

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de fin d'étude

Option : Administration Et Sécurité Des Réseaux

Vers un protocole MAC dans la nouvelle technologie Wi-Fi 7

Réalisé par :

Mr. DEKIMECHE Mehdi
Mr. HAMDANE Hamza

Soutenu le 30 juin 2025 devant le jury composé de :

Mlle. HOCINI Kenza	MCB	Université de Béjaïa	Encadrante
Mr. MOKTEFI Mohand	MCB	Université de Béjaïa	Président
Mr. CHEKRID Mohamed	MAA	Université de Béjaïa	Examinateur
Mme HOUHA Amel	MAA	Université de Béjaïa	Examinatrice
Mme BATTAT Nadia	MCB	Université de Béjaïa	Examinatrice

Promotion : 2024/2025

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu le Tout-Puissant** de nous avoir accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour terminer ce mémoire.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à **Mlle Kenza Hocini**, notre encadrante, pour son accompagnement bienveillant, ses précieux conseils, ainsi que sa disponibilité tout au long de ce travail.*

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département d'informatique de l'Université A. Mira de Béjaïa, pour la qualité de leur enseignement et leur engagement à transmettre leur savoir.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer et d'apprécier ce mémoire avec bienveillance.

Nous remercions chaleureusement nos familles et nos amis, pour leur soutien moral, leur encouragement constant et leur présence bienveillante durant toutes les étapes de notre parcours.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	v
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : L'évolution des réseaux locaux sans fil	2
1.1 Introduction	2
1.2 Classification des réseaux sans fil	2
1.2.1 Réseaux corporels sans fil	2
1.2.2 Réseaux personnels sans fil	3
1.2.3 Réseaux locaux sans fil	3
1.2.4 Réseaux métropolitains sans fil	3
1.2.5 Réseaux étendus sans fil	3
1.3 Aperçu du standard 802.11	4
1.4 Les WLANs pour la transmission des données	4
1.4.1 Couche physique	5
1.4.2 Couche MAC	5
1.5 Les WLANs pour la qualité de service	6
1.5.1 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)	6
1.5.2 HCCA (HCF Controlled Channel Access)	8
1.6 Les WLANs Pour Le Haut Débit 802.11n	9
1.6.1 Couche Physique	9
1.6.2 Couche MAC	10
1.7 Les WLANs Pour Très Haut Débit 802.11ac	11
1.7.1 Couche Physique	11
1.7.2 Couche MAC	12
1.8 Les WLANs à haute efficacité 802.11ax	13
1.8.1 Couche Physique	13
1.8.2 Couche MAC	14
1.9 Tableau Récapitulatif	15
1.10 Conclusion	16
Chapitre 2 : Standard de IEEE 802.11be et synthèse bibliographique	17
2.1 Introduction	17
2.2 Améliorations de la couche physique	17
2.2.1 Bande Passante des Canaux Jusqu'à 320 MHz	17
2.2.2 Modulation 4096-QAM (4K QAM)	18
2.2.3 MU-MIMO	19
2.3 Améliorations de la couche MAC	19
2.3.1 Opération Multi-Lien - MLO	20
2.3.2 Support Multi-RU	20

2.3.3	Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)	21
2.3.4	Opérations distribuées entre les points d'accès voisins	21
2.3.5	Optimisation du partage de l'air (OFDMA amélioré)	21
2.3.6	Amélioration de la gestion des priorités (Modifications potentielles d'EDCA	22
2.4	L'état de l'art des travaux de recherches	22
2.4.1	Travaux connexes	22
2.4.2	Tableau comparatif	29
2.5	Conclusion	29
Chapitre 3 : Proposition et évaluation de performance		30
3.1	Introduction	30
3.2	Problématique et motivations	30
3.3	Proposition d'une nouvelle méthode d'allocation des ressources	31
3.3.1	Étapes de fonctionnement	31
3.3.2	Exemple de fonctionnement	34
3.4	Simulation et évaluation	36
3.4.1	Environnement et paramètres de simulation	36
3.4.2	Résultats de simulation	37
3.5	Conclusion	43
Conclusion générale et perspectives		45

Table des figures

1.1	Classification des réseaux sans fil	4
1.2	Modulation OFDM	5
1.3	Fonctionnement du EDCA	7
1.4	Fonctionnement du HCCA	8
1.5	Regroupement 40 MHz	10
1.6	DL MU-MIMO	11
1.7	Diagramme de 256 QAM	12
1.8	Différence entre modulation 256-QAM et 1024-QAM	13
1.9	BSS Coloring	14
1.10	Target Wake Time (TWT)	15
2.1	Répartition des bandes de fréquences Wi-Fi	18
2.2	Diagramme de 4k-QAM	18
2.3	MU-MIMO 16 antennes	19
2.4	Multi Link Opération	20
2.5	Support Multi-RU	20
2.6	Hybrid Automatic Repeat Request	21
2.7	Configuration d'un réseau sans fil à l'aide d'un point d'accès sans fil (WAP)	21
2.8	OFDMA dans le wifi 7	22
2.9	Organigramme de l'algorithme proposé	23
2.10	Organigramme de la procédure algorithmique du côté de la station (STA)	24
2.11	Organigramme de la procédure algorithmique du côté du point d'accès (AP)	25
2.12	Exemple de fonctionnement de NCRA, NUORA et NGRA	26
2.13	Illustration de l'approche hybride UORA proposée.	27
2.14	Schéma bloc du GRA	28
3.1	Organigramme amélioré pour la proposition	33
3.2	Logo Matlab	36
3.3	Taux d'utilisation des RUs selon le nombre de stations.	37
3.4	Débit moyen VO en fonction du nombre de stations	38
3.5	Débit moyen VI en fonction du nombre de stations	39
3.6	Débit moyen global en fonction du nombre de stations	40
3.7	Latence moyenne VO en fonction du nombre de stations	41
3.8	Latence moyenne VI en fonction du nombre de stations	42
3.9	Latence moyenne globale en fonction du nombre de stations	43

Liste des tableaux

1.1	Résumé des normes Wi-Fi avec améliorations physiques et MAC	16
2.1	Tableau comparatif des contributions récentes selon la QoS en Wi-Fi 7. .	29
3.1	Paramètres de simulation utilisés	36

Liste des abréviations

AC Access Category.

AP Access Point.

BSR Buffer Status Report.

BSRP Buffer Status Report Poll.

DCF Distributed Coordination Function.

DSSS Direct-Sequence Spread Spectrum.

EDCA Enhanced Distributed Channel Access.

EDCAF Enhanced Distributed Channel Access Function.

H-IoT Healthcare Internet of Things.

HCCA HCF-Controlled Channel Access.

HCF Hybrid Coordination Function.

HR-DSSS High Rate DSSS.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IoT Internet of Things.

MAC Medium Access Control.

MIMO Multiple Input Multiple Output.

MPDU MAC Protocol Data Unit.

MSDU MAC Service Data Unit.

MU-MIMO Multi-User Multiple Input Multiple Output.

OFDMA OFDM Access.

PCF Point Coordination Function.

QAP QoS-enhanced Access Point.

QoS Quality of Service.

RTS/CTS Request-to-Send/ Clear-to-Send.

RU Resource Unit.

SIFS Short Inter-Frame Spacing..

TF Trigger Frame.

TXOP Transmission Opportunity.

UL Up-Link.

UP User Priority.

WBAN Wireless Body Area Network.

WIFI Wireless Fidelity.

WLAN Wireless Local Area Network.

WMAN Wireless Metropolitan Area Network.

WPAN Wireless Personal Area Network.

WWAN Wireless Wide Area Network.

Introduction Générale

Depuis plusieurs décennies, les réseaux sans fil, en particulier les WLAN (Wireless Local Area Networks), occupent une place centrale dans notre quotidien. Qu'il s'agisse d'un usage domestique, professionnel ou public, ils permettent un accès rapide et flexible à Internet, sans contrainte physique de câblage. Depuis l'apparition de la première norme IEEE 802.11 en 1997, de nombreuses améliorations ont été apportées pour accompagner l'évolution des besoins en matière de débit, de portée et de qualité de service. Ces progrès se sont traduits par l'introduction de nouvelles techniques de transmission et d'accès au canal, rendant les communications sans fil de plus en plus performantes.

Ces dernières années, le développement rapide de l'Internet des Objets (IoT) et l'arrivée d'applications exigeantes comme la réalité virtuelle, les systèmes médicaux connectés ou encore les processus industriels intelligents, ont profondément changé les attentes vis-à-vis des réseaux sans fil. Il ne s'agit plus uniquement d'assurer une connexion rapide, mais aussi de garantir une très faible latence, une haute fiabilité et une capacité à gérer un grand nombre d'équipements simultanément. Les réseaux doivent donc évoluer pour répondre à ces nouveaux défis.

C'est dans cette dynamique que s'inscrit le Wi-Fi 7, ou IEEE 802.11be, qui représente la prochaine grande avancée dans l'univers des réseaux WLAN. Il propose un ensemble d'innovations techniques pensées pour améliorer encore davantage les performances et l'efficacité des réseaux sans fil, notamment dans les environnements denses ou les applications critiques. L'élargissement des bandes de fréquence, l'augmentation de la largeur des canaux, ainsi que de nouvelles méthodes d'accès multi-utilisateurs font partie des éléments-clés de cette nouvelle norme.

Ce mémoire s'organise en trois grandes parties. Dans le premier chapitre, nous allons revenir sur l'évolution des réseaux sans fil locaux, en retraçant les étapes clés du développement des normes IEEE 802.11 jusqu'à aujourd'hui. Le deuxième chapitre sera consacré à une présentation détaillée de la norme Wi-Fi 7, ainsi qu'à une revue des travaux de recherche existants qui y sont liés. Enfin, dans le dernier chapitre, nous allons proposer une amélioration d'un mécanisme existant d'accès radio basé sur l'OFDMA, en cherchant à optimiser l'allocation des ressources. Cette proposition sera testée à l'aide de simulations réalisées sous MATLAB afin d'évaluer ses performances par rapport aux approches existantes.

À travers ce mémoire, notre objectif est de contribuer à la réflexion autour de la gestion des ressources radio dans les futurs réseaux Wi-Fi, en particulier dans les contextes où la réactivité et la fiabilité sont cruciales, comme c'est le cas pour l'IoT en temps réel.

Chapitre 1

L'évolution des réseaux locaux sans fil

1.1 Introduction

L'essor des réseaux sans fil repose sur la nécessité croissante de mobilité et de connectivité. Depuis les premiers réseaux WLAN développés dans les années 1990, les standards n'ont cessé d'évoluer pour répondre aux besoins croissants en bande passante, en sécurité et en efficacité énergétique (Cisco, 2021). Les avancées technologiques ont permis l'intégration des réseaux WLAN dans des domaines variés tels que l'Internet des Objets (IoT), les infrastructures industrielles et les services de cloud computing.

Dans ce chapitre, nous allons retracer cette évolution incroyable, depuis les débuts des réseaux sans fil jusqu'aux innovations récentes comme le Wi-Fi 6 (802.11ax). Nous verrons comment les WLAN s'intègrent dans un univers plus vaste de technologies sans fil, allant des capteurs portables (WBAN) sur notre corps aux réseaux qui couvrent des villes entières (WMAN).

1.2 Classification des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil sont partout autour de nous, facilitant la communication sans câbles. Ils se déclinent en plusieurs catégories selon leur portée et leur usage [1]. Découvrons les ensembles :

1.2.1 Réseaux corporels sans fil

Les Réseaux Corporels Sans Fil (WBAN) sont des systèmes composés de capteurs miniatures placés sur ou à l'intérieur du corps humain pour surveiller des paramètres physiologiques comme le rythme cardiaque ou la température corporelle. Ces capteurs communiquent sans fil avec un nœud central, qui transmet les informations à un serveur distant, permettant une surveillance médicale en temps réel, indépendamment du lieu du patient. Cette flexibilité permet aux individus de continuer leurs activités quotidiennes tout en étant surveillés.

Les WBAN sont particulièrement avantageux dans des contextes comme la prise en charge des personnes âgées, des patients atteints de maladies chroniques ou des athlètes. Ces réseaux offrent aussi une surveillance plus continue et moins invasive par rapport aux systèmes traditionnels souvent encombrants et fixes. Cependant, l'adoption généralisée des WBAN reste confrontée à des défis, tels que l'intégration dans les systèmes médicaux existants et les préoccupations relatives à la sécurité et à la confidentialité des données transmises. Malgré cela, les WBAN représentent une avancée significative pour améliorer la qualité des soins de santé et l'optimisation des performances sportives.

1.2.2 Réseaux personnels sans fil

Les réseaux personnels sans fil (WPAN) permettent de connecter des appareils comme des téléphones ou des ordinateurs sur de courtes distances (environ 10 mètres). Il en existe trois types :

Le groupe A est économique et utilise une faible consommation d'énergie, idéal pour des connexions simples. Le groupe B offre de meilleures performances pour des applications comme la téléphonie. Le groupe C, comme Bluetooth, ajoute des fonctions avancées comme la sécurité et la connexion à d'autres réseaux.

Exemples de WPAN : Bluetooth, ZigBee (faible consommation), et les liaisons infrarouges (utilisées dans les télécommandes).

1.2.3 Réseaux locaux sans fil

Les réseaux locaux sans fil (WLAN) connectent des appareils via la technologie radio sur une portée allant jusqu'à 500 m, assurant ainsi la couverture de campus, bâtiments ou hôpitaux. Parmi les standards de WLAN, le Wi-Fi (basé sur la norme IEEE 802.11) permet, via des points d'accès ou hotspots, de connecter des dispositifs (ordinateurs, smartphones, objets connectés) avec des débits pouvant dépasser 450 Mbps sur des périphériques à double canal. Le standard Hiperlan, quant à lui, se décline en deux versions : Hiperlan1 offre des débits de 1 à 2 Mbps, tandis que Hiperlan2 atteint jusqu'à 54 Mbps en utilisant la bande de 5 GHz, chaque appareil se connectant au point d'accès fournissant le meilleur signal.

1.2.4 Réseaux métropolitains sans fil

Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN) couvrent de 5 à 50 km et connectent plusieurs réseaux locaux (comme sur un campus ou dans une ville) pour offrir un haut débit. Par exemple, WiMax (IEEE 802.16) se décline en versions fixe (802.16-2004) et mobile (802.16e/2005), utilisant l'OFDM et le MIMO pour assurer une transmission rapide et fiable. D'autres solutions, comme HiperMAN, étendent la couverture en se basant sur le même matériel que les WLAN.

1.2.5 Réseaux étendus sans fil

Les réseaux étendus sans fil (WWAN) offrent une couverture mondiale en connectant divers réseaux cellulaires. Le GSM et ses extensions (GPRS, EDGE) assurent principalement la communication vocale et intègrent des services de données via une transmission par paquets. Le GPRS améliore le GSM en permettant une gestion plus efficace des données, tandis que l'UMTS complète ces réseaux en apportant des services multimédias, même si sa mise en œuvre nécessite d'importants investissements et des adaptations aux normes actuelles.

CLASSIFICATION DES RÉSEAUX SANS FIL SELON LA PORTÉE

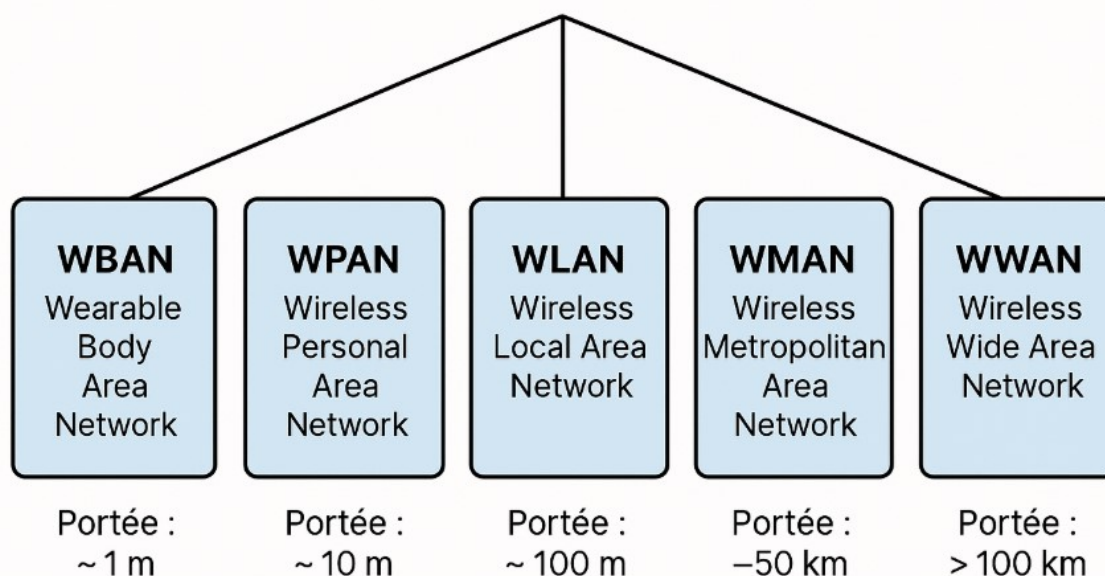


FIG. 1.1 : Classification des réseaux sans fil

1.3 Aperçu du standard 802.11

Le terme « 802.11 » ou « IEEE 802.11 » ne vous dit probablement rien. Pourtant, vous êtes quotidiennement en contact avec 802.11. C'est en effet ainsi que l'on désigne les normes Wi-Fi, c'est-à-dire la connexion d'un média à la couche de transmission de bits dans un réseau radio local. La norme 802.11 a été publiée pour la première fois en 1997 par l'Institut des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens (IEEE) et a été rapidement intégrée au sein de divers appareils. Aujourd'hui, IEEE 802.11 est la norme la plus connue et la plus utilisée pour les réseaux sans fil. Il existe plusieurs générations de réseaux locaux sans fil [2].

La norme IEEE 802.11 établit deux couches essentielles du réseau model OSI : la couche physique, responsable de la transmission des ondes radioélectriques, et la couche MAC, qui gère la manière dont les dispositifs se répartissent le réseau pour éviter toute interférence.

1.4 Les WLANs pour la transmission des données

La norme 802.11b a été adoptée en 1999. En raison de l'utilisation du DSSS Direct Sequence Spread Spectrum et de la fréquence de 2,4 GHz, c'est la première norme Wi-Fi qui a pu être utilisée avec différents équipements. Le protocole peut fonctionner avec une portée d'environ 300 mètres en extérieur avec une alimentation d'énergie ne dépassant pas 11 Mbps. Les échanges sont effectués sur l'un des trois canaux radio. La capacité de la norme a ensuite été élargie dans l'HR-DSSS [3].

En parallèle, l'IEEE a introduit la norme 802.11a, encore appelé Wi-Fi 5, cette norme permet d'obtenir du haut débit (54 Mbit/s) tout en spécifiant 8 canaux. Mais elle n'est pas compatible avec la 802.11b. Elle utilise la technique de modulation OFDM [4].

Face à cette incompatibilité, l'IEEE a introduit en 2003 la norme 802.11g, La 802.11a offre un débit assez élevé mais la portée est plus faible et son usage en extérieur est souvent interdit. Pour répondre à ces problèmes, l'IEEE développe la nouvelle norme

802.11g, offrant le même débit que le Wi-Fi 5, tout en restant compatible avec le Wi-Fi 2 (bande de fréquences de 2.4 GHz). Cette norme vise aussi à remplacer Wi-Fi 2 sur la bande 2.4 GHz mais avec un débit plus élevé pouvant atteindre les 54 Mbits/s. Elle utilise aussi la technique de modulation OFDM [4].

1.4.1 Couche physique

On définit dans cette sous-section les différentes techniques de modulation utilisées dans IEEE 802.11 ainsi que les bandes de fréquences utilisées [5].

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

Le DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) est une technique de modulation qui fonctionne en étalant le signal radio sur une large bande de fréquences. Cela permet de réduire les interférences et d'améliorer la robustesse du signal contre le bruit.

- **HR-DSSS(High Rate DSSS)**

Le HR-DSSS est une évolution du DSSS, utilisée notamment dans la norme 802.11b (Wi-Fi 1), permettant d'atteindre un débit de 11 Mbps contre seulement 2 Mbps avec le DSSS classique.

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

L'OFDM est une technique de modulation introduite avec les normes 802.11a (Wi-Fi 2) et 802.11g (Wi-Fi 3). Contrairement au DSSS, qui utilise une seule porteuse étalée sur la bande, l'OFDM divise le signal en plusieurs sous-porteuses orthogonales, ce qui réduit les interférences et améliore l'efficacité spectrale.

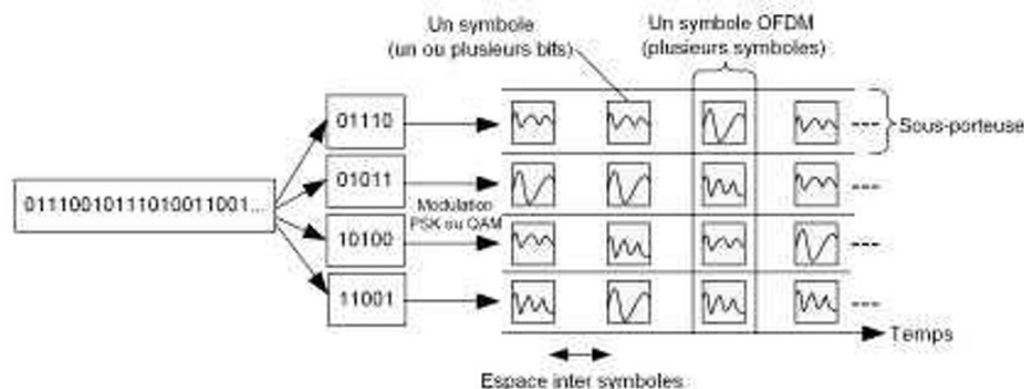


FIG. 1.2 : Modulation OFDM

- **Canalisation des bandes 2,4 GHz et 5 GHz**

La bande 5 GHz est plus rapide et stable, mais sa portée est plus courte et elle traverse mal les obstacles. À l'inverse, la bande 2.4 GHz couvre une plus grande distance mais est plus sujette aux interférences, car de nombreux appareils l'utilisent (Bluetooth, micro-ondes, etc.). Même si le 5 GHz semble plus performant, les deux bandes restent complémentaires selon l'usage.

1.4.2 Couche MAC

- **DCF (Distributed Coordination Function) :** C'est un mode qui peut être utilisé par tous les mobiles, et qui permet un accès équitable au canal radio sans aucune centralisation de la gestion de l'accès (mode totalement distribué). Ce mode

peut aussi bien, être utilisé lorsqu'il n'y a pas de stations de base (mode ad hoc) que lorsqu'il y en a (mode infrastructure) [6].

- **PCF (Point Coordination Function) :** C'est une méthode optionnelle et donc peu ou pas implémentée dans les matériels 802.11. La PCF consiste en une gestion centralisée des ressources. C'est le point d'accès qui ordonne les transmissions et distribue le droit à la parole. C'est par l'intermédiaire de trames d'administration définies à cet effet qu'une sollicitation explicite est effectuée auprès d'une station (mécanisme de polling) pour lui attribuer le droit à émettre [6].

1.5 Les WLANs pour la qualité de service

Pour répondre aux exigences des applications en temps réel comme la VoIP (Voix sur IP) ou le streaming vidéo, l'IEEE a introduit en 2005 la norme 802.11e. Celle-ci améliore la gestion du trafic en intégrant une Qualité de Service (QoS) directement à la couche MAC des réseaux sans fil [2, 5].

Contrairement à la norme 802.11 classique, qui traite toutes les données de manière uniforme, la 802.11e optimise les mécanismes DCF et PCF afin de prioriser les flux sensibles, garantissant ainsi une meilleure fluidité pour les services critiques [6, 7].

Les équipements compatibles avec cette norme sont appelés QAP (QoS-enhanced Access Point) pour les points d'accès et QSTA (QoS-enabled Station) pour les terminaux connectés. Ils reposent sur une nouvelle structure, le HCF (Hybrid Coordination Function), qui combine deux méthodes d'accès pour optimiser la gestion des priorités réseau et améliorer la performance globale du Wi-Fi [2].

1.5.1 EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)

EDCA est une amélioration du DCF (Distributed Coordination Function) introduite par la norme IEEE 802.11e pour prendre en charge la qualité de service (QoS) dans les réseaux Wi-Fi. Contrairement au DCF, qui traite toutes les transmissions de manière équitable, EDCA introduit une différenciation du trafic en classant les paquets en quatre catégories d'accès (ACs) : Voix, Vidéo, Best Effort et Background. Chaque catégorie dispose de paramètres de contention spécifiques (AIFS, CWmin, CWmax, TXOPLimit) qui influencent son accès au canal. Cette différenciation permet aux flux à forte exigence en temps réel, comme la voix et la vidéo, d'avoir un accès prioritaire au médium, réduisant ainsi la latence et améliorant la qualité globale du réseau. Chaque flux de données est classé selon son niveau de priorité et bénéficie d'un accès privilégié au canal en fonction de son intervalle de temps et de son importance. Pour cela, huit niveaux de priorité utilisateur (User Priority - UP) sont définis, répartis en quatre catégories d'accès (Access Category - AC) :

Chaque Access Category (AC) dispose de sa propre file d'attente et d'un ensemble de paramètres spécifiques pour gérer l'accès au canal.

Une fonction appelée EDCA Function (EDCAF) est responsable de l'arbitrage et de la transmission des trames. Lorsque des trames de données arrivent à la couche MAC, elles sont classées dans l'AC appropriée et placées dans la file d'attente correspondante.

Dans cette architecture, chaque AC agit comme une station virtuelle, ce qui peut entraîner des collisions internes lorsque plusieurs catégories souhaitent émettre simultanément depuis la même station physique. Dans ce cas, l'AC ayant la priorité la plus élevée est autorisée à transmettre, tandis que les autres attendent et augmentent leur fenêtre de contention [5].

EDCA définit plusieurs paramètres d'accès permettant d'ajuster la différenciation des priorités :

- **AIFS** : Temps d'attente avant la contention.
- **CWmin / CWmax** : Fenêtre de contention.
- **TXOPLimit** : Durée maximale d'une transmission.

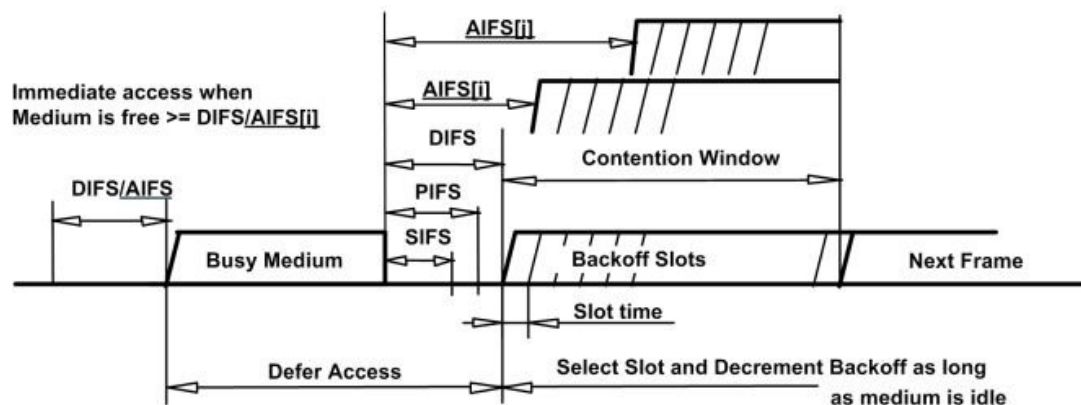


FIG. 1.3 : Fonctionnement du EDCA

Ces paramètres sont stockés dans chaque station QSTA (QoS Station) et influencent la rapidité d'accès au canal. Les ACs à haute priorité bénéficient de valeurs plus faibles pour ces paramètres, leur permettant d'obtenir un accès plus rapide au médium.

Procédure de transmission dans EDCA

Chaque AC dans une station QSTA fonctionne comme une station virtuelle, avec un accès indépendant au canal.

Écoute et contention : Avant de transmettre, l'AC doit écouter le canal et attendre une période correspondant à son $AIFS(AC)$. Si le canal est libre, la station démarre un compteur de Backoff avec une valeur aléatoire choisie dans l'intervalle $[0, CW]$. Si une activité est détectée sur le canal pendant ce délai, le compteur s'arrête et reprend une fois le canal à nouveau libre [8].

Transmission et opportunité de transmission (TXOP) : Lorsque le compteur atteint zéro, l'AC commence la transmission. Elle peut envoyer plusieurs trames successives dans une limite définie par $TXOPLimit(AC)$, en échangeant des données et des acquittements séparés par un SIFS (Short Inter-Frame Space) [8].

Gestion des collisions et retransmissions : Si la station ne reçoit pas d'acquiescement (ACK), elle considère la transmission comme un échec et doit attendre une période $AIFS(AC)$ avant de retenter l'envoi. En cas de collision, la CW (Contention Window) est doublée jusqu'à atteindre $CWmax(AC)$. Si le nombre de tentatives dépasse une limite fixée (Retry Limit), la trame est abandonnée [9].

Post-Backoff et gestion du trafic : Après chaque transmission réussie, l'AC exécute un post-backoff aléatoire, même si elle n'a plus de trames en attente. Cela permet d'éviter qu'une même station monopolise l'accès au canal. Si de nouvelles trames sont disponibles après ce post-backoff, la station tente immédiatement d'accéder au canal. Sinon, elle reste en veille jusqu'à l'arrivée de nouveaux paquets [8].

Utilisation du RTS/CTS : Comme dans DCF, le mécanisme RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send) peut être utilisé pour minimiser les risques de collision, notamment pour les transmissions longues [8].

- **Bande passante demandée** : Débit nécessaire pour assurer la qualité de service [2].
- **Retard maximal toléré** : Temps maximal avant transmission des données sensibles (Voix/Vidéo) [7].

Procédure de transmission dans HCCA

- **Attribution du canal par le HC**
 - Le **Hybrid Coordinator (HC)** analyse les besoins des stations QSTA [2, 5].
 - Il attribue des **TXOPs** selon les demandes et la disponibilité du médium [2].
 - Les **QSTAs** sélectionnées peuvent transmettre sans passer par un backoff [7].
- **Transmission pendant le TXOP**
 - La station envoie ses trames tant que son **TXOP** n'est pas expiré [2].
 - Les trames sont séparées par un **SIFS**, sans nécessité de contention [5].
- **Fin de transmission et nouvelle allocation**
 - Lorsque le **TXOP** se termine, la station cesse sa transmission [2].
 - Le **HC** peut accorder un nouveau **TXOP** à une autre station ou basculer en période de contention (CP) [5, 7].
- **Gestion des erreurs et retransmissions**
 - En cas de collision ou d'erreur, la station ne retransmettra qu'à la prochaine allocation de **TXOP** [2].
 - Cela **réduit** la congestion et **améliore** la gestion des ressources radio [5].

1.6 Les WLANs Pour Le Haut Débit 802.11n

L'introduction de la norme 802.11n a marqué une avancée majeure avec l'ajout de la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), permettant une augmentation significative du débit et de la portée [10].

1.6.1 Couche Physique

La couche physique du 802.11n prend en charge plusieurs flux spatiaux pour maximiser le débit, atteignant jusqu'à 600 Mbps.

MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Les systèmes de communication sans fil basés sur une seule antenne en émission et en réception (SISO) sont devenus obsolètes avec l'émergence de la technologie MIMO. Cette dernière améliore considérablement l'efficacité spectrale en exploitant plusieurs antennes pour la transmission et la réception des signaux, grâce à la diversité et au multiplexage spatial [10].

Avec le multiplexage spatial, les données à transmettre sont fragmentées en plusieurs flux et envoyées simultanément par différentes antennes. À la réception, si chaque flux possède une signature spatiale distincte, le récepteur peut les différencier et reconstituer

les données d'origine. Cela permet d'exploiter les multiples chemins que peut emprunter le signal, optimisant ainsi les performances du réseau.

Dans la norme Wi-Fi 802.11n, le nombre de flux simultanés dépend du plus petit nombre d'antennes entre l'émetteur et le récepteur. Par exemple, si un émetteur dispose de trois antennes mais que le récepteur n'en possède que deux, seules deux transmissions parallèles seront possibles. On parle alors d'une configuration MIMO $3 \times 2 \times 2$: trois antennes à l'émission, deux à la réception et deux flux transmis en parallèle. Lorsque les conditions radio sont favorables, le multiplexage spatial peut permettre d'atteindre un débit jusqu'à quatre fois supérieur avec une configuration MIMO $4 \times 4 \times 4$ [11].

Regroupement 40 MHz

La norme 802.11n a introduit l'agrégation des canaux comme une solution pour améliorer les performances du Wi-Fi. Cette technique consiste à regrouper deux canaux de 20 MHz afin de former un seul canal de 40 MHz, ce qui permet d'augmenter les débits de connexion. Grâce à cette approche, la vitesse maximale, initialement limitée à 54 Mbps, peut atteindre jusqu'à 300 Mbps [11].

Un canal de 40 MHz occupe autant d'espace spectral que deux canaux de 20 MHz distincts. Toutefois, cette configuration offre une capacité légèrement supérieure au double du débit, car la bande de garde située entre les deux canaux peut également être exploitée pour la transmission des données. En général, l'utilisation des canaux de 40 MHz est plus efficace dans la bande des 5 GHz, qui dispose d'un grand nombre de canaux non superposés [10].

En revanche, dans la bande des 2,4 GHz, où seuls trois canaux de 20 MHz (1, 6 et 11) ne se chevauchent pas, l'agrégation est plus compliquée. L'association de deux de ces canaux pour former un canal de 40 MHz conduit alors à une situation où il n'existe plus qu'un seul canal de 40 MHz non superposé, limitant ainsi l'intérêt de cette approche sur cette fréquence.

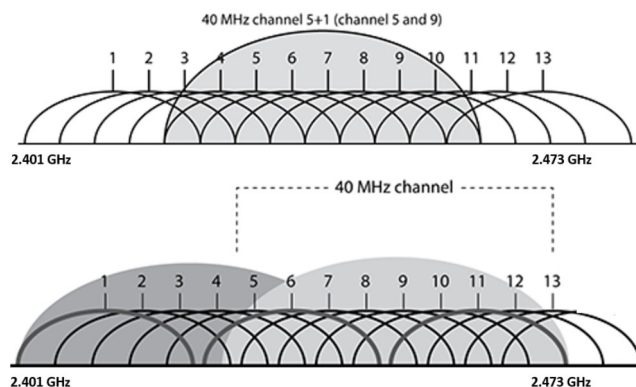


FIG. 1.5 : Regroupement 40 MHz

1.6.2 Couche MAC

Le standard 802.11n améliore l'agrégation des trames pour réduire l'overhead de transmission et optimiser l'utilisation du canal [12].

MSDU (MAC Service Data Unit)

L'agrégation A-MSDU consiste à combiner plusieurs unités de service de données (MSDU), c'est-à-dire des paquets provenant des couches supérieures, en une seule trame MAC (MPDU). En regroupant ces MSDU, on partage un unique en-tête pour l'ensemble

du bloc, ce qui réduit la surcharge et améliore l'efficacité de transmission. Pour que cette méthode soit applicable, il faut que tous les MSDU regroupés aient le même destinataire et des paramètres de qualité de service identiques [7, 12].

MPDU(MAC Protocol Data Unit)

L'agrégation A-MPDU, quant à elle, regroupe plusieurs trames MAC complètes (MPDU), chacune conservant son propre en-tête et son CRC, en une seule grande transmission. Cette technique permet d'envoyer plusieurs trames simultanément et d'utiliser un mécanisme d'acquiescement en bloc (block ACK) pour valider l'ensemble, ce qui réduit les délais d'acquiescement et augmente l'efficacité globale du réseau [12].

Agrégation à deux niveaux

Pour maximiser l'utilisation du canal, la norme 802.11n combine les deux approches précédentes dans une agrégation à deux niveaux. D'un côté, l'agrégation A-MSDU réduit la surcharge en regroupant plusieurs paquets de données en une seule trame MAC, et de l'autre, l'agrégation A-MPDU permet de regrouper plusieurs trames déjà formées pour diminuer les délais liés aux en-têtes et aux acquiescements individuels. Cette double stratégie optimise la transmission et augmente significativement le débit effectif du réseau [7, 12].

1.7 Les WLANs Pour Très Haut Débit 802.11ac

Adoptée en 2013, la norme 802.11ac permet aux appareils de se connecter simultanément sur les bandes 2,4 GHz et 5 GHz. Elle reste compatible avec les anciens standards (802.11b/g/n) et offre des débits impressionnants jusqu'à 7 Gbps dans la bande inférieure à 6 GHz. Aujourd'hui, la grande majorité des routeurs domestiques supportent cette norme [13].

1.7.1 Couche Physique

Il existe plusieurs technique et améliorations au niveau de la couche PHY [13], nous allons citer :Down-Link MU-MIMO et le 256 QAM :

- **Down-Link MU-MIMO** : c'est une innovation qui permet à un point d'accès de faire partager en meme temps plusieurs flux de données vers différents clients, ce qui améliore considérablement la capacité du réseau et facilite la gestion des environnements où de nombreux appareils sont connectés.



FIG. 1.6 : DL MU-MIMO

De plus, en optimisant la répartition des ressources radio, le Down-Link MU-MIMO contribue à réduire la latence et offre à utilisateur une expérience plus fluide pour des applications gourmandes en bande passante, telles que le streaming vidéo ou les jeux en ligne.

- **256 QAM** : Le 802.11ac inclut la prise en charge obligatoire des précédentes modulations : BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM. C'est une technique de modulation permet de transmettre un plus grand nombre de bits par symbole, offrant ainsi des débits nettement supérieurs, surtout dans des conditions de signal optimales.

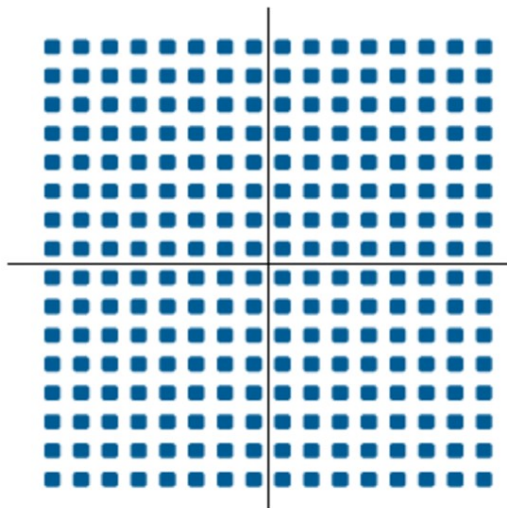


FIG. 1.7 : Diagramme de 256 QAM

1.7.2 Couche MAC

Méthode Statique

Dans 802.11ac, des améliorations statiques au niveau de la couche MAC reposent sur des réglages fixes. Par exemple, le format des trames a été repensé pour réduire la quantité d'en-têtes superflus, ce qui permet de gagner du temps lors de la transmission. De plus, l'agrégation statique consiste à regrouper un nombre prédéfini de trames MAC en une seule transmission. Cette méthode, qui ne change pas en fonction du trafic, fonctionne particulièrement bien dans des environnements où le flux de données est stable, en réduisant les délais d'acquittement et en optimisant l'utilisation du canal [14].

Méthode Dynamique

D'autre part, la norme 802.11ac intègre des mécanismes dynamiques pour ajuster la gestion des transmissions en temps réel. Par exemple, l'agrégation dynamique adapte la taille et la fréquence des regroupements de trames en fonction des fluctuations du trafic, ce qui permet d'optimiser l'utilisation du canal selon les besoins du moment. De plus, le système de TX Opportunity Sharing répartit de manière flexible les opportunités de transmission entre les différents flux, garantissant ainsi une qualité de service constante même dans des environnements très chargés [15].

1.8 Les WLANs à haute efficacité 802.11ax

En 2014, le groupe de travail IEEE 802.11 a initié le développement de la norme 802.11ax, également appelée Wi-Fi 6, pour améliorer les performances des réseaux locaux sans fil dans des environnements à haute densité.

1.8.1 Couche Physique

OFDMA et allocation d'unités de ressources (RUs) :

Wi-Fi 6 exploite l'OFDMA pour diviser un canal large en plusieurs sous-canaux (RUs) alloués dynamiquement à différents utilisateurs. Ce découpage permet d'optimiser l'utilisation du spectre, de réduire les interférences et de répondre de manière adaptée aux variations de trafic dans des environnements denses [16].

Allongement de la durée des symboles OFDM et réduction des intervalles de garde :

En quadruplant la durée des symboles, passant de $3,2 \mu\text{s}$ à $12,8 \mu\text{s}$, la norme améliore la tolérance aux délais inter-symboles et diminue la proportion de temps consacré aux intervalles de garde. Cela se traduit par une réduction notable de l'overhead, en particulier dans des conditions de propagation difficiles, ce qui est crucial pour maintenir des débits élevés [16].

Modulation 1024-QAM :

En complément des modulations classiques, la modulation 1024-QAM, bien que facultative, permet d'augmenter considérablement le débit par flux dans des environnements où la qualité du canal (rapport signal/bruit) est excellente. Cette technique offre ainsi une palette de taux de transmission plus étendue, permettant d'atteindre des débits plus élevés dans des conditions optimales [16].

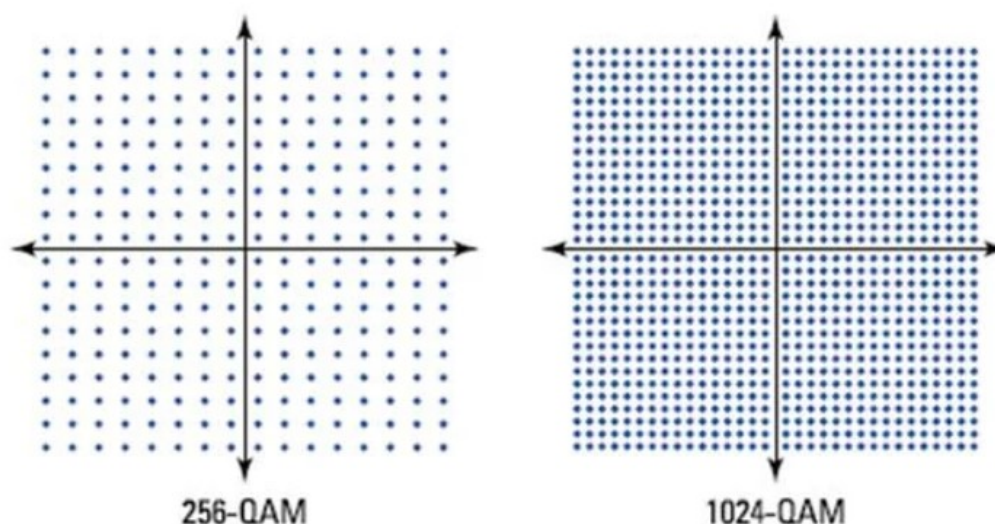


FIG. 1.8 : Différence entre modulation 256-QAM et 1024-QAM

Techniques de modulation complémentaires (DCM) :

Le Dual Carrier Modulation (DCM) peut être utilisé pour renforcer la robustesse des transmissions en dupliquant le signal sur deux tons éloignés, ce qui aide à compenser les

pertes dues aux interférences ou aux atténuations localisées. Bien que cette technique réduise le débit effectif, elle améliore la fiabilité dans des scénarios contraints [16].

Flexibilité dans l'allocation des largeurs de canaux :

La norme 802.11ax supporte des canaux de 20, 40, 80 et 160 MHz, mais contrairement aux approches précédentes, elle permet d'allouer dynamiquement ces largeurs sous forme de RUs. Cette flexibilité garantit que le spectre est exploité de manière optimale en fonction de la demande et des conditions locales, maximisant ainsi l'efficacité spectrale [16].

1.8.2 Couche MAC

Coordination multi-utilisateur via Trigger Frames :

Le Wi-Fi 6 introduit les Trigger Frames, qui permettent à l'AP de planifier et de synchroniser les transmissions uplink et downlink de plusieurs stations simultanément. Cette coordination fine réduit les risques de collisions et optimise l'utilisation du canal, en particulier lors de transmissions simultanées dans des environnements très fréquentés [17].

Structure repensée des trames avec HE-SIG-A et HE-SIG-B :

Les nouveaux champs HE-SIG-A et HE-SIG-B, présents dès le préambule, permettent de transmettre rapidement des informations essentielles telles que le MCS, la configuration des RUs et le nombre de flux spatiaux. Cela accélère la phase de décodage et assure que chaque station reçoive exactement les paramètres nécessaires pour optimiser sa transmission [16].

Mécanismes de coexistence et spatial reuse (BSS Coloring) :

Pour gérer la coexistence entre plusieurs réseaux (BSS) se chevauchant, le BSS Coloring attribue une "couleur" aux trames d'un réseau. Cette identification permet aux stations de distinguer les transmissions internes des interférences provenant d'autres BSS, facilitant ainsi une réutilisation spatiale plus efficace du spectre et réduisant les perturbations inter-réseaux [18].

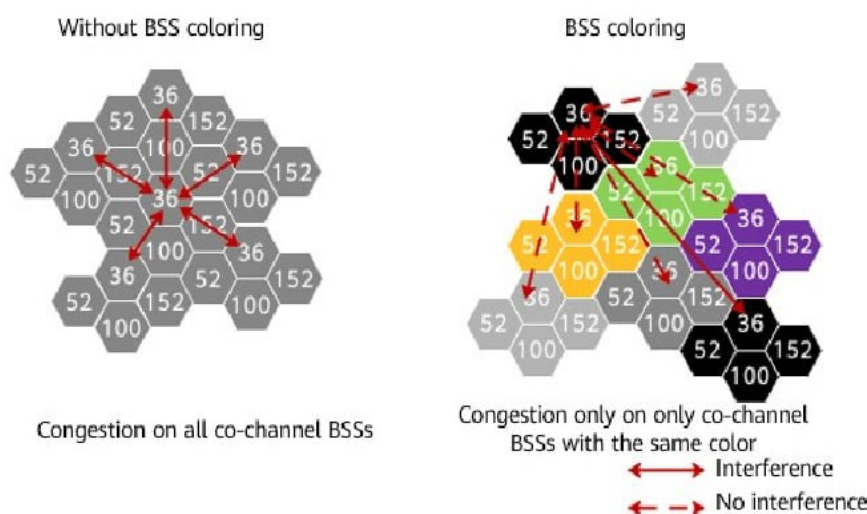


FIG. 1.9 : BSS Coloring

Adaptation dynamique des paramètres EDCA et TXOP Sharing :

L'AP peut ajuster les paramètres d'accès au canal (comme CWmin et CWmax) pour favoriser les transmissions utilisant l'OFDMA. Cette adaptation permet de réduire la concurrence avec les appareils legacy et d'assurer que les stations 802.11ax bénéficient d'un accès prioritaire au canal, notamment grâce au mécanisme de TXOP Sharing qui autorise des transmissions groupées sur différentes catégories de trafic [16].

Target Wake Time (TWT) :

Grâce au TWT, les stations planifient précisément leurs périodes d'activité et de sommeil. Ce mécanisme réduit significativement la consommation d'énergie, tout en assurant une synchronisation efficace pour les transmissions programmées, ce qui est particulièrement avantageux pour les appareils mobiles et l'IoT [19].

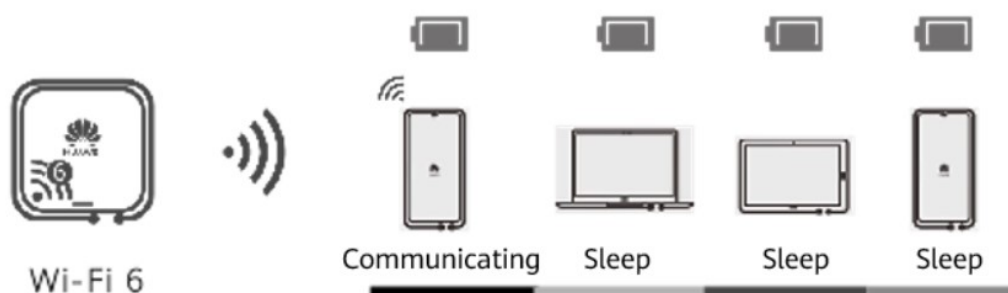


FIG. 1.10 : Target Wake Time (TWT)

Optimisation de l'agrégation et de la fragmentation des trames :

Des techniques améliorées d'agrégation (A-MPDU, A-MSDU) et une meilleure gestion de la fragmentation permettent de réduire les overheads liés aux en-têtes et aux temps morts entre les transmissions. Ces mécanismes garantissent une utilisation plus efficace de la fenêtre de transmission, surtout lors de l'envoi de petits paquets, contribuant ainsi à une amélioration globale des débits effectifs [16].

1.9 Tableau Récapitulatif

Ce tableau présente un aperçu clair des différentes normes Wi-Fi, en montrant à la fois leurs caractéristiques techniques et les améliorations apportées au contrôle d'accès au réseau. Il illustre comment les performances et l'efficacité des connexions sans fil ont progressivement évolué au fil du temps.

Norme	Année	Fréquence	Améliorations physiques	Améliorations MAC
802.11	1997	2,4 GHz	Transmission basique avec DSSS et FHSS	DCF (Distributed Coordination Function)
802.11b	1999	2,4 GHz	DSSS robuste pour meilleure portée	DCF optimisé
802.11a	1999	5 GHz	Utilisation de l'OFDM à 5 GHz pour un débit élevé	Accès plus rapide au médium
802.11g	2003	2,4 GHz	OFDM adapté à 2,4 GHz pour compatibilité et performance	Compatibilité avec 802.11b
802.11n	2009	2,4/5 GHz	MIMO (multi-antennes), OFDM, canaux 40 MHz, STBC	A-MSDU, A-MPDU, retransmission optimisée
802.11ac	2013	5 GHz	MU-MIMO, modulation 256-QAM, canaux jusqu'à 160 MHz	TXOP étendu, QoS renforcée
802.11ax	2019	2,4/5 GHz	OFDMA, MU-MIMO, modulation 1024-QAM, efficacité spectrale	TWT, gestion efficace des utilisateurs avec OFDMA

TAB. 1.1 : Résumé des normes Wi-Fi avec améliorations physiques et MAC

1.10 Conclusion

L'évolution des WLANs a permis d'améliorer considérablement la connectivité sans fil. Avec l'arrivée de 802.11ax et bientôt 802.11be, les performances ne cessent d'être optimisées pour répondre aux besoins croissants des utilisateurs. L'essor des réseaux sans fil joue un rôle clé dans le développement des infrastructures numériques, de l'industrie 4.0 et des systèmes de communication avancés. Par exemple, l'utilisation des WLANs dans les hôpitaux permet une meilleure gestion des dossiers médicaux électroniques et une communication instantanée entre le personnel soignant.

Chapitre 2

Standard de IEEE 802.11be et synthèse bibliographique

2.1 Introduction

Après le succès de la norme 802.11ax (Wi-Fi 6), qui s'est concentrée sur l'amélioration de l'efficacité spectrale et de la couverture dans les environnements denses, l'IEEE 802.11 a entrepris le développement de la prochaine génération qui est l'IEEE 802.11be, également connue sous le nom de Wi-Fi 7. Le Wi-Fi 7 se positionne comme la prochaine étape majeure dans l'évolution du Wi-Fi, visant à repousser encore davantage les limites des performances sans fil. L'objectif principal du Wi-Fi 7 est de fournir un débit extrêmement élevé (extremely high throughput), potentiellement atteignant des débits nominaux supérieurs à 46 Gbps, tout en offrant une latence plus faible et une fiabilité accrue. Pour atteindre ces objectifs, le Wi-Fi 7 s'appuie sur l'extension des techniques utilisées dans les normes précédentes, telles que l'augmentation de la bande passante (jusqu'à 320 MHz) et du nombre de flux spatiaux (jusqu'à 16 en MU-MIMO). Il introduit également de nouvelles fonctionnalités innovantes qu'on va découvrir par la suite.

Dans ce chapitre, nous abordons les améliorations de la couche PHY pour atteindre des débits plus élevés et celles de la couche MAC pour une gestion optimisée des ressources. Nous présentons également une synthèse bibliographique sur IEEE 802.11be, avant de définir la problématique de l'intégration de ces innovations afin de répondre aux exigences de performance des réseaux de prochaine génération.

2.2 Améliorations de la couche physique

Pour répondre à la demande croissante de bande passante imposée par des applications toujours plus gourmandes, comme la vidéo 8K, le Wi-Fi 7 mise grosse sur une refonte de sa couche physique. L'objectif principal est d'atteindre des débits de données extrêmement élevés (EHT), et pour cela, plusieurs leviers technologiques sont actionnés. Ces améliorations s'appuient en partie sur les fondations solides posées par Wi-Fi 6 (802.11ax), tout en introduisant des innovations majeures.

2.2.1 Bande Passante des Canaux Jusqu'à 320 MHz

Doublement de la largeur de bande maximale des canaux par rapport au Wi-Fi 6, permettant d'augmenter considérablement le débit. Alors que Wi-Fi 6 plafonne à une largeur de canal maximale de 160 MHz, Wi-Fi 7 franchit une étape significative en doublant cette capacité pour atteindre 320 MHz. Cette augmentation de la largeur de bande se traduit directement par une augmentation proportionnelle du débit de données potentiel. Imaginez l'autoroute de données qui s'élargit, permettant à beaucoup plus d'informations de

transiter simultanément. Comme l'indique la Figure 2.1, Wi-Fi 7 exploite pleinement le potentiel des bandes de fréquences disponibles pour offrir ces largeurs de canal accrues.

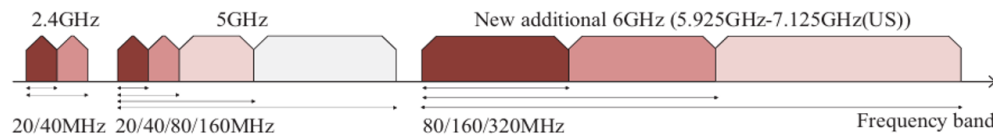


FIG. 2.1 : Répartition des bandes de fréquences Wi-Fi

Utilisation potentielle accrue de la bande 6 GHz. L'introduction de la bande de fréquences des 6 GHz avec le Wi-Fi 6E ouvre des perspectives intéressantes pour Wi-Fi 7. Cette bande, moins encombrée et spécifiquement dédiée aux transmissions Wi-Fi, offre un spectre plus large et contigu, idéal pour l'implémentation des canaux de 320 MHz. En effet, on précise que Wi-Fi 7 supporte une bande passante maximale de 320 MHz sur la bande 6 GHz, en plus des bandes 2.4 GHz et 5 GHz avec des largeurs de canal plus conventionnelles. Il est important de noter, que la disponibilité de la bande 6 GHz peut varier selon les régions [20].

2.2.2 Modulation 4096-QAM (4K QAM)

La norme Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) introduit une modulation d'ordre supérieur, le 4096 QAM, qui permet d'encoder 12 bits par symbole, contre 10 bits avec le 1024 QAM utilisé en Wi-Fi 6. Autrement dit, pour une même bande passante et un nombre de flux spatiaux identiques, le 4096 QAM offre théoriquement un gain de débit d'environ 20% bien que ce gain soit relativement modeste par rapport aux augmentations précédentes (par exemple, 33% lors du passage du 64 QAM au 256 QAM et 25% pour le 1024 QAM). Ce gain de performance n'est toutefois pas obtenu sans compromis. En effet, l'augmentation de la densité d'information par symbole nécessite un rapport signal sur bruit (SNR) très élevé, typiquement autour de 40 dB voire plus, ce qui est difficile à atteindre dans les scénarios Wi-Fi courants. Pour compenser ce besoin en SNR, des techniques telles que la formation de faisceaux (beamforming) sont utilisées, surtout lorsque le point d'accès dispose d'un grand nombre d'antennes et que le nombre de flux spatiaux est limité. Dans ces conditions, notamment dans des situations où les transmissions multi-utilisateurs ne sont pas possibles, l'utilisation d'un ordre de modulation élevé devient le seul moyen d'augmenter le débit.

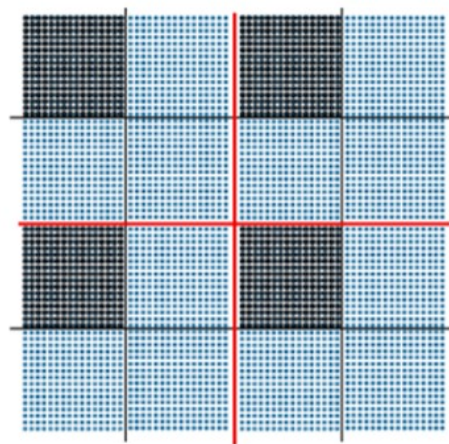


FIG. 2.2 : Diagramme de 4k-QAM

C'est pourquoi le 4K QAM est pris en charge de manière optionnelle par la norme 802.11be. Ainsi, bien que cette modulation permette d'atteindre des débits théoriques pouvant aller jusqu'à environ 46 Gbps lorsqu'elle est combinée à d'autres avancées (comme l'élargissement des canaux jusqu'à 320 MHz et l'augmentation du nombre de flux spatiaux jusqu'à 16), ses bénéfices ne seront pleinement réalisés que dans des environnements où les conditions de signal sont optimales [21].

2.2.3 MU-MIMO

La norme Wi-Fi 7 permet d'augmenter considérablement le nombre de flux spatiaux, offrant ainsi la possibilité de supporter jusqu'à 16 flux simultanés grâce à la technologie MU-MIMO. Cela signifie que le point d'accès peut envoyer et recevoir plusieurs flux de données en parallèle vers différents clients, optimisant ainsi l'efficacité spectrale et exploitant pleinement les débits élevés fournis par des connexions comme la fibre optique jusqu'au domicile. En pratique, cette capacité à multiplier les flux permet d'améliorer la performance dans des environnements intérieurs denses, où chaque appareil bénéficie de transmissions plus rapides et plus stables.

Pour réduire la surcharge liée à l'acquisition des informations sur l'état du canal (CSI) dans un contexte de multiplexage spatial important, le Wi-Fi 7 envisage une méthode de sondage implicite, qui s'appuie sur la réciprocité des canaux montant et descendant via les pilotes envoyés par les stations. Cette approche, conjuguée aux techniques avancées de MU-MIMO, permet d'optimiser la gestion des ressources tout en limitant le temps de collecte des informations, assurant ainsi une transmission fiable même dans des scénarios où le nombre de flux par station est limité à quatre et le nombre total de stations multiplexées spatialement est de huit [22].



FIG. 2.3 : MU-MIMO 16 antennes

2.3 Améliorations de la couche MAC

La norme IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) met l'accent sur des améliorations majeures de la couche MAC, en complément des évolutions de la couche physique. Ces améliorations visent à optimiser l'efficacité spectrale, réduire la latence et améliorer la gestion des ressources, en particulier dans les environnements à forte densité. Plusieurs fonctionnalités sont en cours d'étude par les groupes de travail de l'IEEE pour répondre à ces objectifs ambitieux. Les aspects suivants explorent certaines des améliorations clés actuellement considérées.

2.3.1 Opération Multi-Lien - MLO

Est une fonction clé du nouveau standard le Wi-Fi 7 offre la possibilité de se connecter simultanément sur différentes bandes Wi-Fi, telles que le 2,4 GHz et le 5 GHz. Si votre appareil le permet, il peut même modifier automatiquement de fréquence sans interruption, à l'image d'une voiture qui ajuste son parcours sans diminuer sa vitesse. En conséquence il vise à atteindre une connexion optimisée pour une meilleure rapidité et stabilité, réduisant les coupures pendant les jeux ou les appels vidéo [22].

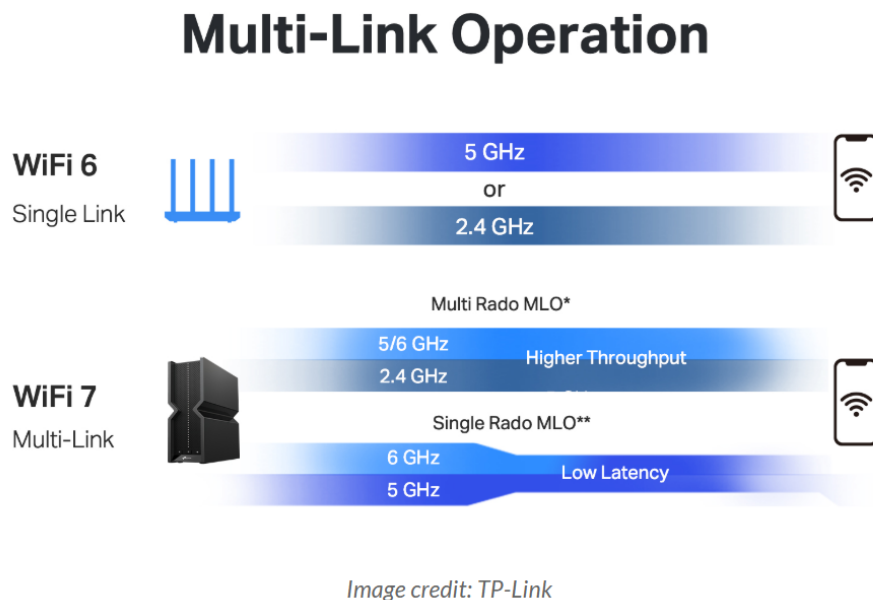


FIG. 2.4 : Multi Link Opération

2.3.2 Support Multi-RU

Multi-RU permet à un appareil d'utiliser plusieurs blocs de fréquences Wi-Fi en même temps, un peu comme s'il roulait sur plusieurs voies d'une autoroute. Grâce à ça, il peut envoyer et recevoir plus de données à la fois, ce qui améliore la performance globale du réseau [22].

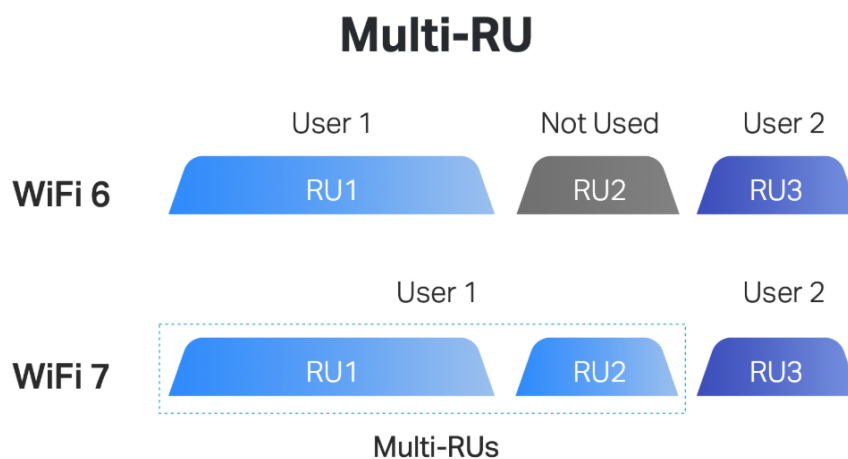


FIG. 2.5 : Support Multi-RU

2.3.3 Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)

Il s'agit d'une méthode employée dans les réseaux sans fil pour accroître la fiabilité des transmissions. En principe, quand des données sont transmises (telles que des vidéos ou des messages), le destinataire contrôle l'existence de possibles erreurs. Dans une telle éventualité, il tente en premier lieu de les rectifier par ses propres moyens à l'aide de codes de correction intégrés. Si cela lui semble trop compliqué, il demande simplement l'expéditeur pour qu'il renvoie uniquement les sections problématiques, au lieu de tout reproduire. Cela réduit les délais d'attente et optimise l'exploitation de la bande passante, tout en garantissant une connexion stable, même dans des scénarios compliqués (par exemple : interférences) [22].

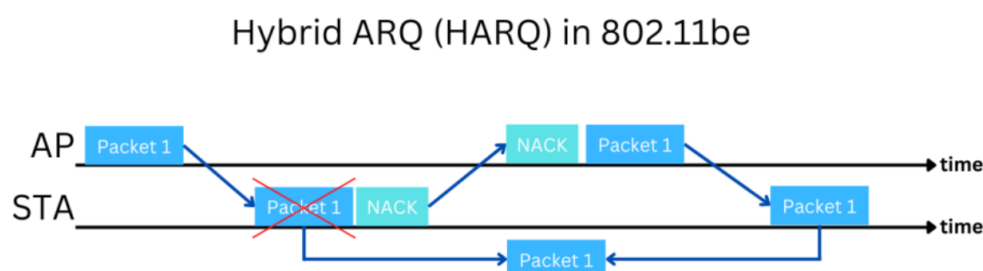


FIG. 2.6 : Hybrid Automatic Repeat Request

2.3.4 Opérations distribuées entre les points d'accès voisins

Cela désigne la capacité des points d'accès Wi-Fi (AP) au sein d'un réseau à collaborer, sans l'intervention d'un système centralisé, afin d'améliorer leur rendement. Ces points d'accès, pour dire les choses autrement, transmettent des informations en temps réel (comme la charge de trafic, le nombre d'utilisateurs ou les perturbations) afin de gérer l'attribution des connexions, d'ajuster leurs réglages (fréquences, intensité) et de garantir une transition fluide entre les différents points d'accès. Cela contribue à éviter les engorgements, réduire les coupures et garantir une connexion Wi-Fi fiable, même dans des sites très peuplés (comme : bureaux, campus) [23].

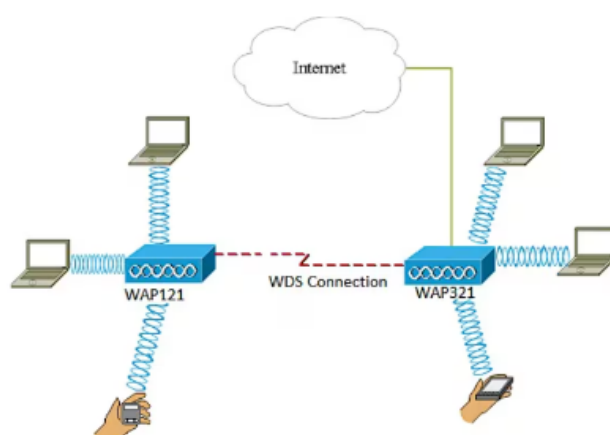


FIG. 2.7 : Configuration d'un réseau sans fil à l'aide d'un point d'accès sans fil (WAP)

2.3.5 Optimisation du partage de l'air (OFDMA amélioré)

C'est une technique qui permet à un réseau Wi-Fi de partager une même fréquence entre plusieurs appareils en même temps, comme si on divisait un camion de livraison en

petits colis pour desservir plusieurs adresses en un seul trajet. Avec l'OFDMA amélioré (dans le Wi-Fi 7), cette répartition est plus précise et flexible : le point d'accès attribue des « morceaux » de la connexion à chaque appareil selon ses besoins (ex : plus de bande passante pour une vidéo, moins pour un capteur). Résultat : moins de temps perdu, moins de latence, et un réseau plus efficace dans les environnements saturés (maisons connectées, bureaux) [22].

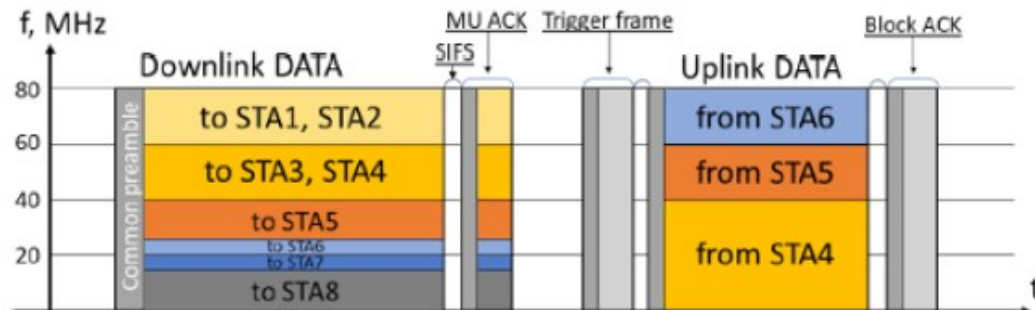


FIG. 2.8 : OFDMA dans le wifi 7

2.3.6 Amélioration de la gestion des priorités (Modifications potentielles d'EDCA)

L'objectif est d'améliorer la façon dont le Wi-Fi priorise le trafic selon sa pertinence (par exemple : streaming en direct > transfert de fichiers). Autrement dit, cela requiert une révision des « routes prioritaires » du réseau pour assurer que les données cruciales (vidéoconférences, jeux) soient traitées plus vite, même en situation de surcharge. Quelle est la finalité ? Réduire les temps de latence et garantir que les applications moins prioritaires (comme les actualisations en arrière-plan) ne nuisent pas à la voie de communication. Pour le Wi-Fi 7, cela pourrait impliquer une gestion plus fine des files d'attente ou des régulations d'accès au canal mieux ajustées aux applications modernes (telles que la réalité virtuelle, l'IoT) [22].

2.4 L'état de l'art des travaux de recherches

2.4.1 Travaux connexes

- **Article 1 : "Preparing Wi-Fi 7 for healthcare Internet-of-Things "**

Yazdan Ahmad Qadri et al. [24] abordent le défi de répondre aux exigences de faible latence des applications sensibles au délai, notamment dans le domaine de l'Internet des Objets pour la santé (H-IoT), en utilisant les réseaux Wi-Fi de nouvelle génération, en particulier La norme IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) vise un débit >30 Gbps et une latence ultra-faible pour les applications temps réel. Toutefois, les performances en liaison montante (UL) sont limitées par des mécanismes d'accès aléatoires comme l'UORA (introduit dans 802.11ax), basé sur un backoff OFDMA (OBO) aléatoire. En situation de saturation, cela entraîne une latence imprévisible et une baisse du débit, inadaptées aux exigences temps réel. Bien que des outils comme les rapports d'état de tampon (BSR) existent, ils sont peu utilisés. Les solutions actuelles (accès cyclique, optimisation de l'UORA, hybrides) restent insuffisantes, souffrant de latence, d'inefficacité ou d'inéquité. Une gestion plus déterministe de l'accès UL est donc nécessaire pour atteindre les objectifs du Wi-Fi 7.

Pour remédier aux problèmes de latence et d'efficacité dans l'accès UL des réseaux OFDMA saturés, l'article propose un algorithme de planification sensible au délai, adapté aux réseaux IEEE 802.11be, notamment pour les applications critiques en santé (H-IoT). L'approche s'appuie sur le rôle actif du point d'accès (AP) qui exploite les rapports d'état de tampon (BSR) ou les en-têtes QoS pour connaître la taille des files d'attente des différentes catégories d'accès (AC) à chaque station (STA).

L'algorithme fonctionne en deux étapes : il évalue les files d'attente par AC (voix, vidéo, best effort, arrière-plan) pondérées selon leur importance pour l'application, puis tient compte de l'historique de transmission de chaque STA. La priorité d'une STA est calculée selon une formule combinant ces deux critères. Lorsqu'un TXOP est disponible, l'AP attribue des ressources (RUs) aux STAs les plus prioritaires, optimisant la latence des trames critiques sans signalisation supplémentaire, tout en préservant l'équité.

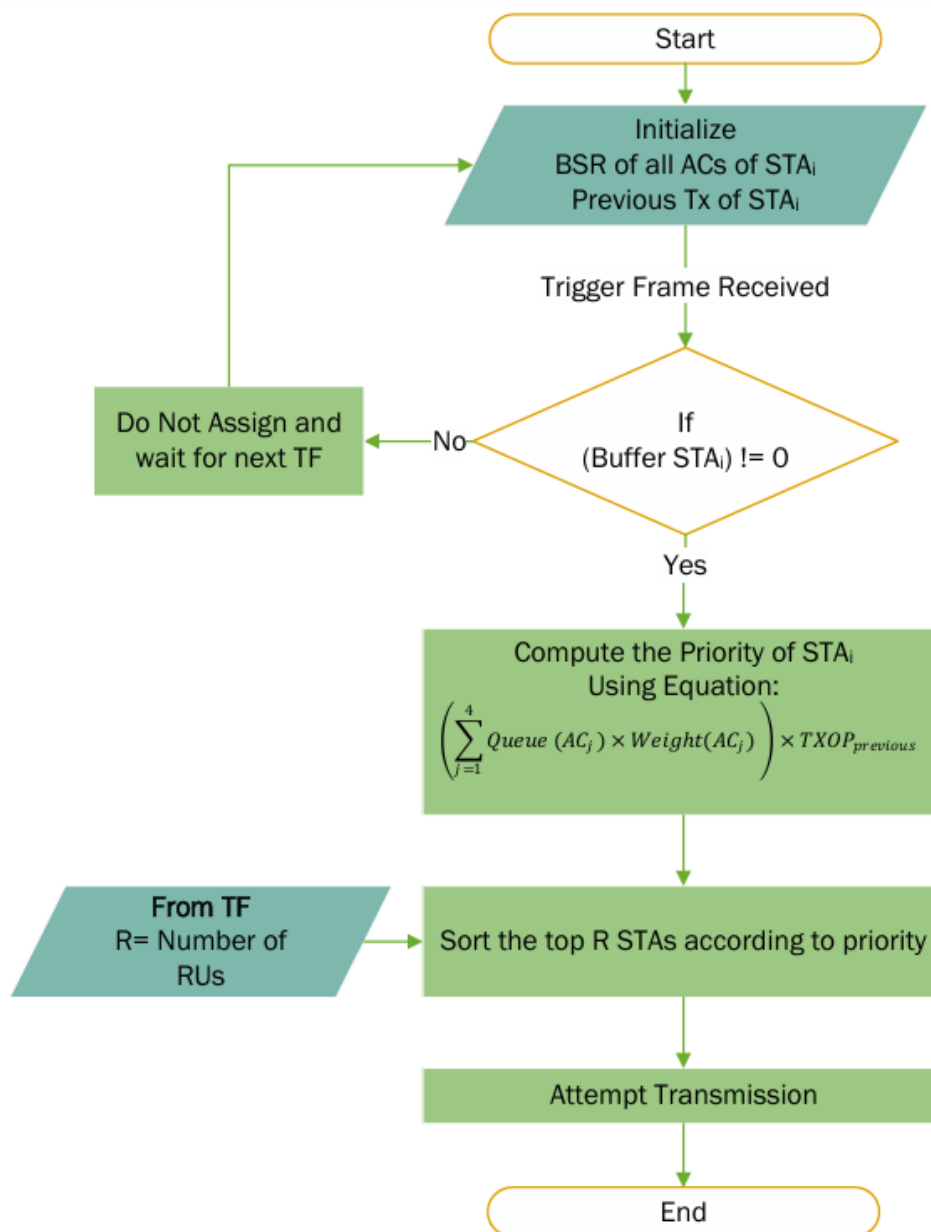


FIG. 2.9 : Organigramme de l'algorithme proposé

Les simulations NS-3 montrent que le scheduler proposé offre de meilleures perfor-

mances que l’UORA et le scheduler basé sur l’historique. Il réduit significativement la latence UL, améliore l’équité entre les STAs (même avec un grand nombre d’utilisateurs) et augmente le débit total. Ces gains permettent de répondre efficacement aux exigences de délai des applications H-IoT critiques.

- **Article 2 : ”A2P : A Scalable OFDMA Polling Algorithm for Time-Sensitive Wi-Fi Networks”**

Douglas Dziejzorm Agbeve et al. [25] s’intéresse à la montée en charge des réseaux Wi Fi à base d’OFDMA (IEEE 802.11ax/be) pour des applications temps sensible (téléconférence, IoT critique, AR/VR). Le mécanisme standard de sondage UL, qui consiste à envoyer un Buffer Status Report Poll (BSRP) à toutes les stations associées, engorge le canal lorsque le nombre de STAs augmente (jusqu’à 100 dans le scénario étudié), provoquant des délais de contention élevés, des pertes de paquets et une mauvaise utilisation des Resource Units (RUs).

Pour pallier ces limites, les auteurs proposent A2P (Active to Passive polling), un algorithme qui distingue les STAs actives (celles ayant transmis via EDCA récemment) et les STAs passives. Concrètement, lorsqu’une STA transmet un paquet par EDCA, l’AP l’ajoute à une liste de polling et désactive son EDCA pour une durée Y Time Units (TU). Lors de chaque opportunité TXOP, l’AP n’envoie des Trigger Frames UL OFDMA qu’aux STAs figurant sur cette liste — les autres stations restent en mode EDCA et ne sont sondées qu’épisodiquement pour préserver l’équité. Si la liste dépasse le nombre de RUs disponibles, un round robin interne y est appliqué.

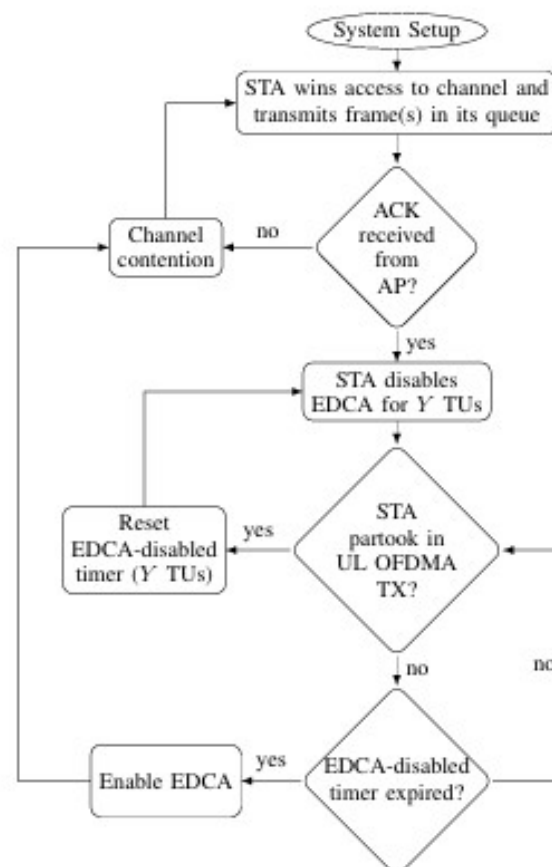


FIG. 2.10 : Organigramme de la procédure algorithmique du côté de la station (STA)

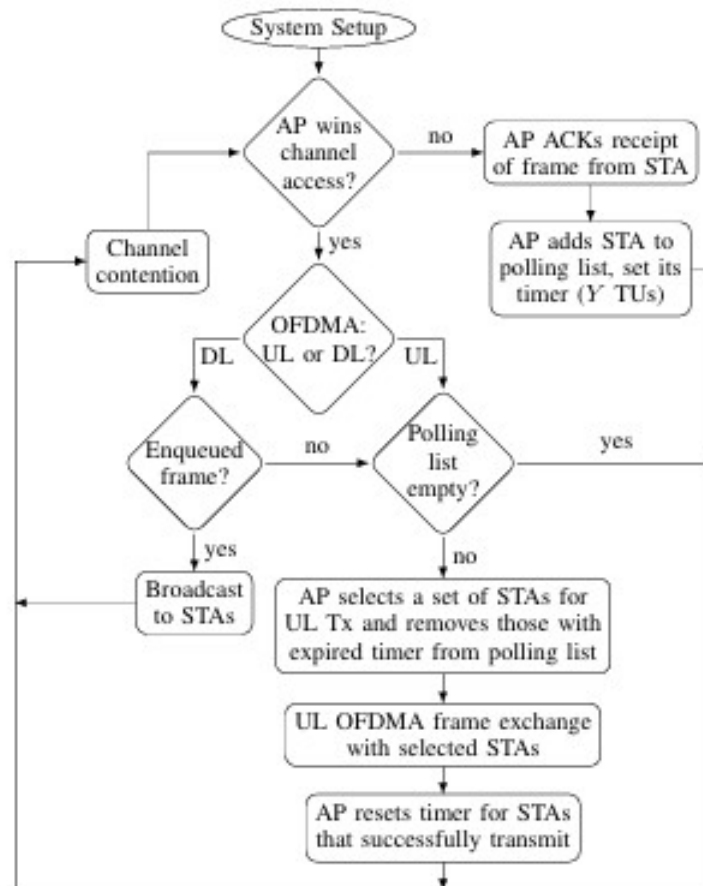


FIG. 2.11 : Organigramme de la procédure algorithmique du côté du point d'accès (AP)

Les simulations sous NS-3 comparent **A2P** à trois scénarios :

- EDCA seul (pas d'OFDMA),
- OFDMA + polling "*POLL ALL*" (toutes les STAs sondées),
- OFDMA + EDCA indépendant.

Les résultats des simulations montrent que l'approche A2P permet de réduire la latence, d'améliorer le débit global et d'assurer une meilleure équité entre les stations, tout en maintenant un fonctionnement scalable dans les environnements denses.

En conclusion, **A2P** offre un sondage *UL OFDMA* scalable et efficace, parfaitement adapté aux environnements Wi-Fi denses et aux applications critiques.

- **Article 3 : "Resource Allocation Strategies for Real-Time Applications in Wi-Fi7"**

Mihail Silviu Udrea et al. [26] s'attaque à la problématique de l'intégration des applications temps réel (Real-Time Applications — RTA) dans les réseaux Wi-Fi de prochaine génération, en l'occurrence IEEE 802.11be (Wi-Fi 7). Ces applications, telles que la réalité augmentée, la réalité virtuelle, le jeu en ligne ou les systèmes de contrôle industriel imposent des contraintes extrêmement strictes en matière de délai (latence inférieure à 1–10 ms) et de fiabilité. Or, bien que la norme Wi-Fi 7 améliore les performances physiques, les solutions existantes dans la couche MAC ne garantissent pas une qualité de service adéquate pour ces flux temps réel, surtout dans des environnements radioélectriques perturbés par le bruit ou les interférences. La principale difficulté réside dans le fait que l'AP (Access Point) ne connaît pas, a priori, le nombre exact de stations ayant des paquets urgents à transmettre, ce

qui rend complexe une allocation optimale des ressources tout en minimisant le gaspillage.

Pour répondre à ces enjeux, les auteurs proposent trois nouveaux algorithmes d'allocation de ressources basés sur l'OFDMA et la redondance fréquentielle : NUORA (Noise-Resistant UORA), NGRA (Noise-Resistant Group RA) et NCRA (Noise-Resistant Cyclic RA). Ces approches s'appuient sur une stratégie de réplication en fréquence : chaque station émet plusieurs copies de ses trames sur des Resource Units (RUs) distincts au sein du même intervalle de temps. Cela vise à accroître la probabilité de succès d'au moins une transmission, même en présence de bruit. NUORA consiste à allouer dynamiquement plusieurs RUs pour un accès aléatoire via le mécanisme UORA (Uplink OFDMA Random Access), où chaque station duplique ses trames sur f RUs aléatoires. NGRA améliore ce principe en regroupant les stations et en distribuant les RUs de manière contrôlée, ce qui réduit les risques de collisions et optimise l'utilisation des ressources. Enfin, NCRA attribue cycliquement un bloc de RUs à chaque station encore en attente de transmission, favorisant une répartition équitable et une couverture systématique de l'ensemble du spectre disponible.

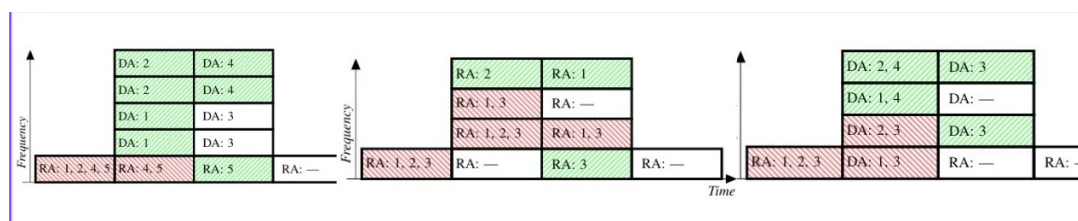


FIG. 2.12 : Exemple de fonctionnement de NCRA, NUORA et NGRA

Les résultats de simulation montrent que ces trois algorithmes améliorent significativement la fiabilité des transmissions par rapport aux mécanismes classiques. Avec un paramètre de redondance $f = 3$, NGRA parvient à maintenir un taux de perte de paquets (PLR) inférieur à 10 % même lorsque la probabilité d'erreur sur le canal atteint 20 %. NCRA obtient les performances les plus robustes (PLR minimal), mais au prix d'une consommation légèrement plus élevée de RUs. Globalement, NGRA apparaît comme le meilleur compromis entre fiabilité et efficacité spectrale, car il laisse plus de 50 % des RUs disponibles pour le trafic non temps réel. Ces travaux démontrent la pertinence d'approches multi copies en fréquence pour satisfaire les contraintes rigoureuses des applications RTA sur Wi-Fi 7, ouvrant la voie à des optimisations dynamiques futures basées sur l'adaptation automatique du niveau de redondance en fonction des conditions radio.

- **Article 4 : "Optimizing Real-Time Responsiveness in IIoT : A Dynamic Approach for WiFi OFDMA Uplink Transmissions"**

Qiaohan Zhang et al. [27] aborde la question essentielle de maintenir une réactivité en temps réel dans les transmissions WiFi OFDMA en voie montante, un enjeu particulièrement crucial pour les applications industrielles (IIoT). Il met l'accent sur le fait que l'accès aléatoire standard (UORA) est sujet à une latence imprévisible en raison de la contention, ce qui ne convient pas aux exigences sévères des systèmes en temps réel. Il est crucial de souligner que la simple diminution du taux de perte global (PLR) ne suffit pas. En effet, la répartition des pertes, en particulier les séries de pertes consécutives, est déterminante pour la capacité des protocoles industriels à gérer les retransmissions.

Les méthodes actuelles tendent souvent à négliger ce facteur. Pour remédier à ces difficultés, les auteurs suggèrent un modèle d'accès aléatoire optimisé fondé sur

l'OFDMA. Ce schéma innovant se fonde sur trois axes majeurs. D'abord, un UORA hybride fournit un accès déterminé au canal pour les stations temps réel (RTAs), en utilisant leurs identifiants d'association uniques (AIDs, de 1 à 2007) pour leur attribuer des unités de ressource (RUs) spécifiques. Cela leur donne la possibilité d'accéder directement au canal sans passer par le processus standard de backoff aléatoire. En second lieu, un mécanisme d'attribution adaptatif de ressources unitaires (SARUA) modifie dynamiquement l'allocation des unités de ressources en tenant compte des conditions du canal et des antécédents des transmissions, jugeant la criticité d'un paquet en se basant sur le nombre de pertes successives précédentes. Une suite de pertes prolongées déclenche l'attribution simultanée de plusieurs RUs pour la prochaine transmission, en profitant des capacités multi-RU à venir des normes telles que le 802.11be et en recourant à des schémas d'allocation AID adaptatifs pour gérer la distribution dynamique des RUs hybrides. Pour terminer, on utilise la méthode du Maximal Ratio Combining (MRC) pour fusionner les signaux captés par plusieurs RUs véhiculant des informations identiques. Ceci permet d'améliorer le rapport signal sur bruit (SNR) global et de renforcer considérablement la fiabilité de la démodulation

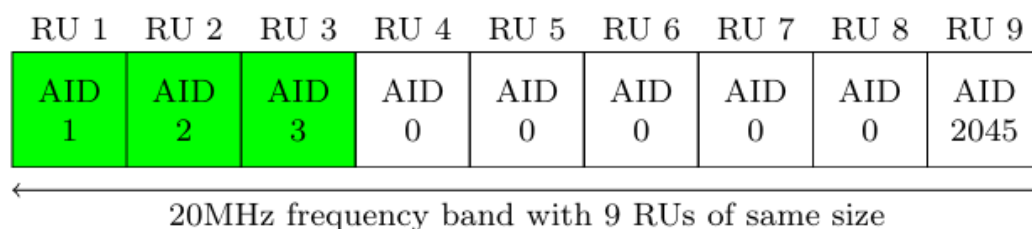


FIG. 2.13 : Illustration de l'approche hybride UORA proposée.

L'approche a été validée dans des conditions réelles en effectuant des simulations intégrales à l'aide de la boîte à outils MATLAB WLAN. Elles démontrent que les RTAs jouissent d'une latence moyenne (AL) considérablement plus basse et constante. Il est crucial de noter que l'évaluation des pertes subséquentes (grâce au PLSL du PLSL et au MTTF) indique que, même si les configurations multi-RU statiques et MRC diminuent efficacement les séries de pertes (faible PLSL max) et augmentent le MTTF, elles consomment beaucoup de RUs et majorent sensiblement l'AL des stations non en temps réel. Les schémas dynamiques SARUA atteignent un équilibre impressionnant, présentant une durée moyenne jusqu'à la première défaillance (MTTF) comparable aux schémas statiques pour des seuils d'échec critiques (absence de défaillance pour $k_{fail}=3$), tout en ayant une consommation significativement inférieure en RUs (environ 1.03-1.05) et un impact marginal (environ 0.4%) sur l'AL des stations sans temps réel. L'application du modèle de régression classique sur les modèles dynamiques SARUA améliore encore leurs performances. Pour conclure, l'approche suggérée, en particulier le SARUA, s'avère robuste et efficace pour améliorer la réponse en temps réel, surtout en minimisant l'impact des pertes consécutives cruciales pour l'IIoT. C'est une mise en œuvre prometteuse des techniques multi-RU pour les normes Wi-Fi futures.

- **Article 5 : “Enabling Massive Real-Time Applications in IEEE 802.11be Networks”**

Evgeny Avdotin et al. [28] s'intéresse à un défi essentiel : comment faire en sorte que le futur Wi-Fi 7 (norme IEEE 802.11be) puisse vraiment répondre aux exigences très strictes des applications temps réel. Ce type d'applications, comme la réalité virtuelle, les systèmes de contrôle industriel ou le jeu en ligne, a besoin de

délais ultra-courts (moins d'une milliseconde) et d'une fiabilité quasi parfaite. Le problème, c'est que les mécanismes d'accès au canal utilisés dans Wi-Fi 6, notamment l'UORA (accès aléatoire OFDMA), ne suffisent pas. Ils entraînent beaucoup de collisions entre les stations, ce qui provoque des pertes de paquets et augmente la latence — deux choses inacceptables pour le temps réel.

Pour résoudre ça, les auteurs proposent deux solutions : d'abord, un algorithme appelé CRA (Cyclic Resource Assignment), qui attribue les ressources de manière cyclique quand des collisions sont détectées. Ça fonctionne mieux que l'UORA, mais pas de manière optimale : parfois, des ressources sont attribuées à des stations qui n'ont même rien à envoyer, ce qui est du gaspillage. C'est pourquoi les auteurs vont plus loin avec une autre méthode, pensée pour le Wi-Fi 7 : le GRA (Group Resource Assignment). L'idée est simple et efficace : regrouper plusieurs stations dans un même bloc de ressources, et laisser seulement celles qui ont des données transmettre. Ce petit changement dans la façon d'accéder au canal permet d'éviter les transmissions inutiles, de réduire les collisions et surtout de garder des temps de réponse très bas, même quand il y a beaucoup d'appareils connectés.

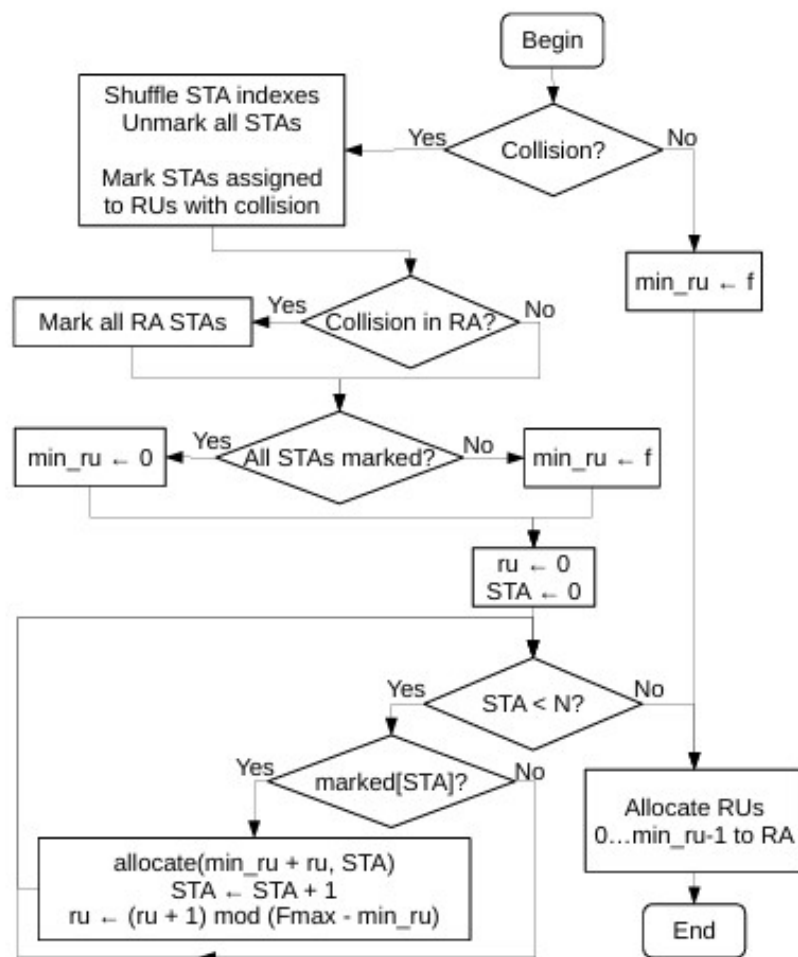


FIG. 2.14 : Schéma bloc du GRA

Les simulations confirment les bénéfices de cette approche : le GRA maintient un très faible taux de retard même avec 70 stations temps réel, et il laisse assez de bande passante pour les autres types de trafic. En clair, ce que montre cet article, c'est qu'avec quelques adaptations ciblées et intelligentes, le Wi-Fi 7 peut réellement devenir une solution fiable pour les applications industrielles ou critiques, là où les générations précédentes commencent à atteindre leurs limites.

2.4.2 Tableau comparatif

- Le signe ✓ Signifie performante.
- Le signe ✗ Signifie Mauvaise.
- Le signe ○ Signifie acceptable.

Critères	Yazdan Ahmad Qadri et al [24]	Douglas Dziedzorm Agbeve et al [25]	Mihail Silviu Udrea et al [26]	Qiaohan Zhang et al [27]	Evgeny Avdotin et al [28]
Débit	✗	✓	✓	○	○
Équité	✓	✓	✗	○	✗
Latence	✓	✓	✗	✓	○
Délai	✗	○	✗	○	✓
Faible taux de pertes (PLR)	✗	✗	✓	✓	✓

TAB. 2.1 : Tableau comparatif des contributions récentes selon la QoS en Wi-Fi 7.

2.5 Conclusion

Le Wi-Fi 7 transforme l'accès sans fil, mais ses performances en matière de transmission montante dépendent fortement de l'efficacité du protocole MAC. Les méthodes classiques comme l'UORA atteignent vite leurs limites lorsqu'elles sont mises au défi des exigences en temps réel. Des méthodes récentes comme A2P, NGRA...etc fournissent des solutions plus exactes : une meilleure coordination, une planification flexible et une gestion efficace des ressources.

Ces recherches montrent que l'avenir du MAC en UL repose sur des mécanismes plus avancés, adaptatifs et prévisibles. Par conséquent, ce chapitre a mis l'accent sur les contraintes présentes tout en mettant en lumière les visions prometteuses. Le prochain chapitre va analyser une approche innovante pour traiter les enjeux identifiés.

Chapitre 3

Proposition et évaluation de performance

3.1 Introduction

Dans le contexte des réseaux Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), l'accès multiple par division de fréquence orthogonale (OFDMA) a été introduit pour permettre aux stations (STAs) de transmettre simultanément sur des ressources fréquentielles appelées Resource Units (RU). L'efficacité de cette transmission dépend fortement de la stratégie d'ordonnement utilisée par le point d'accès, en particulier lors de la phase UL-OFDMA.

Dans ce chapitre, nous abordons la problématique de la répartition équitable et performante des RUs entre les stations, en nous basant sur une méthode de priorisation déjà bien établie, mais en proposant une stratégie d'allocation plus adaptée à la réalité dynamique du réseau. Cette proposition vise à améliorer les performances globales du système en termes de délai, d'utilisation des ressources et de qualité de service.

3.2 Problématique et motivations

Dans les réseaux Wi-Fi de dernière génération, notamment ceux basés sur la norme IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), l'ordonnement des transmissions en montée (uplink) repose sur l'exploitation des capacités d'accès multiple par répartition en fréquence (OFDMA). Cette technologie vise à améliorer l'efficacité spectrale en autorisant plusieurs stations (STAs) à transmettre simultanément sur différentes unités de ressource (RUs). Dans ce contexte, de nombreuses propositions ont été formulées pour prioriser intelligemment les transmissions, en fonction de la nature du trafic et de la saturation des files d'attente.

L'article sur lequel s'appuie notre travail propose une stratégie de planification UL-OFDMA fondée sur un calcul de score de priorité pour chaque STA, prenant en compte les catégories de trafic (voix, vidéo, best effort, background) et l'historique des transmissions. Cette approche présente l'avantage d'introduire une forme d'équité entre les stations et de mieux gérer la coexistence des flux à faible latence et des flux à faible priorité.

Cependant, malgré cette avancée, l'article conserve une méthode d'allocation relativement rigide : chaque station sélectionnée reçoit systématiquement une seule unité de ressource, quel que soit son niveau de priorité ou la quantité de trafic qu'elle doit transmettre. Cette contrainte fixe ne permet pas de différencier de manière efficace les stations fortement chargées de celles dont la demande est marginale. Ainsi, une station disposant d'un trafic critique et saturée peut se voir attribuer exactement le même nombre de ressources qu'une station faiblement sollicitée, ce qui limite la capacité d'adaptation du réseau aux besoins réels.

Ce manque de proportionnalité dans l'allocation des RUs engendre plusieurs effets indésirables. Il compromet la qualité de service pour les applications sensibles au délai,

réduit l'efficacité globale du système en cas de congestion, et augmente le risque de gaspillage de bande passante lorsque les ressources sont attribuées à des stations peu actives. De plus, dans les environnements denses, cette rigidité peut accentuer l'encombrement de certaines files, allonger les délais de transmission, et réduire l'équité globale du partage du médium.

Ces limites mettent en évidence la nécessité d'une amélioration du mécanisme d'attribution des ressources. Il devient essentiel de concevoir une stratégie plus souple, capable d'ajuster dynamiquement l'allocation des RUs en fonction de la priorité relative de chaque STA et de son niveau réel de demande, tout en conservant les fondements pertinents du modèle initial proposé dans l'article. C'est dans cette optique que s'inscrit notre contribution.

3.3 Proposition d'une nouvelle méthode d'allocation des ressources

3.3.1 Étapes de fonctionnement

Afin de surmonter les limitations identifiées dans la stratégie d'allocation de ressources présentée par Yazdan Ahmad Qadri et al [24], nous proposons une méthode améliorée et conforme aux spécifications du standard Wi-Fi 7. Notre approche repose sur une meilleure exploitation des scores de priorité pour permettre une distribution plus flexible et intelligente des Resource Units (RUs) lors de chaque cycle UL-OFDMA. Elle s'intègre parfaitement dans le fonctionnement normal du protocole, tout en ajoutant une logique de pondération plus fine dans l'étape critique d'allocation des ressources.

Le processus commence par l'envoi d'une première trame TF (Trigger Frame) par le point d'accès. Cette trame, appelée ici « TF de requête », a pour but de signaler aux stations qu'un nouveau cycle de transmission est en cours, et de leur demander de transmettre un rapport sur leur état de file d'attente. Chaque station répond alors par une trame BSR (Buffer Status Report), qui contient des informations détaillées sur le nombre de paquets en attente dans les différentes files correspondant aux classes de service définies par le standard : voix (VO), vidéo (VI), best effort (BE) et background (BK). Ces informations permettent à l'AP de mesurer la charge de trafic réelle de chaque station.

Une fois l'ensemble des rapports BSR collectés, le point d'accès procède au calcul d'un score de priorité pour chaque station. Ce score est obtenu à l'aide de la formule suivante, issue de l'article initial :

$$\text{Priority_STA}_i = \text{TXOP_previous}(i) \times (0.4 \times \text{VO} + 0.3 \times \text{VI} + 0.2 \times \text{BE} + 0.1 \times \text{BK})$$

Dans cette expression, chaque catégorie de trafic est pondérée selon son exigence en termes de latence, la voix étant la plus critique, suivie de la vidéo. Le facteur **TXOP_previous(i)** introduit un mécanisme de justice temporelle en réduisant légèrement la priorité d'une station ayant déjà transmis récemment, afin de favoriser un service plus équitable dans le temps.

La principale nouveauté de notre proposition réside dans la manière dont les scores de priorité sont exploités pour attribuer les RUs. Plutôt que de suivre la méthode rigide consistant à attribuer exactement un RU par station prioritaire, notre approche transforme chaque score en une proportion, permettant une allocation dynamique et adaptative. Pour cela, le point d'accès calcule d'abord la somme totale des scores obtenus pour toutes les stations. Il en déduit ensuite, pour chaque STA, la part relative qu'elle représente dans la demande globale :

$$P_i = \frac{\text{Priority}_i}{\sum \text{Priority}_j}$$

Cette proportion est ensuite convertie en nombre de RUs à attribuer via l'équation suivante :

$$RU_i = \text{floor}(P_i \times R)$$

Où P_i est la proportion de la STA i , et R le nombre total de RUs disponibles pour ce cycle (par exemple, 9 RUs dans une bande de 20 MHz avec des unités RU26). Le recours à la fonction d'arrondi permet de rester dans un cadre discret, tout en s'approchant au mieux de la répartition idéale.

Ce système permet une allocation adaptative, dans laquelle les stations les plus prioritaires peuvent recevoir plus d'un RU, ce qui leur permet d'émettre davantage de données dans un même cycle. Inversement, les stations peu sollicitées ou avec un trafic peu prioritaire peuvent se voir exclues temporairement de l'allocation, optimisant ainsi l'utilisation de la bande passante.

Il est possible que la somme des RUs obtenus par arrondi dépasse ou ne remplisse pas exactement la capacité disponible. C'est pourquoi une phase de correction est appliquée : si le total est supérieur à R , l'AP réduit le nombre de RUs alloués aux STAs les mieux servies jusqu'à obtenir une somme conforme ; si le total est inférieur, les RUs restants sont redistribués aux stations les plus prioritaires. Ce mécanisme garantit que toutes les ressources sont utilisées sans dépassement.

Une fois l'allocation finalisée, le point d'accès envoie une seconde trame TF, cette fois appelée « TF d'allocation ». Contrairement à la première, celle-ci contient les détails de la décision d'allocation : pour chaque STA sélectionnée, le nombre de RUs attribués ainsi que leur position dans la bande de fréquence. Cette trame respecte totalement le format standard du protocole, ce qui assure une compatibilité totale avec les spécifications existantes.

À la réception de la TF d'allocation, les stations concernées entament la transmission de leurs paquets selon les RUs qui leur ont été attribués. Le choix des paquets à transmettre suit une logique descendante de priorité : les paquets de voix (VO) sont traités en premier, suivis de ceux de vidéo (VI), puis de best effort (BE), et enfin de background (BK). Chaque paquet est encapsulé dans une trame de type Data, contenant des métadonnées essentielles telles que l'identifiant de la station, le type de trafic (AC), la taille du paquet, et le temps de génération. Ces informations sont utilisées pour calculer la latence de bout en bout et mesurer avec précision le débit total obtenu.

Par ailleurs, afin d'introduire une forme d'équité temporelle, les stations qui n'ont pas été servies lors d'un cycle voient leur facteur de transmission TXOP augmenté d'un boost de 0.3. Ce mécanisme garantit qu'une station dépriorisée de manière répétée pourra bénéficier d'un renforcement de sa priorité dans les cycles suivants, assurant ainsi une répartition plus équitable des ressources à long terme.

En intégrant cette méthode d'allocation pondérée, notre proposition apporte une réponse concrète aux limitations du schéma de base. Elle permet aux stations les plus chargées ou aux flux les plus critiques de recevoir plus de ressources dans un cycle donné, ce qui améliore la fluidité du trafic, réduit les délais pour les applications sensibles, et augmente le taux d'utilisation des ressources disponibles. L'approche reste conforme au standard Wi-Fi 7 et peut être intégrée sans modifier le format des trames ou le comportement de base du point d'accès, ce qui en fait une solution à la fois pragmatique.

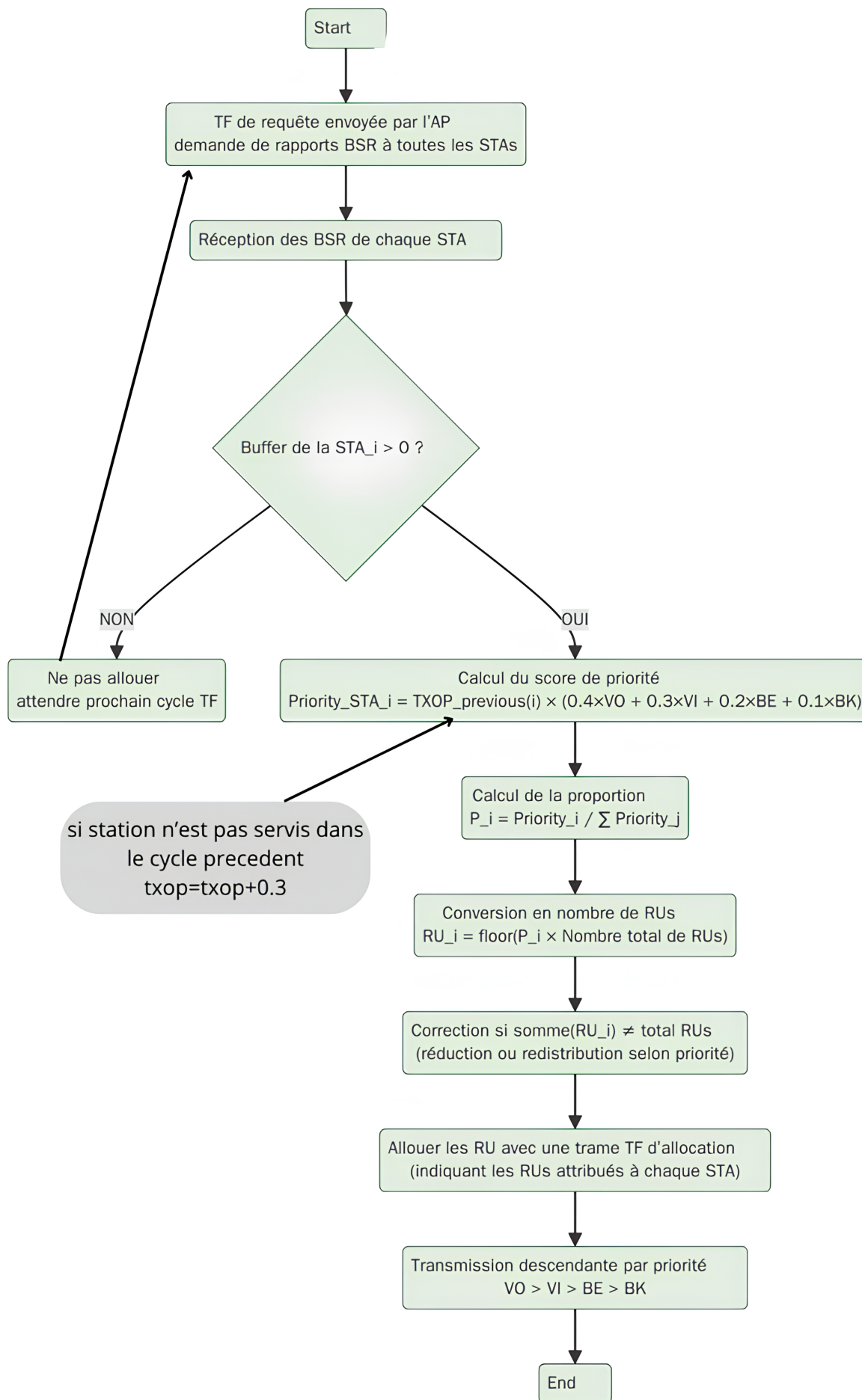


FIG. 3.1 : Organigramme amélioré pour la proposition

3.3.2 Exemple de fonctionnement

Considérons un réseau Wi-Fi 7 comportant 5 stations (STA1 à STA5), et un point d'accès (AP) chargé de l'ordonnancement des transmissions en mode UL-OFDMA. Le canal disponible est de 20 MHz, divisé en 9 Resource Units (RUs) de type RU26.

- **État initial des files d'attente :**

Chaque station dispose de paquets en attente dans ses files réparties par catégorie d'accès (Access Category – AC) : VO (voix), VI (vidéo), BE (best effort) et BK (background). Le contenu des files est le suivant :

Station	VO	VI	BE	BK
STA1	3	1	1	0
STA2	1	2	1	0
STA3	0	0	5	3
STA4	4	2	0	0
STA5	0	0	2	4

- **Envoi de la trame TF1 (Trigger Frame 1) :**

Le cycle UL-OFDMA commence par une trame TF1 envoyée par l'AP. Cette trame déclenche le processus d'ordonnancement, en demandant aux stations de transmettre leur état de buffer.

- **Réception des trames BSR (Buffer Status Report) :**

Chaque STA répond à TF1 en envoyant une trame BSR contenant le nombre de paquets dans chaque file. L'AP collecte alors les informations suivantes :

- **STA1** → VO : 3, VI : 1, BE : 1, BK : 0
- **STA2** → VO : 1, VI : 2, BE : 1, BK : 0
- **STA3** → VO : 0, VI : 0, BE : 5, BK : 3
- **STA4** → VO : 4, VI : 2, BE : 0, BK : 0
- **STA5** → VO : 0, VI : 0, BE : 2, BK : 4

- **Calcul des scores de priorité :**

L'AP utilise la formule pondérée suivante (issue de l'article original, conservée dans notre proposition) :

$$\text{Priority_STA}_i = \text{TXOP_previous}(i) \times (0.4 \times \text{VO} + 0.3 \times \text{VI} + 0.2 \times \text{BE} + 0.1 \times \text{BK})$$

En supposant que toutes les stations ont $\text{TXOP_previous} = 1$ (aucune station ignorée dans les cycles précédents), les scores de priorité sont :

Station	Score
STA1	$0.4 \times 3 + 0.3 \times 1 + 0.2 \times 1 + 0 \times 0 = 1.7$
STA2	$0.4 \times 1 + 0.3 \times 2 + 0.2 \times 1 + 0 \times 0 = 1.2$
STA3	$0.4 \times 0 + 0.3 \times 0 + 0.2 \times 5 + 0.1 \times 3 = 1.3$
STA4	$0.4 \times 4 + 0.3 \times 2 + 0.2 \times 0 + 0.1 \times 0 = 2.2$
STA5	$0.4 \times 0 + 0.3 \times 0 + 0.2 \times 2 + 0.1 \times 4 = 0.8$

- **Calcul des parts relatives et des RUs attribués :**

La somme totale des scores est :

$$S = 1.7 + 1.2 + 1.3 + 2.2 + 0.8 = 7.2$$

Les parts relatives (P_i) de chaque STA sont :

$$\begin{aligned} - P_{STA1} &= \frac{1.7}{7.2} \approx 0.236 & RU_1 &= \lfloor 0.236 \times 9 \rfloor = 2 \\ - P_{STA2} &= \frac{1.2}{7.2} \approx 0.161 & RU_2 &= \lfloor 0.161 \times 9 \rfloor = 1 \\ - P_{STA3} &= \frac{1.3}{7.2} \approx 0.181 & RU_3 &= \lfloor 0.181 \times 9 \rfloor = 1 \\ - P_{STA4} &= \frac{2.2}{7.2} \approx 0.306 & RU_4 &= \lfloor 0.306 \times 9 \rfloor = 2 \\ - P_{STA5} &= \frac{0.8}{7.2} \approx 0.111 & RU_5 &= \lfloor 0.111 \times 9 \rfloor = 1 \end{aligned}$$

Total RU utilisés = $2 + 1 + 1 + 2 + 1 = 7$

Il reste 2 RUs à allouer. Ils sont attribués aux STAs avec les plus hauts scores :

- STA4 (+1 RU) → passe à 3
- STA1 (+1 RU) → passe à 3

- **Allocation finale des RUs :**

Station	RUs attribués
STA1	3
STA2	1
STA3	1
STA4	3
STA5	1

- **Envoi de la trame TF2 (Trigger Frame 2) :**

L'AP envoie ensuite une trame TF2 indiquant à chaque station le nombre de RUs attribués. Cela remplace les BSRP de l'article pour simplifier.

- **Transmission des paquets :**

Chaque STA transmet autant de paquets que le nombre de RUs qu'elle a reçus. Les paquets sont extraits selon la priorité suivante :

$$VO > VI > BE > BK$$

- **Fin de cycle : calcul des performances**

L'AP mesure :

- la **latence** de chaque paquet transmis (cycle actuel - temps d'arrivée)
- le **débit total** : somme des tailles de tous les paquets transmis
- le **taux d'utilisation des RUs** : RUs utilisés / RUs disponibles

3.4 Simulation et évaluation

3.4.1 Environnement et paramètres de simulation

Présentation du simulateur

Pour notre projet, nous avons utilisé Matlab 2024, une version récente et performante de cet environnement de programmation bien connu dans le domaine scientifique. Cette version nous a permis de développer notre simulation plus facilement, grâce à une interface améliorée et à de nombreuses fonctionnalités utiles. Avec sa syntaxe claire et ses nombreuses bibliothèques, Matlab 2024 s'est révélé être un outil efficace et accessible pour concevoir, tester et analyser notre modèle [29].

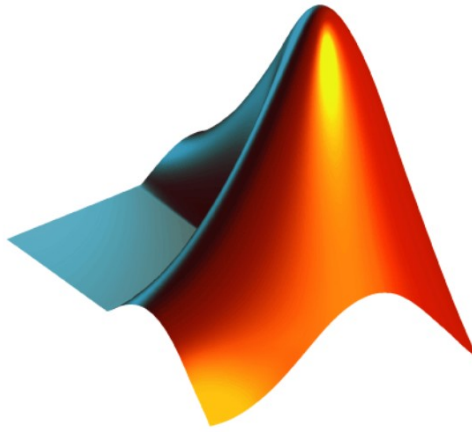


FIG. 3.2 : Logo Matlab

Paramètres de simulation

Afin de comparer efficacement la proposition au mécanisme de base décrit dans l'article, plusieurs scénarios ont été simulés, avec des configurations différentes en termes de nombre de stations et de nombre de RUs disponibles.

Paramètre	Valeur(s)
Nombre de stations (STAs)	[3, 7, 11, 15]
Nombre de Resource Units (RUs)	9
Taille des paquets	[6000, 9000] bits
Taille d'un RU (RU26)	15000 bits
Nombre de cycles simulés	1000
SIFS (μs)	16
Slot Time (μs)	9
CWmin	15
Taille de la Trigger Frame (TF)	250 bits

TAB. 3.1 : Paramètres de simulation utilisés

Ces paramètres ont été choisis pour refléter un environnement réaliste tout en conservant une charge suffisante permettant d'observer des différences significatives entre les méthodes comparées.

3.4.2 Résultats de simulation

- **L'impact de taux d'utilisation des RUs en fonction du nombre de stations**

La figure 3.3 illustre l'évolution du taux moyen d'utilisation des Resource Units (RUs) selon le nombre de stations actives dans le réseau. La méthode proposée atteint un taux d'utilisation de 100 % quelle que soit la densité du réseau (de 3 à 15 stations), tandis que la méthode de Yazdan Ahmad Qadri et al [24] montre une utilisation incomplète lorsque le nombre de stations est inférieur au nombre de RUs disponibles.

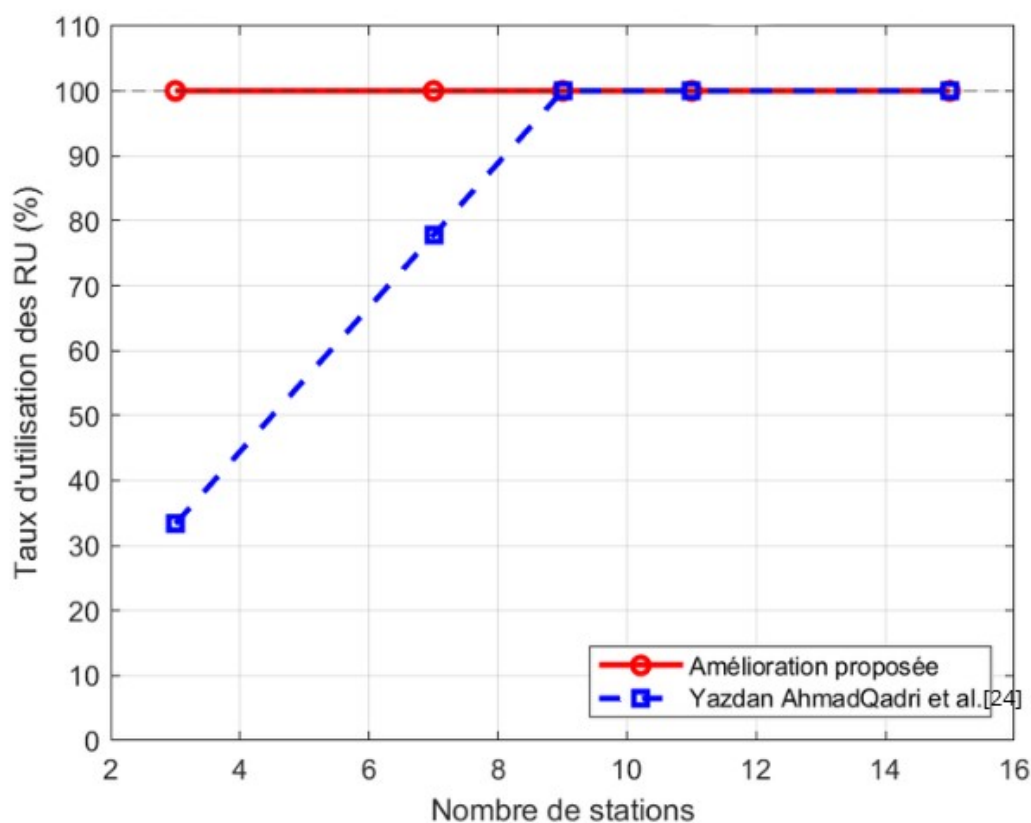


FIG. 3.3 : Taux d'utilisation des RUs selon le nombre de stations.

En effet, dans l'approche de Yazdan Ahmad Qadri et al [24], l'allocation est limitée à une station par RU et à un RU par station sélectionnée. Ainsi, lorsque seules 3 ou 7 stations sont présentes, seuls 3 ou 7 RUs sont utilisés, respectivement, sur un total de 9, ce qui conduit à une sous-utilisation significative des ressources. À l'inverse, notre proposition permet d'attribuer plusieurs RUs à une station en fonction de son score de priorité, ce qui assure une utilisation optimale de la bande passante disponible même avec un faible nombre de stations.

Cela se traduit par une meilleure efficacité spectrale globale, une transmission plus rapide des paquets critiques, et une diminution des files d'attente. L'algorithme adaptatif de réallocation des RUs restants selon les priorités contribue aussi à ce résultat, en évitant qu'un RU reste inutilisé même lorsque d'autres stations ont encore des paquets à transmettre.

- **Évolution du débit VO en fonction du nombre de stations**

La figure 3.4 met en évidence l'évolution du débit de la voix (VO) selon le nombre de stations connectées. On constate que notre proposition maintient un débit VO plus élevé dans tous les cas, en particulier lorsque le réseau devient plus dense. Cela s'explique par la stratégie d'allocation pondérée qui, au lieu d'attribuer systématiquement un seul RU par station, accorde plusieurs RUs aux stations ayant une forte charge en trafic critique.

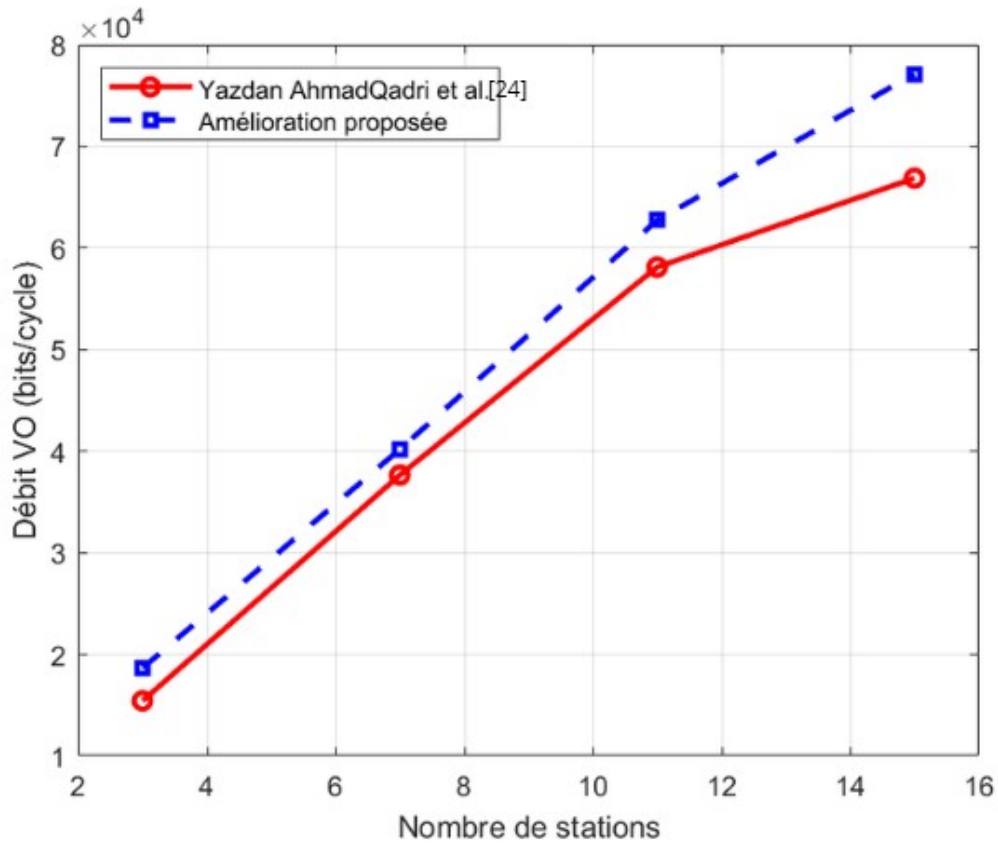


FIG. 3.4 : Débit moyen VO en fonction du nombre de stations

En effet, dans notre méthode, les stations avec un trafic VO important obtiennent plus de ressources, ce qui leur permet de transmettre plusieurs paquets par cycle. À l'inverse, la méthode de Yazdan Ahmad Qadri et al [24] applique une règle fixe sans différencier la nature du trafic dominant, ce qui peut empêcher les stations VO d'exploiter pleinement les ressources disponibles, en particulier lorsqu'elles sont en compétition avec d'autres stations moins critiques.

Ce ciblage efficace de la voix permet d'atteindre un débit plus élevé et constant, tout en respectant les contraintes de faible latence indispensables aux communications vocales en temps réel.

- **Évolution du débit VI en fonction du nombre de stations** L'analyse du débit vidéo (VI) révèle également des résultats favorables à notre méthode, bien que les écarts soient légèrement moins marqués que pour la voix. Cela s'explique par notre logique d'alternance stricte entre les paquets VO et VI durant la phase de transmission. Grâce à cette approche, chaque station peut transmettre à la fois du trafic vocal et vidéo, tant que le budget RU le permet.

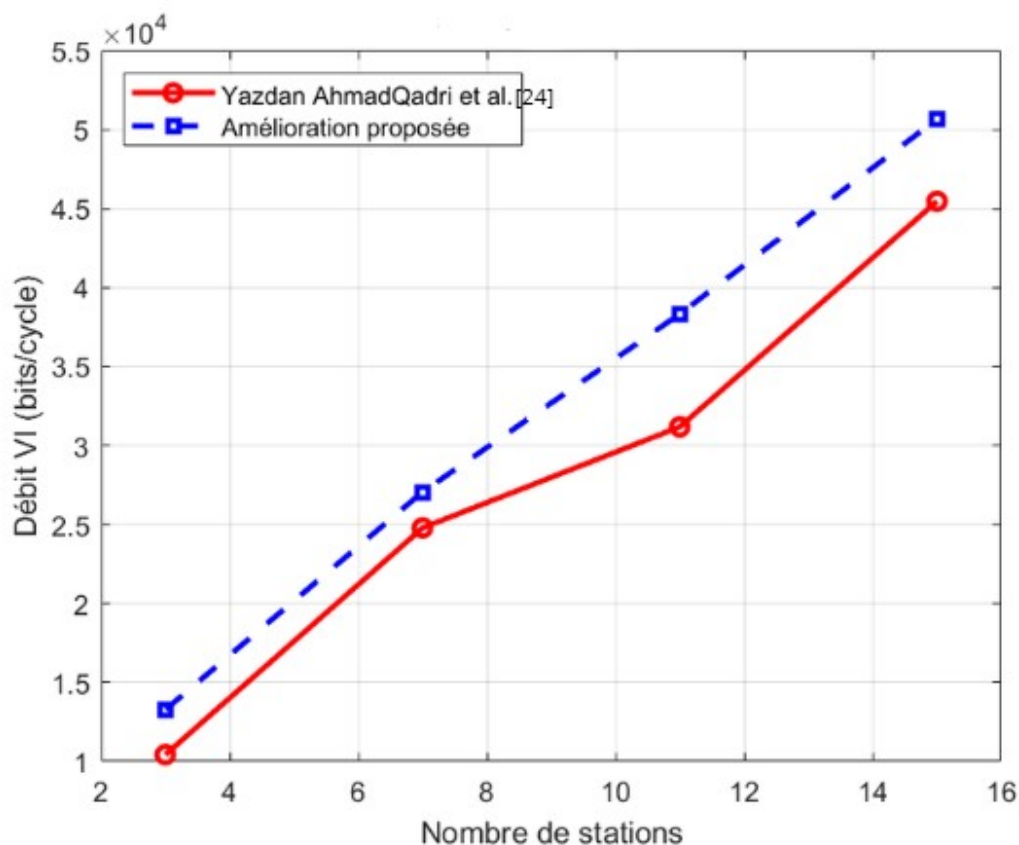


FIG. 3.5 : Débit moyen VI en fonction du nombre de stations

Contrairement à la méthode de Yazdan Ahmad Qadri et al [24], qui tend à favoriser excessivement le VO au détriment des autres catégories, notre stratégie accorde au trafic VI un accès plus régulier aux ressources. Cela évite les blocages prolongés pour les paquets vidéo, qui peuvent devenir critiques dans certaines applications (visioconférence, télémédecine).

Même lorsque le nombre de stations devient supérieur au nombre de RUs, notre méthode continue d'assurer un certain niveau de transmission VI. Ce comportement contribue à améliorer l'équité globale et à préserver une qualité de service acceptable pour le trafic multimédia.

- **Évolution du débit moyen global en fonction du nombre de stations**

La figure 3.6 illustre l'évolution du débit moyen global lorsque le nombre de stations augmente, avec un nombre de RUs fixé à 9. On observe qu'avec un petit nombre de stations (3 ou 7), les deux approches offrent des performances relativement proches. Cela s'explique par le fait que, dans ces scénarios peu chargés, chaque station peut obtenir au moins un RU, ce qui limite l'impact des stratégies d'allocation.

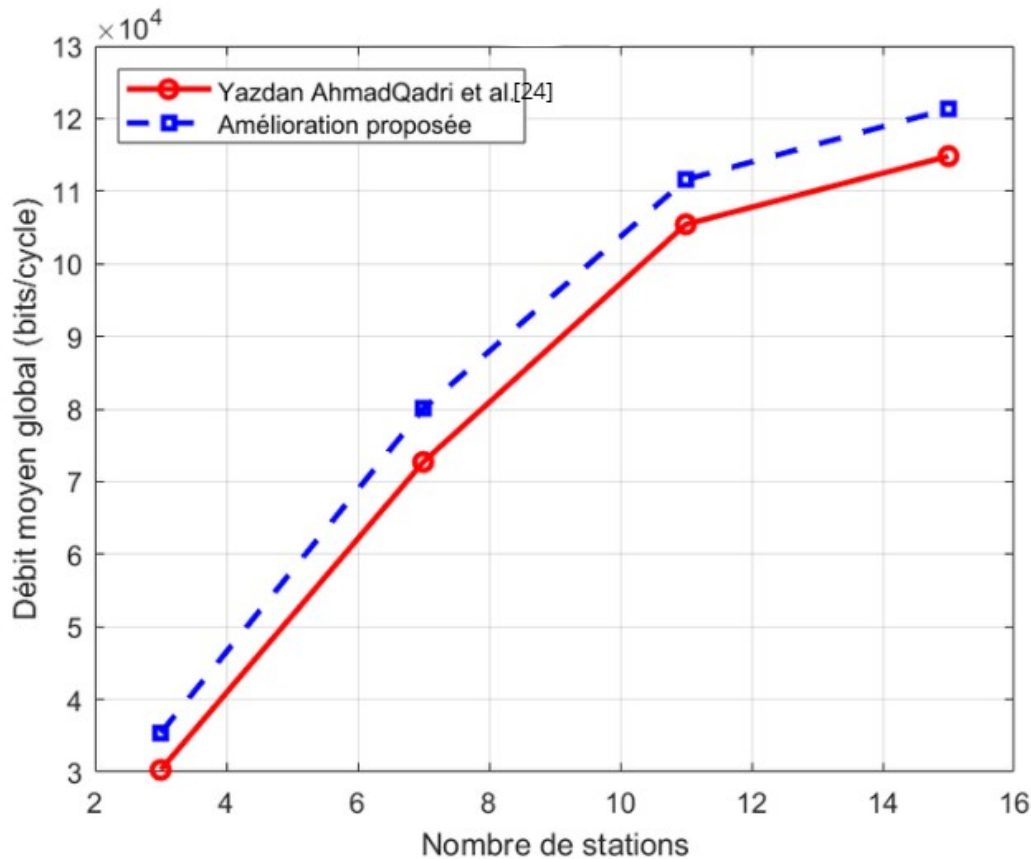


FIG. 3.6 : Débit moyen global en fonction du nombre de stations

Cependant, à partir de 11 stations, l'écart entre les deux méthodes devient notable. Alors que la méthode de Yazdan Ahmad Qadri et al [24] atteint un seuil et ne parvient plus à exploiter efficacement les ressources disponibles, notre proposition continue d'augmenter le débit. Cette amélioration s'explique par notre approche d'allocation pondérée, qui attribue les RUs de manière proportionnelle à la priorité réelle des stations. Les stations fortement chargées ou avec du trafic temps réel se voient attribuer plusieurs RUs, ce qui permet de transmettre plusieurs paquets par cycle et donc d'augmenter le débit total.

Par ailleurs, notre mécanisme de boost TXOP pour les stations non servies améliore la rotation des accès, garantissant une meilleure équité dans la durée, sans sacrifier l'efficacité globale. Cette combinaison d'optimisation dynamique et de différenciation selon la charge rend notre proposition plus adaptée aux environnements denses, comme le montre l'augmentation continue du débit même avec 15 stations.

- **Évolution de la latence VO en fonction du nombre de stations**

Le trafic vocal étant particulièrement sensible au délai, la maîtrise de la latence VO est un enjeu crucial pour garantir la qualité des communications en temps réel. La figure 3.7 met en évidence une amélioration nette de la latence VO avec notre méthode par rapport à celle de l'article de référence.

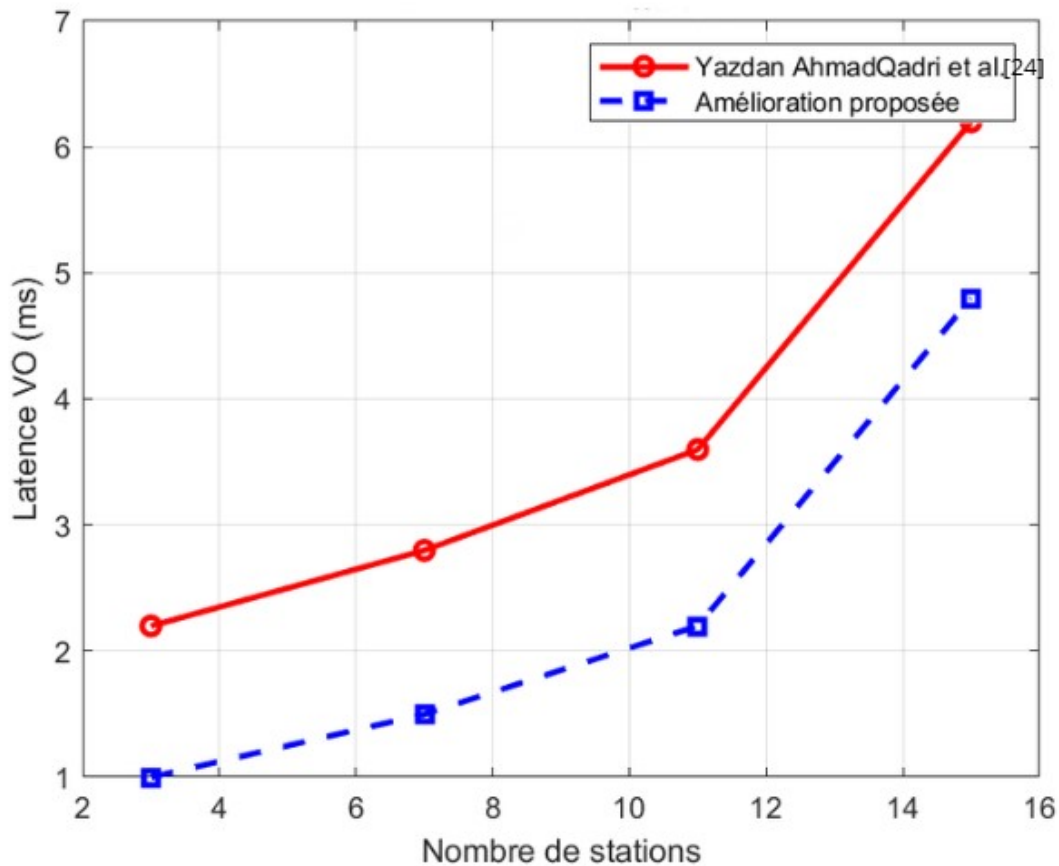


FIG. 3.7 : Latence moyenne VO en fonction du nombre de stations

La méthode de Yazdan Ahmad Qadri et al [24], en allouant uniquement un RU fixe par station sélectionnée, ne tient pas compte de la saturation des files VO. En situation de forte demande, les stations vocales voient leur file se remplir rapidement, ce qui entraîne des retards importants dans la transmission des paquets.

Notre approche, en revanche, priorise explicitement les catégories critiques comme la voix via la pondération dans le calcul du score. De plus, le mécanisme de TXOP boost permet d'augmenter temporairement la priorité des stations non desservies, réduisant ainsi les risques de saturation. Cette stratégie garantit que les stations vocales obtiennent une part équitable et suffisante des RUs, même lorsqu'elles sont en concurrence avec d'autres types de trafic.

Le résultat est une latence VO qui reste faible. L'écart observé avec la méthode de l'article devient significatif, prouvant que notre proposition améliore considérablement la réactivité du réseau pour le trafic sensible à la latence.

• Évolution de la latence VI en fonction du nombre de stations

La figure 3.8 montre que la latence du trafic vidéo augmente avec le nombre de stations, mais reste significativement plus faible dans notre méthode. Dans l'approche classique, les stations reçoivent un RU fixe indépendamment de leur charge, ce qui défavorise les stations avec un trafic vidéo important, surtout en situation de congestion.

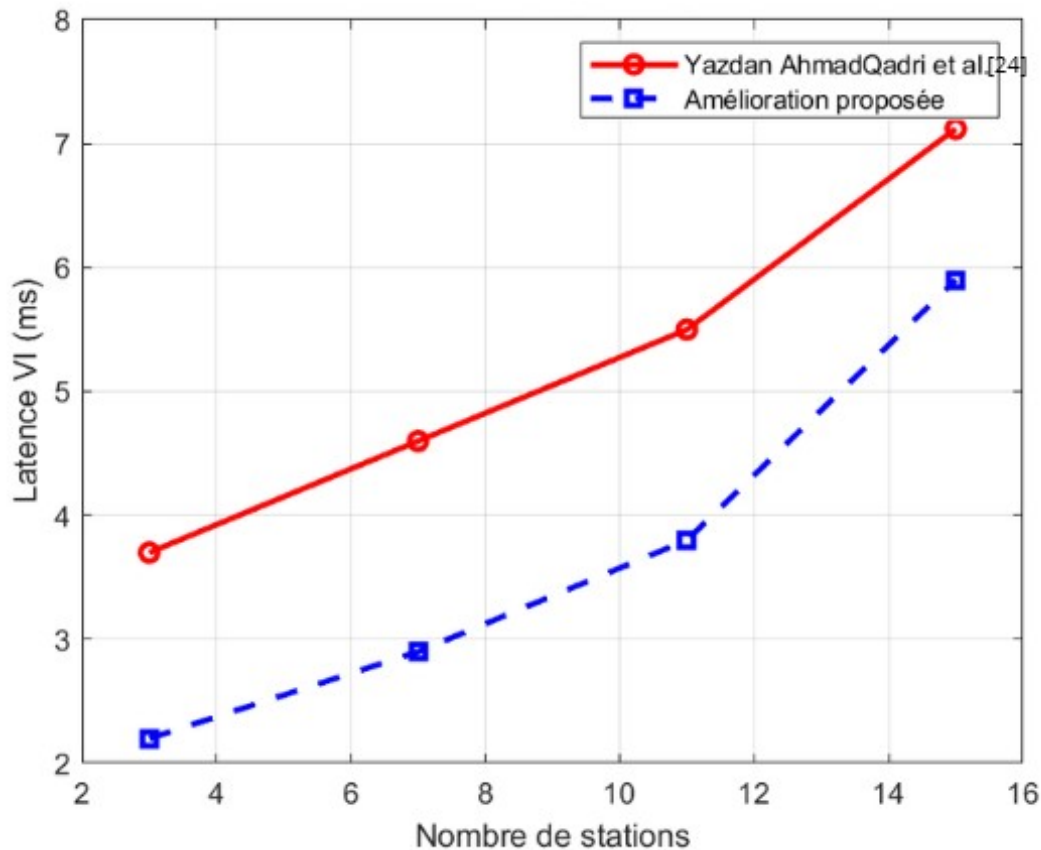


FIG. 3.8 : Latence moyenne VI en fonction du nombre de stations

Notre méthode, en attribuant les RUs de manière proportionnelle aux priorités calculées, permet aux stations ayant accumulé du trafic VI de transmettre plus de paquets dans un même cycle. Cette répartition pondérée des ressources, combinée au renforcement du score pour les stations non servies, contribue à réduire la file d'attente vidéo. Ainsi, même avec 15 stations, la latence VI reste maîtrisée, prouvant que notre stratégie d'allocation améliore la réactivité du service vidéo dans les environnements denses.

- **Évolution de la latence moyenne globale en fonction du nombre de stations**

La latence moyenne globale constitue une mesure déterminante de la qualité de service dans un réseau Wi-Fi, car elle reflète le temps d'attente moyen que subissent les paquets, toutes catégories confondues. La figure 3.9 montre une diminution sensible de cette latence dans notre approche.

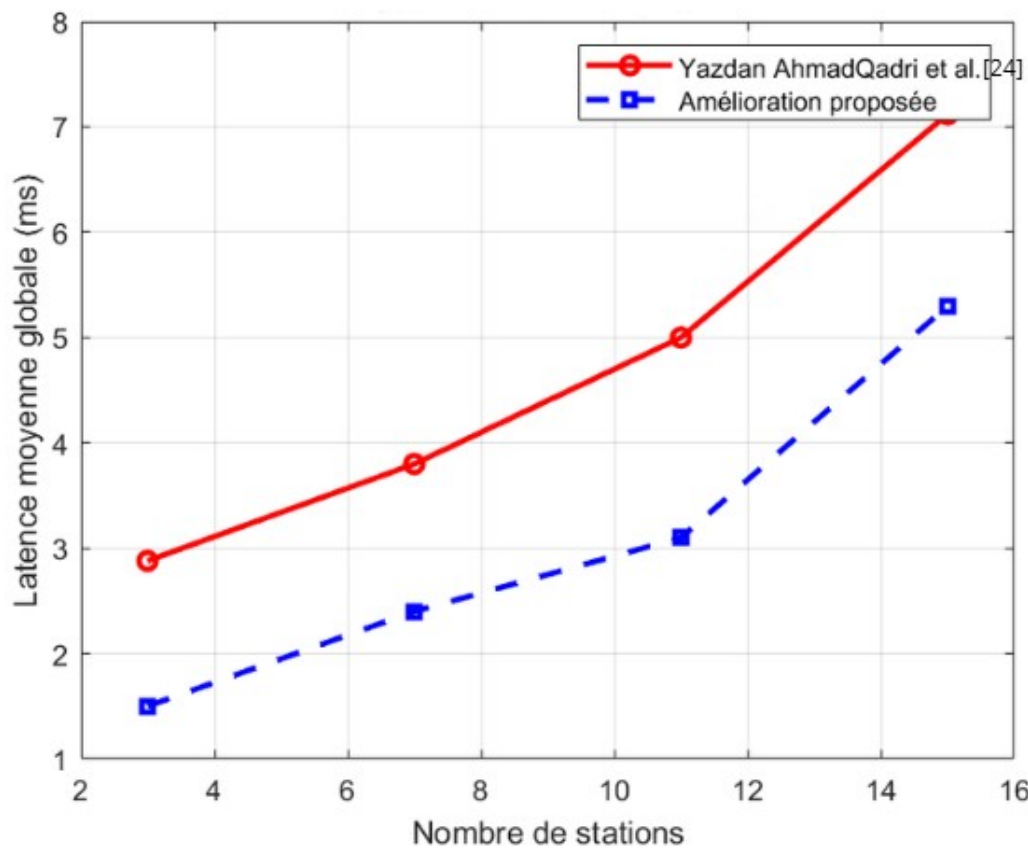


FIG. 3.9 : Latence moyenne globale en fonction du nombre de stations

Avec la méthode de Yazdan Ahmad Qadri et al [24], les stations reçoivent au maximum un seul RU par cycle, ce qui limite drastiquement le débit possible pour les stations ayant un trafic important, notamment VO et VI. Cette allocation rigide provoque une accumulation rapide des paquets en attente dans les files, ce qui augmente progressivement la latence moyenne au fur et à mesure que le nombre de stations croît.

À l'inverse, notre proposition repose sur une logique de pondération des scores de priorité. Les stations les plus chargées ou les plus critiques (en termes de type de trafic) se voient attribuer plusieurs RUs lorsque c'est justifié. Cela permet de désengorger leurs files d'attente plus rapidement. De plus, notre méthode adapte dynamiquement l'attribution en fonction de la charge réelle, évitant ainsi le gaspillage de RUs. Cette optimisation de la répartition des ressources permet de maintenir la fluidité du trafic et de contenir efficacement la latence globale, même en environnement dense.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les exigences de la méthode classique d'attribution des RUs dans le Wi-Fi 7, qui donne un unique RU par station sans réellement considérer sa charge ou l'importance du trafic. Afin d'améliorer cela, nous avons proposé une nouvelle méthode plus adaptable qui distribue les RUs de manière proportionnelle en fonction des exigences réelles de chaque station.

Notre solution a été intégrée dans le fonctionnement habituel du réseau sans apporter de modifications à la norme, ce qui permet son application simple. Par la suite, nous avons effectué plusieurs tests en simulant différentes situations afin d'évaluer les performances,

en tenant compte de la latence, du débit et de l'utilisation des RUs.

Nos résultats parlent d'eux-mêmes : la méthode que nous proposons permet de réduire les temps d'attente, d'améliorer le débit des données et d'utiliser les ressources du réseau de façon plus efficace, même quand celui-ci est très chargé. Ainsi, notre solution offre une gestion plus intelligente et plus équitable des transmissions dans le Wi-Fi 7.

Conclusion générale et perspectives

Ce mémoire s'est inscrit dans l'étude des réseaux sans fil de nouvelle génération, avec un intérêt particulier porté à l'évolution des standards IEEE 802.11 et aux défis posés par les usages actuels en matière de connectivité. Il a permis d'explorer les avancées technologiques récentes et de réfléchir à des solutions concrètes pour améliorer la gestion des ressources dans les réseaux à forte densité.

Dans la première partie, nous avons retracé l'évolution des principales normes Wi-Fi, en mettant en évidence les améliorations apportées aux couches physique et MAC. Nous avons présenté les mécanismes d'accès au canal, les techniques de modulation et les approches introduites pour répondre aux besoins croissants en débit, en fiabilité et en efficacité spectrale.

La deuxième partie a été consacrée à l'étude des innovations apportées par la nouvelle génération de Wi-Fi. Nous avons analysé les principales caractéristiques techniques et étudié un ensemble de travaux de recherche récents portant sur l'amélioration des performances réseau, notamment en matière de planification, d'allocation dynamique des ressources et de qualité de service.

Enfin, la dernière partie a porté sur l'analyse d'un algorithme existant d'allocation des ressources en montée, utilisé dans le contexte des transmissions simultanées. À partir des limites identifiées, notamment en termes de latence et d'efficacité pour les flux critiques, nous avons proposé une amélioration reposant sur une stratégie plus souple et mieux adaptée à la nature du trafic. Les simulations réalisées sous MATLAB ont confirmé les bénéfices de cette approche, en termes de réduction de la latence, d'augmentation du débit et d'un meilleur taux d'utilisation des ressources.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives intéressantes. Il serait notamment pertinent d'élargir notre approche à d'autres types de trafic, y compris ceux habituellement considérés comme non prioritaires, afin d'améliorer l'équilibre global du réseau. Il serait également intéressant d'intégrer d'autres fonctionnalités avancées du Wi-Fi moderne dans les futures simulations, comme la gestion multi-lien ou l'utilisation d'antennes multi-utilisateurs, pour évaluer leurs effets combinés dans des environnements plus complexes. Par ailleurs, d'autres axes d'optimisation pourraient être explorés, comme la prise en compte de la mobilité, des variations du canal ou encore des contraintes propres à certaines applications sensibles.

En conclusion, ce mémoire a permis d'approfondir la compréhension des problématiques liées à la gestion des ressources dans les réseaux sans fil actuels. Il a mis en évidence les limites des méthodes classiques d'allocation et proposé une solution simple mais efficace, validée par simulation. Cette contribution peut servir de point de départ à des recherches futures visant à développer des protocoles plus intelligents, adaptatifs et performants, capables de répondre aux exigences croissantes des réseaux de demain.

Bibliographie

- [1] Mohand Moktefi. Proposition et validation d'un protocole mac pour les futures générations de réseaux wi-fi. Mémoire de magistère, Université de Béjaïa, Département d'informatique, Béjaïa, Algérie, 2016.
- [2] Aurélien Géron. *WiFi professionnel : la norme 802.11, le déploiement, la sécurité*. Dunod, Paris, France, 2009.
- [3] IEEE Standards Association. IEEE standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks—specific requirements—part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/3703/>, 1999. Norme officielle IEEE 802.11-1999.
- [4] Matthew S. Gast. *802.11 Wireless Networks : The Definitive Guide*. O'Reilly Media, Sebastopol, CA, USA, 2nd edition, 2005.
- [5] Philippe Atelin. *Wi-Fi : réseaux sans fil 802.11 – Technologie, déploiement, sécurisation*. France, 2008.
- [6] Dominique Dhoutaut. *Étude du standard IEEE 802.11 dans le cadre des réseaux ad hoc : de la simulation à l'expérimentation*. Thèse de doctorat en informatique, 2003.
- [7] Martine Heusse and Franck Rousseau. *Réseaux Locaux 802.11: WiFi et Bluetooth*. Eyrolles, Paris, 2008.
- [8] IEEE Computer Society. Ieee std 802.11e-2005 – part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications - amendment 8: Medium access control (mac) quality of service enhancements. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1541322>, 2005. Consulté le 6 Mars 2025.
- [9] Giuseppe Bianchi and Ilenia Tinnirello. Remarks on ieee 802.11 dcf performance analysis. *IEEE Communications Letters*, 2005.
- [10] Lara Deek, Eduard Garcia-Villegas, Elizabeth Belding, Sung-Ju Lee, and Kevin Almeroth. Intelligent channel bonding in ieee 802.11n wlans. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014.
- [11] Rasika. Cwap – 802.11n introduction. <https://mrncciew.com/2014/10/19/cwap-802-11n-introduction/>, 2014. Consulté le 10 Avril 2025.
- [12] IEEE Computer Society. Ieee std 802.11n-2012 - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications, 2012.
- [13] Oscar Bejarano, Edward Knightly, and Minyoung Park. IEEE 802.11ac : From channelization to multi-user MIMO. *IEEE Communications Magazine*, 51(10) :84–90, October 2013.

- [14] IEEE Computer Society. Ieee std 802.11ac-2013 – part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications – enhancements for very high throughput for operation in bands below 6 ghz. https://standards.ieee.org/standard/802_11ac-2013.html, 2013. Consulté le 13 Avril 2025.
- [15] Oran Sharon and Yaron Alpert. A new aggregation based scheduling method for rapidly changing ieee 802.11ac wireless channels. *arXiv preprint*, 2018. arXiv :1803.10170.
- [16] Evgeny Khorov, Andrey Kiryanov, Artem Lyakhov, and Giniyat Sagindikov. A tutorial on ieee 802.11ax high efficiency wlans. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1) :197–216, 2019.
- [17] Jian Li, Ying Li, Bin Li, Bo Li, and Hongyu Wu. Trigger-based uplink multi-user mimo for ieee 802.11ax wlans : A deep reinforcement learning approach. *IEEE Access*, 2020.
- [18] Yasin Karakoç and Hüseyin Arslan. Performance evaluation of spatial reuse operation in ieee 802.11ax networks. *Physical Communication*, 2021.
- [19] Mario Nurchis and Boris Bellalta. Target wake time : Scheduled access in ieee 802.11ax wlans. *arXiv preprint arXiv :1804.04976*, 2018.
- [20] Rongpeng Liao, Boris Bellalta, Tao M. Cao, Jaume Barcelo, and Miquel Oliver. Uni-MUMAC : A unified down/up-link MU-MIMO MAC protocol for IEEE 802.11ac WLANs. *Wireless Networks*, 21(5) :1457–1472, 2015.
- [21] Xiaoqian Liu, Yuhan Dong, Yiqing Li, Yousi Lin, Xun Yang, and Ming Gan. Ieee 802.11be wi-fi 7: Feature summary and performance evaluation. *arXiv preprint arXiv :2309.15951*, 2023.
- [22] Ilya Levitsky Evgeny Khorov and IAN F.Akyildiz. Current status and directions of ieee 802.11be, the future wi-fi 7. *IEEE Access*, 8, 2020.
- [23] Shikhar Verma, Tiago Koketsu Rodrigues, Yuichi Kawamoto, Mostafa Fouda, and Nei Kato. A survey on multi-ap coordination approaches over emerging wlans : Future directions and open challenges. *arXiv preprint*, 2023.
- [24] Yazdan Ahmad Qadri, Zulqarnain, Ali Nauman, Arslan Musaddiq, Eduard Garcia-Villegas, and Sung Won Kim. Preparing wi-fi 7 for healthcare internet-of-things. *Sensors*, 22(16) :6209, 2022.
- [25] Douglas Dziejzorm Agbeve, Andrey Belogaev, Wim Sandra, Carl Lylon, and Jeroen Famaey. A2p : A scalable ofdma polling algorithm for time-sensitive wi-fi networks. arXiv preprint arXiv :2502.00430, February 2025. Consulté le 18 Mars 2025.
- [26] Evgeny Avdotin, Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, and Andrey Lyakhov. Resource allocation strategies for real-time applications in wi-fi 7. arXiv preprint arXiv :2107.03543, July 2021. Consulté le 18 Mars 2025.
- [27] Qiaohan Zhang, Philipp Schulz, and Gerhard Fettweis. Optimizing real-time responsiveness in iiot : A dynamic approach for wifi ofdma uplink transmissions. Hong Kong, China, October 2023. IEEE.
- [28] Evgeny Avdotin, Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, and Andrey Lyakhov. Enabling massive real-time applications in ieee 802.11be networks. In *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2019.

- [29] The MathWorks, Inc. *MATLAB (Version R2024a)*. The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, 2024.

Résumé

Ce mémoire vise à l'optimisation de la prochaine génération de réseaux sans fil, le Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), afin de satisfaire les exigences cruciales de l'Internet des Objets (IoT) et des applications en temps réel, notamment en termes de débit élevé, de faible latence et de fiabilité. Après avoir présenté les standards Wi-Fi et les innovations du Wi-Fi 7, le travail met en évidence une problématique majeure : la rigidité des mécanismes actuels d'allocation des unités de ressource (RUs) en liaison montante (UL-OFDMA). Plus spécifiquement, nous avons identifié que, même dans l'approche de Yazdan Ahmad Qadri et al. que nous prenons comme base, la limitation à une seule RU par station sélectionnée entraînait une latence imprévisible et une sous-utilisation des ressources. Pour y remédier, ce mémoire propose une amélioration significative de cette méthode d'allocation des RUs. Notre solution calcule un score de priorité pour chaque station et lui attribue un nombre proportionnel de RUs, permettant aux stations ayant le trafic le plus critique (Voix, Vidéo) de recevoir davantage de ressources par cycle, tout en intégrant un mécanisme de "boost" pour l'équité temporelle. Les simulations approfondies sous Matlab ont validé l'efficacité de cette proposition, démontrant une utilisation des RUs à 100%, une augmentation notable du débit moyen global (particulièrement pour la voix et la vidéo), et une réduction significative de la latence moyenne.

Mot Clés : IEEE 802.11be, IoT, UL-OFDMA, Allocation des RUs, évaluation de performance.

Abstract

This thesis aims to optimize the next generation of wireless networks, Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be), to meet the critical requirements of Internet of Things (IoT) and real-time applications, specifically concerning high throughput, low latency, and reliability. After outlining the evolution of Wi-Fi standards and Wi-Fi 7's key innovations at the physical and MAC layers, the work highlights a major problem : the rigidity of current uplink (UL-OFDMA) Resource Unit (RU) allocation mechanisms. We identified that, even in the approach by Yazdan Ahmad Qadri et al.¹ which serves as our foundation, limiting stations to a single allocated RU leads to unpredictable latency and under-utilization of resources. To address this, this thesis proposes a significant enhancement to this RU allocation method. Our solution calculates a priority score for each station and assigns a proportional number of RUs based on this score, allowing stations with the most critical traffic (Voice, Video) to receive more resources per cycle, while integrating a "boost" mechanism for temporal fairness. Extensive simulations conducted using Matlab² validated the effectiveness of this proposal, demonstrating 100% RU utilization, a notable increase in overall average throughput (especially for voice and video), and a significant reduction in average latency.

Keywords : IEEE 802.11be, IoT, UL-OFDMA, RU allocation, performance evaluation.