocation des RUs	27
8	Paramètres de simulation	29

Liste des abréviations

HEW High-Efficiency WLAN

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

WiFi Wireless Fidelity

WPAN Wireless Personal Area Network

WLAN Wireless Local Area Network

WMAN Wireless Metropolitan Area Network

WWAN Wireless Wide Area Network

WECA Wireless Ethernet Compatibility Alliance

WiMax Worldwide Interoperability for Microwave Access

CPU Central Processing Unit

UWB Ultra Wide Band

VoIP Voice over Internet Protocol

BPSK Binary Phase-Shift Keying

GPRS General Packet Radio Service

GSM Global System for Mobile Communication

VHF Very High Frequency

UHF Ultra High Frequency

ISM Industrial Scientific Medical

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

U-NII Unlicensed - National Information Infrastructure

ACK Acknowledgement

AIFS Arbitrary Inter-frame space

SJF Short Job First

AP Access Point

TG Trigger Frame

DL Down Link

UL Up Link

MAC Medium Access Control

MIMO Multiple Input Multiple Output

TWT Target Wake-up Time

MU Multi Users

MU-MIMO Multi-User Multiple Input Multiple Output

SU-MIMO Single User- MIMO

NAV Network Allocation Vector

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PPDU Physical Protocol Data Unit

MPDU MAC Protocol Data Unit

BSR Buffer Status Report

BSRP Buffer Status Report Poll

BSS Basic Service Set

OBSS Overlapping BSS

RF Radio Frequency

RTS Request To Send

CTS Clear To Send

HMAC Hybrid Medium Access Control

HiTRAS High Throughput Resource Unit Assignment Scheme

EA-RUs Efficient Allocation of Resource Units

DRA-OFDMA Double Random Access Based QoS Oriented OFDMA

QAM Quadrature Amplitude Modulation

QoS Quality of Service

STA STAtion

QPSK Quadrature Phase-Shift Keying

RA Random Access

SA Scheduling Access

RMD Request-to-Multiple-DL

CRU Clear-to-receive-with-UL-Request

RU Resource Unit

RMU Request-to-Multiple-UL

Introduction générale

Les réseaux sans fil ont révolutionné notre façon de communiquer et d'interagir avec les appareils ; Ils offrent une connectivité mobile pratique, permettant aux utilisateurs d'accéder à Internet et de partager des données sans avoir besoin de câbles. Cependant, ils nécessitent également une attention particulière en matière de sécurité et de performances pour assurer une expérience utilisateur optimale.

Les réseaux locaux sans fil, également connus sous le nom de WLAN (Wireless Local Area Networks) ou WiFi (Wireless Fidelity), qu'ils utilisent des ondes radio pour transmettre des données entre les appareils. Ils offrent une flexibilité et une mobilité inégalées, permettant aux utilisateurs de se connecter à Internet ou à d'autres appareils à partir de n'importe quel endroit dans la zone de couverture du réseau.

Ces réseaux sont largement utilisés dans divers domaines, tels que les foyers, les bureaux, les établissements d'enseignement, les espaces publics, les entreprises et même les véhicules. Ils offrent une connectivité pratique et facilitent le partage de ressources, tels que les fichiers audio et vidéo et autres type de données, entre les appareils connectés.

Les réseaux sans fil utilisent des normes et des protocoles de communication pour garantir une transmission de données fiable et sécurisée. IEEE 802.11 est le standard développé par "Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)", ce dernier est le plus couramment utilisé, il définit les caractéristiques techniques des réseaux locaux sans fil(WLAN), telles que la vitesse de transmission des données, la zone de couverture du réseau et les fréquences utilisées...

Cependant, les réseaux sans fil présentent également des défis et des limitations. Par exemple, la portée du réseau peut être limitée, en particulier dans les environnements où des obstacles physiques ou des interférences électromagnétiques sont présents. De plus, la sécurité des réseaux sans fil est une préoccupation majeure, car les transmissions par ondes radio peuvent être interceptées par des personnes non autorisées ou malicieuses.

Malgré ces défis, les WLANs continuent de se développer et d'évoluer. De nouvelles technologies et normes, telles que la Wi-Fi 6 (802.11ax) qui offre des améliorations significatives par rapport à ses prédécesseurs. Elle a été développée pour répondre aux besoins croissants de connectivité dans les environnements à haute densité, tels que les zones urbaines denses. L'objectif principal de la norme 802.11ax est d'augmenter considérablement la capacité et l'efficacité du WLAN, tout en offrant des performances supérieures aux utilisateurs finaux. Elle utilise une combinaison de techniques pour atteindre cet objectif, y compris l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), le MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) et la modulation 1024-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)...

La norme 802.11ax, aussi appelée HEW (High Efficiency WLAN) offre une connectivité sans fil plus rapide, plus fiable et plus efficace dans les environnements à haute densité. Elle est conçue pour répondre aux exigences croissantes des utilisateurs en matière de bande passante et de performance, en offrant une meilleure expérience globale du réseau sans fil.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons en général les réseaux sans fil, avec un focus sur le réseau Wifi ou le standard IEEE 802.11 dédié à ce dernier, ainsi que des exemples de son architecture et de son fonctionnement. Ensuite, nous définissons les diffères normes du standard IEEE 802.11 aux court des années afin d'améliorer les performances du réseau.
- Le deuxième chapitre sera consacré à une présentation des principales technologies utilisées dans la nouvelle norme IEEE 802.11ax, suivie d'une synthèse sur les travaux de recherche basés sur la technologie OFDMA, et une problématique qui résume les inconvénients majeurs de ces derniers.
- Dans le troisième et le dernier chapitre, une méthode d'accès est proposée qui se base sur l'un des protocoles déjà mentionné précédemment qui lui porte des améliorations qui optimisent le débit et le temps de transmission ainsi qu'une utilisation efficace du canal de transmission, suivie par des résultats de simulation.

Finalement, ce travail sera accompli par une conclusion générale, suivie de quelques perspectives.

Les réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11

1 Introduction

Les réseaux sans fil sont devenus essentiels dans de nombreux environnements, offrant une grande flexibilité et une grande portabilité pour les utilisateurs c'est un réseau informatique qui permet aux périphériques de communiquer entre eux sans utiliser de liaisons physiques comme les câbles. Ces réseaux sont couramment utilisés pour connecter des ordinateurs, des smartphones, des tablettes et d'autres appareils mobiles à Internet ou à d'autres réseaux. Avec la norme IEEE 802.11 qui est un ensemble de spécifications techniques pour les réseaux sans fil locaux (WLAN) développée par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Cette norme définit les méthodes de transmission de données, les fréquences de fonctionnement, les protocoles de sécurité et d'autres aspects importants pour assurer la compatibilité entre les équipements de différents fabricants. Les réseaux sans fil sont devenus plus performants et plus sécurisés, permettant une connectivité sans fil fiable pour un large éventail d'applications. Au cours de ce chapitre ; En premier, nous allons présenter les réseaux sans fil et ses principales catégories. Ensuite, on parlera sur la norme IEEE 802.11 et ses générations. Enfin, on termine ce chapitre avec une conclusion

2 les réseaux sans fils

2.1 Définition

Un réseau sans fil est un réseau qui permet de connecter différents nœuds (ordinateurs et d'autres appareils informatique) sans l'aide d'une connexion physique (sans câblage) mais qui établit la communication par des ondes électromagnétiques (infrarouge ou radio). La transmission et la réception des données ont besoin de dispositifs agissant comme des ports. Grâce au réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de se déplacer dans un périmètre géographique plus aux moins étendu sans être déconnecté dans le réseau. C'est pour ça qu'on entend souvent le terme de "mobilité" Ce qui représente plus de confort et fait économiser de l'argent au niveau des infrastructures. En revanche, ce genre de réseaux a généralement moins de sécurité car, sans protection efficace, l'introduction d'intrus est probable [2].

Dans les réseaux sans fil il existe principalement deux mode de transmission :

2.1.1 Transmission par les ondes infrarouges

La technologie de transmission infrarouge fait référence à l'énergie dans la région du spectre de rayonnement électromagnétique à une longueur d'onde plus longue que celle de la lumière visible mais plus courte que celle des ondes radio (des fréquences de 3000 GHz à 400 THz d'où la longueurs d'onde de 1 mm à 770 nm). La technologie infrarouge permet aux appareils informatiques de communiquer via des signaux sans fil à courte portée sans aucun obstacle entre l'émetteur et le récepteur (car la transmission est directionnel).(Figure-1)

2.1.2 Transmission par les ondes radio

Les ondes radioélectriques ou ondes hertziennes sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence est par convention inférieure à 3 000 GHz, se propageant dans l'espace sans guide artificiel. Elles sont comprises entre 9 kHz et 3 000 GHz qui correspond à des longueurs d'onde de 33 km à 0,1 mm. Les ondes de fréquence inférieure à 9 kHz sont cependant des ondes radio, mais ne sont pas réglementées. Les ondes radios ont l'avantage de ne pas être arrêtés par les obstacles car elles sont émises d'une manière omnidirectionnelle. (Figure 1)

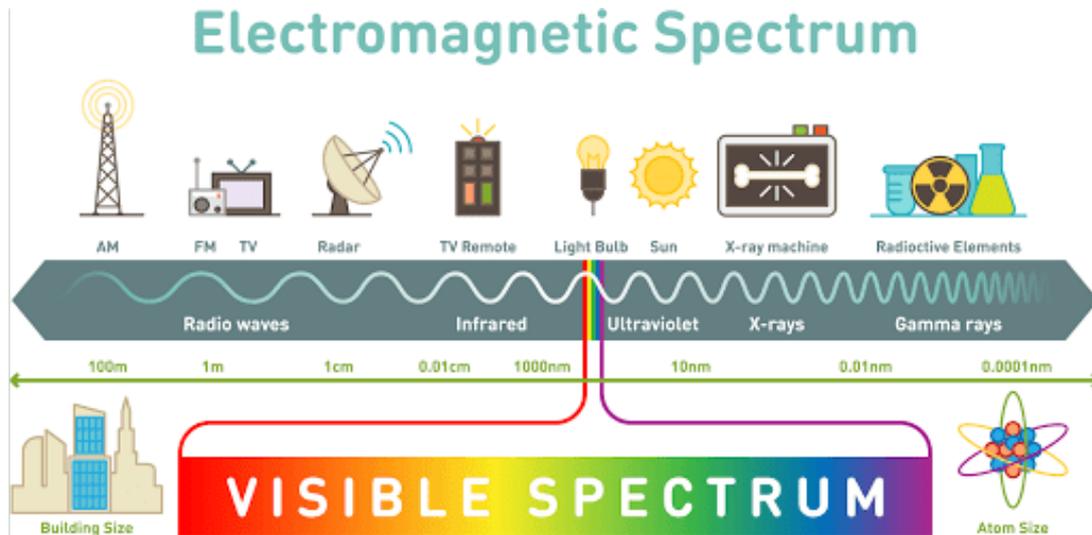


Figure 1: Les ondes électromagnétiques

2.2 Les principales catégories des réseaux sans fil

2.2.1 Réseau Personnel sans fil - WPAN (Wireless Personal Area Network)

Ce sont des réseaux avec d'une portée d'une dizaine de mètres, ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques...) appartenant à un même utilisateur et distants de quelques mètres. Ils existent plusieurs technologies utilisées pour les WPAN :

- La technologie Bluetooth, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1 Mbps pour une portée maximale d'une trentaine de mètres.
- La technologie ZigBee, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.4, permet d'obtenir des liaisons sans fil à très bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégré dans de petits appareils électroniques (appareils électroménagers, jouets, ...).
- L'UWB (Ultra-Wide Band), connue sous le nom IEEE 802.15.3, a pour objectif de réaliser un environnement sans fil à très haut débit pour un réseau personnel. Il est utilisé en particulier pour la mise en œuvre d'un port similaire à un USB sans fil en offrant des débits de 480Mbit/s [3].

2.2.2 Réseau Local sans fil - WLAN (Wireless Local Area Network):

Ce sont des réseaux avec une portée d'une centaine de mètres. IL existe plusieurs technologies concurrentes, la principale norme est IEEE 802.11/Wi-Fi.

Le Wi-Fi (ou IEEE 802.11), soutenu par l'alliance WECA (Wireless Ethernet Compatibility

Alliance) offre des débits allant jusqu'à 600Mbps sur une distance de plusieurs centaines de mètres. Il permet aux ordinateurs portables, équipements de bureau et les équipements personnels (PDA)... en créant un réseau sans fil couvrant un rayon de dizaines de mètres d'accéder au grand réseau internet [4].

- Le standard IEEE 802.11 sera détaillé prochainement.

2.2.3 Réseau Métropolitain sans fil - WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)

Ce sont des réseaux avec une portée de 2 à 50 kilomètres, l'envergure d'une ville. Cette technologie est destinée principalement aux opérateurs de télécommunication. Les principales normes sont IEEE802.16/WiMax et IEEE 802.20/MBWA [5].

- IEEE 802.16/WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) est avant tout une famille de normes, définissant les connexions à haut débit par voie hertzienne. WiMax est également un nom commercial pour ces normes, comme l'est WiFi pour 802.11. Par rapport au modèle OSI 802.16 se focalise comme tous les standards IEEE sur les couches 1 et 2, et décrit des technologies hertziennes destinées principalement à des architectures point-multipoint : à partir d'une antenne centrale, plusieurs répéteurs propagent les signaux vers des terminaux pour leur donner un accès. Les réseaux basés sur la technologie IEEE 802.16 ont une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. L'objectif du WIMAX est de fournir une connexion internet haut débit sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres de rayon. Dans la théorie, le WIMAX permet d'obtenir dans la bande des fréquences radio de 2 à 11 GHz des débits montants et descendants de 70 Mbit/s sur une portée de 50 kilomètres.
- IEEE 802.20/MBWA est un standard en cours de développement permettant plus de mobilité que le WiMax et plus de débit que l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Cette technologie utilise des fréquences inférieures à 3,5 GHz avec une cellule d'un rayon de 2,5Km et peut offrir 1 Mbits/s par utilisateur. Des versions utilisant un canal plus large de 5 MHz pourraient permettre des débits de 4 Mbit/s en descente et 1,2 Mbit/s en montée pour chaque utilisateur. Le MBWA autorise des déplacements pouvant aller jusqu'à 250km/h avec un débit d'1Mbit/s.

2.2.4 Réseau étendu sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network)

Wireless Wide Area Network ou WWAN est un réseau sans fil étendu qui couvre une large zone géographique. Avec ce type de réseau sans fil, une technologie spéciale est nécessaire, plus précisément un réseau cellulaire, pour pouvoir fournir un service de télécommunications efficacement. Ces services comprennent l'accès Internet, les appels téléphoniques et le streaming vidéo. Les principales technologies sont les suivantes :

- GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile)
- GPRS (General Packet Radio Service)
- UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)

Le réseau WWAN dispose d'un protocole de cryptage et d'authentification pour avoir des communications plus sécurisées, mais ils n'atteignent pas toujours leur objectif. En effet, les réseaux sans fil sont plus vulnérables que les réseaux filaires [6].

2.2.5 Réseau Régional sans fil WRAN (Wireless Regional Area Network)

Le WRAN, appelés aussi "super Wifi". Ce sont des réseaux sans fil à haut débit couvrant une large zone géographique. Ils sont conçus et mis en place, en particulier pour les zones rurales, les pays en développement, les lieux à faible densité de population. La principale norme est IEEE 802.22. IEEE 802.22 est un groupe de standards contenant des spécifications pour la mise en œuvre des réseaux régionaux sans fil. Il a été mis au point par le groupe de travail 22 du comité de normalisation LAN/MAN de l'IEEE 802. Cette norme a été élaborée pour offrir un accès à large bande à de vastes régions n'importe où au monde ainsi que des communications rapides, fiables et sécurisées à des collectivités ayant des services insuffisants ou inexistantes. La norme IEEE 802.22 vise à créer des réseaux sans fil dont la zone de couverture est comprise entre 40 et 100 km, en utilisant la bande de fréquence VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency) entre 54 et 862 MHz (fréquence de télévision). Pour éviter des interférences avec les canaux utilisés par la télévision, il utilise seulement les fréquences qui ne sont pas attribuées aux chaînes de télévision. 802.22 utilise un canal de 6, 7 ou 8 MHz et peut avoir un débit de 18 Mbit/s pour un canal de 6 MHz [7].

- La figure suivante résume chacune des classes réseaux sans fil décrit en-dessus en terme de portée et des technologies utilisées.

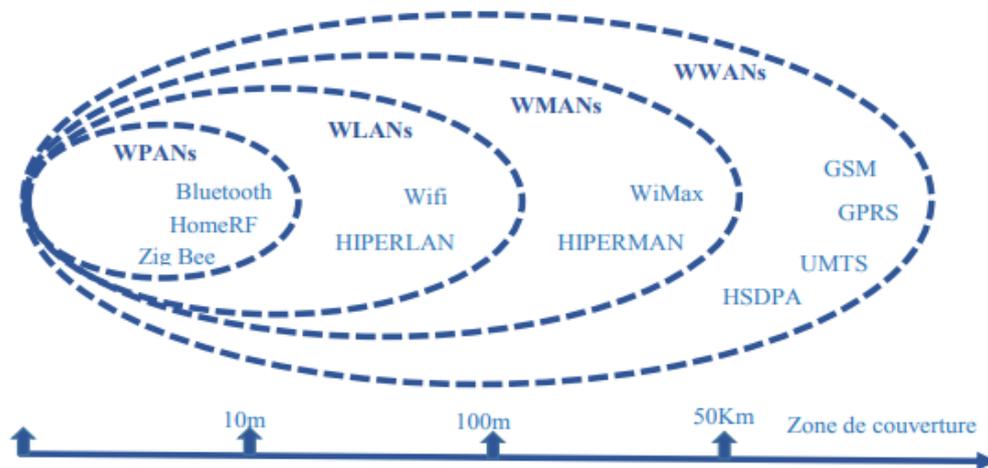


Figure 2: Classification des réseaux sans fil [1]

3 Le standard IEEE 802.11

3.1 Définition

En 1980, l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE) a créé le comité 802, chargé d'élaborer des normes techniques pour les différentes technologies réseau. Cependant, comme le terme IEEE 802.11-1997 n'était pas très identifiable et reconnaissable, un cabinet de conseil a été engagé pour créer une marque plus accrocheuse. Et une étoile était née. La norme IEEE 802.11-1997(Legacy) a été appelée Wi-Fi. Depuis, le comité IEEE 802 a publié plusieurs amendements à la norme IEEE 802.11-1997.

IEEE 802.11 est la définition d'un ensemble de normes concernant les réseaux sans fil locaux (le Wi-Fi). Il a été mis au point par le groupe de travail 11 du comité de normalisation LAN/MAN de l'IEEE (IEEE 802) Le terme IEEE 802.11 est également utilisé pour désigner la norme d'origine 802.11, et qui est parfois appelée 802.11 legacy mode (legacy mode en anglais signifie dans ce contexte : mode historique ou antérieur) [8].

3.2 Les générations du standard 802.11

Le standard 802.11 a passé de plusieurs générations comme suit : [9]

3.2.1 Wi-Fi 1 (802.11b)

L'amendement 802.11b était l'amendement Wi-Fi la plus répandue en base installée au début des années 2000. Elle propose un débit théorique crête de 11 Mbit/s (6 Mbit/s réels) avec une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres (en théorie) dans un environnement dégagé.

La plage de fréquences utilisée est la bande des 2,4 GHz (bande ISM = Industrial Scientific Medical) avec, en France, 13 créneau radio disponibles dont 3 au maximum non superposés (1 - 6 - 11, 2 - 7 - 12...). La modulation utilisable est au choix : CCK, DBPSK ou QPSK.

3.2.2 Wi-Fi 2 (802.11a)

L'amendement 802.11a est publiée en 1999 ; elle permet d'obtenir un haut débit (dans un rayon d'environ 10 mètres : 54 Mbit/s théoriques, 27 Mbit/s réels) dans la bande de fréquence radio SHF des 5 GHz (bande U-NII = Unlicensed - National Information Infrastructure). L'amendement 802.11a spécifie 8 canaux de 20 MHz, non superposés, occupant la bande de 5,150 à 5,350 GHz ; chaque canal est subdivisé en 52 sous-porteuse (codage OFDM). La modulation utilisable est adaptive, en fonction des conditions radio : 16QAM, 64QAM, QPSK ou BPSK.

3.2.3 Wi-Fi 3 (802.11g)

L'amendement 802.11g, publiée en 2003, offre un débit plus élevé (54 Mbit/s théoriques, 25 Mbit/s réels) dans la bande de fréquence des 2,4 GHz. L'amendement 802.11g offre une compatibilité ascendante avec l'amendement 802.11b. Cette aptitude permet aux équipements de proposer le 802.11g tout en restant compatibles avec les réseaux existants 802.11b. Le principe est le même que celui de l'amendement 802.11a (bande des 5 GHz), mais en utilisant 13 canaux composés chacun de 48 sous-porteuses radio et partiellement superposés, dans la bande de fréquences des 2,4 GHz. Le 802.11g utilise un codage OFDM autorisant de plus hauts débits ; chaque sous-porteuse utilise les modulations classiques BPSK, QPSK ou QAM comme dans l'amendement 802.11a.

Le codage OFDM étant interne à chacun des treize canaux de 22MHz possibles (quatorze au Japon), il est donc possible d'utiliser au maximum, à plein débit, trois de ces canaux non superposés (1 - 6 - 11, 2 - 7 - 12 ... etc.).

3.2.4 802.11e(QoS)

802.11e est un amendement aux normes 802.11, publiée en 2005, qui définit un ensemble de qualité de service (QoS) pour les applications LAN sans fil via des modifications de la couche de contrôle d'accès au support. Il fournit également des services essentiels pour les applications sensibles aux retards, telles que le streaming vidéo et la voix sur protocole Internet (VoIP). Il correspond à la certification Wi-Fi multimédia de la Wi-Fi Alliance.

802.11e offre aux abonnés un accès Internet haut débit avec VoIP, vidéo en plein écran et audio de haute qualité. Les réseaux utilisant 802.11e fonctionnent à des fréquences radio comprises entre 2,4 GHz et 2,4835 GHz ou entre 5,75 GHz et 5,850 GHz. Ces plages de fréquences plus élevées présentent des avantages tels que plus de canaux, des vitesses de transfert de données rapides et moins de risques d'interférences.

3.2.5 Wi-Fi 4 (802.11n)

Ajoute le MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) et l'agrégation de porteuse qui augmentent le débit. Des équipements propriétaires, qualifiés de "pré-N" étaient disponibles depuis 2006. Le 802.11n a été conçu pour pouvoir utiliser les bandes de fréquences de 2,4 GHz et/ou 5 GHz. Les premiers adaptateurs 802.11n disponibles étaient souvent simple-bande à 2,4 GHz, mais des adaptateurs double-bande (2,4 GHz ou 5 GHz, au choix) ou double-radio (2,4 GHz et 5 GHz simultanément) sont également disponibles. Le 802.11n sait combiner jusqu'à deux canaux de 20 MHz non superposés, ce qui permet, en théorie d'atteindre une capacité totale théorique de 600 Mbit/s dans la bande des 5 GHz.

3.2.6 Wi-Fi 5 (802.11ac)

Est l'avant dernière évolution " grand public " du standard de transmission sans fil 802.11. Elle permet une connexion Wi-Fi haut débit dans une bande de fréquences inférieure à 6 GHz (communément appelée " bande des 5 GHz "). Le 802.11ac offre jusqu'à 1 300 Mbit/s de débit théorique, en utilisant des canaux de 80 MHz, soit jusqu'à 7 Gbit/s de débit global dans la bande des 5 GHz (de 5 170 MHz à 5 835 MHz). Cet amendement a été ratifié en janvier 2014.

3.2.7 Wi-Fi 6 (802.11ax)

Aussi appelés HEW (High-Efficiency WLAN) est la dernière évolution du standard sans fil 802.11 utilisée. Elle permet une connexion Wi-Fi haut débit dans les bandes de fréquences 2,4GHz et 5 GHz. Le 802.11ax offre jusqu'à 1,1 Gbit/s de débit théorique, en utilisant des canaux de 20 MHz, soit jusqu'à 10,5 Gbit/s pour un canal de 160MHz. Cet amendement a été ratifié en janvier 2019 [3].

- La norme IEEE 802.11ax sera détaillée prochainement dans le deuxième chapitre.

3.2.8 Wi-Fi 7 (802.11be)

est l'un des prochains amendements prévus de la norme IEEE 802.11, et sera probablement désigné sous le nom Wi-Fi 7. Il s'appuie sur la norme 802.11ax, en se concentrant sur le fonctionnement WLAN en intérieur et en extérieur, avec des vitesses plus élevées, en mode stationnaires et mode piéton, en utilisant les bandes de fréquences 2,4, 5 et 6 GHz .

Le développement de l'amendement 802.11be est en cours, avec pour objectif un projet initial en mars 2021 et une version finale de la norme attendue pour mars 2024.

- La (Table 1) suivante résume les caractéristiques des différentes générations du standard IEEE 802.11.

Generation	IEEE Standard	Maximum Linkrate(Mbit/s)	Adopted	Radio frequency (GHz)	Modulation	Frequency multiplexing
Wi-Fi 7	802.11be	1376 – 46120	(2024)	2,4/5/6	4096-QAM	
Wi-Fi 6	802.11ax	574 – 9608	2019	2,4/5	1024-QAM	OFDMA
Wi-Fi 5	802.11ac	433 – 6933	2014	5	256-QAM	OFDM
Wi-Fi 4	802.11n	72 – 600	2008	2,4/5	16-QAM, 64-QAM	OFDM
Wi-Fi 3	802.11g	6 – 54	2003	2,4	BPSK, QPSK ou QAM	
Wi-Fi 2	802.11a	6 – 54	1999	5	16QAM, 64QAM, QPSK ou BPSK	
Wi-Fi 1	802.11b	1 – 11	1999	2,4	CCK DBPSK, QPSK	
Wi-Fi 0 (Legacy)	802.11	1 - 2	1997	2,4		

Table 1: Les générations du standard IEEE 802.11

4 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est introduit par les réseaux sans fil, les modes de transmissions existants, leurs différentes catégories, les caractéristiques et les technologies utilisées par chacune de ces dernières.

Ensuite nous avons présenté le standard IEEE 802.11 ou la Wi-Fi. On a cité les différentes générations du standard et leurs caractéristiques en termes de débit, l'année de sortie, la bande de fréquence et les modulations utilisées.

Dans le prochain chapitre nous allons parler de la dernière génération de Wi-Fi appelée High Efficiency WLAN(HEW) ou la norme IEEE 802.11ax, et d'une nouvelle technique utilisée par cette dernière qui permet l'accès multi-utilisateurs dans les réseaux WLAN appelée OFDMA pour "Orthogonal Frequency Division Multiple Access".

La norme IEEE 802.11ax et OFDMA

1 Introduction

La 802.11ax, également connue sous le nom de Wi-Fi 6, est la dernière norme sans fil développée par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Elle vise à améliorer les performances et l'efficacité du Wi-Fi en augmentant la vitesse de transfert de données, la capacité du réseau, la fiabilité et la sécurité. Cette norme utilise des technologies avancées telles que la modulation OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) et le MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) pour offrir des performances supérieures dans les environnements à haute densité de trafic. En résumé, la 802.11ax apporte des améliorations significatives aux performances du Wi-Fi, offrant une expérience de connectivité plus rapide et plus fiable pour les utilisateurs [10].

Dans ce chapitre, nous allons présenter la norme 802.11ax, ses caractéristiques et objectifs et la technique OFDMA ainsi une synthèse sur les travaux de recherche de cette dernière, enfin suivie d'une conclusion.

2 Transmissions Multi-Utilisateur

La transmission multi-utilisateur (multi-user) fait référence à une méthode de communication dans laquelle plusieurs utilisateurs peuvent envoyer et recevoir des informations simultanément sur un même canal de communication. Dans le domaine des réseaux de communication, la transmission multi-utilisateur est souvent utilisée pour permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder à un même canal de communication (comme une connexion Internet à haut débit) sans interférer les uns avec les autres.

2.1 MU-MIMO

La technologie Multi-User Multiple-Input Multiple-Output (MU-MIMO) est une technique de communication sans fil qui permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser simultanément un même canal de communication sans fil, tout en augmentant la capacité et l'efficacité du système.

Traditionnellement, les systèmes de communication sans fil utilisent une technique appelée Single-User Multiple-Input Multiple-Output (SU-MIMO), où chaque utilisateur utilise un canal de communication séparé. Cependant, dans les environnements où il y a de nombreux utilisateurs, cela peut entraîner une congestion du réseau, une baisse de la qualité de service et une augmentation du temps d'attente.

La technologie MU-MIMO résout ce problème en permettant à plusieurs utilisateurs d'utiliser simultanément un même canal de communication sans fil. Elle utilise plusieurs antennes pour envoyer et recevoir des signaux sans fil, ce qui permet à plusieurs utilisateurs d'utiliser le même canal sans fil sans causer d'interférences. MU-MIMO est une avancée majeure dans la technologie sans fil, car elle permet d'améliorer considérablement l'efficacité du réseau sans fil et de fournir une meilleure expérience utilisateur[11].

Il existe deux types principaux de MIMO, à savoir DL-MIMO (Downlink MIMO) et UL-MIMO

(Uplink MIMO), qui se réfèrent respectivement à la transmission de données du point d'accès ou de la station de base vers les terminaux mobiles (Downlink) et de l'envoi de données des terminaux mobiles vers le point d'accès ou la station de base (Uplink) :

2.1.1 DL-MIMO

également appelé MIMO Downlink, permet à une station de base (BS) ou un point d'accès (AP) d'utiliser plusieurs antennes pour transmettre des données à plusieurs terminaux mobiles (UE's) simultanément. Dans un système DL-MIMO, la station de base ou le point d'accès peut diviser les données à transmettre en plusieurs flux de données, puis utiliser plusieurs antennes pour transmettre ces flux à plusieurs terminaux mobiles en même temps. La technologie DL-MIMO est utilisée dans les réseaux sans fil 4G (LTE) et 5G pour améliorer la capacité du réseau et la qualité de la communication. Dans les réseaux LTE, par exemple, la technologie DL-MIMO permet aux stations de base de transmettre des données à plusieurs terminaux mobiles en utilisant jusqu'à quatre antennes en même temps, ce qui augmente la capacité du réseau et améliore la qualité de la communication[11].

2.1.2 UL-MIMO

également appelé MIMO Uplink, permet à plusieurs terminaux mobiles (UE's) d'envoyer des données à une station de base (BS) en utilisant plusieurs antennes. Dans un système UL-MIMO, chaque terminal mobile peut utiliser plusieurs antennes pour envoyer ses données à la station de base, ce qui permet d'améliorer la qualité de la communication et de réduire les interférences. La technologie UL-MIMO est également utilisée dans les réseaux sans fil 4G (LTE) et 5G pour améliorer la qualité et la capacité du réseau. Dans les réseaux LTE, la technologie UL-MIMO permet à plusieurs terminaux mobiles d'envoyer des données à la station de base en même temps, ce qui améliore la qualité de la communication et réduit les temps d'attente pour les utilisateurs[11].

En résumé, DL-MIMO et UL-MIMO sont deux techniques de communication sans fil utilisées pour améliorer la capacité et la qualité du réseau. DL-MIMO permet à une station de base ou un point d'accès d'envoyer des données à plusieurs terminaux mobiles simultanément, tandis que UL-MIMO permet à plusieurs terminaux mobiles d'envoyer des données à une station de base simultanément, en utilisant plusieurs antennes dans les deux cas. Ces technologies sont couramment utilisées dans les réseaux sans fil 4G (LTE) et 5G pour améliorer la capacité et la qualité de la communication. (Figure 4).

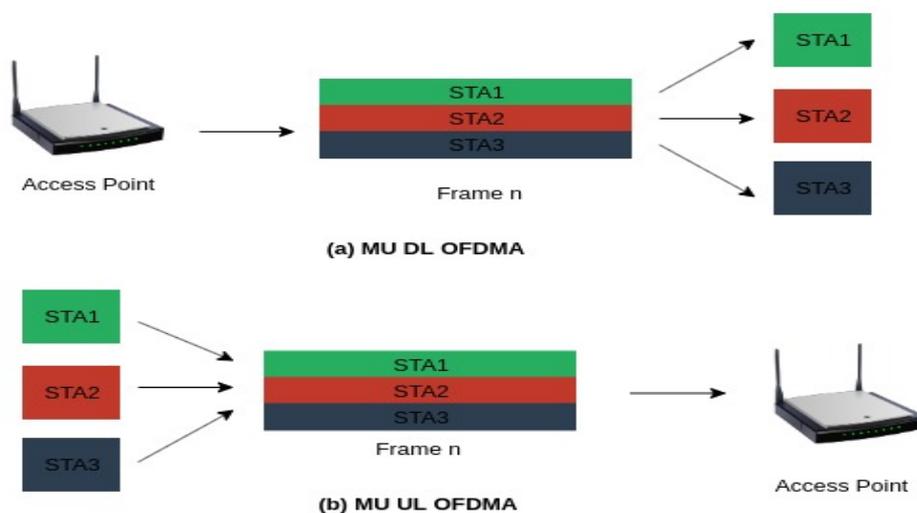


Figure 3: DownLink et UpLink

2.2 OFDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) est une version multi-utilisateurs de la technologie modulation OFDM. Les radios 802.11a/g/n/ac utilisent actuellement l'OFDM pour les transmissions mono-utilisateur sur une fréquence 802.11. OFDMA subdivise un canal en allocation de fréquence plus petites, appelées unités de ressources (RU). En subdivisant le canal, parallèlement les transmissions de petites trames à plusieurs utilisateurs peuvent se produire simultanément. Penser à OFDMA en tant que technologie qui divise un canal en sous-canaux plus petits afin que des transmissions simultanées à plusieurs utilisateurs puissent se produire. Par exemple, un canal de 20 MHz peut être divisé en neuf sous-canaux plus petits. En utilisant l'OFDMA, un point d'accès 802.11ax peut transmettre simultanément de petites trames à neuf clients 802.11ax.

L'OFDMA est une utilisation beaucoup plus efficace du médium pour les petites trames. La transmission simultanée réduit le coût overhead excessifs au niveau de la sous-couche MAC ainsi que les frais généraux de contention au médium. L'objectif de l'OFDMA est une meilleure utilisation de l'espace de fréquences disponible. La technologie OFDMA a été testée dans le temps avec d'autres communications RF (Radio Frequency). Par exemple, OFDMA est utilisé pour les communications cellulaires LTE en liaison descendante.

Pour la rétrocompatibilité, les radios 802.11ax prendront toujours en charge OFDM. Gardez à l'esprit que les trames de gestion et de contrôle 802.11 seront toujours transmises à un débit de données de base en utilisant la technologie OFDM que les radios 802.11a/g/n/ac peuvent comprendre. Par conséquent, la transmission des trames de gestion et de contrôle sera transmise sur toutes les sous-porteuses d'un canal primaire entier de 20 MHz. OFDMA est uniquement pour les échanges de trames de données 802.11 entre les points d'accès et les clients 802.11ax. Il existe deux type de transmission pour l'OFDMA à savoir DL-OFDMA et UL-OFDMA, qui se réfèrent respectivement à la transmission de données du point d'accès ou de la station de base vers les terminaux mobiles (Downlink) et de l'envoi de données des terminaux mobiles vers le point d'accès ou la station de base (Uplink) [12].

2.2.1 DL-OFDMA

Après un AIFS (Arbitrary Inter-frame space) le point d'accès 802.11ax enverra d'abord une trame de demande d'envoi multi-utilisateurs (MU-RTS). La trame MU-RTS est transmise en OFDM (non OFDMA) sur l'ensemble du canal 20 MHz afin que les anciens clients puissent également comprendre le MU-RTS. Les clients hérités doivent rester inactifs pendant que les trames de données OFDMA multi-utilisateurs sont transmises entre le point d'accès 802.11ax et les clients 802.11ax. La trame MU-RTS est également un trigger frame étendue du point d'accès utilisé pour synchroniser les réponses client CTS (clear-to-send) de liaison montante pour un client 802.11ax. Le point d'accès utilise le MU-RTS comme un trigger frame pour allouer des unités de ressources (RU's). Les clients 802.11ax enverront des réponses CTS en parallèle à l'aide de leurs RU's assignées.

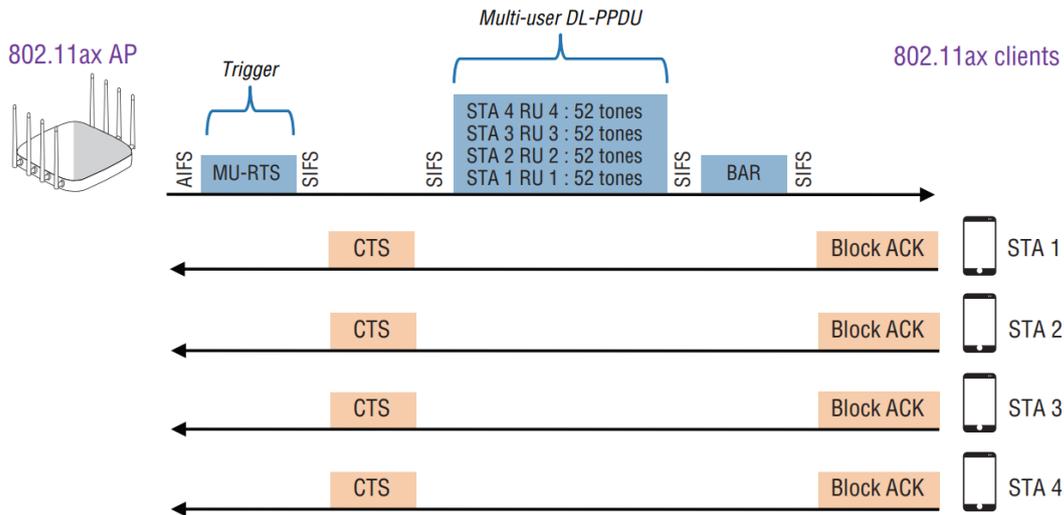


Figure 4: Downlink-OFDMA

Après la réponse CTS parallèle des clients, l'AP commencera le DL-PPDU multi-utilisateur transmissions du point d'accès aux clients compatibles OFDMA. Gardez à l'esprit que le point d'accès a déterminé comment partitionner le canal 20 MHz en plusieurs RU's. Une fois que les clients 802.11ax reçoivent leurs données via leurs RU assignées, ils devront envoyer un Block ACK à l'AP. L'AP enverra une trame de requête Block ACK (BAR) suivie par les clients répondant avec Block ACK en parallèle. En option, un Block ACK automatique peut être envoyé par les clients en parallèle [13].

2.2.2 UL-OFDMA

Contrairement au DL-OFDMA, UL-OFDMA est plus complexe que DL-OFDMA car dans la liaison montante, le trafic doit être transmis simultanément de plusieurs stations au point d'accès, et l'AP agit en tant que coordinateur des opérations et de la transmission, il s'agit aussi d'une transmission basée sur la programmation. Peut nécessiter l'utilisation de jusqu'à trois triggers frames. Chacun est utilisée pour solliciter un type de réponse spécifique de la part des stations. Le processus UL commence par un point d'accès qui s'occupe de l'espace aérien, l'AP envoie d'abord une trame BSRP (buffer status report poll) pour demander aux stations des informations sur leur besoin d'envoyer des données sur la liaison montante (permet d'évaluer quelle allocation RU doit être fait pour répondre aux besoins de chaque station). Les stations répondent ensuite par des BSR (Buffer Status Report). L'AP utilise ces informations pour décider comment allouer au mieux les RU aux stations pour les transmissions de la liaison montante. Une fois que les STA's répondent avec leur BSR, l'AP envoie une trame de demande d'envoi multi-utilisateur (MU-RTS) qui fonctionne comme un deuxième type de trame de déclenchement, l'AP utilise le MU-RTS pour allouer des unités de ressources (RU). Après les STA's envoient des réponses CTS en parallèle en utilisant leurs RU assignées. Une troisième trame de déclenchement de base est nécessaire pour indiquer aux stations de commencer la transmission de leurs données sur la liaison montante avec leurs RU's assignées, chaque STA doit envoyer des données au même moment et également avec la même durée. Cela peut amener certaines stations qui n'ont pas le PPDU de même taille à ajouter un rembourrage à la fin de la trame afin d'assurer qu'il transmet la même durée comme le montre la (figure-2-3), ce rembourrage est identifié et rejeté par le point d'accès. Une fois que les données de la liaison montante sont reçues des stations, l'AP envoie un seul bloc ACK multi-utilisateur aux stations en utilisant le canal complet de 20 MHz [13].

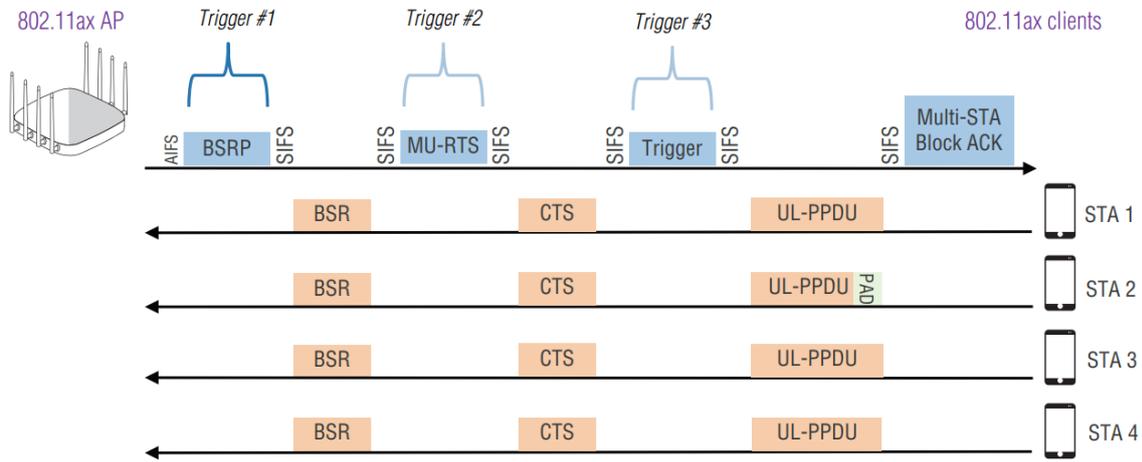


Figure 5: Uplink-OFDMA

Description des trames de déclenchement (trigger frame) utilisées:

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

2.2.3 Les RUs

Lorsqu'un point d'accès 802.11n/ac transmet une liaison descendante vers 802.11n/ac clients sur un canal OFDM, tout l'espace de fréquence du canal est utilisée pour chaque transmission de liaison descendante indépendante. Dans l'exemple ci-après (Figure-2-4), le AP transmet à six clients indépendamment au fil du temps. Les 64 sous-porteuses sont utilisées lorsqu'une radio OFDM transmet sur un canal de 20 MHz. En d'autres termes, la totalité des 20 MHz canal est nécessaire pour la communication en liaison descendante entre le point d'accès et un seul OFDM client. Il en va de même pour toute transmission de liaison ascendante d'un seul client 802.11n/ac vers le point d'accès 802.11n/ac. L'ensemble du canal OFDM 20 MHz est nécessaire pour la transmission du client vers le point d'accès [14].

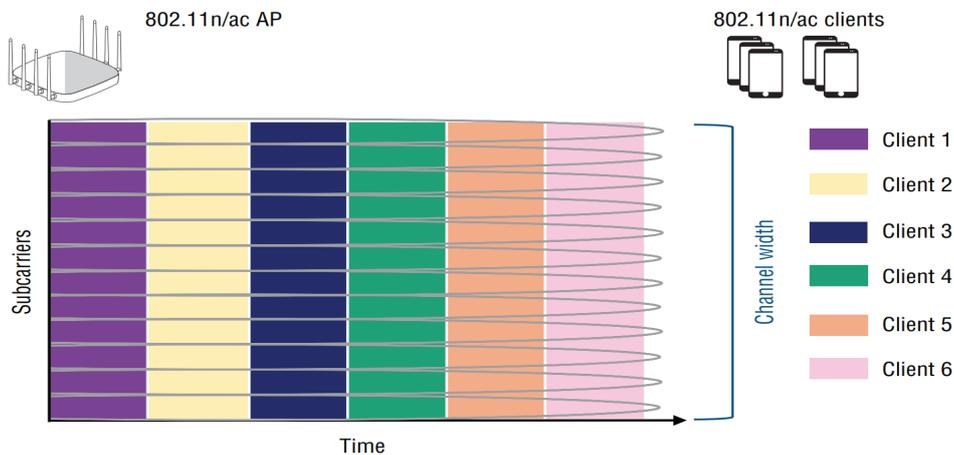


Figure 6: Transmissions OFDM au fur et a mesure du temps

La (figure 8) présente le positionnement des RUs dans la bande passante de 20 MHz, un canal OFDMA de 20 MHz se compose d'un total de 256 sous-porteuses, ces sous-porteuses ou tonalités sont regroupées dans des sous-canaux plus petits connus sous le nom d'unités de ressources (RU) avec une taille minimale de 26 pouvant accueillir jusqu'à 9 utilisateurs pour chaque bande passante de 20 MHz, par exemple lors de la subdivision d'un canal de 20 MHz, un point d'accès désigne 26,52,106 ou toutes les 242 unités de ressource de sous-porteuse, ce qui équivaut à environ 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz et les canaux de 20 MHz respectivement. Un point d'accès dicte comment de nombreux RU son utilisés dans un canal de 20 MHz et différentes combinaisons peuvent être utilisées et différentes tailles peuvent être attribuées à chaque client en fonction de ses besoins en bande passante [14].

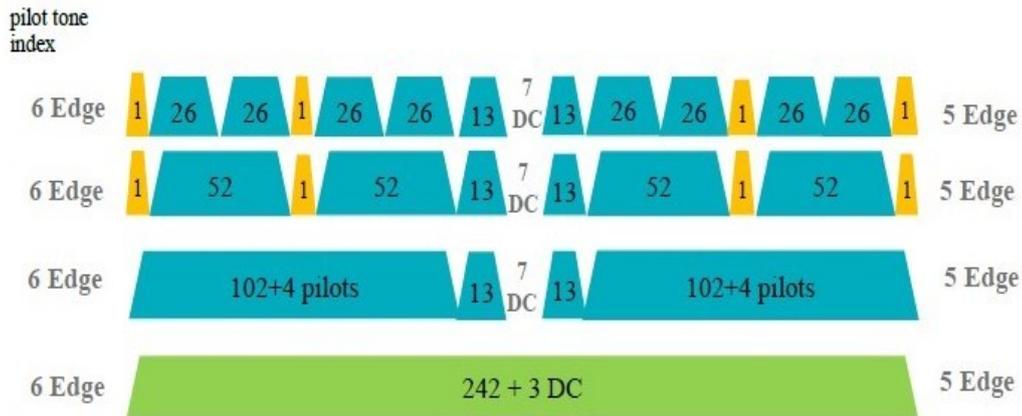


Figure 7: Positions des RUs dans un canal de 20 MHz Avec OFDMA

le point d'accès 802.11ax transmet d'abord simultanément liaison descendante vers les clients 802.11ax 1 et 2. Le canal OFDMA 20 MHz est effectivement partitionné en deux sous-canaux. Rappelez-vous qu'un canal ODFMA 20 MHz a un total de 256 sous-porteuses ; cependant, le point d'accès a transmis simultanément aux clients 1 et 2 en utilisant deux unités de ressources différentes de 106 tonalités. Dans la deuxième transmission, le point d'accès transmet simultanément la liaison descendante aux clients 3, 4, 5 et 6. Dans ce cas, le canal ODFMA avait être partitionné en quatre sous-canaux distincts de 52 tons. Dans la troisième transmission, le AP utilise une seule unité de ressource de 242 tonalités pour transmettre la liaison descendante à un seul client (5). En utilisant une seule unité de ressource de 242 tonalités utilise efficacement l'intégralité du canal de 20 MHz. Dans la quatrième transmission, le point d'accès transmet simultanément la liaison descendante aux clients 4 et 6 en utilisant deux unités de ressources de 106 tons. Dans la cinquième transmission, le point d'accès transmet à nouveau une seule liaison descendante vers un seul client, avec une seule RU de 242 tonalités utilisant tout le canal de 20 MHz. Dans la sixième transmission, le point d'accès transmet simultanément la liaison descendante aux clients 3, 4 et 6. Dans ce cas, le canal 20 MHz est divisé en trois sous-canaux ; deux RU de 52 tonalités sont utilisées pour les clients 3 et 4, et une RU de 106 tonalités est utilisée pour le client 6 [14].

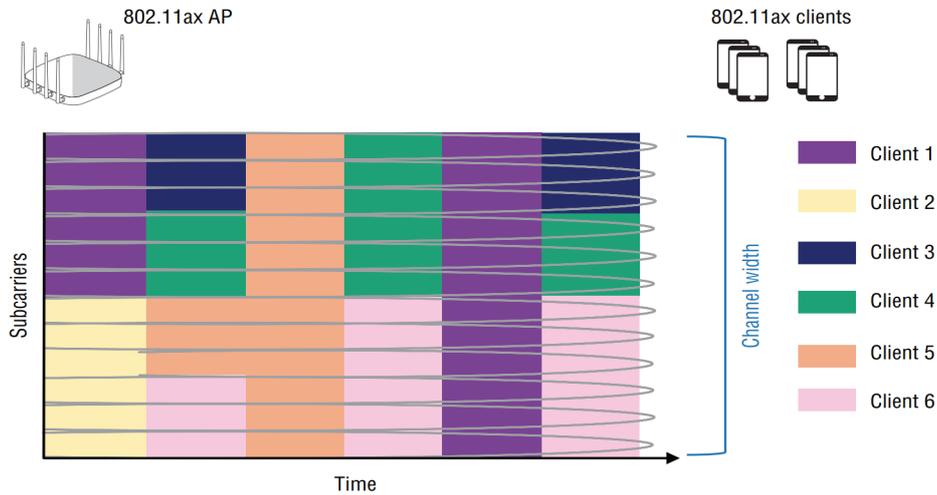


Figure 8: Transmissions OFDMA au fur et a mesure du temps

2.2.4 Les Modes d'accès aux ressources unités

Il existe principalement deux mode d'accès pour obtenir des RUs :

Random Access : L'accès aléatoire dans l'allocation d'unité de ressource fait référence à la possibilité d'accéder à n'importe quelle unité de ressource dans un pool de ressources donné sans avoir à suivre un ordre ou une séquence spécifique. Cela signifie qu'un utilisateur peut accéder à n'importe quelle unité de ressource du pool de manière aléatoire, au fur et à mesure de ses besoins.

Par exemple, dans l'allocation de mémoire informatique, l'accès aléatoire signifie que n'importe quel emplacement de mémoire est accessible directement sans avoir à parcourir tous les emplacements de mémoire qui le précèdent.

L'accès aléatoire est particulièrement utile dans les situations où les ressources sont allouées dynamiquement et l'ordre d'accès ne peut pas être prédéterminé. Il permet une utilisation efficace des ressources et garantit qu'elles sont disponibles pour une utilisation en cas de besoin [15].

Scheduling Access : La planification de l'accès dans l'allocation d'unités de ressources fait référence au processus d'allocation et de gestion des ressources telles que le temps CPU, la mémoire, la bande passante du réseau ou d'autres ressources système à différentes tâches ou processus dans un système en fonction de leurs exigences d'accès.

Par exemple, dans un système d'exploitation informatique, le planificateur attribue du temps CPU à différents processus en fonction de leur priorité, de leur temps d'exécution et d'autres facteurs. De même, dans un réseau, le planificateur alloue la bande passante du réseau à différents utilisateurs ou applications en fonction de leurs exigences d'accès et de leur priorité. L'algorithme de planification utilisé pour l'allocation des unités de ressources peut avoir un impact significatif sur les performances du système et l'utilisation des ressources. L'objectif de la planification des accès est de garantir que les ressources sont utilisées efficacement et équitablement entre les différentes tâches ou processus, tout en minimisant le temps de réponse et en maximisant le débit.

Différents algorithmes de planification peuvent être utilisés en fonction des exigences spécifiques du système et des tâches à exécuter. Certains algorithmes de planification courants incluent la planification à tour de rôle, la planification prioritaire et la planification du travail le plus court en premier (SJF) [16].

3 Autres techniques utilisées par la 802.11ax

3.1 Full Duplex

La transmission de données en Full-duplex signifie que les données peuvent être transmises dans les deux sens sur une porteuse de signal en même temps. Par exemple, dans un réseau local doté d'une technologie de transmission Full-duplex, un poste de travail peut envoyer des données sur la ligne tandis qu'un autre poste de travail reçoit des données au même temps. La transmission en Full-duplex implique une ligne bidirectionnelle qui peut déplacer des données dans les deux sens simultanément [17].

Le mode de transmission d'un canal de communication détermine la ou les directions dans lesquelles les données peuvent être envoyées. Les trois modes de transmission sont les suivants:

Full-Duplex : La transmission simultanée des données est activée entre les systèmes connectés. L'exemple le plus connu d'un canal de communication en Full-duplex est la téléphonie, où les deux participants à un appel peuvent envoyer et recevoir de l'audio simultanément.

Half-Duplex : Ces canaux permettent des communications bidirectionnelles, mais les systèmes à chaque extrémité de la connexion doivent envoyer à tour de rôle sur le support de communication. L'exemple le plus courant d'un canal de communication Half-duplex est une connexion radio push-to-talk (appuyer pour parler) de type talkie-walkie où les parties communicantes transmettent à tour de rôle et signalent que leurs transmissions sont terminées avant que l'autre ne puisse transmettre.

Simplex-Duplex : Ces canaux ne transmettent que dans un sens. Des exemples de canaux simplex incluent les claviers câblés, qui transmettent les frappes mais n'acceptent pas les entrées de l'ordinateur auquel ils sont connectés.

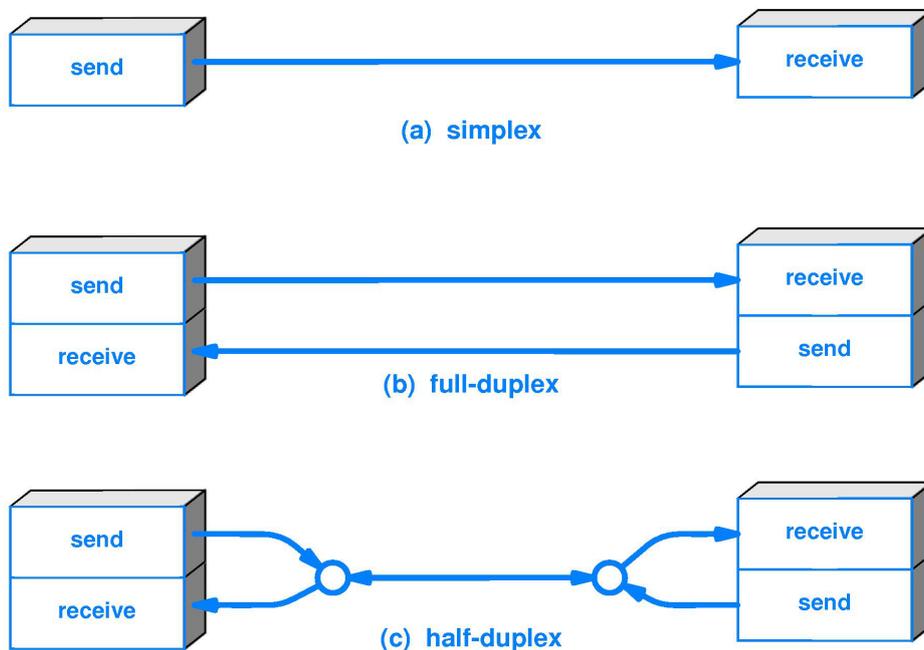


Figure 9: Le full, simple et le half duplex

3.2 La réutilisation spatiale

C'est une nouvelle technique proposée par la norme IEEE 802.11ax pour surmonter l'utilisation excessive de WLAN. Il consiste à allouer le même canal radio ou la même RU à plusieurs

stations. Et pour ce faire on utilise la technique de couleur BSS (Basic Service Set) [18].

BSS Color :

La Wi-Fi 6 est capable de différencier les BSS à l'aide d'un identifiant de couleur BSS lorsque d'autres radios transmettent sur le même canal. La Wi-Fi 6 utilise la coloration BSS pour une meilleure réutilisation spatiale. La coloration BSS permet à un réseau Wi-Fi 6 d'étiqueter les canaux avec des couleurs, comme pour sceller les cadres de différents points d'accès dans des enveloppes de couleurs différentes. Lors de la réception d'une trame dans une telle enveloppe, un récepteur peut déterminer directement si elle provient du même BSS ou d'un BSS différent, sans ouvrir l'enveloppe. Si une trame provient d'un intra-BSS, elle est dans "mon BSS" (MYBSS), s'il provient d'un inter-BSS, il se trouve dans un BSS à chevauchement (OBSS - Overlapping BSS). Si une trame est une trame MYBSS, le récepteur ne prendra pas la peine d'initier une nouvelle transmission, ce qui réduit considérablement les interruptions inutiles pour mieux utiliser les ressources spectrales. La figure suivante montre comment la coloration BSS aide à éliminer les interférences dans les déploiements de points d'accès haute densité. Les AP sur le même canal n'interféreront pas les uns avec les autres tant que leurs canaux sont marqués avec des couleurs différentes, par exemple, un AP sur le canal noir 36 et un AP sur le canal gris 36 peuvent transmettre des données en même temps [19].

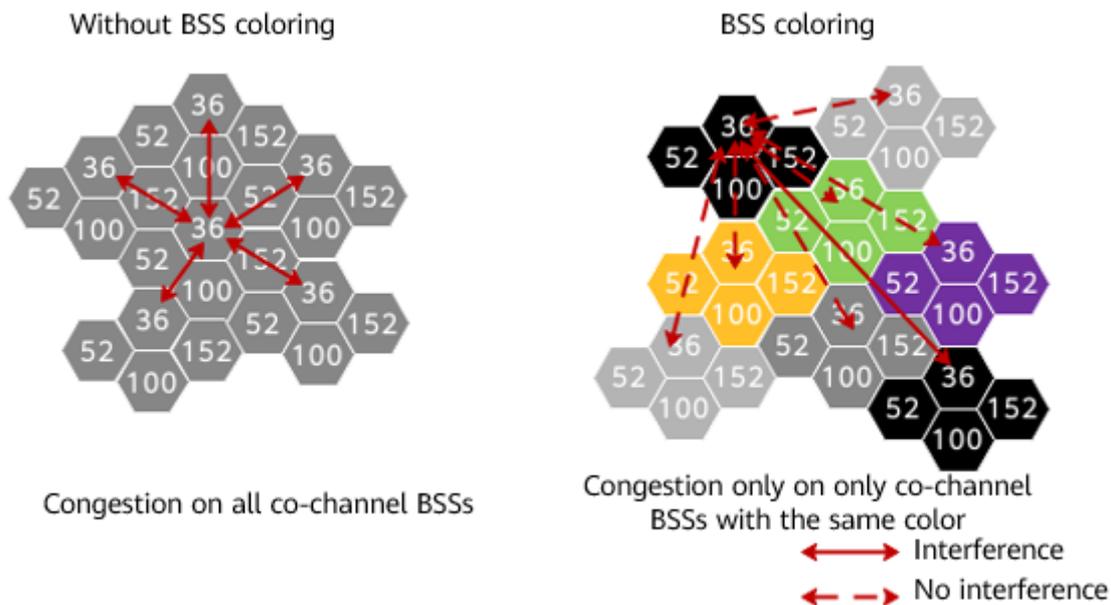


Figure 10: Principe du BSS color

3.3 Target Wake-up Time (TWT)

Le standard 802.11ax offre un nouveau mode d'économie d'énergie, appelé Target Wake-up Time (TWT). Est une autre fonction importante de planification des ressources du la Wi-Fi 6 qui élimine cette relation étroite entre les balises de point d'accès et le temps de veille de l'appareil. Telle que décrite par son nom, permet à l'appareil de négocier et de décider quand se réveiller et recevoir des données, et permet à l'appareil de se réveiller à d'autres segments temporels de la période de transmission de la balise. De plus, le point d'accès sans fil peut regrouper les dispositifs clients en différentes périodes TWT, réduisant ainsi le nombre de dispositifs en concurrence pour un support sans fil en même temps après le réveil [20].

Le TWT augmente également le temps de veille de l'appareil, le faisant entrer dans un état de veille avant que son propre TWT n'arrive, prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie.

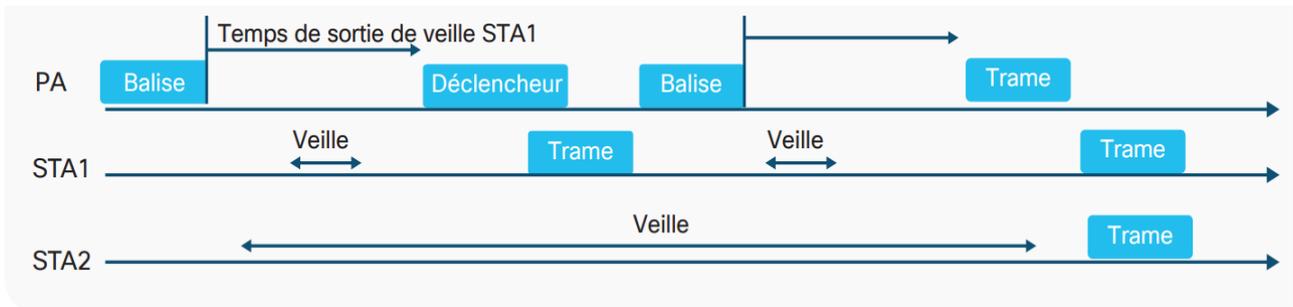


Figure 11: Target Wake-up Time (TWT)

4 Synthèses sur les travaux OFDMA

Dans cette section on va présenter certaines études faites sur la norme IEEE 802.11ax, basés sur la technologies OFDMA.

J.Lee et al (2016) [21]: Ces auteurs ont proposé le protocole Hybrid MAC (H-MAC) basé sur un mélange d'accès centralisé et aléatoire distribué pour maximiser l'utilisation de canal. Il utilise trois type de messages : Request-to-Multiple-DL (RMD), Clear-to-receive-with-UL-Request (CRU), Request-to-Multiple-UL (RMU).

RMD utilise l'ensemble du canal pour identifier chaque station candidate pour DL, et joue un rôle de signal de synchronisation pour CRU. Lors de la réception de RMD, les stations ayant des données DL désignées peuvent répondre par un message CRU, elles peuvent porter également des informations sur les demandes de transmissions UL. Les stations non désignées peuvent accéder de manière aléatoire (RA) dans CRU pour envoyer leur demande UL. RMU est un déclencheur (TF) pour les transmissions UL[12].

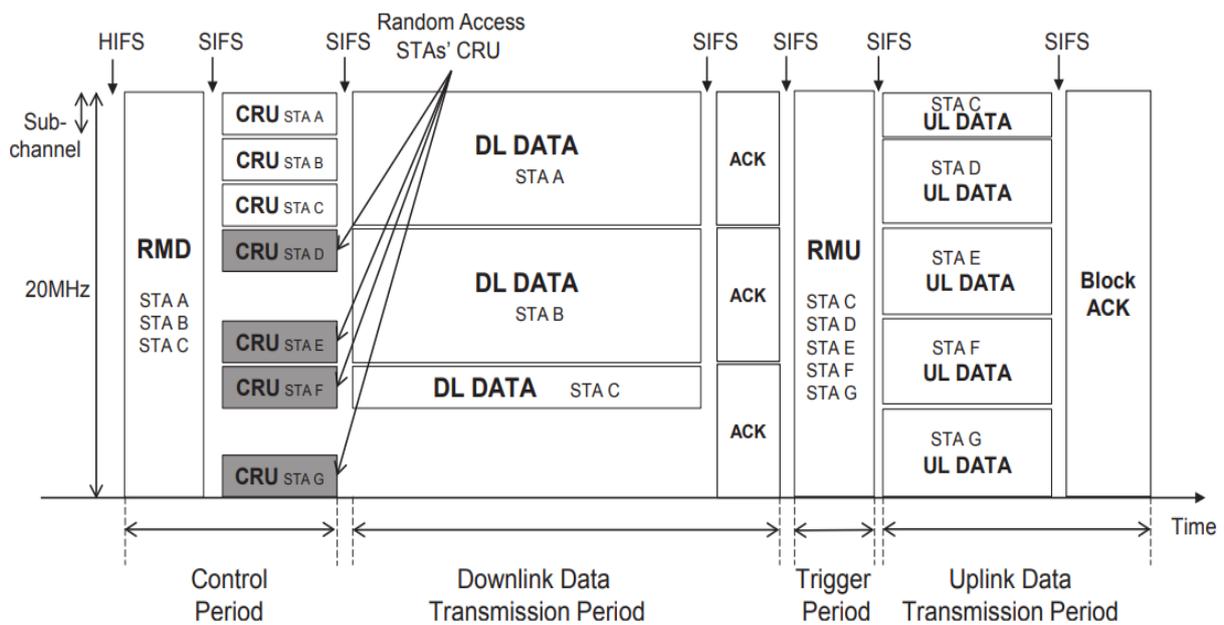


Figure 12: Protocole H-MAC

- Comme illustré dans la Figure 12, le protocole H-MAC fonctionne comme suit :

Le point d'accès diffuse sur tout le canal un message RMD, les stations candidats pour DL seront répertoriées par le point d'accès qui va leur allouer des RUs, Ensuite elles envoient leur réponse CRU par les RUs déjà allouées en RMD. Les stations non désignées et qui possèdent des données UL accèdent de manière aléatoire pour envoyer leur réponse CRU (ex STA-D... STA-G). Après la réception des CRU, le point d'accès envoie ses données et les stations acquittent la réception des données DL en envoyant chacune son ACK.

Après la réception des demandes UL dans CRU, le point d'accès envoie un message RMU et les stations ayant des requêtes UL envoient leurs données, ensuite le point d'accès accuse la réception de ces données UL par un Block ACK (BA).

M.Wu et al (2019) [22]: Un protocole d'allocation des RUs nommé High Throughput Resource Unit Assignment Scheme (HiTRAS) a été proposé par ces auteurs, dans le but d'améliorer le débit de transmission du trafic UL.

Ce protocole est appliqué par le point d'accès pour allouer les RUs correspondantes aux stations de façon aléatoire (RA-RUs) qui vont transmettre leur trafic UL simultanément vers l'AP. Le principe de fonctionnement de HiTRAS se déroule en deux phase : la première phase "BSR poll and RU allocation phase" ou l'AP collecte les BSR des stations et leur attribuer des RUs, et la deuxième phase "UL transmission and ACK phase" ou les stations transmettent leur trafic UL et l'AP accuse la réception des données[13].

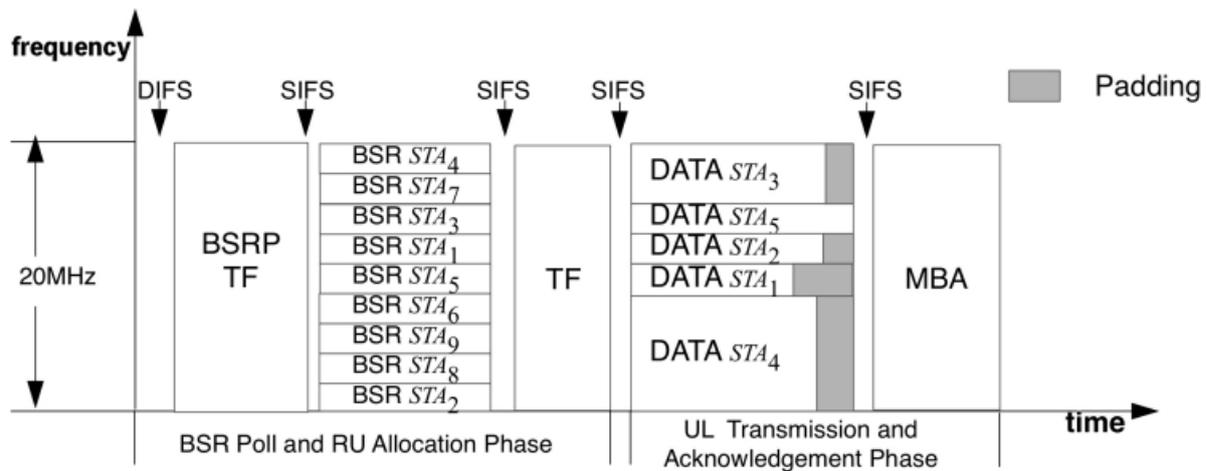


Figure 13: Transmission UL par le Protocole HiTRAS

- Comme illustré dans la Figure 14, le protocole HiTRAS fonctionne comme suit :

Phase 1 "BSR poll and RU allocation phase" : L'AP diffuse en utilisant tout le canal un déclencheur BSRP TF aux stations pour collecter leur BRS. Les stations ayant un trafic UL répondent par leur BSR dans des RUs d'accès aléatoire disponibles (RA-RUs), (ex. les STA₁...STA₉ ont réussissent à obtenir des RA-RUs pour envoyer leur BSR en réponse au BSRP TF de l'AP). Ensuite le protocole HiTRAS sera adopté par l'AP pour attribuer les RUs aux stations ont leur fournissant a chacune une paire optimale d'indice MCS et un schéma d'allocation des RUs (voir les Table 2 et 3). Ces paires seront envoyés dans un message TF diffusée par l'AP aux stations concernées.

Phase 2 ‘UL transmission and ACK phase’ : Par la suite les stations ayant eux des RUs par l’AP transmet leur données UL comme suit :

L’AP organise les STAs selon la taille de leurs données UL en ordre croissant, ensuite il fait la dégradation du débit pour synchronisé la transmission simultanée de plusieurs flux de données. Et enfin l’AP accuse la réception du trafic UL par un block ACK ou un block multi-utilisateurs ACK (MBA).

- Les figures suivantes représentent le schéma d’allocation utikisée par le protocole HiTRAS ansi que les Schémas de modulation et de codage.

Assignment Scheme	26 -tone	52 -tone	106 -tone	242 -tone	Number of schedules
#1	9				1
#2	7	1			4
#3	5	2			5
#4	3	3			4
#5	1	4			1
#6		2	1		2
#7	5		1		2
#8	3	1	1		4
#9	1	2	1		2
#10			2		1
#11		4			1
#12	1		2		1
#13				1	1

Table 2: Schéma d’allocation HiTRAS

MCS Index	MCS	26-tone	52-tone	106-tone	242-tone
0	BPSK, 1/2	0.9	1.8	3.8	8.6
1	QPSK, 1/2	1.8	3.5	7.5	17.2
2	QPSK, 3/4	2.6	5.3	11.3	25.8
3	16-QAM, 1/2	3.5	7.1	15.0	34.4
4	16-QAM, 3/4	5.3	10.6	22.5	51.6
5	64-QAM, 2/3	7.1	14.1	30.0	68.8
6	64-QAM, 3/4	7.9	15.9	33.8	77.4
7	64-QAM, 5/6	8.8	17.6	37.5	86.0
8	256-QAM, 3/4	10.6	21.2	45.0	103.2
9	256-QAM, 5/6	11.8	23.5	50.0	114.7
10	1024-QAM, 3/4	-	-	-	129.0
11	1024-QAM, 5/6	-	-	-	143.4

Table 3: Modulation and Coding Schemes

S.Brahmi et M.Yazid (2021) [23]: Le protocole d’allocation proposé dans cette article est ‘EA-RUs’ pour ‘Efficient Allocation Resource Unit’ dont l’objectif est de maximiser la taux d’allocation des RUs et le débit dans les deux directions DL et UL. Le principe est de satisfaire le maximum nombre de requêtes DL et UL tout en réduisant le gaspillage dans la bande passante. Le protocole EA-RUs utilise différentes RUs dans les deux direction DL et UL. Le tableau suivant liste les différents schéma d’allocation en fonction du nombre de stations qui participe à la communication[14].

	242-RU	106-RU	52-RU	26-RU
schéma 1	1			
schéma 2		2		
schéma 3		2		1
schéma 4		1	2	1
schéma 5			4	1
schéma 6			3	3
schéma 7			2	5
schéma 8			1	7
schéma 9				9

Table 4: Schémas d’allocation du protocole EA-RUs

- Comme illustré dans la Figure 14, le protocole EA-RUs se déroule en deux phases :

Phase 1 ‘DL communication’ : L’AP envoie une trame trigger (TF) a un nombre de stations DL désignées (max 9-STAs) pour les informés de l’envoi planifié de plusieurs flux de données dans des RUs qui leur sont allouées selon les schémas d’allocation EA-RUs. Les stations désignées envoient leur BSR par une requête UL dans des RUs de 26 tonalités (26-RU). Les stations restantes non-désignées choisissent des 26-RU de façon aléatoire (Random Access) dans les RUs restantes pour envoyer leur BSR.

L’AP transmet le trafic DL au STAs qui ont réussies a envoyées leur BSR dans des RUs qui leur sont attribuées. Ensuite les STAs accusent la réception des données DL en envoient des ACK chacune.

Phase 2 ‘UL communication’ : Après la réception des BSRs, l’AP liste les stations UL et leur attribuer des RUs selon le protocole EA-RUs, et les informer par l’envoi d’un déclencheur TF.

Les Stations transmettent leur flux de données simultanément vers l’AP dans des RUs qui leur sont attribuées. Ensuite l’AP envoie en block ACK pour la réception des données UL.

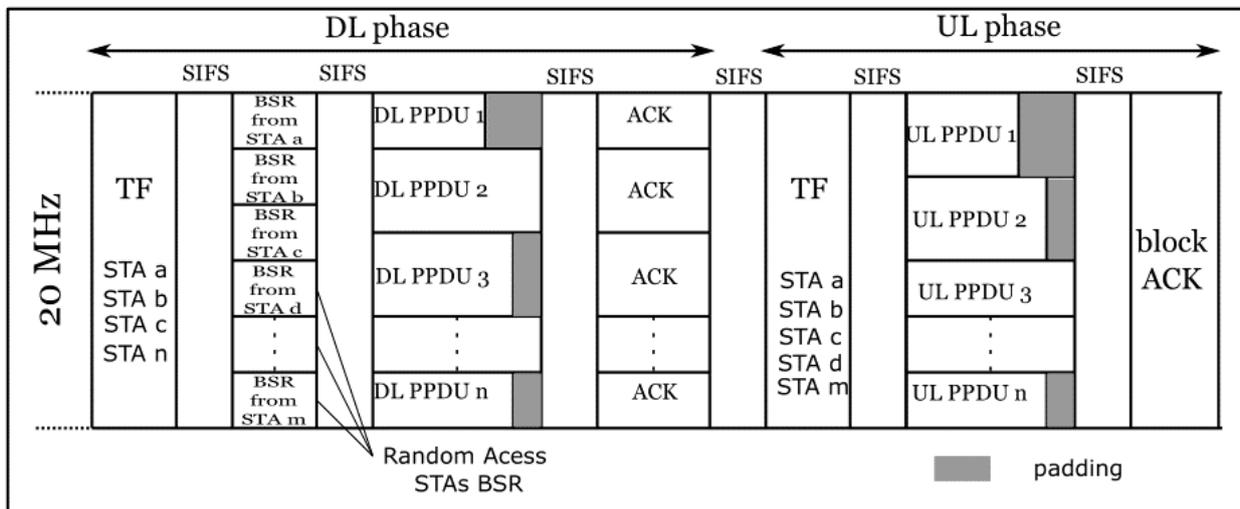


Figure 14: Protocole EA-RUs

D.Magrin et al (2021) [24]: Ces derniers ont proposer un protocole basée sur la technique OFDMA, implémenté par le simulateur NS3 (Network Simulation), il utilise les trois message ACK suivant : ACK-SU-FORMAT, MU-BAR, AGGR-MU-BAR. Ce protocole fonctionne sur les deux direction DL et UL en accès centralisé (SA) et aléatoire (RA), et il utilise des RUs de la même taille[15].

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥ 10
f_{bw}	1	2	2	4	4	4	4	4	9	9
f_{hol}	1	2	4	4	9	9	9	9	9	9

Table 5: Schémas d’allocation du protocole NS3

- Comme illustré dans la Figure 15, ce protocole utilise principalement deux schéma d'allocation.

Le premier schéma : soit la fonction (Fwb) qui renvoie le nombre minimum de RU tel qu'autant de STA que possible peut être desservie sans gaspillage des RUs. Pour $N=3$ STAs, la fonction $Fwb(N=3) = 2$, où on alloue 2 RUs de 106 tonalités a 2 STAs seulement. Ce schéma favorise l'usage maximum de la bande passante sans gaspillage de RUs, mes l'inconvénient c'est qu'il laisse des STAs au prochain cycle alors que le nombre de STAs est bien inférieur au nombre maximum de STAs qui peuvent transmettre ou recevoir leurs données simultanément.

Le deuxième schéma : soit la fonction (Fhol) qui renvoie le nombre maximum de RU pour permettre à un nombre maximum de STAs de participer dans la transmission. Pour $N=6$ STAs, la fonction $Fhol(N=6) = 9$, ou on alloue 9 RUs de 26 tonalités a 6 STAs. Ce schéma favorise la satisfaction d'un nombre maximum de STAs, mes l'inconvénient c'est qu'il y a un gaspillage des RUs. Par exemple dans le cas de $N=6$ STAs on a trois 26-RUs qui seront inutilisable.

Zhou et al (2019) [25]: Une technique d'allocation des ressources distribuée pour l'OFDMA qui propose une meilleure utilisation du spectre, une répartition équitable des ressources et une amélioration des performances dans les réseaux sans fil.

DRA-OFDMA propose une approche décentralisée de l'allocation des ressources, dans laquelle chaque station de base (ou point d'accès) dans le réseau est capable de prendre des décisions locales sur l'allocation des ressources. Cela permet une utilisation plus efficace des ressources disponibles et une meilleure répartition de la charge entre les stations de base.

Dans le cadre de DRA-OFDMA, les stations de base peuvent surveiller les conditions du canal de communication, telles que les niveaux de signal, l'interférence et la qualité de la liaison, pour prendre des décisions sur l'allocation des sous-porteuses aux utilisateurs. Elles peuvent également échanger des informations avec les stations de base voisines pour coordonner l'allocation des ressources et éviter les interférences[16].

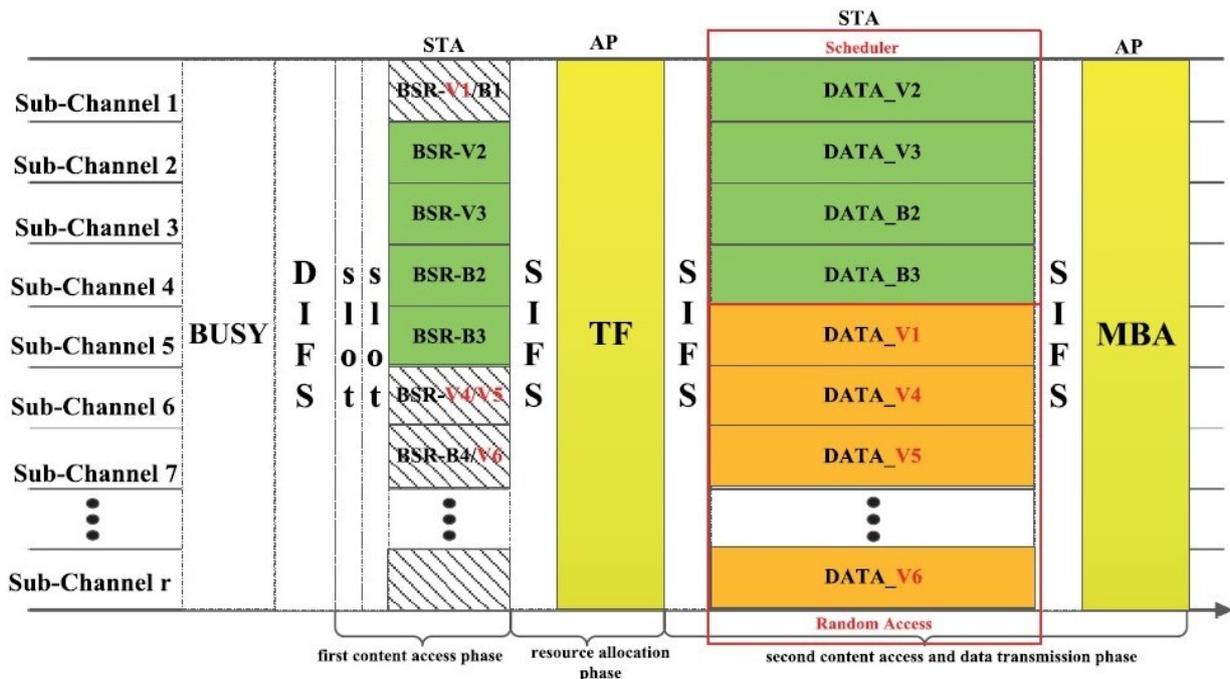


Figure 15: Le protocole DRA-OFDMA

- Comme le montre la Figure 16, la conception du protocole est principalement divisée en trois phases comme suit :

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

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

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

- La Table 6 suivante résume les principaux caractéristiques des différents protocoles basés sur la technique OFDMA :

Caractéristique Protocoles	Direction		Mode d'accès		Schéma d'affectation	
	DL	UL	RA	SA	Uniquement des 26-RUs	Différente Type
H-MAC	X	X	X	X	X	
Hi-TRAS		X	X	X		X
EA-RUs	X	X	X	X		X
NS-3	X	X	X	X		X
DRA-OFDMA		X	X		X	

Table 6: Caractéristiques des protocoles OFDMA traités

5 Problématique

L'objectif fondamental de la technologie OFDMA dans la norme IEEE 802.11ax est de permettre des transmissions simultanées multi-utilisateurs UL et DL en accordant des RUs aux stations selon leur besoin. Dans la nouvelle norme IEEE 802.11ax, l'OFDMA est la nouvelle technique qui permet un accès simultané de plusieurs utilisateurs sur un canal de 20 MHz. Pour cela plusieurs travaux scientifiques ont été publiés parmi eux les travaux cités précédemment sur la conception des méthodes MAC permettant la gestion d'accès aux RUs tout en optimisant le débit et l'efficacité de l'utilisation du canal de transmission.

En effet, parmi les protocoles cités auparavant, ils y en ont ceux qu'ils ne prennent pas en considération les tailles variables des données transmises, et ils y en ont ceux qu'ils utilisent des RUs de taille fixe. Par conséquent il est crucial de concevoir un protocole qui attribue efficacement les RUs à plusieurs STA's afin qu'elles puissent transmettre simultanément dans des RUs de différentes tailles, et les longueurs de données générées par l'AP sont de tailles variables qui engendrent une maximisation de transmission, améliorant ainsi le débit de transmission dans les deux directions DL et UL.

6 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est introduit par la norme IEEE 802.11ax. Les techniques de transmission multi-utilisateurs tel que MU-MIMO et OFDMA. Dans cette partie on s'est focalisé beaucoup plus sur la technique OFDMA et son principe de fonctionnement. On a aussi mentionné d'autres techniques utilisées par la norme IEEE 802.11ax tel que : La réutilisation spatiale, le full duplex, Target Wake-up time (TWT)...

Ensuite, on a présenté quelques travaux de recherche et les propositions existantes basées sur la technologie OFDMA de la norme IEEE 802.11ax tels que les protocoles : HMAC, HiTRAS, EA-RUs, DRA-OFDMA...

Dans le prochain chapitre, nous allons suggérer une proposition qui apporte des améliorations au protocole HMAC en termes d'utilisation du canal, du débit de transmission et du coût de OverHead dans les deux directions DL et UL.

Proposition et évaluation des performances

1 Introduction

La technologie OFDMA introduit par la norme 802.11ax est l'une des techniques clés qui améliore l'efficacité spectrale en regroupant des sous-porteuses en des sous-canaux appelés unités de ressources (RUs). Dès son apparition, un nouveau domaine de recherche est né pour la conception des méthodes d'accès au médium pour but d'améliorer les débit utilisateur dans les réseaux WLAN.

Au cours de ce chapitre, nous allons proposer une méthode d'accès au médium basée sur la technologie OFDMA, et qui est une amélioration du protocole H2M, afin d'optimiser l'efficacité de l'utilisation des sous-canaux tout en augmentons le débit de transmission dans les deux direction DL et UL. Nous rédigeons le principe de fonctionnement de la méthode proposée en premier, et une simulation et évaluation de performance de cette dernière sera décrite en second.

2 Proposition

Dans le but de répondre à la problématique citée dans le deuxième chapitre, nous allons proposer une nouvelle méthode d'accès au médium basée sur la technologie OFDMA et qui est l'amélioration de la méthode présentée par "J.Lee et al" [21].

- Notre proposition est devisée principalement en deux sous proposition :

2.1 Proposition 1

Les auteurs "J.Lee et al" qui ont décrit le protocole HybridH2M n'ont pas indiqué dans leurs article comment le protocole affecte des RUs aux stations. Alors, on a pris le cas par défaut ou il utilise uniquement des RUs de 26 sous porteuses, ce qui entraine une utilisation inefficace du canal de transmission, ce qui engendre par la suite une dégradation du débit.

De ce fait, notre première proposition est d'affecter au protocole H2M un schéma d'allocation (voir la Table 7) pour but d'exploiter et de maximiser l'utilisation du canal et d'augmenter le débit.

En outre, pour réduire la taille du overhead, on a pris la liberté de modifier la taille des trames de contrôle RMD et RMU comme suit :

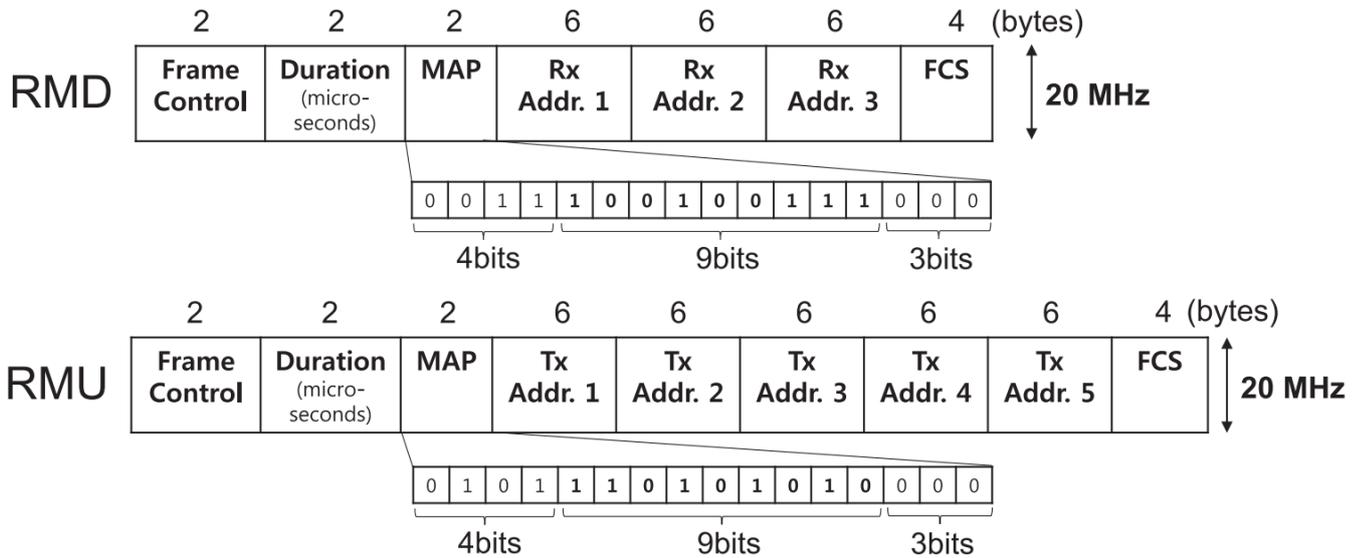


Figure 16: Les trames de contrôle du protocole HMAC

Comme le montre la Figure 16 les champs ‘Rx Addr’ réservés aux adresses des stations sont codés sur 6 octets. De ce fait on a décidé de les réduire à 12bits, c’est-à-dire qu’au lieu d’indiquer les stations par leur adresse-IP comme dans la majorité des cas, on les indique par des identifiants uniques codés sur 12bits.

- La Table 7 suivante décrit le schéma d’allocation des RUs ainsi que le champ MAP des trames RMD et RMU selon le schéma d’allocation.

	242-RU	106-RU	52-RU	26-RU	MAP(9bits)
schéma 1	1				10000000
schéma 2		2			100010001
schéma 3		2		1	100011000
schéma 4			4		101010101
schéma 5			4	1	101010101
schéma 6		1		5	100011111
schéma 7			2	5	101011111
schéma 8			1	7	101111111
schéma 9				9	111111111

Table 7: Schéma d’allocation des RUs

- La Figure suivante représente le schéma de fonctionnement de la première proposition :

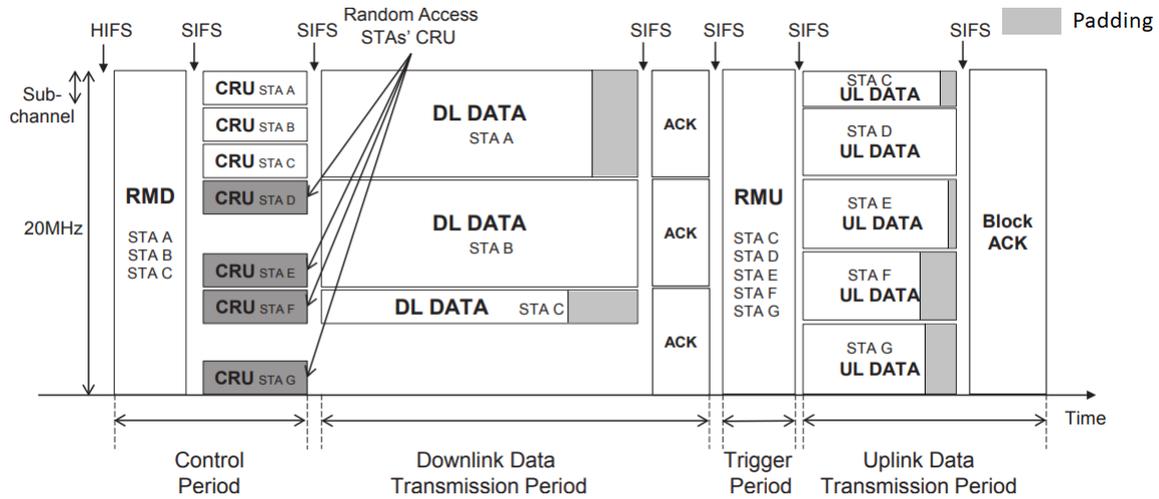


Figure 17: Schéma de la première proposition

2.2 Proposition 2

Dans le fonctionnement du protocole HMAC, la phase de transmission des données UL dépend de la partie ‘‘Control Period’’. En d’autres termes, le nombre de stations qui participent dans la phase UL sont les stations qui ont des données UL à transmettre parmi les stations participantes dans la phase DL, plus les stations qui ont envoyé leur CRU en mode d’accès aléatoire (RA). Donc après la collecte des CRUs des stations en accès centralisé ‘‘Scheduling Access(SA)’’, les autres stations qui désirent à transmettre des données UL vont entrer en compétition sur les sous-canaux non alloués qui restent. Et parmi ces stations y aura celles qui entrent en collision entre elles lorsque deux stations ou plus choisissent la même RUs, et y aura celles qui vont réussir à obtenir des RUs et d’envoyer leurs CRU.

De ce fait, pour réduire ce taux de collision et d’améliorer le service UL en augmentant le nombre de stations UL, on a proposé une deuxième idée consistant à séparer les deux phases d’accès centralisé et aléatoire et qu’elles s’exécutent séquentiellement. Le but est de permettre une compétition entre les stations en accès aléatoire(RA) pas seulement sur les sous-canaux libres mais sur tous les sous-canaux du canal qui est neuf (9) RUs pour un canal de 20MHz.

- La Figure 18 suivante décrit le principe de la deuxième proposition.

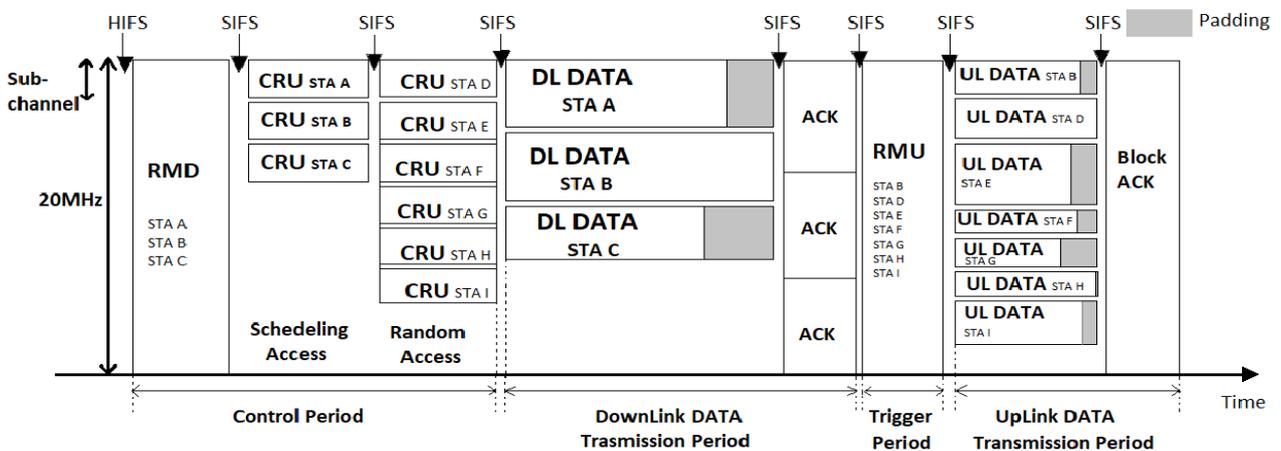


Figure 18: Schéma de la deuxième proposition

Dans l'exemple de la figure ci-dessus on a trois stations (STA A, B, C) qui ont envoyer leur CRU en SA et qu'ils ont participer dans la phase "DownLink DATA Transmission". Ensuite les stations qui ont des données UL à transmettre entrent en compétition pour obtenir des RUs et d'envoyer leur CRU. Dans cette exemple, parmi tous les stations compétitives y en a six (6) stations qui ont réussies à obtenir des RUs sans collision. Et parmi les stations de la phase DL, y en a la STA B qui contient des données UL à transmettre, donc on a un total de sept (7) stations qui vont participer dans la phase "UpLink DATA Transmission".

3 Paramètres de simulation

La Table 8 suivante décrit les paramètres de simulation que nous avons utilisée pour calculer nos métriques d'évaluation des performances. Nous avons conçu nos simulations en utilisant un canal de transmission de 20 MHz pouvant gérer jusqu'à 9 utilisateurs simultanés. Et les autres paramètres de simulation sont présentés en dessous.

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

Table 8: Paramètres de simulation

4 Résultat de simulation

Les Métriques que nous avons calculées pour évaluer les performances de notre première proposition sont : le taux d'allocation et le débit DL et UL, ainsi que la taille overhead. Pour la deuxième proposition on a calculer : le taux de collision et de service UL, ainsi que le débit UL. Tandis que notre proposition est une amélioration du protocole HMAC avec des MPDU (Mac Protocol Data Unit) de taille variable, les résultats de simulation des performances de la méthode proposée sont comparés avec ceux du HMAC.

Le logiciel que nous avons utilisé pour appliquer notre méthode d'accès, est le langage MATLAB sous le système d'exploitation Windows. Le nom MATLAB est la contraction du terme anglais Matrix Laboratory, ce logiciel est spécialement conçu pour le calcul scientifique et la manipulation de vecteurs et de matrices. MATLAB est à la fois un langage de programmation et un environnement de développement, développé et commercialisé par la société américaine MathWorks. MATLAB est utilisé dans les domaines de l'éducation, de la recherche et de l'industrie pour le calcul numérique mais aussi dans les phases de développement de projets. Puisque qu'on a deux propositions, les résultats seront représentés en deux partie comme suit :

4.1 Proposition 1

4.1.1 Le taux d'allocation DL

Le taux d'allocation représente le nombre de sous porteuses allouées aux stations sur le nombre total des sous porteuses d'un canal de 20 MHz.

Comme le montre le graphe suivant (Figure 19), la proposition PROPOSAL surpasse le protocole HMAC quand on a moins de 30 stations dans le réseau. La raison de cette différence c'est quand on a moins de 9 stations qui participe simultanément, HMAC n'utilise pas tout le canal vu qu'il utilise seulement des 26-RUs. Alors que PROPOSAL alloue presque tout le canal pour n'importe quel nombre de stations dans le réseau grâce au schéma d'allocation qu'il utilise.

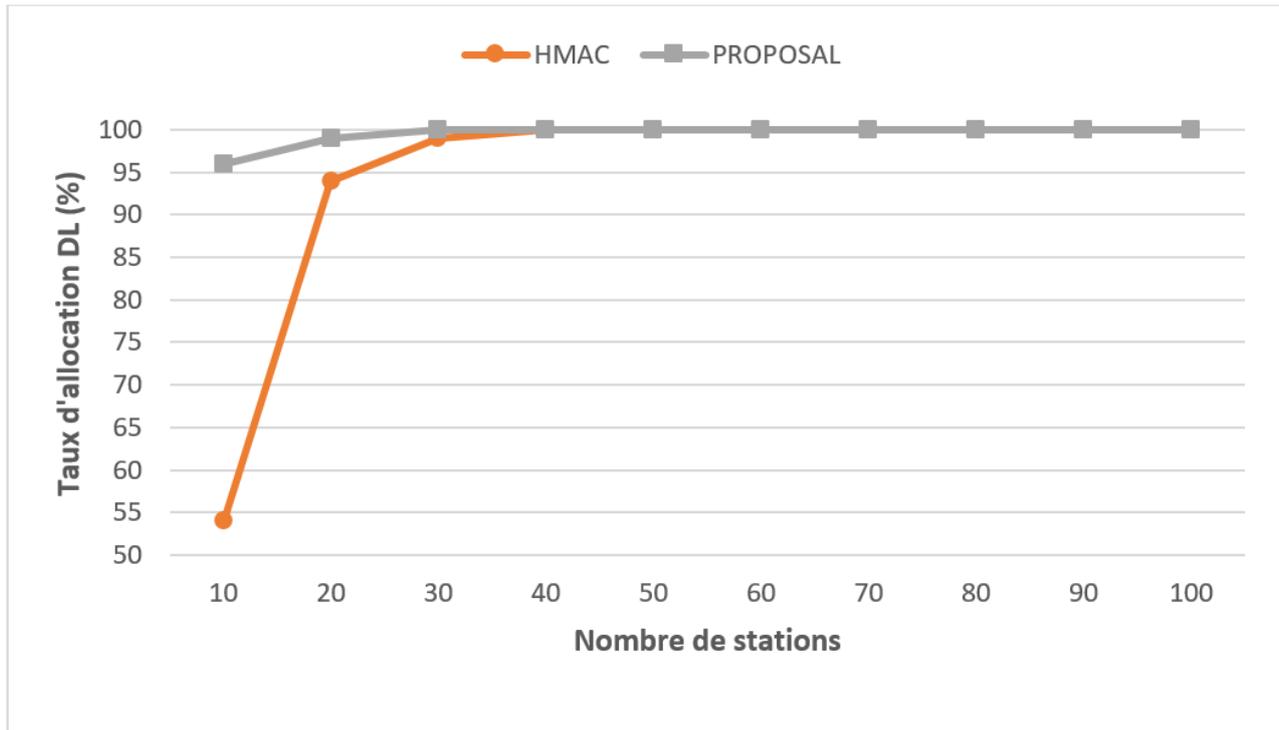


Figure 19: Le taux d'allocation DL

4.1.2 Le débit DL

Cette métrique représente la somme des tailles des MPDU (Mac-Protocol-Data-Unit) des stations participantes sur le temps de transmission des données DL.

Le débit DL est en relation avec le taux d'allocation DL. Le graphe suivant montre que PROPOSAL surpasse HMAC avant les 30 stations avec une moyenne de 8 Mbps, ensuite ils seront dans le même niveau quand il y aura plus de stations pour raison qu'ils utilisent le même schéma de 9 26-RUs.

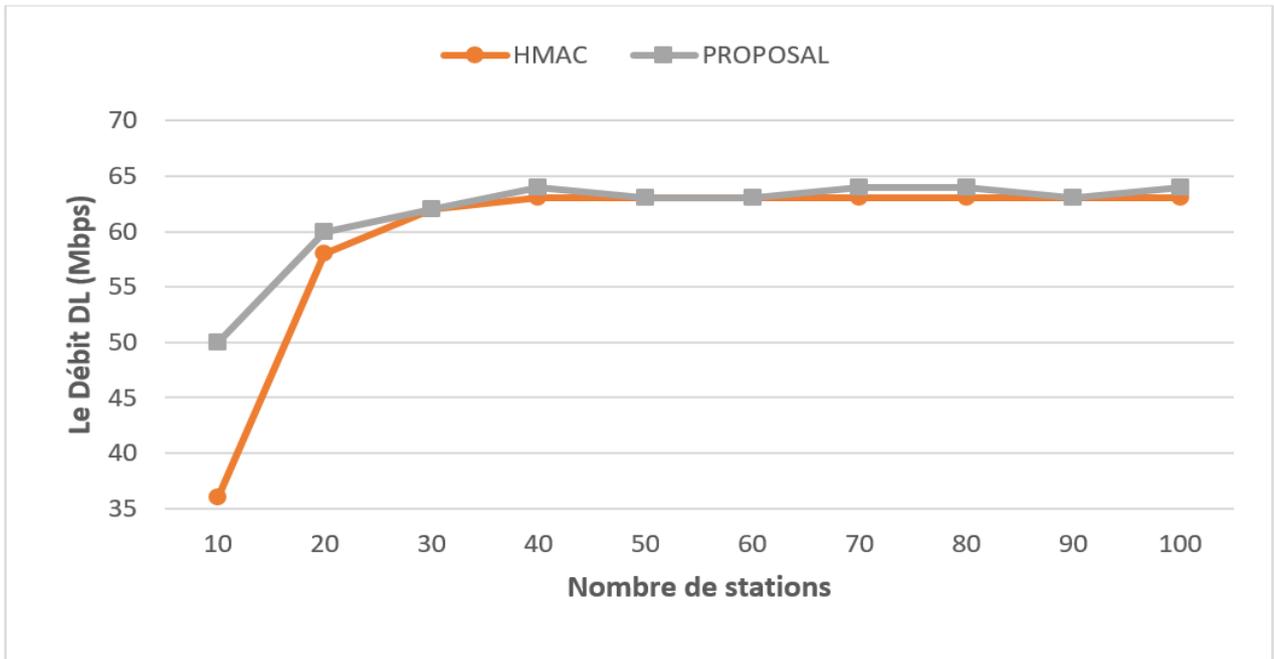


Figure 20: Le débit DL

4.1.3 Le taux d'allocation UL

Pour le taux d'allocation UL, PROPOSAL surpasse HMAC dans tous les cas par une différence moyenne de 45%. Comme on a dit précédemment dans le la métrique "Taux d'allocation DL", PROPOSAL alloue presque tout le canal grâce au schéma d'allocation qu'il utilise. Pour HMAC on voit qu'il utilise une moyenne de 49% du canal car le nombre moyen de station participantes dans le cycle UL est de 4 à 5 stations, ce qui fait qu'il utilise 4 à 5 26-RUs, d'où le taux d'allocation UL est d'un minimum de 44% à 55% pour le cas idéal.

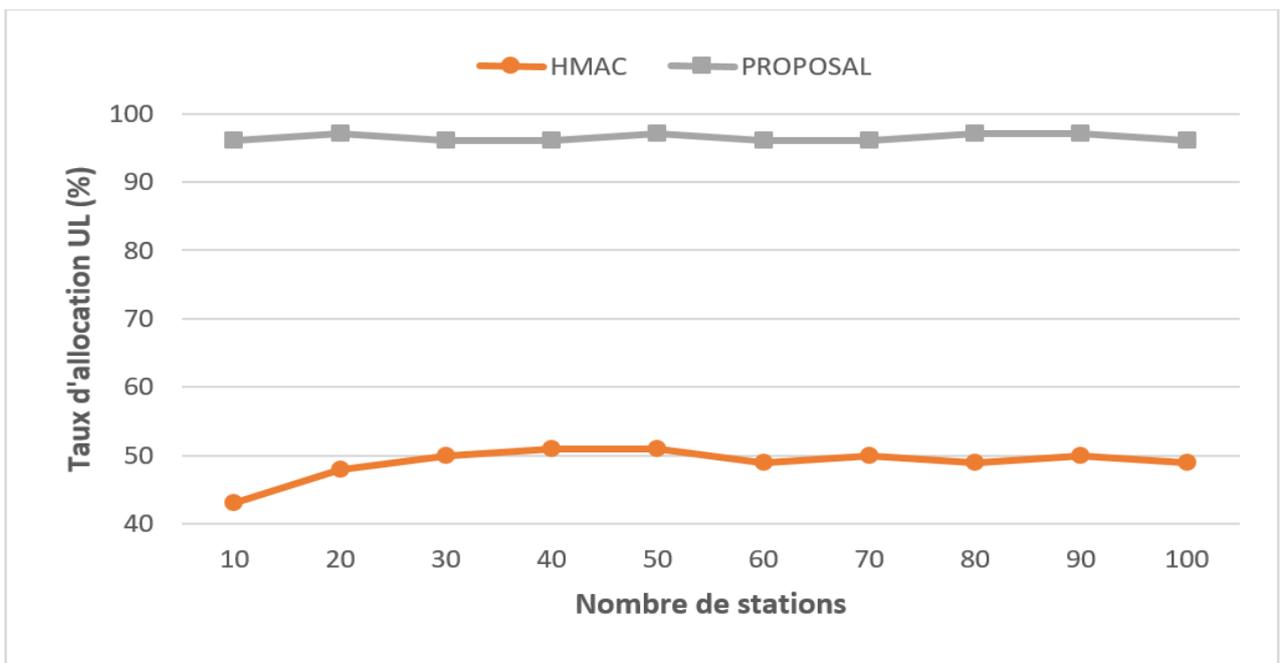


Figure 21: Le taux d'allocation UL

4.1.4 Le débit UL

Le débit UL est aussi en relation avec le taux d'allocation UL, on a dit précédemment que le taux d'allocation UL pour HMAC est compris entre 44% à 55% ceux qui est équivalent à un débit de 32Mbps à 35 Mbps. Pour PROPOSAL, le débit est compris entre 50 à 51Mbps, d'où une amélioration moyenne de 17Mbps.

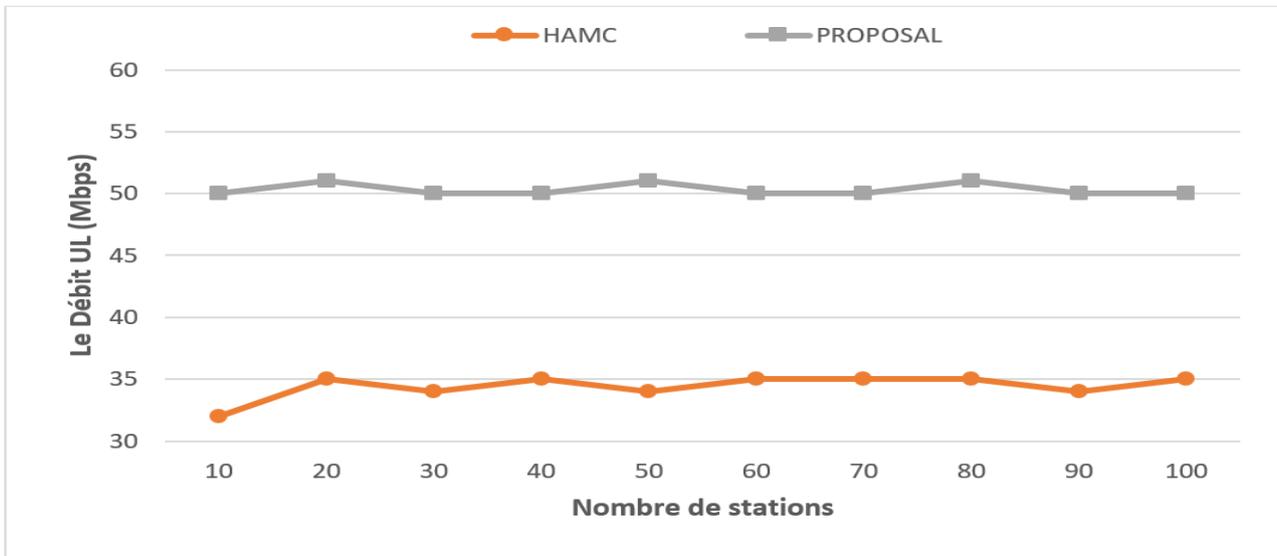


Figure 22: Le débit UL

4.1.5 Le Overhead

Dans le calcul du overhead, on a pris en considération la somme des tailles des paquets de contrôle. A savoir le RMD, CRU et le RMU.

Notre proposition a pour but de réduire la taille du overhead, alors on a réduit les champs "Addr Rx" (plus de détail dans la Figure-3-1) de 6 octets à 12 bits pour indiquer une station par un identifiant au lieu de son adresse IP.

Le graphe suivant montre une amélioration significative jusqu'à 500bits par cycle (voir la Figure 23).

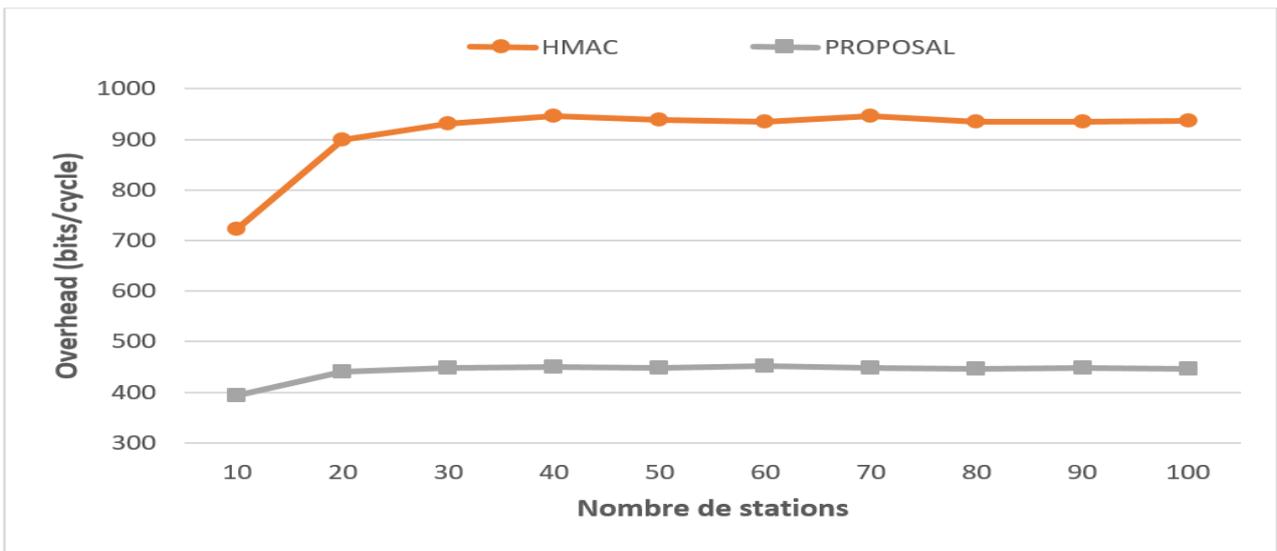


Figure 23: Le Overhead

4.2 Proposition 2

4.2.1 Le taux de collision

Le taux de collision représente le nombre de stations qui ont échouer à envoyer leur CRU sur le nombre total de stations qui ont participer à la compétition pour obtenir des RUs et d'envoyer leur CRU en mode d'accès aléatoire.

Dans HMAC la compétition se fait sur le nombre de sous-canaux libre pour l'envoi des CRUs. Et parmi tous les stations participante y aura celle qui réussisse et d'autres qui entre en collision. Pour réduire ce taux de collision, en à proposer de faire en sorte que la compétition se fait sur neuf (9) sous-canaux, et on a obtenu une amélioration moyenne de 13% avant les 40 stations, mes au-delà le taux sera a 100%. C'est-à-dire qu'une fois on a neuf (9) stations qui envoie leur CRU en mode d'accès centralisé (SA), il n'y aura plus d'accès aléatoire (voir la Figure 24).

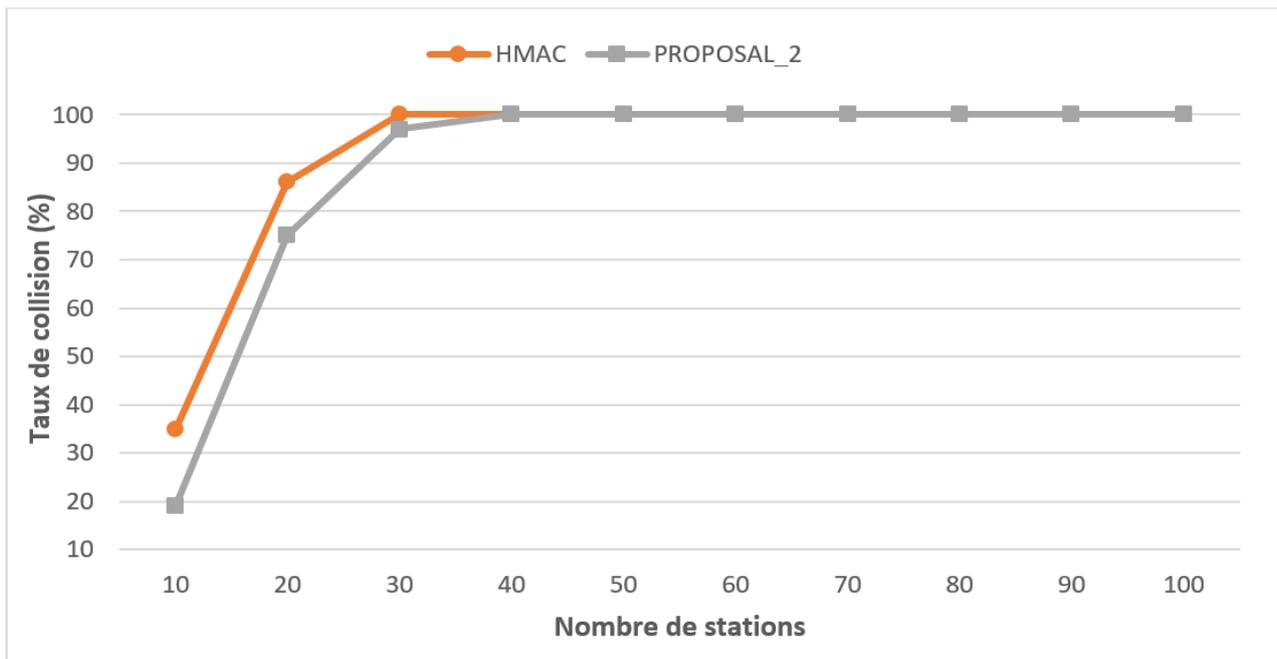


Figure 24: Le taux de collision

4.2.2 Le taux de service UL

Le taux de service UL représente le nombre de stations UL qui ont envoyer leur CRU en mode d'accès aléatoire sur le nombre total des stations qui ont participées dans le cycle UL.

Avec la réduction du taux de collision, le taux de service sera automatiquement encore mieux par rapport au protocole HMAC comme le montre le graphe suivant (Figure 25).

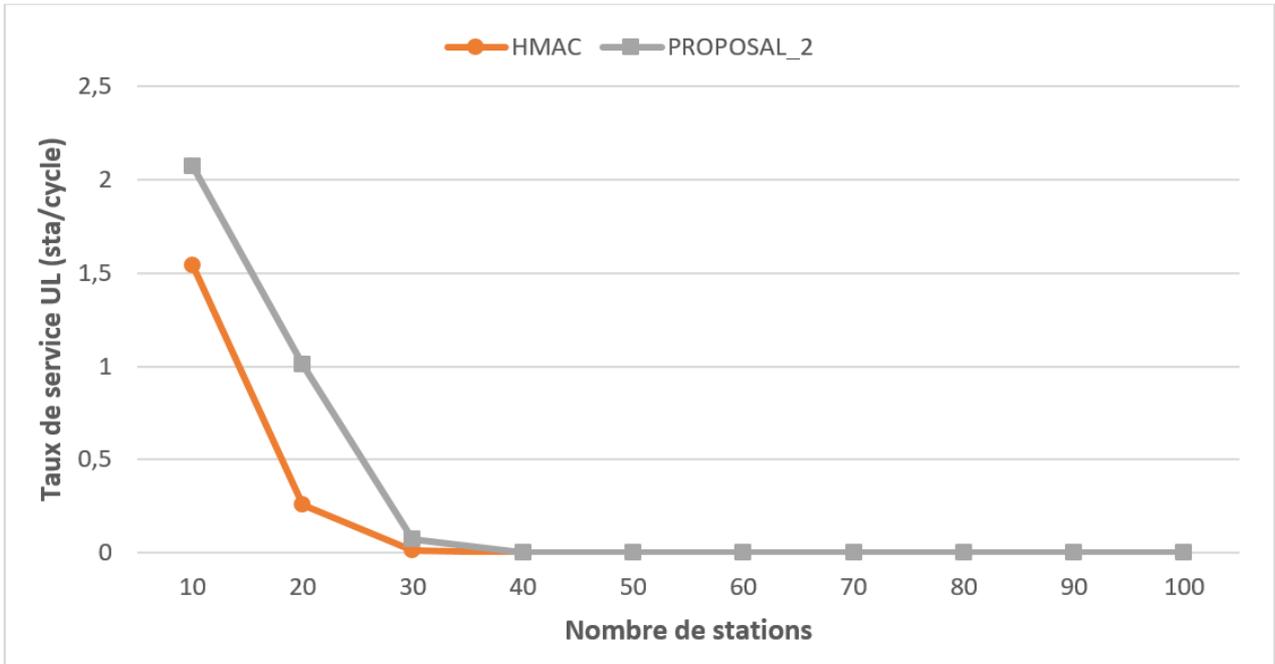


Figure 25: Le taux de service UL

4.2.3 Le débit UL

Cette fois le débit UL représente la taille des données (MPDU) transmis par les stations qui en accèdent en mode d'accès aléatoire (RA) sur le temps de transmission des données UL. L'amélioration du taux de service UL à porter une amélioration moyenne du débit UL de 10 Mbps par rapport au protocole HMAC. Après 40 stations le débit s'annule vue qu'il n'y a plus de stations qui ont accéder en mode d'accès aléatoire (voir la Figure 26).

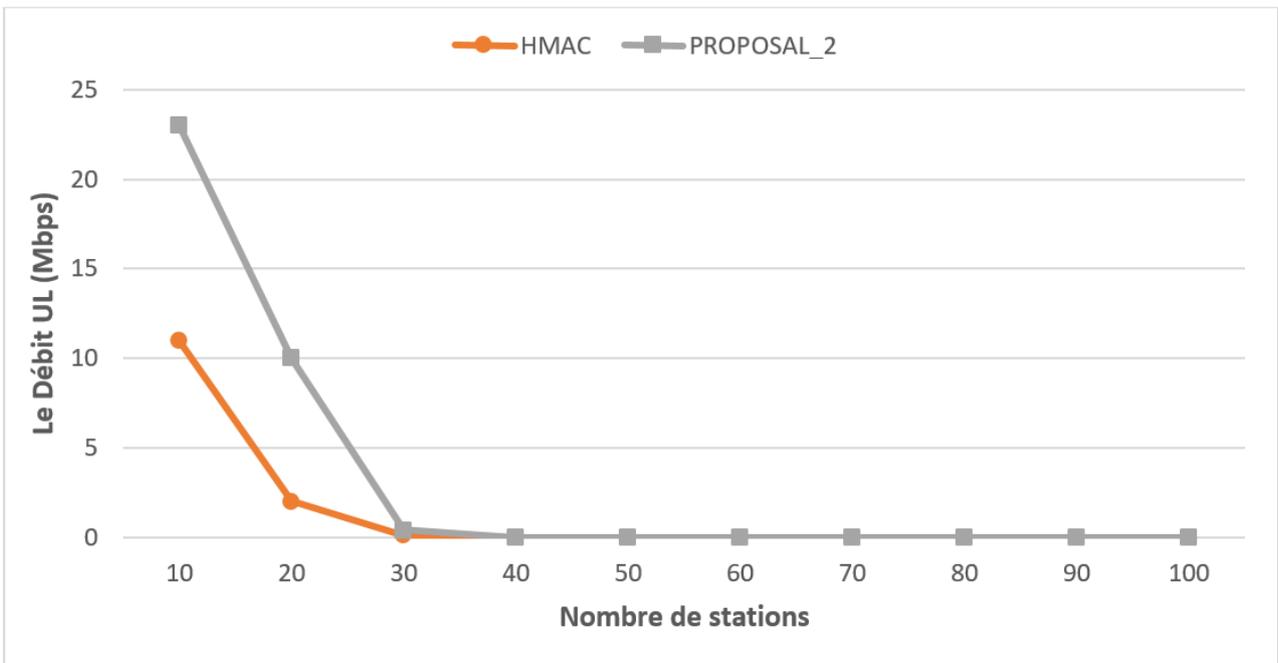


Figure 26: Le débit UL

5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons proposé une méthode OFDMA pour objectif d'optimiser l'utilisation des RUs en améliorant la méthode H-MAC.

Nous avons décrit le fonctionnement et le déroulement de la méthode proposée et la méthode du H-MAC, tout en soulignant les différences entre les deux méthodes et une partie simulation est également mis en œuvre a été présenté dans ce chapitre afin de démontrer l'efficacité de la proposition.

Bien évidemment, les résultats de la simulation montrent que la méthode proposer est bien plus efficace que H-MAC en terme d'utilisation des RUs et du débit de transmission dans les deux direction DL et UL.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire de MASTER, nous présentons les réseaux sans fil en général et décrivons la norme IEEE 802.11, l'une des technologies les plus couramment utilisées pour les réseaux WLAN. Elle a défini de nombreuses évolutions au cours du temps sous les noms IEEE 802.11 b/a/g/n/ac/ax. Nos travaux portent sur la dernière norme IEEE 802.11ax, dédiée aux WLAN à haute efficacité.

À travers la norme 802.11ax ou HEW, elle fournit un ensemble spécifique de clés qui lui permettent d'atteindre ses objectifs. Par conséquent, chaque cible fait face à de nombreux défis. Dans ce travail, nous nous concentrons sur la technologie OFDMA, l'un des objectifs clés de la norme IEEE 802.11ax.

D'après plusieurs recherches sur des problèmes résolus par l'introduction OFDMA, nous avons pu proposer une méthode d'accès au médium. Cette dernière est basée sur la notion d'une utilisation efficace des sous-canaux de transmission. Pour cette raison, notre proposition se base sur une allocation optimale des RUs de différentes tailles, tout en augmentant le débit de transmission, et de réduire la taille du overhead pour une transmission plus rapide.

Ensuite, des comparaisons sont faites entre le HMAc et la méthode proposée sur l'utilisation des sous-canaux et les débits de transmission dans les deux directions DL et UL. Et les résultats de simulation montrent que notre méthode est bien plus efficace que la méthode HMAc, et lui a apporté des améliorations intéressantes par rapport aux métriques calculées.

Les perspectives suivantes sont générées par ce travail :

- Proposition d'une méthode d'accès MAC permettant l'amélioration du débit de transmission DL et UL OFDMA.
- Etude comparative des débits offerts par l'adoption du principe de regroupement de canaux de 40, 80 et 160 MHz pour les liaisons DL et UL OFDMA.
- Intégration de la QoS dans la méthode proposée.

Bibliographie

- [1] *M. Yazid. Evaluation et Optimisation des performances des réseaux locaux sans fil IEEE 802.11. PhD thesis, Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira.*
- [2] *HADDACHE. Les réseaux sans fil (Wireless Networks). 2010/2011.*
- [3] *Richard C. Braley, Ian C. Gifford, Robert F. Heile. Wireless Personal Area Networks: An Overview of the IEEE P802.15 Working Group.*
- [4] *AlShourbaji, Ibrahim - 2013/02/04 SP - An Overview of Wireless Local Area Networks (WLAN) - International Journal of Computer Science and Information Security(IJCSIS).*
- [5] *DHARMA P. AGRAWA, HRISHIKESH GOSSAIN, DAVE CAVALCANTI, PRASANT MOHAPATRA. Recent advances and evolution of WLAN and WMAN standards. IEEE Wireless Communications(Volume: 15, Issue: 5, October 2008).*
- [6] *Réseau étendu sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network)-<https://www.informatique-mania.com/linternet/reseau-wwan/>, consulter le (19/03/2023).*
- [7] *P. C. Jain, "Rural Wireless Broadband Internet Access in Wireless Regional Area network using Cognitive radio", 2013.*
- [8] *H.NOUI. Les Réseaux sans fils IEEE 802.11. 2010.*
- [9] *S.BOUCHENAK. Étude et mise en œuvre de protocoles de sécurité des réseaux Wi-Fi: Application au réseau de l'université de Tlemcen, Mémoire de Magistère,. Université AbouBekrBelkaid, Tlemcen, Faculté de Technologie, 2017.*
- [10] *D.Coleman and Lawrence C. Miller. 802.11ax For Dummies. Aerohive Special Edition.*
- [11] *D. Deng, Y. Lin, X. Yang, J. Zhu, Y. Li, J. Luo, and K. Chen. Ieee 802.11ax :, IEEE Communications Magazine, 55(12) :52–59, Decembre 2017., Highly efficient wlans for intelligent information infrastructure.*
- [12] *OFDMA : CWNA®: Certified Wireless Network Administrator Study Guide: Exam CWNA-107, Fifth Edition, (consulter le 20/03/2023).*
- [13] *David D. Coleman and David A. Westcott. 802.11ax : High efficiency (he). Certified Wireless Network Administrator Study Guide : Exam CWNA-107, Fifth Edition, pages 796–809, 2018.*
- [14] *M. Simon. La norme wi-fi 802.11ax accélère la communication dans les scénarios multi-utilisateurs. ACTUALITES 217, Technologies sans fil, 2017.*
- [15] *Hybrid OFDMA Random Access With Resource Unit Sensing for Next-Gen 802.11ax. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9110744> (consulter le 26/04/2023).*
- [16] *What Is OFDMA? site:"<https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html>". (consulter le 26/04/2023).*
- [17] *Peter Loshin. What is Full Duplex. <https://www.techtargert.com/searchnetworking/definition/full-duplex> consulter le '19/02/2023'.*
- [18] *M. YAZID, S. BRAHMI and M. OMAR. 2020 Second International Conference on Embedded and Distributed Systems (EDiS). Multiuser Access via OFDMA Technology in High Density IEEE 802.11ax WLANs: A Survey. Novembre 2020.*

- [19] *D. X. Yang, Y. Guo, and O. Aboul-Magd. 802.11ax : The coming new wlan system with more than 4x mac throughput enhancement. In 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pages 1–5, Septembre 2017.*
- [20] *<https://support.huawei.com/enterprise/fr/doc/EDOC1100102755?fbclid=IwAR3d5L-1/>.consulté le 14/03/2023.*
- [21] *J. Lee and C. Kim. An efficient multiple access coordination scheme for ofdma wlan. IEEE Communications Letters, 21(3) :596–599, Mars 2017.*
- [22] *Y. Zhu M. Wu, J. Wang. High throughput resource unit assignment scheme for ofdma based wlan. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2019.*
- [23] *S.BRAHMI et M.YAZID. Towards an Efficient Allocation of Resource Units in Multi-User OFDMA Communications. 5th International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems IC-AIRES2021.*
- [24] *D.Magrin, S.Roy, S.Avallone, M.Zorzi. Validation of the ns-3 802.11ax OFDMA Implementation. Workshop on ns-3 – WNS3 2021 – ISBN: 978-1-4503-9034-7 Virtual Event, USA – June 23-24, 2021.*
- [25] *Run Zhou, Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Annan Yang: DRA-OFDMA: Double Random Access Based QoS Oriented OFDMA MAC Protocol for the Next Generation WLAN. Published online: 22 May 2019.*

RÉSUMÉ

802.11ax ou HEW est actuellement la dernière norme certifiée du standard IEEE 802.11, elle est publiée en 2021, dédiée aux réseaux WLAN. La norme a établi une efficacité et un débit accrus dans les cas d'utilisation plus difficiles (environnements denses) en tirant parti des capacités physiques et MAC existantes et en introduisant de nouveaux concepts tels que l'OFDMA, l'ordre de modulation 1024-QAM, le Full Duplex et la quantité de réutilisation spatiale. La technique de modulation OFDMA divise le canal de transmission en groupes de sous-porteuses appelés unités de ressources (RU) auxquelles peuvent accéder simultanément jusqu'à 9 utilisateurs sur un canal de 20 MHz. Afin d'optimiser l'utilisation des RUs, ainsi d'améliorer les débits de transmission, nous avons proposé une méthode d'accès MAC basée sur la technique OFDMA. Notre proposition est suivie par des résultats de simulation afin de démontrer l'amélioration du débit.

Mots clés: WLAN, IEEE 802.11ax, HEW, OFDMA.

ABSTRACT

802.11AX is the latest certified standard of the IEEE 802.11 standard, published in 2021, dedicated to the WLAN networks. The standard established increased efficiency and throughput in more challenging use cases (dense environments) by leveraging existing physical and MAC capabilities and introducing new concepts such as OFDMA, 1024-QAM, Full duplex and amount of spatial reuse. The OFDMA modulation technique divides the transmission channel into groups of subcarriers called Resource Unit (RU) which can be accessed simultaneously by up to 9 users on a 20 MHz channel. In order to optimize the use of RUs, thus improving transmission throughputs, we have proposed a MAC access method based on the OFDMA technique. Our proposal is followed by simulation results to demonstrate the improved throughput.

Keywords: WLAN, IEEE 802.11ax, HEW, OFDMA.