

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



Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en Informatique

Option

Administration et sécurité des réseaux

Thème

Equilibrage de charge dans la norme IEEE 802.11be(Extremely High Throughput)

Réalisé par

M^{lle} BACHIRI Kahina

M^{lle} DAACHI Amina

Devant le jury composé de

Présidente :	M ^{me} Ait Abdelouhab Karima	MCB	Université de Bejaia
Encadrant :	M. YAZID Mohand	MCA	Université de Bejaia
Co-Encadrant :	M. MOKTEFI Mohand	MAA	Université de Bejaia
Examinatrice :	M ^{lle} MAMMRI Souhila	MAB	Université de Bejaia

Promotion 2020 - 2021

Remerciements

Nous tenons à remercier :

Le bon Dieu de nous avoir donné la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à :

Notre promoteur M. MOKTEFI Mohand pour ses conseils, ses orientations pour nous avoir transmis les renseignements nécessaires à la réalisation de ce travail, et son aide durant l'encadrement.

Nous remercions également :

L'enseignante et la doctorante du département Informatique M^{lle} BRAHMI Saloua ainsi que l'enseignant du département mathématique M. BOUSLA Sid Ali pour leurs idées fécondes et brillantes qui ont été un élément très essentiel dans ce mémoire.

Les membres de jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger, de lire et d'évaluer ce mémoire.

Nous tenons également à remercier :

Tous les enseignants de notre département qui nous ont accompagnés au cours de notre formation.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Ma mère qui a toujours été ma source de courage.

Mon père ,mon pillié dans ma vie.

Mon fiancé qui m'as beaucoup aidé durant ma formation.

Mes deux soeurs.

Ma petite nièce Assil .

Et à toute ma famille.

M^{lle} BACHIRI Kahina

Je dédie ce modeste travail à

Ma maman qui m'a toujours soutenue et encouragée durant ces années d'études,qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Mes frères Tarek et Ziad, mon père et ceux qui ont partagés avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisations de ce travail.

Ma famille , mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

Mon fiancé Amine qui n'a pas cessé de me conseiller et encourager tout au long de mon parcours.

M^{lle} DAACHI Amina

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1
1 Réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11	4
1.1 Introduction	4
1.2 les réseaux sans fil	4
1.2.1 Généralités sur les réseaux sans fil	4
1.2.2 Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture	5
1.2.3 Architecture WLAN	6
1.3 La norme 802.11	7
1.3.1 Généralités	7
1.3.2 La couche physique	8
1.3.3 La couche MAC	9
1.4 Conclusion	13
2 Evolution du Wi-Fi	14
2.1 Introduction	14
2.2 La norme IEEE 802.11ac	14
2.2.1 Bande et largeur de bande des canaux	15
2.2.2 Utilisation des canaux - modulation OFDM	16
2.2.3 Trame VHT (Very High Throughput, très haut débit)	16
2.2.4 Modulation 256-QAM et différentes MCS (Modulation and Co-ding Scheme)	17
2.2.5 MIMO - Augmentation du nombre de flux spatiaux	18
2.2.6 NDP beamforming (modelage spatial de lobe avec paquets sans données)	18
2.2.7 MU-MIMO	19
2.3 La norme IEEE 802.11ax	19
2.3.1 Fonctionnement dans les spectres 2,4 et 5 GHz	19
2.3.2 OFDMA	20
2.3.3 Modes de fonctionnement de la norme 802.11ax	20
2.3.4 MIMO multi-utilisateur	21
2.3.5 1024-QAM	21
2.3.6 BSS Color	22
2.4 La norme IEEE 802.11be	23
2.4.1 320 MHz	23
2.4.2 Format de trame PHY	23

2.4.3	4K-QAM	25
2.4.4	16 flux spatiaux et des améliorations du protocole MIMO (multiple-input multiple-output)	25
2.5	Conclusion	26
3	Défis et opportunités	28
3.1	Introduction	28
3.2	Fonctionnalités candidates IEEE 802.11be	28
3.2.1	EDCA avec 802 fonctionnalités TSN	28
3.2.2	OFDMA amélioré	32
3.2.3	Fonctionnement multi-liens	36
3.2.4	Techniques PHY avancées améliorant l'efficacité du spectre	40
3.2.5	Coopération multi-AP	45
3.3	Heuristique de recherche d'un ensemble dominant dans un graphe biparti	50
3.3.1	Graphe biparti	50
3.3.2	Ensemble dominant	50
3.4	Algorithme d'Équilibrage de charge	51
3.5	Conclusion	54
4	Simulation et résultats	55
4.1	Introduction	55
4.2	Pourquoi MATLAB?	55
4.3	Paramètres de simulation	55
4.3.1	Débit	55
4.4	Simulation et interprétation des résultats	56
4.4.1	Le premier test	56
4.4.2	Le deuxième test	56
4.4.3	Le troisième test	56
4.4.4	Le quatrième test	57
4.5	Conclusion	58
	Conclusion générale	59
	Bibliographie	60

Table des figures

1.1	Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture.	6
1.2	Mode Ad Hoc et Infrastructure.	7
1.3	Méthode d'accès au médium en mode RTS/CTS.	13
2.1	Représentation graphique des canaux Wi-Fi dans la bande des 2,4 GHz.	15
2.2	Canal primaire / canal secondaire	15
2.3	Diagrammes de constellation : 64-QAM.	17
2.4	Diagrammes de constellation : 256-QAM.	18
2.5	Diagramme de constellation : 1024-QAM.	22
2.6	Le format de trame EHT.	23
2.7	détection automatique du préambule pour les trames héritées.	24
2.8	Diagramme de constellation 4096-QAM	25
2.9	Un AP de wifi 7 supporte jusqu'à 16 antennes	26
3.1	Parties de latence.	30
3.2	Exemple de transmission OFDMA+MIMO en 802.11 be.	32
3.3	Exemple de hiérarchie de canaux intégrée dans 11 ac.	32
3.4	Exemple de combinaisons possibles RU52 et RU26 en 40 MHz.	33
3.5	Opération multi-liens.	37
3.6	Fonctionnement multi-liens asynchrone (en haut) et synchrone(en bas).	38
3.7	Mode Duplication et Mode Conjoint.	39
3.8	Désalignement du mot de code MDPU.	41
3.9	Le concept de NOMA.	44
3.10	11ax SR vs CSR.	45
3.11	Transmission et réception conjointes (à gauche), Co-OFDMA (au centre), Direction nulle coordonnée (à droite).	46
3.12	Exemple de protocole de sondage multi-AP pour JTX.	48
3.13	Test 1.	52
3.14	Test 2.	53
4.1	Débit en fonction du nombre de stations pour nombre de PA=5.	56
4.2	Débit en fonction du nombre de stations pour nombre de PA=10.	57
4.3	Débit en fonction de nombre de stations pour nombre de PA=50.	57
4.4	Débit en fonction du nombre de stations pour nombre de PA=100.	58

Liste des tableaux

1.1	Tableau comparatif entre les différentes technologies de transmission du 802.11.	9
2.1	Améliorations significatives apportées par la norme 802.11ac [6].	14

Liste des abréviations

A-MPDU	Aggregation Mac Protocol Data Unit
A-MSDU	Aggregation Mac Service Data Unit
AC	Access Category
AP	Access Point
BLR	Boucle Locale Radio
BSS	Basic Set Service
BSS	basic Service Set
CFP	Contention Free Period
CP	Contention Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sens Multiple Access/Collision Detection
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DL	Dowlink
DL-MU	Dowlink-Multi User
DSP	Digital Sigant Processor
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DS	Distribution System
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
ESS	Extented Set Service
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Spécial Mobile
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HE-MU	High Efficiency - Multi User
HE-SU	High Efficiency - Surl User
IBSS	Independent Basic Set Service
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol

IR	Infrarouge
ISM	Industriel, Scientifique et Médical
LDPC	Low Density Parity Check
MAC	Medium Access Control
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCF	Point Coordination Function
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
PHY	couche physique
PPM	pulse position modulation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Qualité de Service
RTA	Round Trip Average
RU	Resource Unit
SIC	Constellations d'Interférences Successives
SS	flux spatiaux
STA	Poste Client
TGbe	Task Group be
TSN	Time-Sensitive Networking
TWT	Target Wakeup Time
TXOP	Transmission Opportunity
UL	Uplink
UL-MU	Uplink-Multi User
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VHT	Very High Throughput
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WiFi	Wireless Fidelity
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WWAN	Wireless Wide Area Networks

Introduction générale

Le WiFi a été conçu, comme Ethernet dont il s'est inspiré, pour mettre en œuvre des réseaux locaux en utilisant les ondes électromagnétiques. On parle donc de Wireless LAN (WLAN), c'est-à-dire « LAN sans fil ». On parle aussi de Radio LAN (RLAN) si le support de communication est la radio. Les produits WiFi reposent sur les protocoles WLAN publiés à partir de 1997 par l'IEEE sous le nom de 802.11 [2]. IEEE est l'un des principaux instituts américains de standardisation des technologies de communications.

Il existe plusieurs variantes du WiFi, le 802.11b et le 802.11g sont compatibles entre eux et fonctionnent tous deux avec les ondes radio d'une fréquence de 2,4 GHz. Le 802.11b atteint un débit de 11 Mbps et le 802.11g monte à 54 Mbps. Le 802.11a n'est pas compatible avec le 802.11b et le 802.11g, car il fonctionne avec les ondes radio d'une fréquence de 5 GHz. Il permet d'atteindre 54 Mbps. Le 802.11n permet d'atteindre un débit réel supérieur à 100 Mbps. Il est capable de fonctionner à 2,4 GHz ou à 5 GHz et est compatible avec le 802.11b/g et le 802.11a. Malheureusement, la plupart des équipements 802.11n disponibles aujourd'hui n'utilisent que la bande de fréquences de 2,4 GHz (et ne sont donc pas compatibles avec le 802.11a) [3].

La norme 802.11ac a été proposée en 2013 pour améliorer les débits de données (jusqu'à 600 Mbps) en exploitant plusieurs techniques. Premièrement, il introduit des taux de codage plus élevés de 5/6 par rapport aux 3/4 précédents et réduit éventuellement l'intervalle de garde entre les symboles OFDM de $0,8 \mu\text{s}$ à $0,4 \mu\text{s}$. Deuxièmement, il double la largeur du canal à 40 MHz. Troisièmement, il introduit la technologie MIMO qui est la percée la plus importante du 802.11n.

Avec 802.11n, une paire d'appareils peut utiliser plusieurs antennes pour transmettre jusqu'à quatre flux spatiaux (SS) simultanément entre eux. Des débits de données nominaux élevés au PHY n'offriraient aucun avantage à l'utilisateur final s'il n'y avait pas les nouvelles fonctionnalités MAC. Les caractéristiques MAC les plus importantes sont deux méthodes d'agrégation, à savoir l'unité de données de service MAC agrégée (A-MSDU) et l'unité de données de protocole MAC agrégée (A-MPDU), qui ont considérablement réduit la surcharge induite par les en-têtes et les espaces inter-trame. A-MSDU ajoute plusieurs paquets agrégés avec un seul en-tête MAC et une somme de contrôle. A-MPDU attribue un en-tête MAC et une somme de contrôle de trame à chaque paquet agrégé. Ainsi, La prochaine augmentation de 10x des débits de données est mise en œuvre avec l'amendement 802.11ac (Wi-Fi 5).

L'amendement 802.11ac étend les approches utilisées dans la version précédente du Wi-Fi. Ainsi, il augmente l'ordre de constellation de la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) de 64-QAM à 256-QAM, c'est-à-dire que le nombre maximal de bits bruts par symbole passe de six à huit. La bande passante du canal augmente jusqu'à 160 MHz. Comme de telles bandes larges ne sont pas disponibles en 2,4 GHz, le 802.11ac ne fonctionne qu'en 5 GHz. En raison de la rareté du spectre, l'amendement permet d'utiliser des canaux $80 + 80$ MHz non contigus qui peuvent être séparés par un certain écart de fréquence. Pour faire face aux interférences, avant chaque transmission de paquet, chaque appareil sélectionne de manière adaptative la bande passante utilisée pour ce paquet : 20, 40, 80 ou 160 MHz. Quant au MIMO, le 802.11ac double le nombre de SS jusqu'à 8. Les développeurs de la norme ont remarqué qu'il n'est guère possible de déployer plus de deux antennes sur certains appareils. De plus, le point d'accès (AP) peut ne disposer que d'une faible partie des données destinées à chaque poste client (STA). Pour résoudre ces

problèmes, 802.11ac introduit le MIMO multi-utilisateurs (MU) de liaison descendante (DL) qui permet à un point d'accès d'attribuer différents DL SS à divers STA. Tous ces moyens augmentent le débit jusqu'à 7 Gbps.

Le développement du Wi-Fi 6 (802.11ax) est lié à un changement de paradigme. Au lieu d'augmenter les débits de données nominaux, le groupe de travail 802.11 se concentre sur l'amélioration de l'efficacité des réseaux Wi-Fi, en particulier dans les déploiements denses de 2,4 GHz et 5 GHz. Principalement, ils introduisent un accès multiple à répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) au Wi-Fi, ce qui permet d'allouer des portions petites mais les plus efficaces de ressources temps-fréquence aux STA. En dehors de cela, le Wi-Fi 6 permet les transmissions MU MIMO et OFDMA en liaison montante (UL) et introduit des règles plus flexibles pour la liaison de canal et la détection de porteuse. L'AP contrôle entièrement les paramètres des transmissions UL MU, tels que le MCS, la durée, etc. En particulier, il envoie des trames de déclenchement qui incluent ces paramètres et initient les transmissions UL MU, une nouvelle norme verra le jour sous la dénomination EHT (Extremely High Throughput) ou 802.11be.

Pour améliorer les performances dans les scénarios extérieurs et ajouter plus de flexibilité à OFDMA, le 11be downclocke la numérotologie OFDM quatre fois, quadruplant le nombre de tonalités. Ainsi, la durée du symbole OFDM devient 12,8 μ s plus l'intervalle de garde de 0,8, 1,6 ou 3.2 μ s. Avec l'intervalle de garde le plus court, la surcharge réduit de 10 % par rapport au Wi-Fi 5. Pour augmenter le débit nominal, le Wi-Fi 6 active 1024-QAM qui transporte 25 % plus de données brutes que le 256-QAM du Wi-Fi 5. En résumé, les débits nominaux sont augmentés de 37 %, ce qui est négligeable par rapport à la croissance dix fois supérieure à ses prédécesseurs. Malgré de bien meilleures performances dans les déploiements denses, ces faibles gains de débit nominal peuvent ne pas attirer de nouveaux clients. Les sceptiques affirment que se concentrer sur la qualité de fonctionnement et ignorer les indicateurs de performance quantitatifs peut ralentir les ventes d'appareils Wi-Fi 6. Une telle préoccupation est l'une des raisons pour lesquelles le groupe de travail 802.11 revient à l'augmentation du débit nominal en Wi-Fi 7, ainsi qu'à l'amélioration de l'expérience utilisateur (par exemple, Des débits de données élevés ne suffisent pas pour prendre en charge RTA car les paquets peuvent attendre longtemps que le canal devienne inactif ou que les paquets précédents soient servis. Ainsi, en plus de fournir des débits de données élevés, l'amendement 802.11be traite de la qualité de service (QoS) de RTA. Dans les réseaux Wi-Fi, il existe une palette de méthodes pour fournir la QoS. Cependant, un seul d'entre eux, à savoir Enhanced Distributed Channel Access (EDCA), est utilisé dans la pratique. EDCA distingue les types de trafic voix, vidéo, au mieux et en arrière-plan en leur attribuant différentes catégories d'accès (AC). Comme EDCA étend l'accès au canal paramétrique de base, il ne peut pas garantir la qualité de service.

Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous nous sommes intéressés à l'équilibrage de charge de l'amendement IEEE 802.11be, ses défis et problèmes techniques liés à cette norme. Pour cela, nous avons entrepris notre étude selon les quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre propose quelques notions fondamentales et généralités à propos des réseaux locaux sans fil et les différentes modifications apportées au fil des années.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les trois normes IEEE 802.11ac, ax, et be, nous présentons les caractéristiques et les avantages de chacune par rapport à sa précédente.

Le troisième chapitre est consacré aux problèmes et défis techniques de la norme IEEE 802.11be, et nous terminons par la proposition de deux heuristiques liés aux problèmes de l'équilibrage de charge, ainsi qu'un exemple d'application pour chacune.

Enfin, Le quatrième chapitre se repose sur la simulation de l'algorithme de l'équilibrage de charge et résultats, on a pris le débit agrégé comme métrique de simulation et on a interprété les résultats de chaque test.

Chapitre 1

Réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11

1.1 Introduction

Généralement la gestion des réseaux sans fil se rapporte à l'utilisation des signaux infrarouges ou hertziens (radiofréquences) pour partager l'information et les ressources entre les dispositifs. Beaucoup de types d'appareils sans fil sont disponibles aujourd'hui ; par exemple, terminaux mobiles, PCs de poche, ordinateurs portables, téléphone mobile, PDA, capteurs sans fil, et récepteurs satellites.

La communication entre divers dispositifs sans fil permet de fournir des services uniques et innovateurs. Bien que cette communication sans fil inter-dispositifs soit un mécanisme très puissant, c'est également un mécanisme complexe et maladroit, menant à beaucoup de complexité dans les systèmes actuels. Ceci rend non seulement la gestion du réseau difficile mais bien aussi pose des limites dans sa flexibilité. Beaucoup de normes existent aujourd'hui pour la connexion de divers dispositifs.

Dans ces dernières années, beaucoup de normes et technologies sans fil de connectivité ont émergé. Ces technologies permettent à des utilisateurs de connecter un grand nombre de dispositifs de télécommunications facilement et simplement, sans la nécessité d'acheter, porter, ou relier des câbles.

L'objectif de ce chapitre est de présenter en détail le standard 802.11 qui est le plus utilisé dans les réseaux locaux sans fil. Pour cela, nous commencerons dans une première partie par décrire les topologies suivant lesquels les WLAN 802.11 fonctionnent. Ensuite, nous présenterons les caractéristiques liées à l'architecture logique de la norme (couche physique et couche MAC).

1.2 les réseaux sans fil

1.2.1 Généralités sur les réseaux sans fil

Un réseau sans fil (wireless network) est, comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux (ordinateur portable, PDA, etc.) peuvent communiquer sans liaison filaire.

Grace aux réseaux sans fil, un utilisateur a la possibilité de rester connecté tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu, c'est la raison pour laquelle on entend parfois parler de mobilité.

Les réseaux sans fil permettent de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation de tels réseaux ne demande pas de lourd aménagements des infrastructures

existantes, comme c'est le cas avec les réseaux filaires, ce qui a valu un développement rapide de ce type de technologies [5].

1.2.2 Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture

On distingue habituellement plusieurs catégories de réseaux sans fils, selon le périmètre géographique offrant une connectivité (appelé zone de couverture).

1.2.2.1 Les WPAN

Le réseau personnel sans fil (appelé également réseau individuel sans fil ou réseau domestique sans fil et noté WPAN concerne les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, ...) ou un assistant personnel (PDA) à un ordinateur sans liaison filaire ou bien à permettre la liaison sans fil entre deux machines très peu distantes comme par exemple le réseau ZigBee. Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN. La principale technologie WPAN est la technologie Bluetooth, lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1 Mbps pour une portée maximale d'une trentaine de mètres. Bluetooth, connue aussi sous le nom IEEE 802.15.1, possède l'avantage d'être très peu gourmande en énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée à une utilisation au sein de petits périphériques [5].

Le ZigBee est un réseau pour des communications bas débit et dédié à des applications embarquées. Un émetteur/récepteur ZigBee est caractérisé par une portée de quelques dizaines de mètres et un débit de 20 à 250 Kbit/s. La norme prévoit l'utilisation de trois bandes de fréquence (868, 915 ou 2400 MHz). La spécification ZigBee propose une pile protocolaire propriétaire et légère, déclinable dans plusieurs versions. Elle s'appuie sur la norme IEEE 802.15.4 pour les couches Physique et Liaison de données. Elle propose ses propres couches supérieures (Réseau, etc..).

1.2.2.2 Les WLAN

Le réseau local sans fil ou WLAN est un réseau permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, soit une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe plusieurs technologies concurrentes : Le Wifi (ou IEEE 802.11), soutenu par l'alliance WECA qui offre des débits allant jusqu'à 54Mbps sur une distance de plusieurs centaines de mètres.

1.2.2.3 Les WMAN

Le réseau métropolitain sans fil (WMAN) est connu sous le nom de BLR. Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. La boucle locale radio offre un débit utile de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication. La norme de réseau métropolitain sans fil la plus connue est le WiMAX, permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres.

WiMAX est le réseau métropolitain sans fil le plus connu, permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbits/s sur un rayon de plusieurs kilomètres. Il permet de fournir un accès internet rapide à certaine zones rurales qu'il coûterait trop cher d'équiper en ADSL classique.

Le WiMAX utilise des bandes de très hautes fréquences, situées entre 2 et 66 GHz. C'est une technologie de réseau sans fil fixe et non mobile. Elle nécessite que les antennes émettrices et réceptrices soient situées l'une en face de l'autre pour que les transmissions passent [5].

1.2.2.4 Les WWAN

Le réseau étendu sans fil (WWAN) est également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies de WWAN : GSM (Global System for Mobile Communication ou en français Groupe Spécial Mobile), GPRS (General Packet Radio Service) et UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

GSM constitue au début du 21^{me} siècle le standard de téléphonie mobile le plus utilisé en Europe. Il s'agit d'un standard de téléphonie dit de seconde génération (2G), car contrairement à la première génération de téléphones portables, les communications fonctionnent selon un mode entièrement numérique.

GPRS permet d'étendre l'architecture du standard GSM, afin d'autoriser le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums de l'ordre de 171,2 Kbits/s (en pratique jusqu'à 114 Kbits/s). Grâce au mode de transfert par paquets, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsque c'est nécessaire. Le standard GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans sur coût [5].

La figure 1.1 résume la classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture :

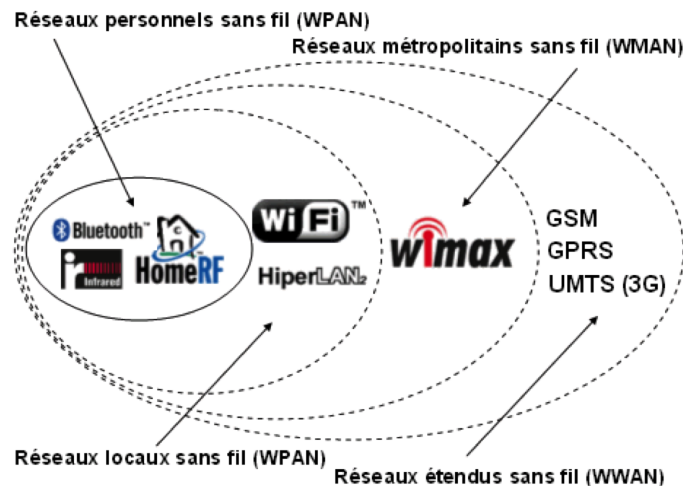


FIGURE 1.1 – Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture.

1.2.3 Architecture WLAN

Le Wi-Fi est fondé sur une architecture cellulaire. Cette architecture est par exemple celle utilisée dans la téléphonie mobile, où des téléphones mobiles utilisent des stations de base pour communiquer entre eux. Un groupe de terminaux munis d'une carte d'interface réseau 802.11, s'associent pour établir des communications directes et forment un BSS. le standard 802.11 offre deux modes de fonctionnement, le mode infrastructure et le mode ad hoc.

1.2.3.1 Mode avec infrastructure

Le mode infrastructure est défini pour fournir aux différentes stations des services spécifiques sur une zone de couverture déterminée par la taille du réseau. Les réseaux d'infrastructure sont établis en utilisant des points d'accès, ou AP, qui jouent le rôle de station de base pour une BSS.

Les APs peuvent être reliés ensemble par un système de distribution ou DS. Le standard ne donne pas de spécification particulière sur la nature de cette interconnexion mais il s'agit en général d'un réseau filaire (de type Ethernet). Le DS pourrait tout aussi bien utiliser des connexions hertziennes entre les points d'accès. Un groupe de BSS interconnectés par un système de distribution forment un ESS, qui n'est pas très différent d'un sous-système radio de réseau de mobiles [5].

1.2.3.2 Mode ad hoc

Un réseau sans fil ad hoc est un type de réseau sans fil décentralisé qui ne s'appuie pas sur une infrastructure préexistante, comme des routeurs dans les réseaux filaires ou des points d'accès dans les réseaux sans fil administrés. Au lieu de cela, chaque nœud participe au routage en retransmettant les données aux autres nœuds, de façon que le choix du nœud qui va transmettre les données est opéré dynamiquement sur la base de la connectivité du réseau et de l'algorithme de routage utilisé.

Les réseaux sans fil ad hoc sont des réseaux auto-configurants et dynamiques dans lesquels les nœuds sont libres de se déplacer. Les réseaux sans fil ne souffrent pas des complexités liées à la configuration et à l'administration d'infrastructures, permettant ainsi aux appareils de créer et joindre des réseaux à la volée – n'importe où, n'importe quand [22].

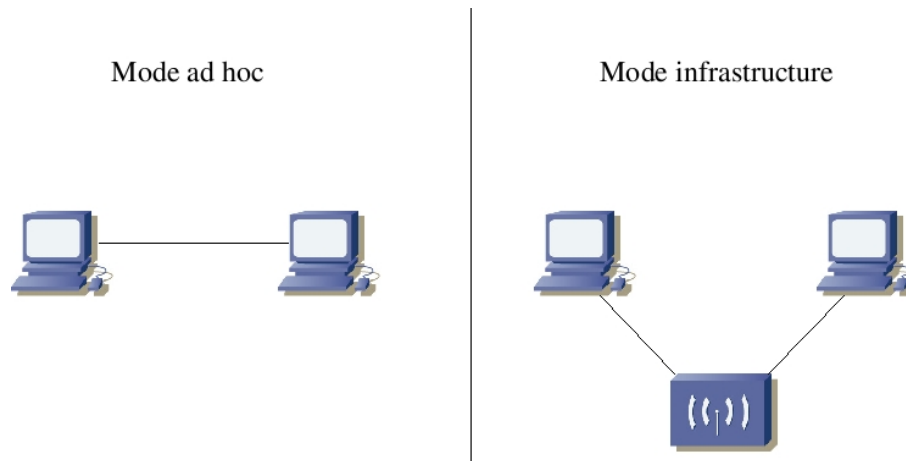


FIGURE 1.2 – Mode Ad Hoc et Infrastructure.

1.3 La norme 802.11

1.3.1 Généralités

Le premier standard international de réseaux locaux sans fils IEEE 802.11 a été écrit par l'IEEE en 1997. Ce standard couvre la couche physique et la sous couche de contrôle d'accès au médium du modèle de référence OSI. Quatre types de couches physiques étaient alors définis dans le standard 802.11 utilisant soit la technique à étalement de spectre à sauts de fréquences FHSS, soit la technique à étalement de spectre à séquence directe DSSS

, soit l'infrarouge, soit la technique de division du signal sur des porteuses orthogonales OFDM. Ces couches définissent aussi bien les caractéristiques du canal radio utilisé que les différents codages permettent de fiabiliser les transmissions. L'ensemble de ces supports physiques utilisant la même sous couche MAC permettait des débits de 1 à 2 Mbps [5].

1.3.2 La couche physique

La couche physique définit la modulation des ondes radioélectriques et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données, elle propose plusieurs types de codage de l'information : DSSS, FHSS, IR, OFDM, toutes ces technologies permettent des débits de 1Mbps et 2Mbps.

- DSSS

C'est une méthode de modulation de signal, qui permet un étalement de spectre en séquence directe. La bande des 2,4 GHz est divisée en 14 canaux de 22 MHz espacés de 5 MHz. Les canaux adjacents se chevauchent partiellement (en cas où deux points d'accès utilisant les mêmes canaux ont des zones d'émission qui se recoupent, des distorsions du signal risquent de perturber la transmission) et seuls trois canaux sur les 14 étant entièrement isolés sont généralement utilisés pour éviter les interférences. Les données sont transmises intégralement sur l'un de ces canaux de 22 MHz, sans répartition de canaux de technologies DSSS [8].

- FHSS

Cette technique consiste à découper la large bande de fréquence en un minimum de 75 canaux (hops ou saut d'une largeur de 1 MHz), puis de transmettre en utilisant une combinaison de canaux connue de toutes les stations de la cellule. Dans la norme Wi-Fi, la bande de fréquence de 2.4 GHz permet de créer 79 canaux de 1 MHz. La transmission se fait ainsi en émettant successivement sur un canal puis sur un autre pendant une courte période de temps (d'environ 400 ms), l'émetteur et le récepteur s'accordent sur une séquence de Sauts de fréquence porteuse pour envoyer les données successivement sur les différents sous-canaux.

- IR

Une liaison infrarouge permet de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec un débit qui peut atteindre quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée pour la domotique (télécommandes) mais souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses [9].

Il est possible grâce à la technologie infrarouge d'obtenir des débits allant de 1 à 2 Mbit/s en utilisant une modulation appelée PPM. Cette dernière consiste à transmettre des impulsions à amplitudes constantes, et à coder l'information suivant la position de l'impulsion.

- OFDM

Le principe de cette technique consiste à diviser le signal que l'on veut transmettre sur différentes bandes porteuses, comme si l'on combinait ce signal sur un grand nombre d'émetteurs indépendants, fonctionnant sur des fréquences différentes. Un canal est constitué de 52 porteuses de 300 KHz de largeur, 48 porteuses sont dédiées au transport de l'information utile et 4 pour la correction d'erreurs appelées porteuses pilote,

Huit canaux de 20 MHz sont définis dans la bande de 5 GHz.

Comparaison entre ces techniques :

	Avantages	Inconvénients
DSSS	-Elle propose des vitesses de transmissions plus importantes.	-L'utilisation d'un seul canal pour la transmission, rend le système DSSS plus sensibles aux interférence.
FHSS	-Elle empêche une perte totale du signal, grâce à la technique de transmission par saut. -Elle constitue une solution efficace dans un environnement où il y a beaucoup de multitrajets.	-Faible largeur de bande par canal ne lui permettant pas d'atteindre des vitesses de transmissions élevées. -Utilisation de toute la largeur de bande, ce qui implique une charge supplémentaire sur le réseau.
Infrarouge		-La transmission se fait avec une longueur d'onde très faible. -Une traversée des obstacles (murs, plafonds, cloisons...) n'est pas possible.
OFDM	-Permet d'atteindre des vitesses de transmission jusqu'à 54 Mbps pour la 802.11a et la 802.11g. -Elle offre un mécanisme de correction d'erreurs sur l'interface physique.	

TABLE 1.1 – Tableau comparatif entre les différentes technologies de transmission du 802.11.

1.3.3 La couche MAC

La couche MAC 802.11 est comparable à la couche MAC 802.3 où elle implémente la politique d'accès, néanmoins elle reste spécifique à l'IEEE 802.11 car elle offre davantage de fonctions par rapport à une couche MAC classique (allocation du support, adressage, formatage des trames). Ces fonctions supplémentaires offertes sont normalement confiées aux protocoles supérieurs, comme les sommes de contrôle CRC, la fragmentation et le réassemblage (très utile car le support radio a un taux d'erreurs important), les retransmissions de paquets et les accusés de réception. Cela ajoute de la robustesse à la couche MAC 802.11 [5].

L'une des particularités du standard 802.11 est qu'il définit deux mécanismes d'accès fondamentalement différents au niveau de la couche MAC :

- Une fonction de coordination distribuée DCF conçue pour prendre en charge le transport de données asynchrones, dans laquelle tous les utilisateurs voulant transmettre des données, ont une chance égale d'accéder

au support. Son implémentation est obligatoire pour tous les équipements IEEE 802.11 fonctionnant en mode avec ou sans infrastructures et correspond à une méthode d'accès assez similaire à celle des réseaux traditionnels supportant le best-effort.

- Le second mécanisme d'accès est une fonction de coordination centralisée PCF, fondée sur l'interrogation à tour de rôle des terminaux, ou polling, sous le contrôle du point d'accès. La méthode PCF est conçue essentiellement pour la transmission de données sensibles, qui demandent une gestion de la QoS. PCF, mode sans contention, est utilisé pour les applications temps-réel, telles que la voix ou la vidéo. Un réseau en mode ad-hoc utilise uniquement DCF, tandis qu'un réseau en mode infrastructure utilise à la fois le DCF et le PCF [5].

1.3.3.1 Le CSMA/CA de la norme IEEE 802.11

Le CSMA/CA est une technique d'accès aléatoire de la même famille que CSMA/CD d'Ethernet (IEEE 802.3), avec écoute de la porteuse, qui permet d'écouter le support de transmission avant d'émettre. Le CSMA évite ainsi qu'une transmission ne soit faite que lorsque le support est libre, réduisant pour cela le risque de collision, mais ne permet pas de l'éviter complètement.

L'utilisation de la méthode CSMA/CD de l'Ethernet est impossible sur un canal radio : une station ne peut pas transmettre et écouter simultanément sur le canal vu les différences significatives des puissances de transmission et d'émission. Pour la signalisation de la bonne réception d'une trame, un mécanisme d'acquiescement positif est utilisé dans la méthode CSMA/CA. Chaque fois qu'une trame est correctement reçue, un paquet d'acquiescement doit être renvoyé à la source. L'absence de cet acquiescement indique un problème dans la transmission de la trame. La trame doit être retransmise.

Ce protocole repose sur une écoute du canal de transmission, couplée à une attente aléatoire avant émission, afin de réduire la fréquence des émissions simultanées des trames rendant souvent la réception de ces trames impossible à cause de collisions [5].

1.3.3.2 Mode d'accès PCF

Ce mode d'accès est complémentaire au mode d'accès décentralisé et nécessite la présence d'un coordinateur, généralement le point d'accès, qui prend le contrôle du support et autorise ou non les stations à émettre. Cette méthode est optionnelle contrairement à la méthode DCF et ne fonctionne qu'en mode infrastructure, où les stations de base ont la charge de la gestion de l'accès au canal dans leur zone de couverture pour les mobiles qui leur sont rattachés. Les communications directes entre les stations sans fils ne sont plus possibles, elles doivent toutes passer par le point d'accès. De ce fait, la moitié de la bande passante est gaspillée.

Cette méthode a été lancée par le standard pour répondre aux besoins des utilisateurs ayant des trafics temps réel. Elle est basée sur la définition d'une période sans contention CFP qui se déroulera en alternance avec la période avec contention CP gérée par le mode DCF. Au sein d'un même BSS, le temps d'accès au canal sera alors partagé en des intervalles (CFP + CP) nommés Beacon Interval ou balise. Les stations peuvent utiliser à la fois les algorithmes PCF et DCF. La durée maximale, CFP- MaxDuration est définie par le point d'accès. Les périodes CFP s'initient lors de l'émission d'une balise par le point d'accès. Pendant la durée CFP-MaxDuration, c'est la méthode d'accès PCF qui est activée, le reste du temps c'est la méthode DCF.

Pour alterner les modes PCF et DCF, on utilise une super-trame qui permet de notifier la période de répétition du mode sans contention (PCF). Le début de cette super-trame est marqué par une trame balise. Pour émettre cette balise, on utilise l'inter-trame PIF. Le début du mode PCF peut être retardé, soit par l'attente de la fin de l'émission d'un paquet qui n'est pas fini, soit par l'attente de son acquittement s'il arrive avant le PIFS. L'acquittement est prioritaire parce que le SIFS est plus court que le PIFS [5].

1.3.3.3 Mode d'accès DCF

La méthode d'accès basique de la couche Mac 802.11 est la DCF (Distributed Coordination Function) qui se base sur l'utilisation de CSMA/CA pour supporter les transmissions asynchrones de données. L'accès au support est contrôlé par l'utilisation d'espaces inter trames ou Inter-Frame Spacing (IFS). Ils correspondent à l'intervalle de temps entre la transmission de deux trames. Ce sont en fait des périodes d'inactivité sur le support de transmission qui permettent de gérer l'accès au support pour les stations ainsi que d'instaurer un système de priorités lors d'une transmission. Les valeurs des différents IFS sont calculées par la couche physique.

Ces IFS sont :

- **Short IFS (SIFS)** : Est le plus court des IFS. Il est utilisé pour séparer les différentes trames transmises au sein d'un même dialogue comme par exemple, entre des données et leurs acquittements ou entre différents fragments d'une même trame ou pour toute autre transmission relative à un même dialogue (question-réponse).
- **DCF IFS (DIFS)** : Est le temps que doivent attendre les stations avant d'émettre un paquet en mode DCF. La valeur du DIFS est calculée comme suit :

$$\text{DIFS} = \text{SIFS} + 2 \times \text{Slotime}$$

- **PCF IFS (PIFS)** : Est utilisé par le point d'accès pour accéder avec priorité au support. Il est calculé de la façon suivante :

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

- **Extended Inter-Frame Spacing (EIFS)** : Est utilisé par les stations opérant en mode DCF. C'est le plus long des IFS et est utilisé suite à un FCS (Frame Check Sequence) erroné.

Dans DCF, une station doit écouter le canal avant d'initialiser l'envoi d'un paquet. Si le canal est libre pendant un temps DIFS, la station peut transmettre son paquet. Les stations en écoute constatent une émission et déclencheront pour une durée fixée leur indicateur NAV et utiliseront cette information pour retarder toute transmission prévue.

Si le canal est resté libre durant une période DIFS, les stations qui veulent émettre choisissent, dans une fenêtre appelée Contention Window (CW), un backoff aléatoire exprimé en un nombre de time slots d'une durée fixe de 20 μ s. Ce temps aléatoire (Temps De Backoff) est choisi de la façon suivante :

$$\text{Temps de Backoff} = \text{Random}(0, \text{CW}) \times \text{Slotime}$$

Où Random (a, b) est la fonction de tirage aléatoire uniforme d'un entier dans l'intervalle [a, b]; CW est la valeur en cours de la fenêtre de contention.

Une fois ce tirage effectué, tant que le canal reste libre, les stations décrémentent leur backoff. La première station qui termine la décrémentation, s'engage à émettre ses données. Dès que les autres stations détectent le regain d'activité sur le canal, ils stoppent la décrémentation de leurs backoff et entrent en période de defering. Lorsque le canal redevient libre pendant un temps supérieur à DIFS, les stations qui n'avaient pas pu émettre peuvent reprendre la décrémentation de leur backoff au point où ils l'avaient laissé.

Une collision peut avoir lieu si deux ou plusieurs stations ont commencé à transmettre en même temps, sinon un acquittement est envoyé à l'émetteur pour accuser la réception. Le récepteur attend pendant un temps SIFS après la réception correcte des données avant d'envoyer son ACK. Pour réduire la probabilité de collisions, après chaque échec de transmission, la fenêtre de contention est doublée (4) jusqu'à une valeur maximale prédéfinie CW_{max} .

$$CW = (CW_{min} \times 2^i) - 1$$

La fenêtre de contention est réinitialisée à une valeur minimale fixe CW_{min} , après chaque transmission avec succès ou lorsqu'un paquet est rejeté suite au dépassement de la limite des retransmissions.

Cette technique permet d'éviter au maximum les collisions en laissant, pour chaque station, la même probabilité d'accès au support. Cependant, si au moins deux stations obtiennent leur backoff à zéro en même temps et elles émettent simultanément, une collision peut apparaître et sa détection par la station émettrice n'est malheureusement pas possible. Pour cela, un acquittement (ACK) est utilisé pour informer la station émettrice que la trame est reçue avec succès.

Il faut noter que le temps de pause qui sépare un paquet de données de son acquittement est SIFS. Il est plus court que DIFS. La station en période de defering ne pourra reprendre la décrémentation de son backoff que si le canal est à nouveau libre pendant DIFS. Le fait que SIFS soit plus court empêche que la décrémentation ne reprenne de manière inopportune entre les données et leur acquittement.

Le mécanisme de backoff limite les risques de collision mais ne les supprime pas complètement. Aussi, si une collision se produit quand même (détectée grâce à l'absence d'acquiescement), un nouveau backoff va être tiré au hasard. Mais à chaque collision consécutive, la taille de la fenêtre de contention va doubler afin de diminuer les chances que de telles collisions se répètent. La borne inférieure de la Contention Window est toujours zéro, et la borne supérieure va évoluer entre les valeurs CW_{min} et CW_{max} définies par la norme [5].

1.3.3.4 Mécanisme RTS/CTS

Pour éviter la collision sur le paquet de données, la norme définit un mécanisme optionnel avec échange de messages courts RTS et CTS. Une station voulant émettre transmet d'abord un petit paquet de contrôle appelé RTS (Request To Send), qui comprend la source, la destination, et la durée de transmission la station destination répond (si le canal est libre) avec un paquet de contrôle de réponse appelé CTS (Clear To Send) qui inclura les mêmes informations sur la durée. Grâce à l'envoi de la trame RTS, toutes les stations situées dans la couverture radio de la source sont informées d'une transmission imminente et de sa durée éventuelle. Le CTS a le même rôle d'annonce mais cette fois autour du récepteur.

Ce mécanisme quoique efficace entraîne un surcout important occasionné par la transmission sur la voie radio des trames de signalisation RTS/CTS. Ce surcout correspond à autant de bande passante qui n'est pas utilisée

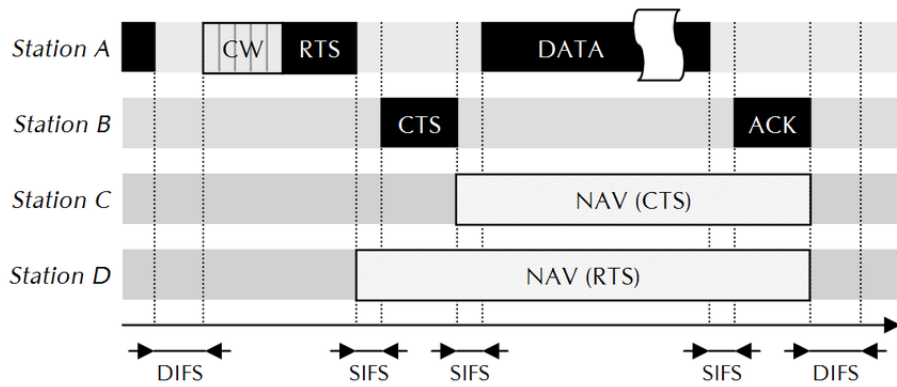


FIGURE 1.3 – Méthode d'accès au médium en mode RTS/CTS.

pour transmettre des données. C'est pourquoi à ce mécanisme est associé un seuil de déclenchement qui limite l'usage lorsque le surcôt devient trop important. Si la longueur des données à transmettre est inférieure à ce seuil, la transmission se fera sans utilisation des trames RTS/CTS. Si le seuil est dépassé alors le mécanisme est utilisé pour la transmission.

1.4 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre l'algorithme de CSMA/CA de la norme IEEE 802.11 en mode DCF, sur lequel est basée la plupart des protocoles qui exploitent de différentes façons une période de contention. Cette norme est prioritairement destinée à des réseaux sans fil à infrastructure fixe, les standards qu'elle définit pour l'accès au médium et pour la couche physique sont tout à fait utilisables dans le contexte des réseaux ad hoc. Le prochain chapitre présentera une comparaison entre les trois nouvelles normes 802.11ac, ax et la be, en particulier la norme qui nous intéresse IEEE 802.11be et toutes ses caractéristiques.

Chapitre 2

Evolution du Wi-Fi

2.1 Introduction

Chaque nouvelle génération de Wi-Fi permet de prendre du recul et de réfléchir aux changements révolutionnaires qui nous affecteront dans les années à venir. Aujourd'hui, les réseaux Wi-Fi doivent déjà prendre en charge des contenus multimédias consommant beaucoup de bande passante, ainsi que plusieurs appareils sans fil par utilisateur. À terme, les réseaux vont devoir faire face à une augmentation continue du nombre d'appareils, à un triplement du nombre total d'adresses IP à travers le monde et à un large éventail de nouvelles technologies qui dépendront fortement du Wi-Fi [10].

2.2 La norme IEEE 802.11ac

Afin de répondre à la demande de performances de plus en plus fortes, le groupe de travail 802.11 a mis en place un groupe d'étude «VHT» pour Very High Throughput (très haut débit) dont le but serait d'apporter un certain nombre de modifications au standard pour lui permettre de dépasser la vitesse de 1Gbits/s. Parmi les applications gourmandes en débit on peut citer la diffusion de flux vidéo en haute définition ou le partage d'écran.

Ce groupe d'études est parvenu à dépasser les débits permis par la norme 802.11n (600Mbit/s) en proposant la norme 802.11ac qui permet des débits théoriques de 1,6Gbit/s. Ces performances reposent sur un certain nombre d'améliorations qui ont été effectuées et qui sont résumées dans ce tablea.

802.11n	802.11ac
<ul style="list-style-type: none">- Compatible avec des canaux de 20 et 40 MHz de largeur de bande.- Compatible avec les bandes de fréquences 2,4 et 5 GHz.- Utilise les modulations BPSK, QPSK, 16-QAM, et 64-QAM.- Supporte beaucoup de types de beamforming.- Supporte jusqu'à 4 flux spatiaux (MIMO 4).	<ul style="list-style-type: none">- Ajout de canaux de 80 et 160 MHz.- Uniquement 5 GHz.- Ajout de la 256-QAM.- Uniquement compatible avec le null data packet (NDP) beamforming .- Supporte jusqu'à 8 flux spatiaux (MIMO 8). pour les points d'accès et 4 (MIMO 4) pour les clients.- Ajout du MU-MIMO (multi-user multiple in multiple out).

TABLE 2.1 – Améliorations significatives apportées par la norme 802.11ac [6].

2.2.1 Bande et largeur de bande des canaux

La bande choisie et la largeur de bande des canaux d'émission jouent un rôle important dans la transmission des données. Il faut rappeler qu'un nombre conséquent d'appareils sont conçus pour émettre et recevoir sur les bandes ISM, il convient donc de les séparer en plusieurs canaux d'émission de largeur réduite pour simplifier leur partage. Les utilisateurs choisissent de manière manuelle ou automatique le canal qu'ils vont utiliser, en évitant d'en choisir un perturbé ou déjà utilisé.

Comme le montre le schéma ci-dessous, la norme IEEE 802.11b définit les canaux utilisés dans la bande des 2,4GHz. On constate que les canaux utilisent une plage de fréquence de 22MHz, bien qu'ils soient à peine distants de 5 MHz. Ce chevauchement entraîne des perturbations entre les canaux adjacents, ce qui rend les conditions de transmission assez mauvaises dans cette bande. Sur la bande des 2,4GHz on peut utiliser au plus 4 canaux qui ne se chevauchent pas : 1 - 6 - 11 - 14

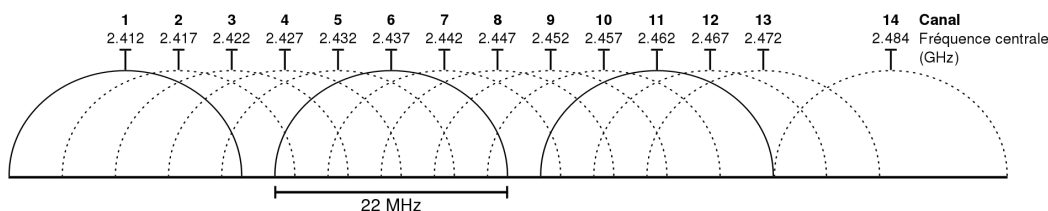


FIGURE 2.1 – Représentation graphique des canaux Wi-Fi dans la bande des 2,4 GHz.

La norme IEEE 802.11ac abandonne la bande des 2,4 GHz pour se concentrer sur la bande des 5 GHz, moins sujette aux pollutions électromagnétiques car moins utilisée. Cette bande est composée de deux sous bandes a dont l'utilisation est autorisée en France : 5150 - 5350 MHz et 5470 - 5725 MHz. Alors que la bande des 2,4 GHz dont la largeur totale est de 83MHz (2400 - 2483 MHz) ne supportait que des canaux d'une largeur de 20MHz ou de 40MHz, la bande des 5GHz, beaucoup plus large supporte des canaux étendus sur 80 voire 160MHz.

Cette évolution permet d'augmenter considérablement le débit grâce à l'utilisation d'un plus grand nombre de sous porteuses ,ce qui augmente la complexité de la modulation OFDM.

Il existe des mécanismes qui permettent de sélectionner la largeur des canaux de manière automatique. L'utilisateur doit néanmoins définir des canaux « primaires » et « secondaires ». Les protocoles de la couche MAC vont ensuite sélectionner de manière dynamique la bande la plus large possible, centrée sur le canal primaire (de 20MHz) choisi. Cela permet notamment à plusieurs appareils de se partager une large bande qu'ils n'utiliseront qu'en cas de besoin, tant que leurs bandes primaires ne se chevauchent pas. La bande des 5GHz présente cependant l'inconvénient de réduire la portée des émetteurs.

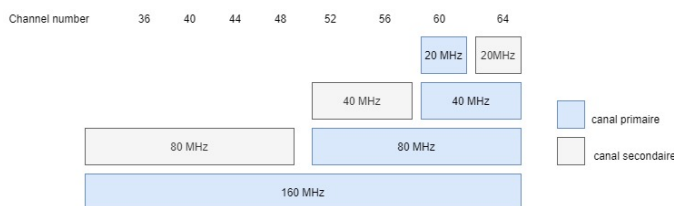


FIGURE 2.2 – Canal primaire / canal secondaire

2.2.2 Utilisation des canaux - modulation OFDM

Comme ses prédécesseurs, la norme IEEE 802.11ac utilise une modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour se servir de la bande passante. Les canaux (20, 40, 80 ou 160MHz) sont divisés en plusieurs sous-porteuses distantes de 312,5 KHz [7], soit 64 sous porteuses pour un canal de 20 MHz. Notons cependant que dans ces 64 sous porteuses, seules 52 sont utilisables pour transmettre des informations. En effet on ne se sert pas des six premières et cinq dernières sous porteuses pour limiter les interférences avec les canaux adjacents. Le canal central n'est pas non plus utilisé en modulation OFDM.

La modulation OFDM répartit les données entrantes entre les différentes sous porteuses. Parmi ces sous porteuses, certaines appelées « pilot » servent à calibrer la transmission entre l'émetteur et le récepteur. Elles sont donc inutilisables pour transporter des données.

2.2.3 Trame VHT (Very High Throughput, très haut débit)

Rappelons qu'avant d'être émises sous forme d'ondes électromagnétiques, les données sont regroupées dans des trames qui indiqueront dans leur entête des métadonnées renseignant notamment sur le destinataire et le type de modulation.

La conception des trames pour la norme IEEE 802.11ac s'est fait selon le critère de rétrocompatibilité imposé par le groupe de recherche 802.11. Lorsqu'un émetteur conforme IEEE 802.11ac émet une trame, les appareils des normes IEEE 802.11a et IEEE 802.11n doivent être capables de la voir et de ne pas transmettre pendant la durée d'émission. Pour répondre à ce critère, la norme IEEE 802.11ac utilise une trame mixte, qui reprend le préambule utilisé dans les normes précédentes.

Les trames doivent comporter des informations supplémentaires relatives aux spécificités de la couche PHY utilisée dans la norme IEEE 802.11ac. Elles doivent notamment renseigner sur le canal utilisé, la largeur de bande et l'utilisateur auquel elles s'adressent dans le cas d'une configuration MU-MIMO.

La partie data des trames, qui supporte les données des couches supérieures (paquets IP) est de taille variable et est modulée selon la valeur de MCS choisie.

Depuis la norme IEEE 802.11n, les trames de la couche MAC peuvent être agrégées pour ne former qu'une seule « trame agrégée ». Comme nous le verrons dans la partie portant sur l'optimisation des réseaux sans fil, cela permet d'améliorer l'efficacité du réseau. Comme pour beaucoup de protocoles réseaux, la plus grande source de ralentissement vient du fait qu'il faut acquérir le droit d'émettre sur le support de communication. L'agrégation de trame profite de la disponibilité du canal pour envoyer un nombre plus important de trames et ainsi augmenter le payload de la transmission, c'est-à-dire la partie données utiles.

L'IEEE 802.11 définit deux modes d'agrégation de trames. D'une part le mode A-MSDU (Aggregate - MAC Service Data Unit) qui consiste à regrouper les trames derrière un unique entête MAC commun à toutes les trames. Celles-ci doivent obligatoirement adressées au même destinataire. D'autre part le mode A-MPDU (Aggregate - MAC Protocol Data Unit) dont l'implémentation est la plus répandue et dont le principe de fonctionnement est simplement de mettre bout-à-bout des trames MPDU avec un champ délimiter pour les délimiter. Lorsqu'il acquiert le canal pour émettre, l'émetteur va donc envoyer un maximum de trames qu'il a en file d'attente en une seule fois.

L'émetteur n'attend pas d'avoir le nombre requis de trame avant d'envoyer une trame agrégée.

Cette notion d'agrégation de trames a été améliorée dans la norme IEEE 802.11ac en ne faisant plus la distinction entre une trame agrégée et une trame seule. Une trame, qu'elle soit seule ou non, est systématiquement transmise dans une trame agrégée, ce qui simplifie les mécanismes des couches MAC et PHY au prix d'une petite augmentation de la taille des entêtes.

2.2.4 Modulation 256-QAM et différentes MCS (Modulation and Coding Scheme)

La modulation consiste à faire varier les paramètres (phase et amplitude) d'une oscillation électrique (onde porteuse) dans le but de transmettre un signal. En modulation QAM, on associe des séquences de bits (appelés « mots ») à des couples (phase, amplitude) donnés. Chaque sous porteuse OFDM sera donc modulée en phase et en amplitude pour former un symbole contenant un mot de bits. On appelle « intervalle de garde » le temps qui sépare deux symboles. Depuis la norme IEEE 802.11n, celui-ci peut être long (800ns) ou court (400ns), sachant qu'un intervalle court augmente le débit, mais n'est parfois pas suffisant pour distinguer clairement deux symboles consécutifs.

Le rapport signal/bruit obtenu en changeant de bande de fréquence nous permet d'utiliser une modulation plus complexe pour parvenir à des débits plus importants.

La norme IEEE 802.11ac introduit la 256-QAM avec 16 valeurs possibles de phase et d'amplitude. Dans ce type de modulation, il y a 256 symboles possibles, soit $256 = 2^8 = 8\text{bits}$ (voir la figure 2.4). Chaque symbole représenté par un point sur le diagramme de constellation ci-dessous représente 8bits, contre 6bits par symboles pour une 64-QAM (voir la figure 2.3). Cela entraîne une augmentation de 33 % du débit.

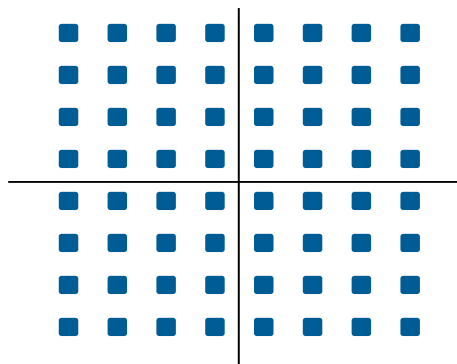


FIGURE 2.3 – Diagrammes de constellation : 64-QAM.

Une telle modulation est tout de même très sensible aux perturbations (interférences et dysfonctionnement matériel) car l'écart entre les symboles est très faible. L'utilisation de la 256-QAM nécessite un rapport signal/bruit 5dB supérieur à celui nécessaire pour une 64-QAM.

La norme IEEE 802.11ac définit aussi d'autres modes de modulation (MCS : Modulation and Coding Scheme), plus ou moins sensibles aux perturbations. Plusieurs moyens sont utiles pour réduire cette sensibilité : l'émetteur peut choisir une modulation plus « large », où les symboles seront plus facilement interprétés, ou augmenter la redondance dans la transmission. Ces choix de MCS se font généralement de manière automatique. Les MCS de la norme IEEE 802.11ac sont au nombre de 10, dont les 8 premières sont mandataires, c'est-à-dire qu'elles doivent

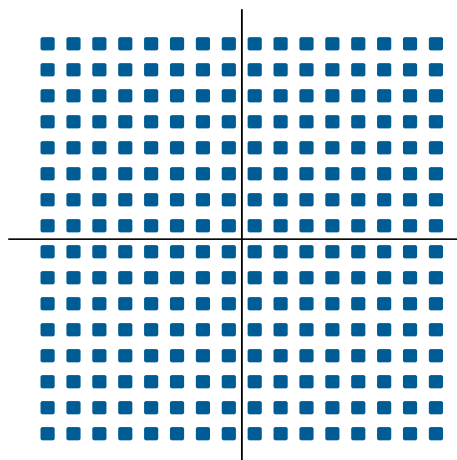


FIGURE 2.4 – Diagrammes de constellation : 256-QAM.

obligatoirement être supportées.

2.2.5 MIMO - Augmentation du nombre de flux spatiaux

Le MIMO (Multiple In Multiple Out) utilise un maillage d'antennes côté émetteur et côté récepteur. Les antennes doivent être indépendantes physiquement, et posséder leur propre circuit radio.

Lorsqu'une antenne émet un flux, il est réceptionné par chaque antenne de l'appareil récepteur d'une manière différente. Le signal reçu par les antennes réceptrices tient compte de l'empreinte de l'environnement, et de la position géographique de l'émetteur et du récepteur. Grâce à de puissants calculs, et en prenant en compte les signaux de toutes les antennes réunies, le récepteur parvient à isoler le signal émis par chaque antenne. On peut alors imaginer émettre différents flux de données avec deux, trois, . . . , huit antennes simultanément et sur la même fréquence, en parvenant à décoder le signal de chacune indépendamment.

Le nombre de flux spatiaux utilisable pour une liaison est majoré par le nombre d'antennes disponibles côté émetteur et récepteur. Un nombre d'antennes supérieur au nombre de flux spatiaux ne fait qu'améliorer le rapport signal/bruit de la transmission. Tandis que la norme IEEE 802.11n limitait une liaison à 4 flux spatiaux, la norme IEEE 802.11ac permet d'aller jusqu'à 8.

Le nombre d'antennes généralement limité sur les appareils nomades comme les téléphones portables ou les ordinateurs portables restreint les possibilités offertes par les points d'accès disposant d'un grand nombre d'antennes. Le groupe de travail 802.11ac a donc imaginé une nouvelle utilisation du MIMO, le MU-MIMO (Multi User MIMO) qui permet de partager les flux spatiaux disponibles d'un point d'accès entre différents utilisateurs.

2.2.6 NDP beamforming (modélage spatial de lobe avec paquets sans données)

Le *beamforming* est une technique de traitement du signal qui permet de « diriger » les ondes électromagnétiques dans une zone privilégiée de l'espace. Cela est rendu possible en combinant les antennes émettrices de telle manière à créer des interférences constructives dans la direction voulue. La méthode de *beamforming* employée dans la norme IEEE 802.11ac repose sur un échange de paquets appelés *Null Data Packet (NDP)*.

Le point d'accès et le client partagent une phase d'écoute qui sert à mesurer la matrice de direction à appliquer pour diriger les fronts d'ondes dans la bonne direction. Pour calculer le signal propre à chaque antenne émettrice, le point d'accès et le client échangent des informations de mesure de l'environnement par l'intermédiaire de paquets ne contenant pas de données (*Null Data Packet*). Cela implique que les deux appareils doivent supporter le beamforming. L'émetteur ajuste l'amplitude et la phase de chaque antenne afin de transmettre le flux au bon endroit.

2.2.7 MU-MIMO

L'utilisation standard du MIMO est limitée par le nombre d'antennes des appareils indépendantes et ayant leur propre circuit radio. Par exemple dans le cas d'une liaison entre un point d'accès possédant 5 antennes indépendantes, et un client n'en possédant que deux, la transmission sera limitée à deux flux spatiaux (contre 5 normalement supportés par le point d'accès). Cette situation est courante puisque les appareils mobiles n'embarquent que très rarement un grand nombre d'antennes et de circuits radio. Le MU-MIMO rentabilise la présence de flux non utilisés dans la plupart des configurations en les partageant entre plusieurs utilisateurs.

Le MU-MIMO (pour *Multi User MIMO*) utilise le *beamforming* pour pouvoir adresser des données simultanément à deux utilisateurs sans qu'elles interfèrent. Le MU-MIMO tire profit de tous les flux spatiaux mis à disposition par un point d'accès seulement dans le cas où il s'adresse à des utilisateurs distants les uns des autres. Cela permet d'allouer de la bande passante supplémentaire à chaque appareil, alors que la norme IEEE 802.11n divisait la bande passante totale entre les utilisateurs.

2.3 La norme IEEE 802.11ax

Le Wi-Fi 6 présente plusieurs améliorations qui en font l'ensemble de protocoles sans fil le plus performant jamais développé. Non seulement le Wi-Fi 6 stimule-t-il les performances globales, mais il est également conçu pour optimiser l'efficacité dans des scénarios réels. De nouvelles fonctionnalités telles que OFDMA, la liaison ascendante MU-MIMO, TWT, le coloriage BSS et les nouveaux schémas de modulation interagissent pour permettre aux utilisateurs de bénéficier d'une connectivité permanente sans engorgement du réseau ni dégradation des performances [10].

2.3.1 Fonctionnement dans les spectres 2,4 et 5 GHz

Alors que la norme 802.11n a été améliorée avec à la fois des bandes 2,4 GHz et 5 GHz, la norme 802.11ac offrait uniquement une fréquence de 5 GHz. La norme 802.11ax ajoute des flux spatiaux en prenant en charge les bandes 2,4 et 5 GHz. En outre, la norme 802.11ax fonctionne dans un spectre de 20, 40 et 80 MHz, ce qui est similaire à la norme 802.11ac. Le spectre supplémentaire de 2,4 GHz offre plusieurs avantages pour les utilisations à l'extérieur (qui nécessitent une plus grande portée), ainsi qu'une meilleure couverture pour les objets connectés. Bien que ce spectre soit sujet au bruit et à la congestion, ses fonctionnalités de propagation plus performantes associées aux optimisations de la norme 802.11ax en matière d'efficacité devraient contribuer à maximiser le potentiel de la bande 2,4 GHz [10].

2.3.2 OFDMA

Le principal changement réside dans le lancement de la technologie de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA, Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) en liaisons montante et descendante. Elle permet à plusieurs utilisateurs d'émettre simultanément et de partager la bande passante disponible sur un même canal. Les normes précédentes utilisent l'OFDM et le multiplexage temporel ; un seul utilisateur émet donc sur toute la bande passante.

Avec l'OFDMA, chaque utilisateur reçoit une partie du spectre disponible : un sous-ensemble contigu des sous-porteuses (minimum 26, maximum 996) lui est ainsi alloué. Cette quantité partielle est appelée unité de ressource (RU, Resource Unit). En plus de la largeur spectrale d'une RU, le type de modulation varie également d'un usager à l'autre. Le point d'accès peut ainsi répondre de façon individuelle au besoin des utilisateurs en termes de débit de données. Contrairement au domaine fréquentiel et à sa répartition dynamique, l'axe temporel opère de manière uniforme : afin d'éviter les interférences, les paquets de données présentent une longueur identique dans toutes les RU et sont émis simultanément. Les utilisateurs qui doivent transmettre moins de données que la longueur de paquet ne le permet doivent remplir les paquets avec des bits de complément. La largeur de bande maximale s'élève à 160 MHz, et permet jusqu'à 74 utilisateurs simultanés. Un seul utilisateur actif constitue un cas spécial d'OFDMA. Une seule unité de ressource absorbe alors l'ensemble de la bande passante [11].

2.3.3 Modes de fonctionnement de la norme 802.11ax

Les normes Wi-Fi actuelles utilisent généralement un seul type de paquet et ne distinguent pas la liaison montante de la liaison descendante. La norme 802.11ax lance quatre nouveaux types de paquet spécifiques des liaisons montante et descendante. La liaison montante désigne comme toujours la transmission d'un terminal (station, STA) vers un routeur Wi-Fi (point d'accès, AP), et la liaison descendante la transmission du point d'accès vers la station. Chaque type de paquet (HE-PPDU, High-efficiency PLCP Protocol Data Unit ; PLCP, Physical Layer Convergence Procedure) dispose d'un préambule distinct correspondant aux informations de signalisation, suivi des données utiles (Payload) [11].

- Mode utilisateur unique (HE-SU)

Ce mode sert à la communication avec un seul utilisateur. Les signaux en liaisons montante et descendante utilisent le même format de paquet. L'utilisateur occupe l'ensemble du spectre via une unité de ressource de taille maximale. Ce mode évite l'incontournable gestion induite de la communication en mode multi-utilisateur.

- Liaison descendante multi-utilisateur (HE-MU)

Le type de paquet (HE-MU) est utilisé pour le mode OFDMA en liaison descendante. Comme le spécifie la norme 802.11ax, le point d'accès émet les paquets simultanément pour tous les utilisateurs. Le préambule contient le champ HE-SIG-B, lequel inclut des informations relatives à la répartition du spectre en unités de ressources ainsi qu'à l'affectation aux différents utilisateurs. En liaison descendante, la bande passante disponible est toujours intégralement remplie de RU.

- Liaison montante multi-utilisateur (HE-TRIG)

En liaison OFDMA montante, les terminaux mobiles émettent leurs paquets de données simultanément vers le point d'accès sur demande de ce dernier (déclenchement). Afin d'éviter une collision, les informations suivantes doivent avoir été préalablement communiquées : désignation des RU occupées et par quel utilisateur, mode d'émission des données, et niveau d'émission requis pour chaque utilisateur. Elles sont essentielles pour éviter les perturbations, car les signaux des terminaux doivent impérativement atteindre le point d'accès au même moment et à un niveau quasiment identique. Pour ce faire, l'AP envoie d'abord une trame de déclenchement à tous les utilisateurs. Cette trame contient les paramètres de configuration tels que la longueur de charge utile, la largeur de bande, l'allocation des RU et le type de modulation. Après un intervalle de temps prédéfini, le SIFS (Short Interframe Space), les utilisateurs doivent commencer la transmission des PPDU en liaison montante.

Extended Range PPDU (HE-EXT-SU)

Ce type de paquet est spécialement destiné aux applications en extérieur couvrant de grandes distances et présentant un mauvais rapport signal / bruit. La largeur de bande est limitée à 20 MHz et seules les solides modulations MDP-2 et QPSK sont utilisées. Des parties du préambule sont transmises à une puissance supérieure de 3 dB afin de garantir une solide estimation du canal.

2.3.4 MIMO multi-utilisateur

La technologie MIMO multiutilisateur en liaison descendante a été lancée dans le cadre de la norme 802.11n. Il s'agissait alors d'augmenter le débit de données par le biais de la transmission parallèle de plusieurs flux via plusieurs antennes, du point d'accès jusqu'à un abonné individuel. Si plusieurs abonnés doivent être alimentés, les processus s'effectuent les uns après les autres. La norme 802.11ac améliore également les performances grâce à la technologie MIMO multi-utilisateur. Plusieurs utilisateurs peuvent ainsi être alimentés simultanément par le biais d'autres antennes, ce qui augmente le débit de données effectif sur le réseau.

La technologie MU-MIMO en liaison descendante utilise le multiplexage spatial. La caractéristique de rayonnement du réseau d'antennes est conçue de telle sorte qu'un faisceau apparaisse dans la direction de chaque utilisateur. Résultat : une station reçoit uniquement les signaux qui lui sont destinés. La norme 802.11ax reprend cette fonctionnalité et étend le nombre de flux de données parallèles possibles de quatre à huit. Elle envisage par ailleurs pour la première fois la technologie MU-MIMO en liaison montante. Plusieurs stations peuvent ainsi émettre simultanément. Mais elles n'utilisent pas le multiplexage spatial, ce qui entraîne un mélange des signaux sur le trajet vers le point d'accès. Ce dernier peut toutefois séparer à nouveau les signaux superposés à l'aide de son réseau d'antennes et les affecter aux différents utilisateurs [11].

2.3.5 1024-QAM

La modulation d'amplitude en quadrature ou QAM permet simplement d'envoyer plus de paquets plus efficacement en modulant l'amplitude et la phase d'un signal. La norme 802.11ac prenait en charge la modulation 256-QAM, tandis que la norme 802.11ax marque le passage à une densité de constellation plus élevée de 1024-QAM. Dans des conditions optimales où un seul client se trouverait près du point d'accès, il est possible de multiplier le débit par 2,5 et d'obtenir un débit de 1,2 Gbit/s par flux spatial. Lorsqu'elle est associée à OFDMA, la modulation 1024-QAM améliore considérablement le seuil de bruit, offrant des performances élevées avec une bande passante de 20 MHz

ou moins.

Avec la modulation 256-QAM, le nombre de bits transmis par symbole OFDM était de 8. La modulation 1024-QAM fait passer ce nombre à 10 bits (voir la figure 2.5), permettant ainsi une augmentation de 25 de l'efficacité spectrale. Avec une plus grande densité, le rapport signal/bruit est particulièrement important, car la marge d'erreur de la modulation 1024-QAM est minimale. Au cours des dernières années, des techniques de filtrage DSP plus précises et des technologies radio améliorées ont été commercialisées pour permettre à cette densité accrue de se traduire par des débits de données plus élevés, même dans des scénarios non idéaux [10].

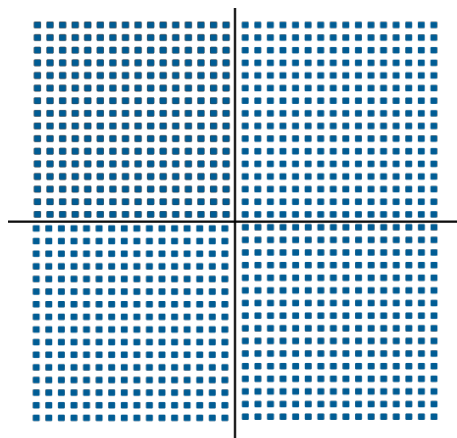


FIGURE 2.5 – Diagramme de constellation : 1024-QAM.

2.3.6 BSS Color

Le Wi-Fi n'est plus un accessoire, mais une nécessité. Les interférences réseau augmentent à mesure que l'adoption des technologies sans fil se développe. Afin d'assurer des performances satisfaisantes, il est important de minimiser ces interférences. Avec les générations Wi-Fi précédentes, les conflits de support et la congestion pouvaient affecter 40 à 60 % des débits de données et nécessitaient une planification attentive des canaux. Pour gérer les interférences, Cisco a lancé RX-SOP, qui permet d'ajuster les niveaux de signal Wi-Fi sur les points d'accès des zones hautement encombrées. Comme RX-SOP est mis en oeuvre sur les points d'accès et pas sur les clients, les niveaux de signal doivent être soigneusement planifiés. Avec le coloriage BSS, le même concept est étendu au point d'accès et au client. L'implémentation repose sur un préambule de couleur BSS 6 bits. Si, pour une transmission donnée, la valeur de couleur BSS est la même que celle de la station réceptrice, le canal est considéré comme occupé. Si la valeur de la couleur BSS est différente, le canal est considéré comme libre pour la transmission [10].

Le Wi-Fi inclut une technologie d'évitement des collisions appelée CSMA/CA, qui permet d'éviter les interférences. Toutefois, à mesure que la congestion augmente sur le réseau sans fil, le débit peut être considérablement réduit. Avec la technologie CSMA/CA, les points d'accès rallongent la durée entre les transmissions si des signaux de collision sont détectés. L'objectif est de réduire les collisions globales. Elle fonctionne bien sur quelques équipements sans fil, mais dans les environnements denses où plusieurs transmissions se chevauchent, le débit global diminue de manière significative. La technologie CSMA/CA consomme des volumes de bande passante très importants. En d'autres termes, le pourcentage du débit TCP global baisse par rapport à la capacité globale du réseau. Le coloriage BSS ajoute un bit de couleur simple, ce qui entraîne une réduction de la surcharge de la bande passante et une meilleure efficacité [10].

2.4 La norme IEEE 802.11be

Le projet 11be a incorporé des objectifs très ambitieux liés à des débits de données nominaux plus élevés, une efficacité spectrale plus élevée, une meilleure atténuation des interférences et la fourniture d'un support RTA.

2.4.1 320 MHz

Un gain beaucoup plus élevé est possible en doublant la bande passante. Récemment ouverte à l'utilisation ISM, la bande 6 GHz apporte des centaines de MHz disponibles au Wi-Fi. Pour exploiter ces fréquences, TGbe introduit des canaux aussi larges que 320 MHz, ce qui permet de doubler le débit nominal maximal par rapport à 11ax. De plus, cette fonctionnalité améliore les débits de données réels si la distance entre l'émetteur et le récepteur est modérée, car le débit réalisable augmente linéairement avec la bande passante, tandis que l'effet d'un SNR deux fois plus petit est logarithmique. À l'heure actuelle, il est approuvé qu'en plus des canaux 320 MHz, 11be prend en charge les canaux $160 + 160$ MHz [12], [13], qui sont formés de deux canaux 160 MHz non adjacents similaires aux canaux $80 + 80$ MHz de 11ac. La bande passante non contiguë facilite la coexistence de réseaux voisins, fournit une bande passante élevée si aucun spectre contigu n'est disponible. De plus, la technologie permettra des canaux $240/160 + 80$ MHz [14]

Lorsqu'une large bande passante est utilisée, le préambule hérité est dupliqué tous les 20 MHz. Une simple duplication peut entraîner un rapport puissance crête/puissance moyenne élevé dans le préambule. Pour le réduire, les amendements précédents font pivoter les parties dupliquées en les multipliant par ± 1 ou $\pm j$. La partie EHT utilisera la même idée [12], [15], mais la méthode exacte n'est pas encore convenue. Étant donné que le fonctionnement dans des canaux aussi larges peut être inefficace dans des déploiements denses, avec un évanouissement sélectif en fréquence, et par des dispositifs à puissance limitée, ainsi que des canaux plus larges, TGbe considère l'agrégation de bandes, c'est-à-dire l'utilisation conjointe de plusieurs liaisons établies à différentes fréquences. Évidemment, avec cette approche, la largeur totale du canal peut dépasser 320 MHz, ce qui entraîne un débit total extrêmement .

2.4.2 Format de trame PHY

Pour prendre en charge toutes les nouvelles fonctionnalités PHY, 11be doit modifier les formats de trame. De nombreux changements sont liés au préambule PHY des trames (voir la figure 2.6) . Pour la rétrocompatibilité, dans les bandes 5 GHz et 6 GHz, toutes les trames Wi-Fi commencent par le préambule hérité de 11a. Le préambule hérité contient un champ d'apprentissage court et un champ d'apprentissage long utilisés pour la détection de trame et la synchronisation du récepteur. Le symbole OFDM suivant porte le champ de signal hérité (L-SIG) qui indique quel MCS est utilisé pour le signal suivant et quelle est la longueur de la trame. Le Wi-Fi n'a pas de moyen explicite d'indiquer la version du protocole PHY. Dans toutes les versions Wi-Fi au-delà de 11n, le MCS et la longueur de trame indiqués dans L-SIG sont faux, mais les appareils hérités peuvent calculer la durée de trame. Ainsi, ils considèrent le canal comme occupé lorsque la trame est en l'air.

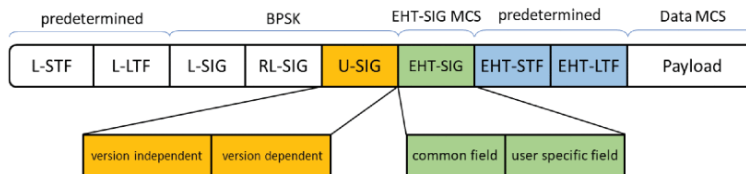


FIGURE 2.6 – Le format de trame EHT.

Pour différencier les formats de trame, 11n, 11ac et 11ax manipulent la modulation du symbole OFDM suivant L-SIG ainsi que le contenu de L-SIG (voir la figure 2.7). Plus précisément, en 11n, L-SIG est suivi d'un champ HT-SIG, composé de deux symboles OFDM qui sont BPSK avec une rotation de 90 degrés (QBPSK). Comme QBPSK n'est pas utilisé dans les amendements Wi-Fi précédents, ayant reçu de tels symboles, un appareil comprend que le format de cette trame est décrit dans l'amendement 11n. 11ac a deux symboles VHT-SIG-A après L-SIG : le premier est modulé avec BPSK, tandis que le second utilise QBPSK. De plus, la longueur indiquée dans L-SIG est un multiple de trois. Quant au 11ax, il répète d'abord L-SIG et indique la longueur égale à un ou deux modulo trois. Deuxièmement, son champ de signal à haute efficacité (HE) contient deux symboles OFDM. Le premier est modulé avec QBPSK, tandis que le second est modulé avec BPSK ou QBPSK.

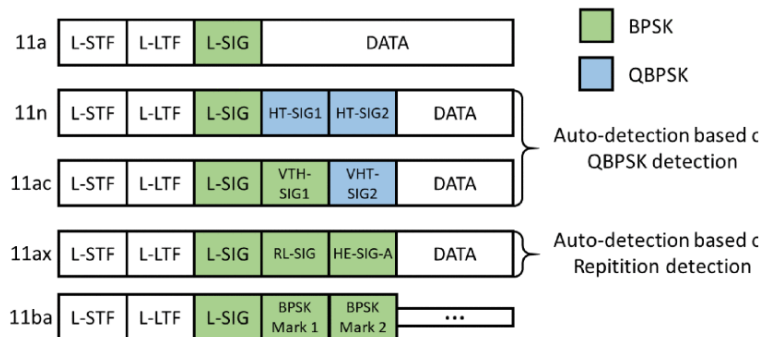


FIGURE 2.7 – détection automatique du préambule pour les trames héritées.

Les formats de trame des modifications 11be et au-delà utiliseront la longueur L-SIG divisible par trois. De plus, les développeurs de 11be ont décidé d'arrêter la mauvaise pratique de l'indication implicite des formats de trame et ont introduit un SIG universel long à deux symboles OFDM (U-SIG), qui fournirait une compatibilité ascendante. Ce nouveau paradigme fournit un mécanisme à long terme pour la détection de type de trame et les modifications futures des formats de trame. U-SIG contient des informations indépendantes de la version, suivies des informations dépendantes de la version. Les informations indépendantes de la version incluent un identifiant PHY à trois bits, un indicateur UL/DL à un bit, la couleur de l'ensemble de services de base (BSS), la durée de l'opportunité de transmission (TX) (TXOP), bande passante, etc. Les informations dépendantes de la version incluront probablement des informations similaires à celles du champ de signal HE (par exemple, le nombre de symboles de champs d'entraînement longs EHT, la périodicité du midamble et le drapeau de codage de bloc espace-temps) et certaines informations pour les caractéristiques 11be.

Le champ EHT-SIG suivant stocke des informations non incluses dans U-SIG mais nécessaires aux nouvelles fonctionnalités 11be. Pour accueillir toutes les informations mentionnées, EHT-SIG peut utiliser son propre MCS (différent du MCS de données) et peut occuper un nombre variable de symboles, ce qui est indiqué dans U-SIG. Le champ EHT-SIG se compose du champ commun et d'un champ spécifique à l'utilisateur. Le champ commun contient des informations sur le MCS, le nombre de flux spatio-temporels, le codage, la durée de l'intervalle de garde et l'allocation RU, etc. Des champs spécifiques à l'utilisateur sont présents pour les trames MU et transportent des informations dédiées pour les STA individuelles. Dans le cas des transmissions UL MU, la trame Trigger définit les informations portées dans le champ EHT-SIG. Pour éviter la duplication inutile des mêmes informations, EHT-SIG est omis dans ce cas.

Le champ d'entraînement court EHT (STF) et le champ d'entraînement long EHT (LTF) suivent EHT-SIG et, comme les analogues HE, servent au réglage précis du temps et de la fréquence lorsque MIMO/OFDMA est utilisé.

11be hérite des variantes plus longues de STF et LTF de 11ax, qui sont favorables pour une portée étendue et une meilleure estimation de canal . Si une trame est transmise dans une large bande passante, EHT-STF et EHT-LTF sont répétés tous les 20 MHz. La phase de chaque copie de 20 MHz est tournée pour réduire le rapport de puissance crête/moyenne et améliorer les performances de corrélation . Les nouveaux canaux 320 MHz nécessitent une nouvelle conception de rotation de phase qui prend en compte le plan de tonalité 320 MHz et les perforations possibles.

2.4.3 4K-QAM

Chaque augmentation supplémentaire de l'ordre de constellation donne un gain de plus en plus petit. Alors que l'introduction du 256-QAM dans le 802.11ac offre un gain de 33 % par rapport au 64-QAM du 802.11n, le 1024-QAM du 802.11ax n'augmente les débits de données nominaux que de 25 %. 4096-QAM ne donne que 20 %. Dans le même temps, le coût d'un si petit gain est élevé. Le rapport signal sur bruit (SNR) nécessaire du côté récepteur pour accepter le 4096-QAM est d'environ 40 dB (voir la figure 2.8), ce qui est trop élevé pour un scénario Wi-Fi typique [16]. Un tel SNR élevé peut-être obtenu avec la formation de faisceau. Ainsi, cette modulation peut être fructueuse lorsque le point d'accès possède de nombreuses antennes et ne dessert qu'un seul client STA avec quelques antennes. Dans un tel cas, les transmissions MU ne peuvent pas être utilisées et le nombre de SS est faible. Ainsi, le seul moyen d'augmenter le débit est d'utiliser un ordre de constellation élevé. C'est pourquoi 4096-QAM sera éventuellement pris en charge par EHT 4096-QAM sera éventuellement pris en charge par EHT.

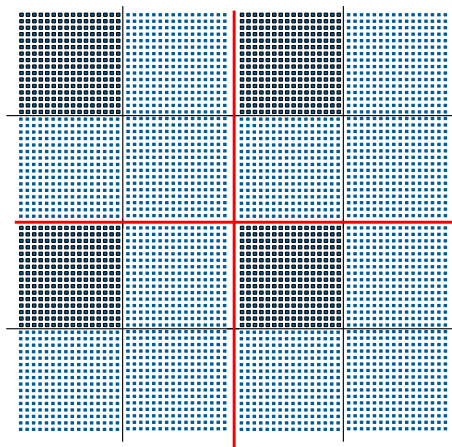


FIGURE 2.8 – Diagramme de constellation 4096-QAM

2.4.4 16 flux spatiaux et des améliorations du protocole MIMO (multiple-input multiple-output)

Au fil des années, les points d'accès Wi-Fi ont été dotés d'un plus grand nombre d'antennes et de meilleures capacités de multiplexage spatial afin de répondre aux exigences strictes en matière de trafic générées par le nombre croissant d'appareils dotés d'une connectivité sans fil. Par exemple, les points d'accès 802.11ac peuvent multiplexer dans l'espace jusqu'à huit flux spatiaux et quatre dispositifs - de façon MU-MIMO - dans une ressource temps/fréquence de liaison descendante donnée, tandis que la norme 802.11ax permet aux points d'accès de multiplexer dans l'espace jusqu'à huit dispositifs à flux unique dans la liaison descendante et montante [19].

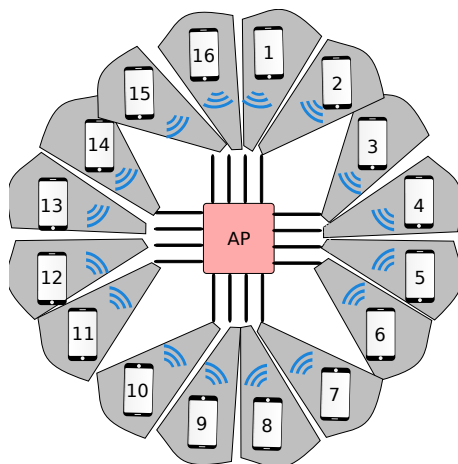


FIGURE 2.9 – Un AP de wifi 7 supporte jusqu'à 16 antennes

Conformément à cette tendance, et en raison des exigences rigoureuses de la norme 802.11be, de nombreux acteurs de la Wi-Fi prévoient la nécessité d'améliorer encore les capacités de multiplexage spatial des points d'accès pour permettre jusqu'à seize flux spatiaux [20], [21].

Cette mise à niveau permet de doubler l'efficacité spectrale de la norme 802.11be par rapport à la norme 802.11ax, en tirant pleinement parti de la liaison à haut débit fourni par les solutions de fibre optique jusqu'au domicile (FTTH) et la riche diffusion dans les environnements intérieurs où les systèmes Wi-Fi fonctionnent généralement.

Ces gains de multiplexage spatial pourraient toutefois être gênés par la surcharge du processus de sondage du canal, qui est crucial pour acquérir des informations précises sur l'état du canal (CSI).

Doubler le nombre de flux spatiaux tout en réutilisant la même procédure d'acquisition CSI explicite actuellement spécifiée dans la norme 802.11ax peut ne pas être évolutif. C'est pourquoi la norme 802.11be envisage d'introduire une procédure implicite de sondage des canaux qui s'appuie sur les pilotes transmis par les STA et exploite la réciprocité des canaux de liaison montante et descendante.

Le sondage implicite nécessiterait probablement que les points d'accès mettent en oeuvre une méthode d'étalement afin d'éviter les incompatibilités matérielles potentielles qui pourraient rompre la réciprocité des canaux [20].

2.5 Conclusion

Le 802.11ax, surnommé le High Efficiency WLAN (HEW), est prévu pour fonctionner sur les deux bandes de fréquences classiques du WiFi actuelles : le 2,4 GHz et le 5 GHz. Il est donc prévu pour être complètement rétro compatible avec l'ensemble des normes précédentes, contrairement au 802.11ac qui ne fonctionnait que sur le 5 GHz. Ainsi, l'idée du 802.11ax est aussi d'étendre au 2,4 GHz les techniques radio et liaison qui ont été mises en place avec le 802.11ac, on pense particulièrement au MU-MIMO et les méthodes associées de traitement des paquets multi-utilisateurs simultanés (A-MPDU et Block-ACK), aux modulations allant jusqu'à 256 QAM, ainsi qu'aux flux spatiaux pouvant monter jusqu'à un nombre de 8.

L'évolution majeure du 802.11ax réside dans le fait qu'à présent il sera aussi possible d'établir des communications multi-utilisateurs dans le sens montant : plusieurs utilisateurs vont pouvoir transmettre leurs données à un point d'accès WiFi unique en même temps, grâce à l'utilisation du mécanisme OFDMA .

Contrairement à son prédécesseur IEEE 802.11ax, IEEE 802.11be atteint des objectifs de performances à haut débit et à très faible latence et est standardisé en tant que modèle de communication sans fil correspondant aux services de communication mobile 5G, grâce à sa vitesse qui dépasse 30 Gbit/s et une bande passante supérieure à 320 MHz.

Dans le chapitre suivant, on va se focaliser sur les défis et les travaux en cours de recherche de la norme 802.11be, ainsi que les algorithmes proposés pour remédier aux problèmes reliant l'axe de recherche la coordination multi-AP.

Chapitre 3

Défis et opportunités

3.1 Introduction

En mai 2018, lorsque le développement des fonctionnalités Wi-Fi 6 a été terminé et que le groupe de travail 802.11 est passé au polissage de l'amendement 11ax, le groupe a créé un nouveau groupe d'intérêt thématique EHT (TIG) [23]. Son objectif principal était de définir de nouvelles fonctionnalités de 802.11 sur les bandes comprises entre 1 et 7,125 GHz avec l'objectif principal d'augmenter le débit de pointe en faisant évoluer le PHY de 11ac et 11ax. En juillet 2018, l'EHT TIG a été transformé en EHT Study Group qui a défini la portée du nouveau projet et identifié la liste des fonctionnalités candidates de 11be.

En parallèle, 802.11 a expliqué comment prendre en charge RTA dans les réseaux Wi-Fi. Les travaux dans ce sens ont commencé en novembre 2017 [24] avec une présentation sur le Wi-Fi Time-Sensitive Networking (TSN) dans le cadre des activités du 802.11 Wireless Next Generation Standing Committee. La proposition a attiré beaucoup d'attention, et en juillet 2018, RTA TIG a été lancé [25]. Étant donné que la prise en charge de RTA nécessite à la fois des débits de données nominaux élevés et certaines fonctionnalités MAC pour accélérer le processus de développement de normes, le groupe de travail 802.11 a accepté de fournir une prise en charge de RTA dans le cadre du futur amendement 11be.

En mars 2019, le groupe d'étude EHT s'est transformé en TGbe [26] qui développe amendement 11be. Il vise à terminer le projet initial dans deux ans, c'est-à-dire d'ici mars 2021. La version finale est attendue pour début 2024.

3.2 Fonctionnalités candidates IEEE 802.11be

3.2.1 EDCA avec 802 fonctionnalités TSN

3.2.1.1 Leçons de IEEE 802 TSN

Des débits de données nominaux élevés ne suffisent pas pour prendre en charge le RTA dans les réseaux Wi-Fi. L'accès au canal peut encore durer longtemps, ce qui augmente la latence. C'est pourquoi de nombreuses solutions MAC sont proposées pour le RTA. La majorité d'entre eux ne sont pas neufs, étant initialement proposés pour les réseaux filaires et largement connus sous le nom de TSN.

IEEE 802 a une expérience significative dans TSN avec son groupe de travail TSN [27] et les normes correspondantes développées pour Ethernet. Cependant, bon nombre des solutions 802 TSN ne sont pas directement applicables au Wi-Fi, car le Wi-Fi fonctionne dans des canaux sans licence et utilise un accès aléatoire, il est donc difficilement possible de garantir les performances requises en termes de latence et de fiabilité.

Pour résoudre ce problème, TGbe distingue deux types de scénarios d'exploitation. Le scénario de fonctionnement non géré représente un point d'accès Wi-Fi typique, un réseau domestique ou de bureau avec des interférences et des conflits pour le canal. Les solutions compatibles RTA peuvent améliorer le débit, la latence et la gigue, mais elles ne peuvent garantir aucune valeur exacte car les performances globales sont limitées par les interférences. Dans le scénario d'exploitation gérée, tous les BSS et STA sont gérés et les interférences peuvent être contrôlées pour prendre en charge les exigences urgentes. De tels réseaux peuvent être conçus pour les usines et les entreprises. En supposant qu'il n'y a pas d'interférence non gérée, le réseau peut fournir une faible latence prévisible, une gigue et une fiabilité élevée.

Pour activer le RTA dans les réseaux Wi-Fi, le RTA TIG a étudié différentes approches issues du 802 TSN. L'un d'eux est la capacité du réseau à détecter le type de scénario d'exploitation. Selon le scénario, l'ensemble des solutions utilisées peut varier.

Une autre fonctionnalité TSN est basée sur la capacité d'arrêter la transmission en cours d'un paquet tolérant un long délai lorsqu'un paquet urgent arrive. Si le paquet long est transmis par le même appareil, ce qui nécessite de transmettre l'urgent, cette fonctionnalité peut être facilement mise en œuvre. Si les appareils sont différents, l'un d'eux demandera à un autre d'arrêter la transmission en cours. Cependant, le lien est occupé et aucun paquet de contrôle ne peut être envoyé explicitement. Pour relever ce défi dans Ethernet, la détection de collision peut être utilisée. En d'autres termes, le dispositif avec un paquet urgent génère un signal pour induire la collision au niveau de l'expéditeur du paquet long. Après avoir détecté la collision, l'expéditeur du paquet long arrête sa transmission et l'appareil avec la trame urgente peut accéder au canal.

Dans les réseaux Wi-Fi, un appareil ne peut pas détecter le canal pendant la transmission. Cette méthode ne peut donc pas être directement appliquée au Wi-Fi. Une solution de contournement possible consiste à utiliser un signal de tonalité d'occupation dans le canal principal ou séparé, qui est envoyé lorsqu'un appareil demande aux autres d'arrêter les transmissions en cours. Cependant, l'efficacité de cette approche dépend du fait que les dispositifs interférents prennent en charge cette tonalité d'occupation et la traitent correctement [24], [28].

802 TSN utilise largement les transmissions programmées. Il améliore efficacement la latence dans le pire des cas [29], [30]. Dans les réseaux Wi-Fi, l'ordonnancement déterministe compatible RTA pourrait être implémenté avec l'accès aux canaux contrôlés par la fonction de coordination hybride, qui est trop lourd et à peine utilisé dans la pratique. Une autre approche consiste à utiliser des trames de déclenchement 11ax [31] pour allouer des ressources temporelles périodiques aux trames sensibles au temps [32], [33]. Ce schéma peut être amélioré en utilisant une allocation UL persistante [34]. Avec cette méthode, les informations d'allocation de ressources restent inchangées pendant un certain temps. Par conséquent, la longueur des trames de déclenchement peut être raccourcie pour réduire les frais généraux [35].

Cependant, en Wi-Fi, l'accès au canal basé sur le déclencheur fonctionne sur l'accès multiple avec détection de porteuse avec prévention des collisions, et personne ne peut garantir que le point d'accès sera en mesure de transmettre la trame de déclenchement en cas d'encombrement. De plus, de telles transmissions ne sont pas protégées des interférences des réseaux voisins. Le trafic en temps réel est très sensible aux interférences et à la congestion, ce qui peut augmenter les retards dans le réseau. Un tel problème peut être résolu avec le contrôle d'admission [36]. Étant donné que les réseaux voisins partagent le même temps de canal, pour rendre le contrôle d'admission efficace, tous les appareils doivent prendre en charge cette fonctionnalité et suivre les mêmes règles.

3.2.1.2 Analyse de latence pour EHT

Les auteurs de la soumission [37] réalisent une simulation de travail en réseau avec un seul BSS, un MCS et une taille de RU constants. Cette présentation donne une ventilation très utile des composants de latence (voir la figure 3.1) : temps d'ordonnancement des paquets, temps de contention du canal, transmission et retransmission.

L'étude révèle qu'un paquet passe plus de temps en contention ou en retransmission en EDCA qu'en OFDMA. Cependant, si le point d'accès envoie des paquets à de nombreuses STA dans OFDMA, le temps de planification peut prendre jusqu'à 80 % de la latence totale, ce qui entraîne l'expiration du délai.

Dans le cas de quelques STA, DL OFDMA a besoin de beaucoup de temps pour la transmission réelle, donc des RU plus grandes peuvent aider à transmettre des données plus rapidement. La latence UL OFDMA se comporte différemment de DL : le temps de programmation et le temps de transmission ne varient pas beaucoup à mesure que le nombre de STA augmente (jusqu'à ce que le trafic soit saturé). Au lieu de cela, la durée du TXOP joue un rôle majeur. Notamment, UL OFDMA n'a pas de collision et de conflit dans le scénario considéré, ce qui fait de la planification le composant de latence dominant.

Dans un travail ultérieur [38], les mêmes auteurs améliorent leur simulation. Ils ont également adopté un service déterministe et un trafic à latence limitée. Service déterministe [39] signifie que les paquets ne sont jamais perdus en raison de la congestion. Les auteurs ont étudié dans quelle mesure le système OFDMA 11ax peut fonctionner en tant que service déterministe dans un scénario résidentiel. Pour le scénario de streaming en temps réel (débit 150 Mbps, frame rate 120 Hz), les auteurs observent que le réseau peine à maintenir la limite de latence de 10 ms, même si le débit est supérieur à 340 Mbps. Dans le cas du cloud gaming (20 Mbps pour DL, 100 kbps pour UL), le trafic UL est beaucoup plus vulnérable au chevauchement de l'environnement BSS (OBSS) que DL quel que soit le débit de données. La prise en charge de quatre STA n'est possible que sans interférence OBSS. Une durée de trame de déclenchement plus courte peut améliorer la latence UL, mais elle n'est pas efficace dans un environnement dense.

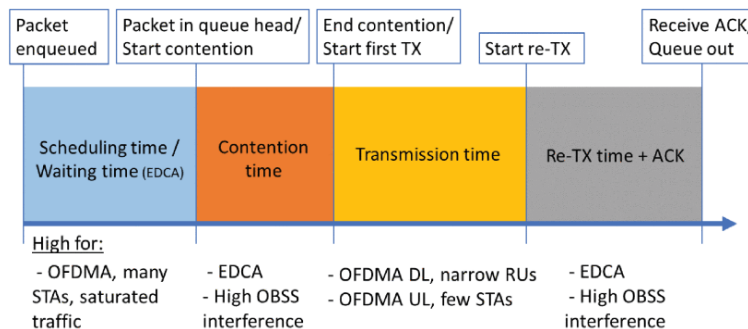


FIGURE 3.1 – Parties de latence.

3.2.1.3 Améliorations de l'EDCA

Pour fournir un support RTA, il est très important de limiter la latence dans le pire des cas au lieu de la moyenne. Si les paquets RTA sont petits et peu fréquents, la latence requise dans le pire des cas peut être atteinte dans les réseaux Wi-Fi sans pertes de paquets [40]. Un exemple d'un tel trafic est le jeu en temps réel. Le Wi-Fi est connu pour être mauvais pour les jeux : les jeux sur console en ligne souffrent de décalages et d'un temps de ping élevé. Une raison de ces effets pourrait être un périphérique de streaming utilisé dans le même réseau. Une étude de simulation [41] a montré qu'un flux vidéo génère considérablement plus de paquets et nécessite beaucoup plus de débit par rapport au trafic de jeux. Le problème clé de tels scénarios est que le trafic vidéo est prioritaire sur le

trafic de jeu, qui est mappé au Best Effort AC [42].

Pour résoudre ce problème, EDCA peut être mis à niveau pour réutiliser une file d'attente AC Voice Alternative (A-VO) existante pour le trafic RTA ou introduire de nouveaux AC [43], de la même manière que cela a été fait dans 11aa [44]. De telles files d'attente RTA peuvent apparaître et disparaître de manière dynamique, en s'adaptant aux changements de canal et de trafic. Les auteurs de [40] suggèrent d'accélérer le comptage des interruptions si la durée de vie de la trame RTA arrive à expiration. Si le point d'accès fonctionne dans un environnement mixte et que le trafic RTA a des exigences différentes, il serait utile que l'EDCA puisse hiérarchiser les paquets en fonction de leur durée de vie restante ou en tenant compte d'autres paramètres.

Un autre outil utile pour réduire la latence dans le pire des cas est l'allocation de canal persistante. Les auteurs de [45] améliorent cet outil pour réduire davantage le délai d'accès au canal. Si le trafic RTA est petit et périodique, une STA peut prédire la prochaine arrivée de paquet et se préparer à l'avance pour l'accès au canal. Le STA commence à compter l'interruption avant que le paquet RTA ne soit mis en file d'attente. Une fois l'interruption terminée, la STA peut envoyer le paquet RTA s'il arrive à ce moment-là. S'il n'arrive pas et que l'arrivée prévue est proche, le STA peut réserver le canal, par exemple, avec un paquet nul.

De plus, TGbe discute des modifications des règles TXOP. Dans les réseaux hérités, ayant obtenu un TXOP, un STA ne peut envoyer que les données d'un seul AC. 11be peut permettre d'utiliser un TXOP de n'importe quel AC pour envoyer le trafic RTA dès que possible. De plus, un AP peut temporairement capturer la propriété TXOP de n'importe quelle STA associée pour fournir le trafic RTA. L'AP peut également accorder l'accès au canal à une autre STA si l'AP sait que cette STA a du trafic RTA. Après la livraison du trafic RTA, le point d'accès renvoie le TXOP au propriétaire du TXOP d'origine.

3.2.1.4 Problèmes ouverts de RTA-Aware MAC

Les réseaux Wi-Fi fonctionnent dans le spectre sans licence, ce qui complique considérablement la prise en charge de RTA. Bien qu'il existe de nombreuses solutions conçues pour les réseaux filaires ou cellulaires, elles ne peuvent pas être directement appliquées au Wi-Fi. Le choix optimal d'un ensemble approprié de solutions dépend de l'environnement.

Dans un réseau non géré, si des limites de latence strictes ne peuvent pas être définies, le point d'accès pourrait au moins mesurer et signaler les paramètres de latence et de gigue réalisables [46]. En donnant la priorité au trafic RTA et en introduisant une diversité de canaux avec OFDMA amélioré, MU-MIMO et un fonctionnement à liaisons multiples, 11be vise à augmenter la probabilité que les paquets RTA soient livrés dans un délai donné. retarder le budget. Cependant, aucune de ces méthodes ne peut améliorer la latence dans le pire des cas.

Dans le même temps, il existe de nombreuses idées qui fonctionnent dans les environnements gérés et améliorent les performances dans le pire des cas : tonalité d'occupation pour notifier le trafic à faible latence, planification persistante basée sur des déclencheurs, contrôle d'admission, coopération multi-AP, etc. TGbe devrait identifier les idées les plus rentables qui peuvent être standardisées avec un effort modéré mais qui offrent des gains énormes. Pour évaluer les idées proposées, des tests précis doivent être effectués.

En outre, il apparaît davantage de preuves que dans les déploiements gérés et non gérés, l'accès programmé peut être efficace pour prendre en charge la RTA. De plus, cette approche est conforme aux réglementations d'accès aux canaux pour les bandes sans licence et robuste contre les interférences [30], [47]. Cependant, la conception de

techniques de planification efficaces et compatibles avec les RTA reste un problème ouvert.

3.2.2 OFDMA amélioré

OFDMA dans 11be utilise la même approche d'ordonnement que dans 11ax [48]. Un point d'accès peut initier une transmission DL-MU en utilisant OFDMA et/ou MIMO, ou une transmission UL-MU basée sur un déclencheur (voir la figure 3.2). Un nouveau degré de liberté d'ordonnement dans 11be est lié à l'attribution de plusieurs RU à une seule STA. En outre, le fonctionnement à liaisons multiples peut nécessiter une synchronisation de planification.

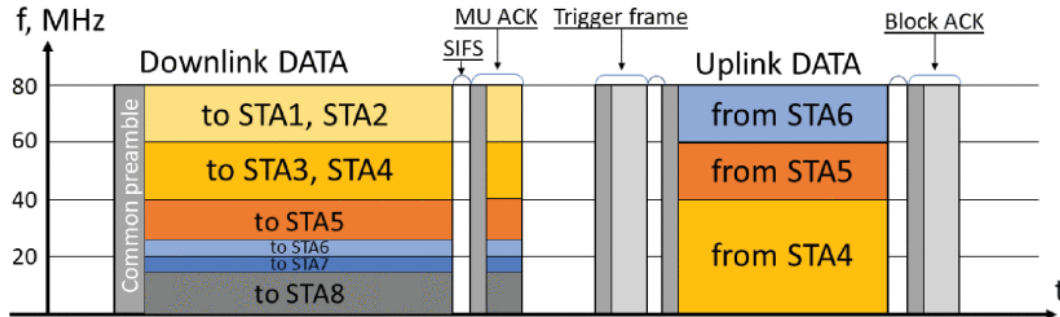


FIGURE 3.2 – Exemple de transmission OFDMA+MIMO en 802.11 be.

3.2.2.1 Perforation du préambule

Dans les réseaux 11ac, les STA peuvent sélectionner de manière adaptative la bande passante pour chaque trame transmise [49]. Pour cela, l'AP définit une hiérarchie de canaux intégrés illustrée à la figure 3.3. Après avoir accédé au support dans le sous-canal principal de 20 MHz, un STA peut étendre la bande passante par concaténation étape par étape des canaux secondaires s'ils sont inactifs. En d'autres termes, si le canal secondaire 20 MHz est inactif, la STA peut transmettre dans une bande passante de 40 MHz. Si les canaux secondaire 20 MHz et secondaire 40 MHz sont inactifs, une bande passante de 80 MHz peut être utilisée, etc. En revanche, même si le canal secondaire 40 MHz est inactif, mais que le canal secondaire 20 MHz est occupé, le STA ne peut transmettre dans le canal principal de 20 MHz. Cette situation peut se produire si le canal secondaire 20 MHz d'un réseau est le canal principal 20 MHz d'un réseau voisin [48].

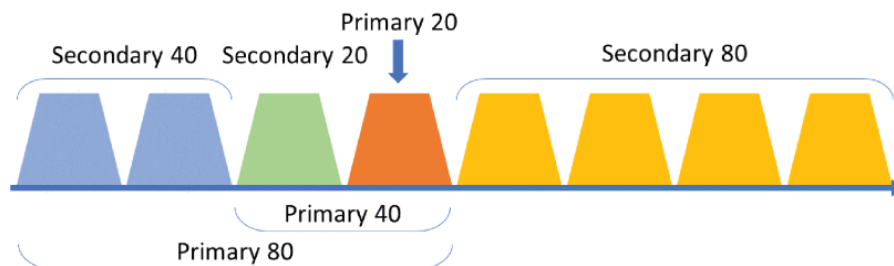


FIGURE 3.3 – Exemple de hiérarchie de canaux intégrée dans 11 ac.

Pour éviter une telle sous-utilisation des ressources de canal causée par les règles rigides de liaison de canal, 11ax introduit la perforation de préambule. Pour une transmission MU dans un canal ≥ 80 MHz, certains sous-canaux

occupés ≥ 20 MHz peuvent être perforés. Cela signifie que le préambule de la trame n'est pas transmis et que les RU ne sont pas allouées dans ces sous-canaux. En déploiement dense, le poinçonnage permet d'utiliser les ressources du canal de manière beaucoup plus flexible [48].

11ax a un nombre restreint de modes de perforation. Pour les transmissions à 80 MHz, un seul des sous-canaux de 20 MHz, à l'exception du canal principal, peut être perforé. Pour les transmissions 160 MHz ou 80 + 80 MHz, la même chose peut être faite dans le canal primaire 80 MHz, et tout le canal secondaire 40 MHz peut être perforé. Aucune des parties des sous-canaux secondaires de 80 MHz ne peut être perforée.

TGbe étend le poinçonnage du préambule aux bandes de 320 MHz et l'améliore également. 11be permet le poinçonnage pour les trames mono-utilisateur [50], ce qui n'est pas pris en charge dans 11ax. Cette augmentation améliore l'utilisation du canal. La conception exacte de la perforation est activement discutée. Un sujet de discussion est que 11be fonctionnera à 6 GHz, là où d'autres technologies historiques sont présentes. Pour les éviter, TGbe a envisagé des options de perforation supplémentaires [51]. De plus, un mécanisme de protection TXOP a été discuté pour les cas de trames à canal large avec poinçonnage [52].

3.2.2.2 Multi-RU

11ax a introduit l'OFDMA dans le Wi-Fi. Dans une trame OFDMA, les tonalités sont regroupées en RU (voir la figure 3.4) [48]. La durée de transmission est la même dans chaque EF. L'AP peut affecter des RU à différentes STA pour la transmission DL ou UL. Une UR peut contenir 26, 52, 106, 242, 484, 996 ou 2×996 tons. Les RU242, RU484, RU996 et $RU2 \times 996$ correspondent respectivement à la totalité de la bande 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz et 160 MHz / 80 + 80 MHz. Chaque RU plus large que RU26 peut être divisée en deux RU environ deux fois plus étroites, plus une RU26 dans le cas de RU242 et RU996.

Un AP 11ax ne peut affecter à chaque STA qu'une seule RU. Les auteurs de [53] montrent qu'une telle restriction entraîne un gaspillage de canaux et une dégradation du débit du réseau dans certains scénarios avec un petit nombre de STAs. Comme premier exemple, dans un scénario avec deux STA dans un canal de 80 MHz, si une RU de 242 tonalités est affectée à une STA, une autre STA peut tout au plus prendre une RU de 484 tonalités, gaspillant 25 % de la bande passante. Deuxièmement, si le point d'accès a des données pour une seule STA et que le point d'accès perce le canal secondaire de 20 MHz alors que le canal secondaire de 40 MHz est inactif, le point d'accès peut attribuer uniquement le canal principal de 20 MHz au STA. Cela signifie que le point d'accès utilise trois fois moins de bande passante qu'il ne le pourrait. Troisièmement, une RU par STA nuit au gain de diversité, ce qui est fructueux pour RTA.

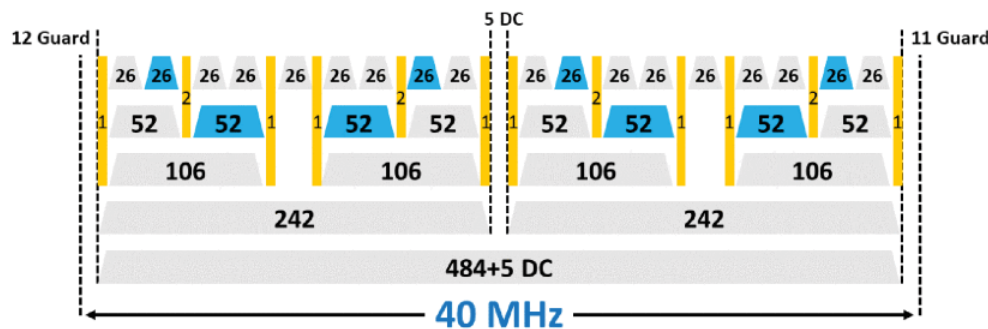


FIGURE 3.4 – Exemple de combinaisons possibles RU52 et RU26 en 40 MHz.

Pour les raisons mentionnées, 11be prend en charge l'attribution de plusieurs RU par STA. Les principaux problèmes ici sont liés à la manière de réduire les frais généraux et de décrire le plus simplement l'ensemble des RU. Dans 11ax, chaque RU est décrite par une longue liste de paramètres, tels que le MCS et le nombre de SS. En cas d'affectation multiple d'EF, les données semblent être transmises avec les mêmes paramètres. Pour simplifier le récepteur, la description des différentes RU affectées à la même STA contient les mêmes informations. Pour compresser de telles informations, des auteurs de [54] proposent de fournir des informations complètes uniquement pour la première RU d'un ensemble de RU affectées à une STA. Pour le reste des RU, la description ne contient qu'une référence à la première RU de l'ensemble. Récemment, TGbe [55] a discuté que si la taille agrégée des EF attribuées à une STA est ≤ 80 MHz, le codage et l'entrelacement doivent être effectués conjointement. Cependant, si la taille dépasse 80 MHz, ils doivent être effectués séparément pour chaque segment de 80 MHz.

L'inconvénient majeur de l'affectation multi-RU est la complexité de la mise en œuvre et de l'ordonnancement. Pour résoudre ce problème, des auteurs de [56] proposent de limiter l'ensemble des combinaisons RU possibles. En outre, ils pensent que la diversité de fréquences apportera des gains plutôt faibles et préfèrent n'utiliser que les combinaisons d'EF qui améliorent l'utilisation du spectre. Ils proposent de diviser les EF en deux groupes : les petites EF (< 20 MHz) et les grandes (≥ 20 MHz). Seules les EF des mêmes groupes peuvent être combinées. Par exemple, la combinaison d'une RU de petite taille avec une RU de grande taille n'augmente pas beaucoup l'utilisation du spectre.

Conformément aux principes décrits, les soumissions [56], [57], [58] proposent des combinaisons d'EF possibles, en éliminant les faibles gains. Par exemple, les petites combinaisons d'EF ne doivent pas franchir les limites des sous-canaux de 20 MHz (peut-être sauf pour RU106 plus RU26 central). Pour la transmission OFDMA en 320/160 + 160 MHz, les EF ne peuvent être regroupées qu'à l'intérieur d'un sous-canal de 160 MHz.

3.2.2.3 OFDMA avec lien direct

Dans les réseaux Wi-Fi d'infrastructure, si une STA possède des données pour une autre STA, associée au même AP, l'échange de données se fait typiquement via l'AP. Une telle transmission à deux sauts conduit à un gaspillage de canal si les STA sont dans la plage de transmission l'une de l'autre. 11e a permis des liaisons directes entre les STA, de sorte que les STA voisines peuvent se transmettre les données directement. TGbe a accepté de concevoir une méthode permettant à l'AP de dédier des ressources de canal à l'exploitation de liaisons directes, bien que la méthode exacte soit en cours de développement.

Introduit dans 11ax, OFDMA ne prend en charge que les transmissions UL et DL, et TGbe peut étendre OFDMA pour prendre en charge les liaisons directes. Cette extension aidera à éviter les collisions entre deux STA communiquant entre pairs et un BSS voisin [59]. Pour cela, l'AP alloue des RU dédiées pour les liaisons directes. Ayant reçu une trame de données dans une RU particulière via un lien direct, la STA en accuse réception dans la même RU. Ce n'est pas encore décidé, mais l'accusé de réception (ACK) est probablement envoyé avec les mêmes paramètres de transmission que la trame de données. La soumission [60] n'implique pas l'utilisation de OFDMA, mais elle propose qu'un AP puisse envoyer une trame de déclenchement pour initier une transmission via une liaison directe entre deux STA.

3.2.2.4 OFDMA pour RTA

Des auteurs de [61] soulignent que l'OFDMA est un outil puissant pour prendre en charge le trafic sensible au délai car l'AP peut gérer de manière centralisée la transmission DL et UL. Cependant, l'OFDMA actuel peut nécessiter davantage d'améliorations si nous voulons prendre en charge un trafic à latence extrêmement faible. Comme évalué dans [62], Les transmissions DL et UL sont vulnérables aux interférences OBSS. Il se produit à un moment

aléatoire, provoque des collisions et retarde l'accès au canal, de sorte que la latence augmente même dans le cas d'un SNR moyen élevé. Par conséquent, le réseau peut prendre en charge les demandes de seulement quelques STA. Nous devons donc nous concentrer sur les problèmes suivants :

Premièrement, pour allouer des RU à un STA, l'AP doit savoir que le STA a des données urgentes à livrer à l'AP. En dehors de cela, pour une planification optimale des ressources de canal, il est important de connaître les paramètres de trafic, la durée de vie restante des paquets, etc.

Deuxièmement, OFDMA de 11ax permet d'allouer RU pour un accès aléatoire soit pour toutes les STA, soit pour les STA qui tentent de s'associer à l'AP. Pour améliorer l'accès aléatoire pour RTA, il vaut la peine d'allouer RU pour les paquets RTA uniquement.

L'article [63] présente l'accès aléatoire OFDMA pour un ensemble dynamique de STA. Il ignore l'utilisation de MU-MIMO, en 11ax, un AP peut affecter une RU à une STA ou à toutes les STA qui partagent cette RU avec un accès aléatoire. Les auteurs de [63] montrent que cette approche est fructueuse pour les RTA massives. Ils modifient l'accès aléatoire OFDMA de sorte que seules les STA qui ont du trafic RTA UL transmettront dans la RU dédiée. Une telle modification accélère le processus de résolution des collisions et peut augmenter de 50 % le nombre de RTA STA dans le réseau.

3.2.2.5 Questions ouvertes de l'OFDMA

Il existe de nombreuses questions ouvertes liées à l'OFDMA amélioré. Premièrement, bien que la perforation flexible du préambule permette l'utilisation de bandes plus larges, elle peut conduire à une fragmentation du spectre. Les avantages et les inconvénients d'une telle approche seront étudiés dans divers scénarios.

Deuxièmement, l'utilisation efficace de l'OFDMA nécessite de repenser les politiques de planification mises en œuvre dans les appareils Wi-Fi. Dans les réseaux Wi-Fi, les RU forment une structure complexe, de sorte que les algorithmes d'allocation des ressources ne sont pas aussi simples que dans LTE. Cependant, à l'heure actuelle, seuls quelques articles examinent le problème de l'allocation des ressources dans les réseaux Wi-Fi 6 [64] - [65]. Remarquables, ces articles révèlent des effets importants concernant la planification dans les réseaux Wi-Fi. Avec une allocation RU beaucoup plus flexible dans le Wi-Fi 7, le problème de planification devient plus difficile. Étant donné que les politiques d'allocation des ressources sont exclues du champ d'application de la norme, ces problèmes ouverts nécessitent une grande attention de la part des fournisseurs et de la communauté universitaire.

Enfin, l'allocation des ressources dépendra des types de trafic à livrer. Les flux tolérants aux retards lourds doivent être livrés dans les RU avec la plus grande efficacité spectrale, tandis que les paquets RTA nécessitent des retards limités. Pour améliorer la qualité de l'expérience pour les utilisateurs, 802.11 doit prendre en compte les valeurs exactes requises des paramètres de QoS. Jusqu'à présent, la norme 802.11 ne considère les couches PHY et MAC que séparément du reste de la pile de protocoles. Ainsi, il n'a pas tout le potentiel pour fournir une coopération inter-couches, comme présenté dans [66], [67]. Considérer RTA peut être un déclencheur pour de tels changements dans l'idéologie 802.11.

3.2.3 Fonctionnement multi-liens

3.2.3.1 Approches héritées pour une utilisation à large spectre

Des canaux de plus en plus larges disponibles dans la technologie Wi-Fi offrent un débit plus élevé et réduisent les retards. Cependant, l'utilisation de canaux larges n'est pas efficace pour les raisons suivantes. Premièrement, même avec OFDMA, toutes les transmissions dans les différentes sous-bandes sont entièrement synchronisées. Deuxièmement, l'accès au canal est principalement contrôlé par le sous-canal principal de 20 MHz. Cela signifie que l'ensemble du canal large est bloqué si le canal principal est occupé et que le reste des sous-canaux est inactif. Troisièmement, le fonctionnement dans un canal large consomme plus d'énergie, ce qui est crucial pour les appareils mobiles. Quatrièmement, à mesure que la largeur du canal augmente, le nombre de tonalités OFDM augmente également et, par conséquent, le rapport de puissance crête sur moyenne. Ce dernier effet a été considérablement aggravé par une augmentation de 4x du nombre de tons en 11ax [48]. Cinquièmement, diverses parties d'un large canal peuvent avoir des propriétés et des niveaux d'interférence différents, de sorte qu'elles peuvent nécessiter différents paramètres d'accès au canal et d'autres mécanismes. Enfin, si un appareil ne supporte que le fonctionnement monocanal, les vendeurs ne peuvent pas indiquer sur le boîtier un débit supérieur à celui défini dans la norme. Cependant, si un appareil peut utiliser plusieurs canaux, le débit total peut être un multiple de la limite standard.

C'est pourquoi, en plus des canaux larges, de nombreux points d'accès modernes prêts à l'emploi prennent en charge le fonctionnement bi-bande ou tri-bande. Dans ces points d'accès, le MAC Wi-Fi et le PHY de diverses bandes fonctionnent presque indépendamment et fournissent de multiples liens indépendants aux STA [68], [69]. Par exemple, en 11ad, le multibande est utilisé pour protéger la fiabilité de la transmission lorsque la liaison à visibilité directe mmWave devient sans visibilité directe en raison d'une atténuation soudaine élevée, par exemple lorsqu'une personne apparaît entre la transmission et la réception.

Compte tenu des méthodes de transmission des données dans les canaux larges à une extrémité et un fonctionnement multibande indépendant à l'autre, les développeurs de 11be essaient de trouver un tel niveau de synchronisation entre les différentes liaisons qui offre une efficacité spectrale élevée, de faibles délais et une faible consommation d'énergie. La solution conçue étend considérablement la fonctionnalité multibande de 11 ad/ay. Pour obtenir de meilleures performances, 11be permettra d'envoyer des paquets simultanément sur plusieurs canaux. Les canaux peuvent occuper des bandes différentes ou même la même bande. Ce dernier cas peut profiter des avantages multi-liens dans une bande indisponible pour un large spectre simple et non contigu, comme l'accès aux canaux asynchrone, le mode d'économie d'énergie, etc. L'opération multi-liens peut agréger un nombre variable de liens de différentes largeurs, par exemple, 160 MHz + 20 MHz.

3.2.3.2 Architecture multi-liens

11be introduit un concept de dispositif multi-liens (MLD) (voir la figure 3.5), qui se compose de plusieurs dispositifs Wi-Fi dits affiliés (chacun a une interface PHY vers le média sans fil), mais avec une seule interface pour la couche LLC. En d'autres termes, les protocoles de couche supérieure considèrent le MLD comme un seul périphérique [70]. En dépit d'avoir plusieurs interfaces radio physiques, MLD a une seule adresse MAC, et les numéros de séquence sont générés uniquement à partir du même espace de numéro de séquence [71]. Cette solution simplifie le réassemblage de fragments et de paquets, la détection de duplication et la commutation de lien dynamique. Ils permettent la retransmission de paquets sur n'importe quel lien quel que soit le lien de la transmission initiale du paquet.

TGbe explique que l'établissement d'une connexion (en termes de normes Wi-Fi, d'association et d'authentification) avec un MLD sur divers appareils affiliés peut se produire indépendamment ou conjointement [72]. Dans ce

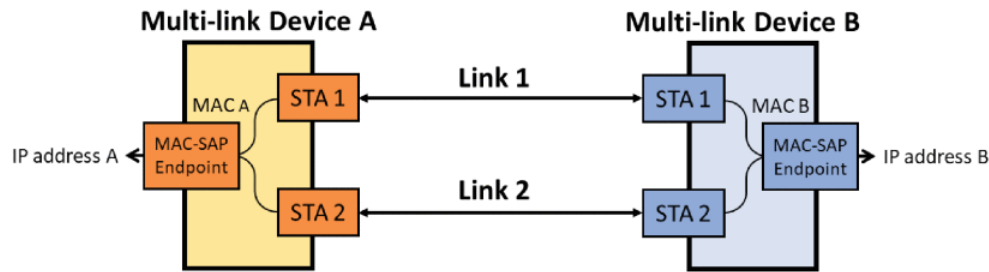


FIGURE 3.5 – Opération multi-liens.

dernier cas, les capacités de tous les liens doivent être explicitement indiquées, car elles peuvent varier d'un lien à l'autre. Par exemple, comme nous le verrons plus loin, les MLD devraient échanger leurs capacités pour transmettre une réception sur les liens simultanément [73].

11be a discuté de deux modes de fonctionnement multi-liens, appelés commutateurs de liens restreints et dynamiques [74]. En mode restreint, les trames de données et les ACK sont liés à un seul lien. Les échanges de gestion transmis sur un lien, tels que ceux liés au mode d'économie d'énergie, à la négociation de clé de sécurité, à la négociation Block ACK (BA), etc., s'appliquent uniquement à ce lien. Il s'agit d'un schéma simple de plusieurs liens indépendants avec agrégation activée. Dans le mode de commutation de lien dynamique, plusieurs liens peuvent être utilisés pour la transmission du même flux. Les informations de gestion et les négociations envoyées sur un lien peuvent s'appliquer à d'autres liens. Ce mode permet l'équilibrage de charge et l'évitement de la congestion. Il améliore également le débit de pointe et réduit la latence [75], [76], les frais généraux et la consommation d'énergie. Cependant, ce mode nécessite de reconsidérer les limitations protocolaires des mécanismes mentionnés. Par exemple, il est suggéré d'augmenter la taille du bitmap BA indiquant le sous-ensemble des trames reçues [77].

3.2.3.3 Accès aux canaux multi-liens

Un avantage important de l'opération multi-liens par rapport au canal extra-large unique est la capacité d'un MLD à effectuer un accès au canal et à transmettre des données via plusieurs liens de manière asynchrone, comme sur la figure 3.6. De tels MLD peuvent effectuer une transmission et une réception simultanées dans différentes bandes, c'est-à-dire 2,4/5/6 GHz [78]. La fuite de puissance entre les bandes est minimale car la distance spectrale entre elles est élevée. Cependant, étant donné que les appareils affiliés au sein d'un MLD partagent les mêmes antennes ou que les antennes sont situées à proximité les unes des autres, ils peuvent interférer si les liens sont dans la même bande. Le masque spectral d'un signal Wi-Fi n'est pas idéal, la force du signal sur l'émetteur est bien supérieure à celle sur le récepteur, et les interférences entre les appareils affiliés peuvent être importantes même s'ils utilisent des canaux différents. Plus les canaux des appareils affiliés d'un MLD sont proches, plus la fuite de puissance d'un appareil affilié émetteur vers les autres est forte. De telles interférences compliquent la capacité de transmission et de réception simultanées.

Pour résoudre ce problème, en plus du fonctionnement multi-liaison asynchrone, des transmissions synchrones sont proposées 3.6. Le fonctionnement synchrone multi-liens évite ce problème au prix d'un débit réduit causé par un accès aux canaux plus rare [79].

Une autre solution potentielle aux interférences entre appareils est la transmission interdite pendant la transmission du récepteur prévu. Par exemple, si un MLD transmet sur un lien, il ne peut pas recevoir de trames (par exemple, des BA) sur un autre lien. Ainsi, pour recevoir le BA avec succès, le MLD doit arrêter la transmission

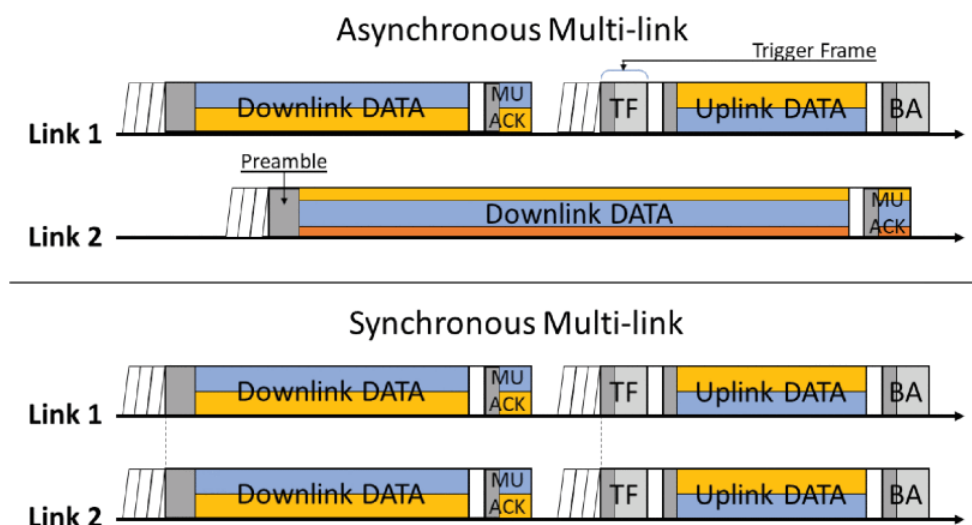


FIGURE 3.6 – Fonctionnement multi-liens asynchrone (en haut) et synchrone(en bas).

dans les bandes voisines [80].

3.2.3.4 Économie d'énergie multi-liens

Le concept d'un MLD implique généralement qu'il comporte au moins deux dispositifs intégrés. Dans le cas courant, ensemble, ils consomment deux fois plus d'énergie. Le problème est particulièrement important pour les appareils alimentés par batterie qui n'ont pas besoin d'écouter en permanence plus d'un lien si leur trafic est faible. Par conséquent, un mécanisme de gestion de l'alimentation pour MLD est requis.

Le mécanisme de base de gestion de l'alimentation fonctionne comme suit. Un appareil Wi-Fi peut fonctionner dans deux modes : actif et économie d'énergie (PS). En mode actif, l'appareil est toujours éveillé et peut émettre et recevoir des trames. En PS, il peut éteindre sa radio de temps en temps. Lorsque la radio est éteinte, c'est-à-dire que l'appareil est en état de sommeil, il ne peut ni émettre ni recevoir.

Dans les réseaux d'infrastructure, une STA doit notifier l'AP avant de changer le mode de fonctionnement. Si la STA est en mode PS, l'AP met en mémoire tampon toutes les trames destinées à cette STA. Pour notifier aux PS STA les paquets mis en mémoire tampon, l'AP inclut dans chaque balise une carte d'indication de trafic (TIM) qui indique la présence de paquets destinés à chaque STA. Chaque PS STA se réveille périodiquement pour recevoir des balises. Si la balise indique qu'aucun paquet mis en mémoire tampon n'est destiné à la STA, la STA revient à l'état de sommeil juste après la balise. Sinon, la STA envoie une trame PS-Poll. En réponse au PS-Poll, l'AP envoie des trames mises en mémoire tampon.

Le mécanisme d'économie d'énergie le plus flexible conçu par aujourd'hui dans le Wi-Fi est Target Wakeup Time (TWT). Bien qu'une description détaillée de la TWT dans les normes 802.11ah et 802.11ax est disponible dans [48], [81], nous ne mentionnerons ici que ses principales particularités. Le TWT permet à un STA de négocier avec l'AP des moments où le STA se réveille pendant un certain temps (appelées périodes de service TWT) et échange des trames avec l'AP. Avec TWT, le STA peut toujours rester somnolent en dehors des périodes de service négociées et n'a plus besoin de se réveiller pour les balises, ce qui réduit considérablement la consommation d'énergie.

Avec le cadre multi-liens, les mécanismes de gestion de l'énergie décrits peuvent fonctionner indépendamment

sur plusieurs différents liens [82]. Cependant, de bien meilleures performances seront obtenues si les MLD peuvent échanger des informations de gestion de l'alimentation sur un lien via un autre. Par exemple, une STA peut notifier l'AP via un lien qu'un autre lien est activé. Plusieurs transmissions TOP sur différentes liaisons peuvent être programmées via l'une d'entre elles [82].

En fonction du trafic, des charges de canal et des interférences sur différentes liaisons, le point d'accès peut commander via les STA associées de désactiver les liaisons qui ne seront pas utilisées pour la transmission de données. Des auteurs de [83] proposent de dédier un lien dit d'ancrage pour la gestion et le lien groupcast. Tous les autres liens peuvent être désactivés en cas d'absence de trafic intensif [84]. Dans ce cas, le point d'accès multi-liens peut utiliser les liens d'ancrage pour en réveiller d'autres lorsque cela est nécessaire. Diverses STA à liaisons multiples associées à un point d'accès à liaisons multiples peuvent utiliser différents canaux pour les liaisons d'ancrage. Un simple exemple de [84] montre une réduction de $\approx 35\%$ de la consommation d'énergie pour ce schéma avec trois liens disponibles.

3.2.3.5 Opération multi-liens pour RTA

L'exploitation multi-liens est considérée comme une approche prospective pour améliorer la fiabilité et réduire la latence dans TGbe [85], [86] grâce à la diversité des canaux. Le rapport de RTA TIG [87] évalue deux modes de fonctionnement multi-liens : le mode dupliqué et le mode conjoint (voir la figure 3.7). En mode Duplicate, l'émetteur envoie des copies de chaque trame sur plusieurs liaisons. Une fois que le récepteur obtient une trame, il supprime toutes ses copies qui sont livrées plus tard. Un tel schéma augmente notablement la robustesse de la transmission. En mode Joint, l'émetteur ne produit aucune copie mais distribue les trames sur les liaisons disponibles. Ce mode réduit la latence de transmission.

Des auteurs de [88] proposent un mode de duplication de paquets conditionnelle. Avec ce mode, un MLD essaie initialement de délivrer une trame via un seul lien. Si dans un certain intervalle de temps, il ne réussit pas, il réplique le paquet et essaie de le livrer via d'autres liens avec la priorité la plus élevée. L'intervalle de temps doit être choisi en fonction du budget de retard de paquet, disons 60% de celui-ci, comme proposé dans [88]. Une fois que le paquet est livré via un lien, ses copies sont supprimées.

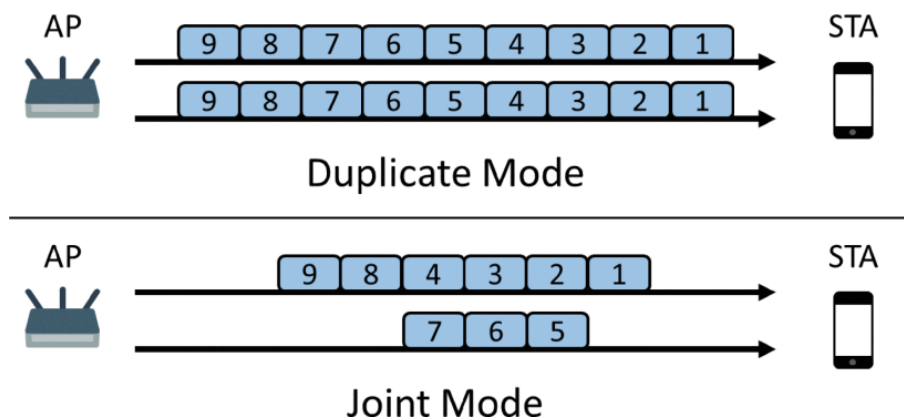


FIGURE 3.7 – Mode Duplication et Mode Conjoint.

3.2.4 Techniques PHY avancées améliorant l'efficacité du spectre

TGbe considère également une palette de techniques PHY avancées, telles que HARQ, Non-orthogonal Multiple Access ou FD, qui améliorent l'efficacité du spectre en cas de retransmissions et de transmissions parallèles dans les mêmes directions ou dans des directions opposées. Bien que de nombreux articles universitaires promettent des gains énormes, les gains observés dans les déploiements Wi-Fi réels ne sont pas évidents et une évaluation supplémentaire des performances est nécessaire.

3.2.4.1 HARQ

Dans les réseaux Wi-Fi, si la somme de contrôle d'un paquet n'est pas égale à la valeur du champ correspondant du paquet, le récepteur supprime les données obtenues et l'émetteur répète l'intégralité du paquet. Pour améliorer l'efficacité spectrale du 11be, de nombreuses contributions [89], [90] proposent d'introduire HARQ dans le 11be. Contrairement à la procédure de retransmission héritée, HARQ exploite les informations des essais précédents. Le récepteur combine les signaux de plusieurs tentatives de transmission, ce qui augmente le SNR et, par conséquent, la probabilité que le récepteur décode correctement le paquet.

HARQ s'avère plus robuste aux erreurs dans l'estimation du SNR au récepteur [91], [92]. Il permet à l'émetteur de sélectionner un MCS plus élevé de manière opportuniste. Soit la transmission est rapide avec le bon canal, soit le récepteur extrait quand même des informations avec le mauvais canal [93] et décode le paquet avec une nouvelle tentative de transmission. De plus, HARQ évite de réduire le MCS pour de telles tentatives.

TGbe a discuté de trois méthodes HARQ populaires : Chase Combining (CC), Punctured CC et Incremental Redundancy (IR). Avec CC, chaque nouvelle tentative contient les mêmes informations que la transmission initiale. Il est donc assez facile de combiner les signaux et d'obtenir des gains dans le SNR. Le coût d'une faible complexité est la valeur des performances par rapport aux autres méthodes HARQ. Avec Punctured CC, l'émetteur ne répète qu'une partie des bits codés qui ont un faible SNR. Ainsi, Punctured CC réduit encore plus la surcharge induite par HARQ. Avec l'IR, chaque retransmission utilise un ensemble différent de bits codés, représentant le même ensemble de bits d'information. Ainsi, à chaque retransmission, le récepteur obtient des informations supplémentaires [94]. L'IR est la plus difficile à mettre en œuvre. Cependant, cette méthode est la plus efficace [91],[94].

Pour ces méthodes, les développeurs 11be impliquent souvent un codage de contrôle de parité à faible densité (LDPC). La prise en charge de HARQ avec un codage convolutif binaire semble excessive, et elle n'apporte de toute façon aucun gain [94], [95].

a) Unité de données

L'un des problèmes les plus cruciaux liés à HARQ est l'unité de données HARQ, c'est-à-dire l'information que l'émetteur doit répéter en cas d'échec de la livraison. En règle générale, dans les réseaux Wi-Fi, chaque MPDU a une somme de contrôle. En cas d'échec, l'ensemble du MPDU est répété [96].

HARQ peut hériter de ce comportement du Wi-Fi hérité et, en cas d'échec de la transmission, répéter l'intégralité du MPDU. Cependant, cette approche soulève de nombreux problèmes. Le premier est que la transmission d'origine et la nouvelle tentative portent des informations différentes en raison du bit de nouvelle tentative, du texte chiffré différent, des bits CRC différents, des brouilleurs différents. Ainsi, les signaux et bits codés sont différents et ne peuvent pas être combinés directement. De plus, si le MPDU perdu est encapsulé dans un A-MPDU, nous avons le problème que les mots de code LDPC ne sont pas alignés sur les MPDU au sein d'un A-MPDU (voir la figure 3.8).

Si la MPDU-2 n'est pas correctement décodée, quelles données de couche MAC doivent être répétées pour générer les mots de code appropriés ? Notez que dans une nouvelle A-MPDU, les MPDU seront mappées différemment aux mots de code.

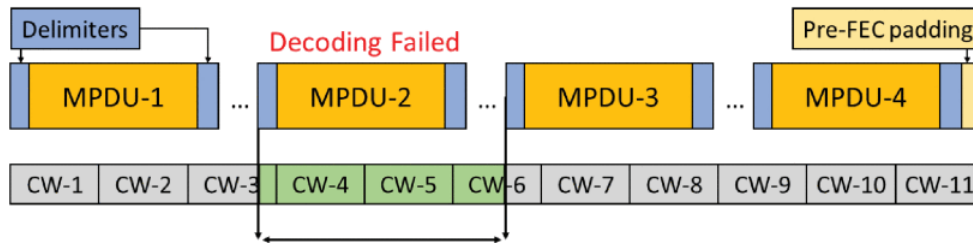


FIGURE 3.8 – Désalignement du mot de code MDPDU.

Pour résoudre tous les problèmes susmentionnés, nous pourrions répéter l'ensemble A-MPDU sans aucun changement, à l'exception du suivant. Pour éviter la duplication de paquets au niveau de la couche MAC, nous devons ajouter un indicateur de nouvelle tentative à l'en-tête PHY, qui est codé séparément. Cependant, la répétition de l'intégralité de l'A-MPDU génère trop de temps système car l'émetteur doit répéter à la fois les données perdues et transmises.

Une bonne solution pourrait consister à ne répéter que les mots de code endommagés. Cette méthode nécessite que le récepteur identifie les mots de code erronés au niveau de la couche PHY pour demander leur retransmission [97]. Les mots de code n'ont pas de somme de contrôle robuste, à l'exception du contrôle de parité de LDPC, qui peut être utilisé avec la somme de contrôle des MPDU. Sur la base de ces informations, PHY peut demander les mots de code associés aux MPDU défaillants. La mise en œuvre des retransmissions de mots de passe nécessite une interaction MAC-PHY étroite, ce qui peut entraîner des problèmes de mise en œuvre.

Les auteurs de [98] proposent de regrouper plusieurs mots de code dans un bloc HARQ qui porte un ou plusieurs MPDU avec des bits de bourrage. La taille d'un tel bloc HARQ peut être négociée ou prédéfinie. Le mécanisme BA peut être réutilisé pour l'acquittement des blocs HARQ. De plus, étant donné que les blocs HARQ sont plus gros que les mots de code, ils nécessitent un surcoût de rétroaction inférieur. Cependant, le schéma entraîne une surcharge sous la forme d'un remplissage MAC. De plus, si plusieurs petites MPDU sont concaténées dans un bloc HARQ, la retransmission peut contenir des MPDU déjà livrées. Les auteurs de [99] suggèrent qu'au lieu d'un remplissage MAC, les blocs HARQ pourraient contenir plusieurs MPDUs et leurs fragments. Mais l'overhead de retransmission sera important si une MPDU fragmentée échoue.

b) Protocole

TGbe explique comment implémenter le protocole HARQ [100]. L'adaptation du mécanisme BA est particulièrement intéressante et convient mieux aux unités MPDU et HARQ Block. La surcharge de rétroaction est faible pour ces unités, mais la surcharge de retransmission peut être importante. La réutilisation de BA pour le HARQ au niveau du mot de code est problématique en raison de la nécessité d'interactions MAC-PHY supplémentaires. Le HARQ au niveau du mot de code peut contourner l'interaction MAC en effectuant une communication uniquement entre les niveaux PHY de l'émetteur et du récepteur. Si ce schéma est approuvé, l'avenant devra définir le protocole de communication correspondant.

Une retransmission HARQ peut se produire dans une nouvelle TXOP, ce qui nécessite des modifications minimales de la norme [101], ou dans la même TXOP. Si la retransmission HARQ se produit dans une nouvelle TXOP, l'AP doit prendre en charge de nombreux processus HARQ car l'AP peut recevoir des trames HARQ de plusieurs STA. Faire des tentatives HARQ dans la même TXOP que la transmission d'origine nécessite beaucoup moins de mémoire que la première approche et accélère les nouvelles tentatives. Cependant, le nombre de retransmissions HARQ est limité par la limite TXOP. De plus, l'expéditeur doit choisir une durée de TXOP suffisante à la fois pour la transmission d'origine et les nouvelles tentatives. Ainsi, cette approche peut entraîner un gaspillage de ressources ou un processus HARQ inachevé.

L'une des approches pour améliorer les performances HARQ est de tirer parti de la diversité de fréquence et de faire des tentatives de transmission supplémentaires à différentes fréquences [102] ou même via différentes liaisons.

Une autre méthode pour améliorer HARQ est la soi-disant HARQ multicouche [103], [104]. Cette méthode exploite le fait que dans une modulation d'ordre élevé (par exemple, 16-QAM, 64-QAM, etc.), divers bits ont une fiabilité différente [105]. Si ces bits appartiennent à des mots de code différents, les mots de code sont également transmis avec une fiabilité différente. En mappant de manière appropriée les mots de code sur les bits modulés, le HARQ multicouche peut améliorer la fiabilité de transmission dans la zone à faible SNR [103]. Notamment, cette approche ne nécessite aucune information SNR instantanée et peut fournir de bien meilleures performances que les schémas traditionnels d'adaptation de débit [106].

En considérant Punctured CC et IR, TGbe est confronté au problème de savoir comment percer les mots de code et quel type de codes doit être utilisé avec HARQ [107], [91]. Les réseaux Wi-Fi utilisent un codage convolutif binaire traditionnel de complexité inférieure et un LDPC moderne avec des performances plus élevées. L'introduction de HARQ nécessitera le développement et l'évaluation de diverses méthodes de perforation, et peut-être de nouvelles constructions de code [91].

Un autre problème est la quantité d'informations à envoyer en cas d'échec de transmission. Les auteurs de [108] montrent qu'en termes de débit global, le pourcentage optimal d'informations retransmises est opposé au SNR (c'est-à-dire que si le SNR est élevé, la part des informations retransmises en cas d'échec de transmission sera faible, et vice versa).

En dehors de cela, TGbe discute de l'introduction d'un compteur de nouvelles tentatives supplémentaire pour les tentatives de retransmission HARQ. Contrairement aux retransmissions habituelles, qui peuvent être effectuées avec des paramètres de transmission différents, des tentatives de transmission supplémentaires effectuées avec les mêmes mots de code deviennent presque inutiles après la quatrième tentative. De nombreux membres déclarent que la limite de deux tentatives de transmission est suffisante pour obtenir des gains raisonnables en bon débit [102], [108], [109].

c) Problèmes de mise en œuvre

La mise en œuvre de HARQ dans des appareils Wi-Fi bon marché soulève de nombreux problèmes liés à la consommation de mémoire et à la vitesse de calcul requise.

HARQ exige que le récepteur enregistre les rapports de vraisemblance (LLR) pour les bits reçus. Cette exigence fait de HARQ une technique gourmande en mémoire plus que complexe. Il existe des estimations de taille de mé-

moire de premier ordre, mais elles ne diffèrent de points de vue.

De plus, les opérations HARQ doivent être effectuées très rapidement. Ce problème est aggravé dans le cas de Punctured CC et IR, où seul un sous-ensemble de bits est retransmis. Un petit nombre de bits retransmis signifie des transmissions courtes et un taux de traitement élevé requis pour suivre les mots de code LDPC entrants [110]. Heureusement, le décodeur LDPC traite les mots de code de manière itérative, et les mots de code combinés nécessiteraient moins d'itérations de décodage [111]. Cependant, dans le cas d'un HARQ basé sur un mot de code, le traitement MAC doit être accéléré. Si seuls quelques mots de code échouent, ils peuvent être retransmis dans une seule trame courte. Le récepteur doit traiter un A-MPDU entier pendant ce court laps de temps et un retour avec ACK. Ce fait peut limiter les gains HARQ possibles, et une évaluation approfondie est nécessaire.

Les performances de HARQ dans les déploiements Wi-Fi restent un problème ouvert. Par exemple, les auteurs de [112] remarquent que HARQ ne montre son gain le plus élevé que si le SNR est faible. La formation de faisceau augmente considérablement le SNR, ce qui réduit les avantages du HARQ. De plus, les performances de HARQ ne sont pas bien étudiées dans les déploiements denses, où les paquets sont perdus par des collisions aléatoires plutôt que par un léger changement de SNR. Cette question est un autre domaine d'investigation fructueux.

3.2.4.2 Duplex intégral

Une autre technique qui a le potentiel d'être incluse dans les futures normes 802.11 est la FD. En janvier 2018, le groupe de travail 802.11 a formé un FD TIG pour étudier ce type de communication. In-Band FD permet UL et DL simultanés sur le même spectre. Cette technique maximise l'utilisation du spectre disponible et offre des avantages tels qu'une latence réduite, une évolutivité élevée et un débit accru. FD a des fonctionnalités supplémentaires, comme la réduction des collisions. Un signal DL empêche les nœuds cachés potentiels de transmettre pendant l'UL. FD peut également assouplir les problèmes des réseaux à relais : plusieurs relais prenant en charge FD peuvent transmettre simultanément. De plus, outre l'augmentation du débit, le FD avec suppression des interférences permet une nouvelle version de l'accès au canal « Listen While Talk ».

Les normes filaires telles que DOCSIS [113] ont déjà adopté FD pour tirer parti de ses avantages. Faire de même en Wi-Fi est plus difficile en raison des variations rapides des canaux et du MIMO. Le défi est l'exigence d'une adaptation rapide et de schémas qui s'adaptent bien aux antennes [114].

Le SIC rend possible l'émission et la réception simultanées, et pourtant c'est le problème le plus complexe à résoudre. Le SIC doit atténuer les réflexions internes (15 à 20 dB inférieures au signal TX), les composantes non linéaires (30 à 40 dB) et les trajets multiples (50 à 60 dB). Cette tâche est souvent divisée en deux parties : le SIC analogique qui réduit les composants les plus puissants et le SIC numérique qui réduit les interférences en dessous du bruit de fond. Le SIC ne peut fonctionner correctement que si le STA connaît le chiffre de ses réflexions internes et de sa non-linéarité. Pour obtenir ce chiffre, le STA a besoin d'une procédure d'étalonnage efficace avec une surcharge minimale au niveau du système [115].

Pour utiliser FD en Wi-Fi, nous devons nous concentrer sur l'identification où FD atteint ses avantages théoriques par rapport aux aspects fondamentaux ci-dessus. La décision précise doit tenir compte des propriétés RF, des interférences résiduelles réalisables et du bruit de fond.

En novembre 2018, la majorité de FD TIG a décidé que le projet EHT devrait inclure FD. Cependant, à ce jour, aucune des solutions FD n'a reçu un soutien suffisant au sein de TGbe en raison de gains incertains dans les

déploiements réels. Il y a eu quelques propositions qui considèrent la mise en œuvre SIC [116] et les améliorations MAC [117]. Néanmoins, l'incorporation de FD dans la technologie Wi-Fi soulève de nombreuses questions : comment modifier le protocole de transmission, quelles STA peuvent être impliquées dans FD, comment combiner FD et MIMO/OFDMA, comment garder la rétrocompatibilité, etc. à FD est quand appliquer FD. La décision précise doit prendre en compte les propriétés RF, les interférences résiduelles réalisables et le bruit de fond.

3.2.4.3 Accès multiple non orthogonal

Pour augmenter le débit de pointe et améliorer l'efficacité, la méthode NOMA est conçue. L'idée de base du NOMA est qu'un AP peut desservir plusieurs STA simultanément dans la même bande de base en allouant des portions de la puissance de transmission totale pour chaque STA (voir la figure 3.9). Le point d'accès peut effectuer des transmissions NOMA avec le codage de superposition, qui est une simple superposition de plusieurs composants de signal avec des coefficients différents soumis à une contrainte de puissance. Par conséquent, plus la puissance est grande, plus la réception des composants est fiable. Dans le cas à deux STA, le composant de grande puissance est destiné à un STA éloigné avec des conditions de canal pires, tandis que l'autre composant est destiné à un STA proche. La STA éloignée reçoit le signal composite tel quel, percevant les interférences du composant de faible puissance comme du bruit. Le STA proche sépare les composants du signal à l'aide de SIC.



FIGURE 3.9 – Le concept de NOMA.

La proposition [118] introduit une variante de NOMA : Semi-orthogonal Multiple Access (SOMA). SOMA ne fait pas seulement de la superposition, mais crée une constellation superposée mappée en gris artificiellement conçue. Cette caractéristique rend le composant de signal de faible puissance plus résistant au bruit. De plus, le SIC devient inutile, ce qui rend le récepteur moins complexe. Ce concept de SOMA est similaire à la fonction de transmission par superposition multi-utilisateurs incluse dans le 3GPP LTE Advanced [119]. Le gain de ≈ 20 à 30 % de la fonctionnalité est déjà prouvé à la fois au niveau du lien et du système.

De plus, il existe une étude expérimentale des systèmes Wi-Fi NOMA/SOMA [120], [121]. Des auteurs fournissent des preuves d'un gain allant jusqu'à 40 % du débit moyen géométrique pour deux STA. De plus, ils montrent que la mise en œuvre de NOMA/SOMA peut être rétro compatible : la STA lointaine peut être héritée. Comme le STA distant reçoit le signal tel quel et n'applique pas le SIC, il n'a pas besoin de savoir que le signal composite utilise SOMA.

Les propositions sur NOMA ont lancé une discussion approfondie concernant son efficacité avec MU-MIMO. NOMA n'est pas une technologie concurrente de MU-MIMO, mais plutôt complémentaire. MU-MIMO affiche des performances élevées si les STA ont une atténuation similaire mais des canaux MIMO orthogonaux. En revanche, NOMA fonctionne mieux avec les STA qui ont une atténuation différente et des canaux corrélés. Intuitivement, l'AP peut utiliser MU-MIMO pour former plusieurs faisceaux spatiaux vers des groupes STA, tandis que chaque faisceau transporte un signal NOMA, séparé au sein du groupe STA. Il existe de nombreux travaux théoriques dédiés à la coopération MU-MIMO et NOMA, mais encore, aucun résultat expérimental n'est disponible.

3.2.5 Coopération multi-AP

3.2.5.1 Idée de base

Alors que 11ax [122] améliore les performances Wi-Fi dans les déploiements denses en introduisant les fonctionnalités qui peuvent être implémentées dans un seul réseau, TGbe va plus loin et discute une liste de fonctionnalités qui nécessitent une coordination des réseaux à proximité [123]. La discussion dans TGbe démontre un changement de paradigme de l'atténuation des interférences à la coopération entre les points d'accès voisins.

Les réseaux Wi-Fi d'entreprise à la pointe de la technologie utilisent souvent des solutions basées sur le cloud telles que Cisco Meraki [10], Quantenna MAUI [124], ou Huawei Agile [125]. Ils permettent une itinérance transparente entre les réseaux Wi-Fi et simplifient la configuration du réseau, par exemple la sélection des canaux à utiliser. Cependant, à l'exception de ces paramètres à long terme, les réseaux fonctionnent dans des modes presque non coordonnés. Dans ce contexte, TGbe vise à améliorer les performances du réseau par une coordination très étroite de l'accès aux canaux, du calendrier de transmission et des transmissions conjointes des mêmes données.

TGbe envisage de permettre à un ensemble d'AP de former un système multi-AP, qui peut avoir une coordination distribuée ou centralisée. Dans ce dernier cas, le nœud central est souvent appelé AP maître, tandis que les autres sont des AP esclaves. Contrairement aux solutions existantes basées sur le cloud, dans lesquelles les points d'accès sont connectés au contrôleur par un fil, certaines propositions, par exemple, supposent que tous les points d'accès esclaves sont dans la plage de transmission du point d'accès maître. Cependant, certains points d'accès esclaves peuvent être masqués les uns des autres. Les rôles AP ne sont pas liés à certains appareils, mais peuvent être modifiés dynamiquement.

TGbe considère deux types de systèmes multi-AP [126] : Coordonné et Joint. Les systèmes coordonnés envoient/reçoivent chaque portion de données par un seul point d'accès, tandis que les systèmes conjoints envoient/reçoivent des données par plusieurs points d'accès. Les systèmes multi-AP considérés sont listés ci-dessous, en commençant par ceux qui sont les plus faciles à mettre en œuvre.

a) Réutilisation spatiale coordonnée (RSE)

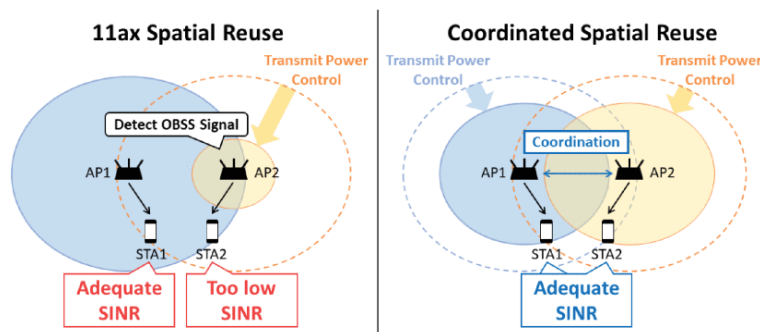


FIGURE 3.10 – 11ax SR vs CSR.

CSR [127], [128], [129], le système multi-AP le plus simple, est une évolution d'un système de réutilisation spatiale (SR) introduit dans 802.11ax. Il peut être utilisé lorsque les interférences inter-BSS sont faibles, mais que l'état

du canal est perçu comme étant occupé. Pour un SNR adéquat à toutes les STA, les AP atténuent les interférences en contrôlant de manière coopérative la puissance d'émission (voir la figure 3.10). Il diffère du 11ax SR non coordonné, où un AP transmet avec la puissance TX maximale tandis que les autres AP doivent diminuer la puissance TX. La RSE nécessite une petite rétroaction inter-AP, et elle combat mieux les interférences par rapport à la SR non coordonnée de 11ax.

b) OFDMA coordonné (Co-OFDMA)

Le système multi-AP Co-OFDMA [128], [129], [130], [131] permet aux AP de coordonner leurs horaires en temps et en fréquences. Avec Co-OFDMA, les points d'accès voisins peuvent attribuer les mêmes RU pour certaines STA si une telle transmission n'interfère pas, ou ils peuvent attribuer différentes RU pour éviter les interférences (voir la figure 3.11). Les résultats de simulation préliminaires montrent que le Co-OFDMA est efficace pour une densité moyenne ou élevée de PA [129].

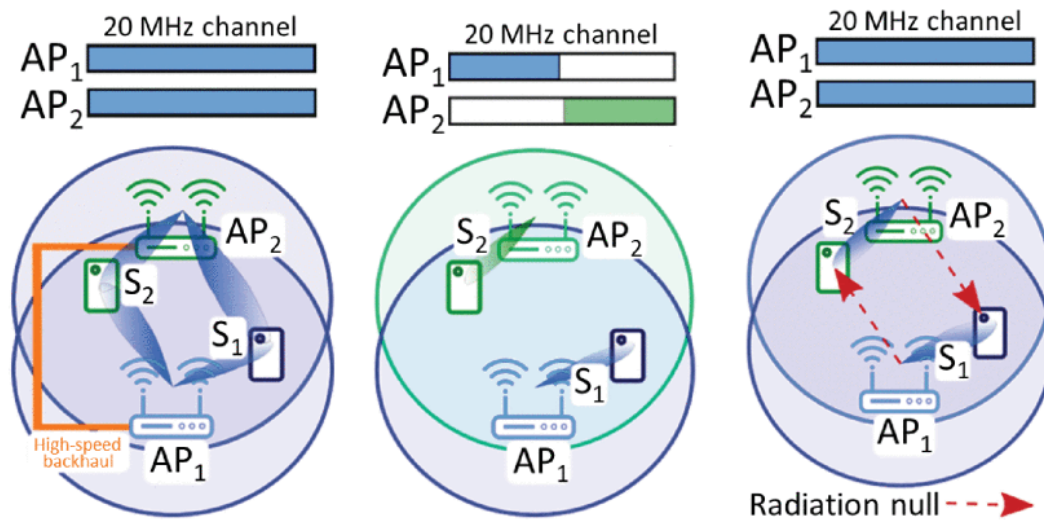


FIGURE 3.11 – Transmission et réception conjointes (à gauche), Co-OFDMA (au centre), Direction nulle coordonnée (à droite).

Parmi la liste des types de coordination multi-AP, CSR et Co-OFDMA sont les plus susceptibles d'être pris en charge dans le nouvel amendement [132] en raison de leur simplicité, de leur flexibilité et de leurs nombreuses solutions possibles. Par exemple, les auteurs de [133] améliorent le schéma en permettant au propriétaire du TXOP de planifier directement les ressources du canal parmi les STAs associés aux APs voisins. Cette approche nécessite une signalisation supplémentaire entre les points d'accès. Cependant, elle peut améliorer l'efficacité du spectre et la flexibilité de la transmission multi-AP.

c) direction nulle

L'idée de Null Steering [129], [131] (ou, comme on l'appelle aussi pour les transmissions DL, Coordinated beamforming, CBF) est que tout en formant les faisceaux vers leurs STA, un AP vise également à annuler son interférence avec des voisins particuliers. STA (voir la figure 3.11). Cette approche évite les interférences mutuelles entre les réseaux voisins. L'un des défis les plus importants du pilotage nul est que les points d'accès doivent acquérir le CSI des STA non desservies associées à d'autres points d'accès.

L'annulation des interférences par point d'accès est une approche de pilotage nul mais utilisée pour la transmission UL [134]. Avant la réception de la trame UL, chaque AP collecte des informations sur le canal vers toutes les STA à proximité. Plus tard, l'AP configure son récepteur pour acquérir une trame de sa STA associée et ignorer les interférences induites par les autres STA. Une telle approche ne nécessite aucun échange de données entre les points d'accès. En outre, il permet une transmission simultanée par différentes STA vers les points d'accès correspondants.

d) Transmission et réception conjointes

Cette méthode [131], [135] permet à plusieurs points d'accès de servir le même STA en créant un système MU-MIMO distribué dynamique. Ce système fonctionne conjointement sur plusieurs points d'accès. En DL, le bénéfice de l'émission et de la réception conjointes s'est avéré expérimentalement le plus élevé par rapport aux systèmes multi-AP coordonnés [136]. Cependant, cette méthode est trop compliquée et a des exigences sévères, telles qu'une liaison haute vitesse et une synchronisation précise entre les points d'accès.

La transmission conjointe dans UL peut être organisée de différentes manières, offrant une fiabilité plus élevée dans divers scénarios. TGbe a discuté les approches suivantes classées dans l'ordre croissant de leur complexité [134] :

- Le SIC distribué améliore la livraison des données UL en cas de chevauchement des transmissions. Avec le SIC distribué, la réception des trames se compose de deux étapes. À la première étape, chaque AP décode les données de ses STA et transmet les données à d'autres AP pour la soustraction des interférences. Ensuite, les autres points d'accès suppriment le signal d'interférence de celui reçu et obtiennent leurs propres données. Cette technique permet une UL simultanée, ce qui est particulièrement utile pour RTA.
- La réception de trame conjointe implique que les points d'accès traitent conjointement les données reçues de toutes les STA. Un tel schéma peut fournir des gains élevés dans les déploiements avec une distribution non uniforme des STA et avec des interférences élevées, mais il nécessite une synchronisation étroite entre les points d'accès, un backhaul extrêmement rapide et à faible latence. Il n'est donc pas encore clair si cela fera partie de l'amendement 11be.

Les méthodes de transmission et de réception conjointes nécessitent un traitement de signal conjoint au niveau des points d'accès. Les performances de ces méthodes peuvent être améliorées par des précodeurs appropriés utilisés par les STA pour transmettre des données en parallèle [137].

Les types décrits diffèrent par le niveau de synchronisation nécessaire entre les points d'accès. CSR peut fonctionner avec une synchronisation aussi grossière que la synchronisation au niveau de la trame, CBF et co-OFDMA nécessitent une synchronisation au niveau des symboles [138]. Dans le même temps, les systèmes conjoints nécessitent une synchronisation étroite en temps et en phase [139]. Pour CSR, Co-OFDMA et CBF, le calendrier doit être diffusé entre les points d'accès. Dans Joint TX, les points d'accès doivent en outre disposer des mêmes données pour la transmission. Dans la réception de trame conjointe, les points d'accès doivent échanger des échantillons de temps de signal. Les deux dernières méthodes sont les plus difficiles à mettre en œuvre et les plus difficiles à fournir des gains notables dans les déploiements réels. Dans cette optique, la RSE [140] et la Co-OFDMA [141] semblent plus attrayants et ont été soutenus récemment lors des téléconférences TGbe.

3.2.5.2 Sondage

Une transmission multi-AP commence par une procédure de sondage au cours de laquelle les AP et les STA mesurent le canal entre eux. Dans un exemple de procédure de sondage pour JTX, illustré dans [142], le point d'accès maître lance le sondage avec une trame de déclenchement multi-AP qui demande des trames multi-AP NDPA et NDP à tous les points d'accès esclaves impliqués (voir la figure 3.12). Les NDP multi-AP de différents AP sont envoyés simultanément. Après avoir reçu tous les NDP, les STA envoient les trames de retour NDP. Chaque STA peut adresser ses commentaires à son AP associé, à l'AP maître uniquement [143], ou aux AP dont la STA a entendu les NDP.

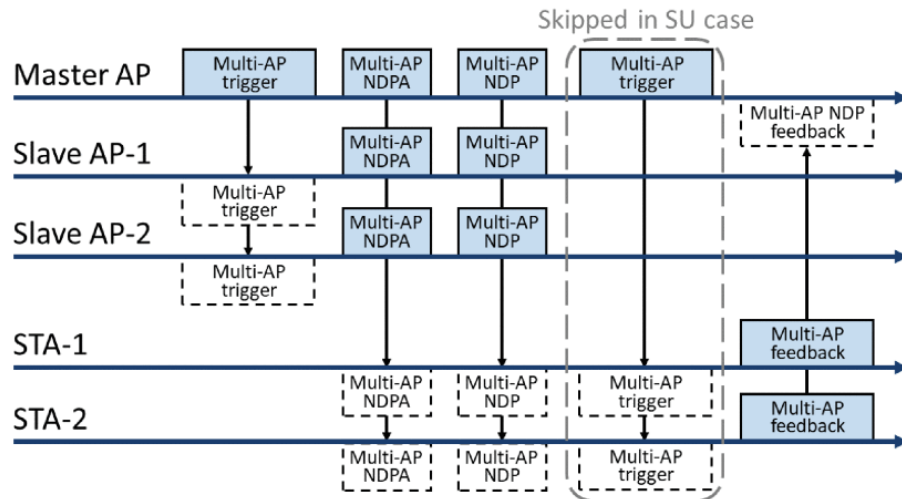


FIGURE 3.12 – Exemple de protocole de sondage multi-AP pour JTX.

Pour un ordre MIMO élevé, les NDP multi-AP peuvent prendre beaucoup de temps d'antenne, la soumission [145] propose donc d'utiliser l'entrelacement de sous-porteuses LTF. La rétroaction sonore des STA peut également prendre beaucoup de temps. Ainsi, la soumission [144] propose une méthode pour réduire les informations de rétroaction. L'idée principale est qu'un STA n'a pas besoin de fournir un retour de formation de faisceau détaillé pour un point d'accès éloigné, car l'implication de ce point d'accès dans la transmission conjointe ne peut pas apporter beaucoup de gain pour le STA de toute façon. Si un STA mesure un mauvais canal à un point d'accès, il peut envoyer soit aucun retour, soit un indicateur de qualité de canal court du lien, de sorte que les ressources du canal sont sauvegardées.

Sur la base du retour de sondage obtenu, le point d'accès maître sélectionne quels points d'accès desservent quelles STA. Il est extrêmement important de s'assurer que tous les points d'accès esclaves sélectionnés contribuent correctement à la transmission. Sinon, le système multi-AP peut perdre son gain anticipé. Bien que la procédure de sélection ne soit pas encore discutée et que l'algorithme de sélection du point d'accès esclave soit hors du champ d'application de la norme, il est proposé que les STA puissent mesurer les liaisons frontales et recommander un ensemble de points d'accès esclaves pour une transmission multi-AP [146], [147].

3.2.5.3 Recueillir les remerciements

Une fois les données transmises, les STA envoient des BA. Dans le cas de MU, les accusés de réception provenant de plusieurs STA doivent être coordonnés. Sinon, ils se heurtent. Ainsi, les BA doivent être envoyés séquentiellement ou en utilisant UL OFDMA. Dans le cas de JTX, les points d'accès doivent synchroniser les informations sur la

livraison de chaque trame. Pour cela, chaque AP peut écouter tous les BA, puis diffuser des informations sur les BA entendus au reste des AP. Une telle approche est plutôt compliquée dans le cas de transmissions MU et nécessite beaucoup de temps de canal. Une autre approche permet à un AP (par exemple, l'AP maître) de collecter tous les BA, puis de partager ces informations avec les autres AP [148].

3.2.5.4 BSS virtuel ⁴

Dans les deux DL et UL, l'ensemble des points d'accès participants peut varier dynamiquement en fonction de la qualité de la liaison, de l'équilibrage de charge, etc [149], [150]. L'échange transparent de trames entre une STA et un groupe de points d'accès coopérants est souhaité sans surcharge de négociation supplémentaire. De plus, si un ensemble de points d'accès coopérants agit comme un seul émetteur ou récepteur, la connexion entre la STA et les points d'accès doit être sécurisée. Pour cela, les procédures d'authentification et d'association doivent se faire avec tous les AP de l'ensemble.

La soumission [149] propose de considérer un tel ensemble de PA comme un BSS virtuel. Tous les points d'accès de l'ensemble partagent l'association/l'authentification et peuvent avoir le même ID BSS. Par conséquent, après avoir terminé la procédure d'association avec un BSS virtuel, le STA n'a pas besoin de réassociation, s'il change l'AP physique desservant le STA [151]. Le coordinateur du BSS virtuel décide quel AP dessert une STA associée. La décision peut prendre en compte les qualités de liaison, la capacité du canal, les capacités de l'AP, le nombre de STA desservies, etc.

3.2.5.5 Problèmes de mise en œuvre

Une large palette d'approches discutées dans TGbe dans le contexte de la coopération multi-AP soulève de nombreuses questions ouvertes liées à leur mise en œuvre et aux gains apportés. Le principal problème est la coexistence avec d'autres réseaux. La coopération multi-AP nécessite une synchronisation étroite entre les points d'accès qui peut être effectuée via des liaisons sans fil ou des backbones. Auparavant, des tentatives similaires avaient été faites dans 11aa avec la négociation HCCA TXOP [152], ce qui est une fonctionnalité assez floue qui n'est pas implémentée dans les appareils réels. En outre, la clusterisation centralisée et distribuée fait partie du Wi-Fi mmWave, qui est un projet de niche. Dans les réseaux Wi-Fi traditionnels, on suppose généralement que les points d'accès à proximité peuvent être produits par différents fournisseurs et avoir des propriétaires différents. Ainsi, déléguer toute décision à des points d'accès concurrents est une stratégie discutable. La coopération multi-AP montre un changement de paradigme dans le groupe de travail 802.11. Cette innovation suppose que dans un réseau d'entreprise, la majorité des points d'accès peuvent appartenir à un seul propriétaire. Ainsi, toute décision centralisée pourrait être fructueuse. Cependant, il n'est pas clair dans quelle mesure de telles décisions sont efficaces en présence de STA étrangères qui ne sont pas sous contrôle est un problème.

Le fonctionnement multi-AP nécessite des techniques de planification avancées qui sont laissées au-delà de la portée de la norme. Même dans un schéma simple, à savoir Co-OFDMA, les points d'accès doivent échanger des informations sur les demandes de ressources de canal. De plus, le mécanisme de sondage - requis pour toutes les méthodes considérées de fonctionnement multi-AP - n'a pas encore été étudié pour UL. Les solutions proposées dans TGbe pour l'échelle DL mal pour UL. En outre, toute approche de planification multi-AP centralisée ou distribuée soulève le problème de l'équité.

De nombreux problèmes ouverts sont liés à la transmission et à la réception conjointes. L'un d'eux est lié au temps, à la fréquence et à la synchronisation de phase des points d'accès. La synchronisation peut être affectée par des décalages de fréquence porteuse indépendants, des décalages temporels entre le NDP et la trame de données,

des dérives de fréquence porteuse au niveau des points d'accès entre les trames NDP et de données, et le délai de propagation entre les points d'accès et la STA [153]. Des auteurs de [154] expliquent l'impact de ces dégradations et donnent une approximation de la fonction de distribution cumulative pour le décalage temporel. La soumission [153] suggère d'introduire des midambles dans de longues trames de données pour réduire l'effet négatif de tout décalage de fréquence porteuse résiduel entre les points d'accès.

La nature variable du canal sans fil complique la transmission et la réception conjointes. Le gain relatif du canal à travers les points d'accès, qui est utilisé pour le précodage, doit être très proche du gain relatif au moment de la transmission [155]. Toute différence au-delà de 0,8 dB doit être corrigée.

La soumission [56] souligne en outre les besoins en matière de liaison terrestre pour la transmission et la réception conjointes. Cette méthode nécessite que les données de toutes les STA participantes soient disponibles sur tous les points d'accès, ce qui peut être fait avec le backhaul. En théorie, le backhaul peut être déployé sur le même canal que le fronthaul ou un autre canal sans fil/filaire. En pratique, l'utilisation du backhaul sans fil est discutable car il doit avoir une capacité énorme, dépassant le débit cumulé de tous les STA du réseau.

3.3 Heuristique de recherche d'un ensemble dominant dans un graphe biparti

Notre problématique dans ce mémoire a été modélisée en un graphe biparti, telle qu'une partie représente des points d'accès et l'autre partie représente des stations, et les arcs représentent les câbles reliant les points d'accès aux stations.

3.3.1 Graphe biparti

Un graphe $G = (V, E)$ est dit biparti si l'ensemble de ses sommets peut être partitionné en deux sous-ensembles A et B qui sont chacun des ensembles stables de G . On dénote alors le graphe G par (A, B, E) . Si de plus l'ensemble E des arêtes est égal à $u, v : u \in A$ et $v \in B$ alors le graphe est dit biparti complet.[156]

3.3.2 Ensemble dominant

Un ensemble dominant d'un graphe G est un ensemble de sommets de G tels que tout sommet de G a au moins un voisin dans celui-ci.[157]

Malgré la grande simplicité de sa définition, il est NP-complet. De par sa remarquable utilité, ce problème de graphe fondamental a fait l'objet de nombreux travaux. Il permet notamment d'exprimer des problèmes qui, par exemple dans un réseau, demandent qu'une certaine ressource soit disponible en local ou chez l'un des voisins immédiats en utilisant le moins possible de cette ressource.[156]

Dans notre cas, on souhaite déployer le moins de points d'accès pour dominer le réseaux d'une façon à interconnecter toutes les stations. À l'exécution de cet algorithme, on remarque que certains points d'accès ont été entièrement libérés.

Pour cela on a proposé l'algorithme suivant, tel que m représente le nombre de points d'accès du réseaux et n représente le nombre de stations.

$A = \text{rand}(n,m)$; génération d'une matrice aléatoire à n lignes et m colonnes.

trierPA; c'est une fonction qui sert à trier les PA par ordre croissant de leurs degrés.

supprimerArc; c'est une fonction qui sert à supprimer des arcs redondants connectant certaines stations à la fois au point d'accès $P\{k\}$ et aux autres points d'accès différents de $P\{k\}$. On retient uniquement la connexion vers $P\{k\}$.

Algorithme dominant
Entrée : matrice générée aléatoirement.
Sortie : matrice réduite.
 $A = \text{rand}(n,m)$;
trierPA ;
supprimerArc ;

Exemple d'application :

On introduit le nombre de points d'accès et le nombre de stations tel que : $m = 8$, $n = 10$

On exécute le programme et on aura (voir la figure 3.13) :

La matrice A c'est la matrice générée aléatoirement, tandis que la matrice B est la matrice résultante. On remarque bien que les points d'accès 9 et 10 ont été libérés (les deux dernières colonnes sont nulles).

3.4 Algorithme d'Equilibrage de charge

Dans cet algorithme on souhaite répartir les charges entre les points d'accès et les stations d'une façon équitable, la condition d'arrêt est le fait de traiter toutes les stations, la procédure consiste à utiliser un tableau de marquage où mettre les identifiants des points d'accès et chaque case du tableau lui-même représente l'identifiant de la station. Quand on sélectionne une station on vérifie si la valeur de cette dernière n'est pas déjà marquée par un point d'accès, si on trouve un arc non marqué, on incrémente le nombre de station.

$A = \text{rand}(n,m)$; génération d'une matrice aléatoire à n lignes et m colonnes.

$B = A$; représente la matrice actualisée.

selectionnerAP; On prend le PA de degré le plus faible.

selectionnerSta; sélectionner une station

$\text{nbSta}++$; incrémenter le nombre de station

```

donner le nombre de points d'accès 8
donner le nombre de stations 10

A =

  0  0  1  0  0  1  0  1
  0  1  1  0  0  1  0  0
  0  0  0  0  1  1  1  1
  0  1  1  1  1  0  1  0
  0  1  1  1  0  0  0  1
  0  0  0  0  1  1  1  1
  1  0  1  1  1  1  0  1
  0  1  1  1  1  0  0  1
  1  1  0  1  1  1  0  0
  1  1  0  1  1  1  1  0

B =

  0  0  0  0  0  1  0  0
  0  0  0  0  1  0  0  0
  0  1  0  0  0  0  0  0
  0  1  0  0  0  0  0  0
  0  0  0  1  0  0  0  0
  0  1  0  0  0  0  0  0
  1  0  0  0  0  0  0  0
  0  0  1  0  0  0  0  0
  1  0  0  0  0  0  0  0
  1  0  0  0  0  0  0  0

```

FIGURE 3.13 – Test 1.

Algorithme Equilibrage**Entrée** : matrice générée aléatoirement.**Sortie** : matrice réduite et le tableau marquage.

A=rand(n,m);

B = A;

while nbSta ≤ nbStaTotale **selectionnerAP** ; **selectionnerSta** ;

nbSta ++;

ActualiserReseaux ;**end****Exemple d'application :**

Dans cet exemple, on donne 10 pour nombre de points d'accès, et 12 pour nombre de stations, on exécute et on aura ce qui suit (voir la figure 3.14) :

0	0	1	1	0	0	1	0	0	0		
0	1	1	0	1	1	1	0	0	1		
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	1	1	0	1	0	1	0		
1	0	1	1	0	1	1	1	0	0		
1	0	1	1	0	0	1	0	0	1		
0	1	1	0	0	1	0	0	0	1		
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1		
0	0	1	1	1	0	1	1	0	0		
1	1	1	0	0	1	1	1	0	1		
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1		
0	1	1	0	1	1	0	1	0	1		
B =											
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
marquage =											
3	5	1	9	6	10	2	9	5	2	9	5

FIGURE 3.14 – Test 2.

On remarque bien dans la matrice B de la figure 3.14 qu'il y a une certaine équilibrage de charge et le nombre de connections a été réduit, les cases du tableau 'marquage' sont des identifiants des stations et contiennent les valeurs suivantes : 3 , 5 , 1 , 9 , 6 , 10 , 2 , 9 , 5 , 2 , 9 , 5 ,et cela signifie que :

La 1^{re} station est connectée au 3^{me} point d'accès.

La 2^{me} station est connectée au 5^{me} point d'accès.

La 3^{me} station est connectée au 1^{er} point d'accès.

La 4^{me} station est connectée au 9^{me} point d'accès.

La 5^{me} station est connectée au 6^{me} point d'accès.

La 6^{me} station est connectée au 10^{me} point d'accès.

La 7^{me} station est connectée au 2^{me} point d'accès.

La 8^{me} station est connectée au 9^{me} point d'accès.

La 9^{me} station est connectée au 5^{me} point d'accès.

La 10^{me} station est connectée au 2^{me} point d'accès.

La 11^{me} station est connectée au 9^{me} point d'accès.

La 12^{me} station est connectée au 5^{me} point d'accès.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents défis et travaux existants de la norme 802.11be, et ceux qui sont en cours de recherche, vu que la version finale est attendue pour début 2024. Ainsi que de nombreuses questions ouvertes sur l'OFDMA amélioré et la RTA.

Chapitre 4

Simulation et résultats

4.1 Introduction

La simulation permet de tester à moindre coût les nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui pourront se poser dans le futur afin d'implémenter la technologie la mieux adaptée aux besoins. MATLAB est un langage de script émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Dans ce chapitre, nous allons simuler les algorithmes cités dans le chapitre précédent, et discuter les différents résultats qu'on a obtenu avec les différentes valeurs.

4.2 Pourquoi MATLAB ?

MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser de calculs numériques et symbolique de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres de graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

Le logiciel fonctionne sous Windows et sous Linux, Son apprentissage n'exige que la connaissance de quelques principes de base à partir desquels l'utilisation des fonctions évoluées est très intuitive grâce à l'aide intégrée aux fonctions. [158]

4.3 Paramètres de simulation

Afin d'évaluer la performance de notre solution, nous avons choisi la métrique suivante :

4.3.1 Débit

On considère que le réseau est en plein charge, c'est-à-dire que toutes les stations connectées dans le réseau ont un paquet à envoyer. Si on fixe la taille d'un paquet à 1500 octet, la quantité de données transmises est calculée en

multipliant 1500 par le nombre de stations du réseau, comme suit :

$$\text{qtité} = 1500 \times n$$

Le débit agrégé du réseau, est calculé en divisant la quantité de données envoyées dans le réseau trouvée auparavant, par le temps maximum de transmission de tous les paquets, comme ceci :

$$\text{débit agrégé} = \text{qtité} / \text{temps-max}$$

Avec

n : le nombre de stations.

qtité : la quantité de données envoyées dans le réseau.

temps-max : temps maximum de transmission, nommé aussi le délai max.

4.4 Simulation et interprétation des résultats

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats de simulation obtenues, en simulant le programme 100 fois. On s'intéresse à la variation de débit en fonction de nombre de stations en faisant varier le nombre de points d'accès.

4.4.1 Le premier test

Le nombre de point d'accès est noté m , dans ce test on pose $m=5$, on aura le graphe suivant (figure 4.1) :

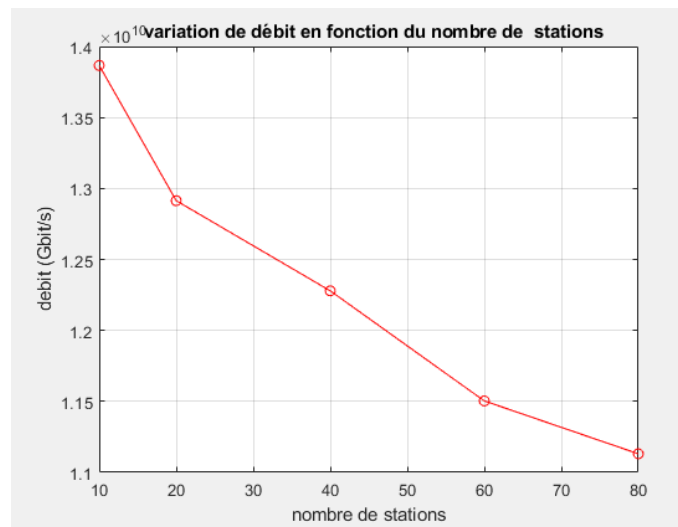


FIGURE 4.1 – Débit en fonction du nombre de stations pour nombre de PA=5.

4.4.2 Le deuxième test

Dans ce test on pose $m=10$, on aura le graphe suivant (figure 4.2) :

4.4.3 Le troisième test

Dans ce test on pose $m=50$, on aura le graphe suivant (figure 4.3) :

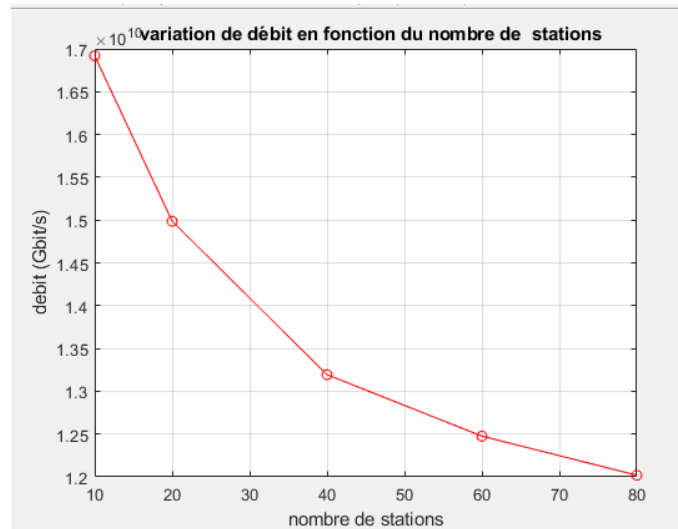


FIGURE 4.2 – Débit en fonction du nombre de stations pour nombre de PA=10.

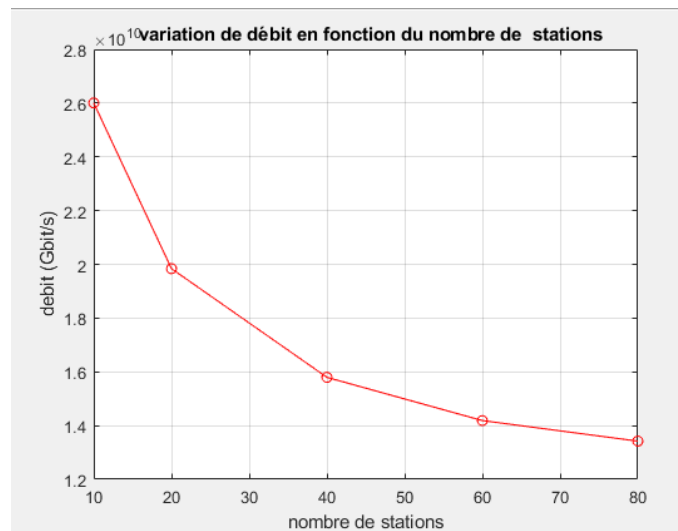


FIGURE 4.3 – Débit en fonction de nombre de stations pour nombre de PA=50.

4.4.4 Le quatrième test

Dans ce test on pose $m=100$, on aura le graphe suivant (figure 4.4) :

D'après les résultats de la simulation illustrés dans les figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4, on remarque que pour 10 stations le débit max est égal à $\simeq 1.39 \times 10^{10}$ Gbit/s, 1.7×10^{10} Gbit/s, 2.6×10^{10} Gbit/s et 3.7×10^{10} Gbit/s (respectivement), et le débit min est égale à $\simeq 1.12 \times 10^{10}$ Gbit/s, 1.2×10^{10} Gbit/s, 1.39×10^{10} Gbit/s et 1.49×10^{10} Gbit/s (repectivement).

Cette diminution de débit par rapport nombre de stations est dû au support partagé et aux nombre de stations participantes à la transmission.

On remarque aussi une augmentation notable du débit agrégé, au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de points d'accès et cela est dû à la transmission de toutes les stations du réseau, c'est-à-dire que toutes les stations

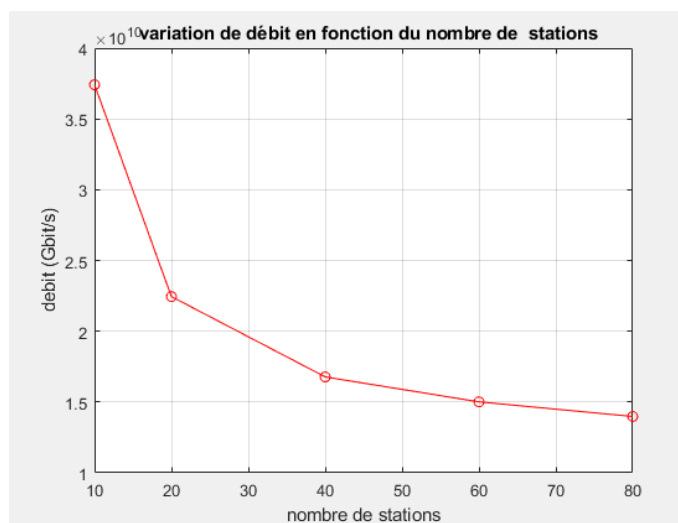


FIGURE 4.4 – Débit en fonction du nombre de stations pour nombre de PA=100.

participent à la transmission des données.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simulation de l'algorithme proposé afin de vérifier son efficacité. Nous avons également présenté le logiciel de simulation que nous avons utilisé pour évaluer les performances de notre algorithme (MATLAB).

Conclusion générale

L'amendement 802.11be est la prochaine étape importante dans la réussite à long terme du Wi-Fi. Ses principales fonctionnalités sont liées à la fourniture d'un débit extrêmement élevé et à la prise en charge d'applications en temps réel. Bien que le processus de développement de la norme en soit à ses tout débuts, nous pouvons déjà esquisser la future technologie et souligner ses avantages et ses limites ainsi que les problèmes ouverts, qui nécessitent des efforts supplémentaires de la part de la communauté.

En théorie, des débits de données nominaux plus élevés et des latences plus faibles ne peuvent être obtenus qu'en utilisant la première innovation : l'EHT PHY. Cependant, dans la pratique, le PHY EHT seul ne peut pas fournir des gains notables en termes de débit et de latence pour les utilisateurs finaux en raison du spectre sans licence, des interférences et de la surcharge massive. C'est pourquoi, en plus de l'EHT PHY, TGbe discute des six autres innovations pour le Wi-Fi 7. L'EDCA et l'OFDMA modifiés prendront en charge le RTA. De plus, l'OFDMA deviendra plus flexible pour améliorer l'efficacité du spectre. L'intégration du fonctionnement multi-liens dans la norme Wi-Fi ajoute de la flexibilité à l'utilisation des ressources et offre une approche complémentaire pour une utilisation plus élevée de la bande passante et des débits encore plus élevés. Beaucoup d'efforts pour minimiser les cibles aériennes de sondage du canal pour ouvrir la porte à des systèmes Wi-Fi MIMO massifs et efficaces. Enfin, TGbe discute des approches PHY avancées, telles que HARQ, NOMA et FD, qui peuvent augmenter l'efficacité spectrale, et diverses approches de coopération multi-AP. Au sein de ce dernier groupe de propositions, nous voyons un autre changement de paradigme de l'atténuation des interférences en séparant la transmission dans le temps/fréquence/espace ou la puissance à la transmission conjointe au sein d'un système d'antenne massive distribué. Bien que TGbe puisse rapporter de nombreuses fonctionnalités avancées de coopération PHY et multi-AP pour les prochaines versions Wi-Fi, elles nous montrent la direction de l'évolution ultérieure au-delà du Wi-Fi 7 [4].

En plus de présenter au lecteur les fonctionnalités attendues de 11be, nous essayons chaque fois que possible de donner d'autres conseils sur des questions ouvertes intéressantes pour l'industrie et le monde universitaire. Ces questions ouvertes sont liées à la fois aux mécanismes qui devraient être inclus dans la norme (par exemple, procédure de sondage, cadre HARQ) et aux algorithmes au-delà de la portée de la norme. Nous décrivons de nombreux problèmes d'optimisation et de mise en œuvre. Nous espérons que notre recherche attirera des chercheurs des meilleures entreprises de télécommunications et des principales universités vers les défis 802.11be .

Bibliographie

- [1] IEEE P802.11-Task Group BE (EHT) *Meeting Update*. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbe-update.htm>
- [2] M. TERRÉ. *WiFi : Le Standard 802.11 Couche physique et couche MAC*. Version 1.1, 2007.
- [3] P. ATELIN. *Wi-Fi - Réseaux sans fil 802.11 : Technologie - Déploiement - Sécurisation*. Editions ENI, 2 edition, 2008.
- [4] KHOROV, EVGENY, LEVITSKY, ILYA, ET AKYILDIZ, IAN F, *Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7*, IEEE Access , 2020, vol. 8, p. 88664-88688.
- [5] K. BELKADI, *Optimisation dynamique de l'accès au canal du protocole IEEE 802.11*, Mémoire de MASTER, Université d'Oran, Oran, 2015.
- [6] — , *802.11ac : A Survival Guide*. O'Reilly Media, 2013.
- [7] W. LEVEUGLE, *Des possibilités d'évolution vers le sans-fil des réseaux audio-numériques pour la sonorisation - Cas des Wireless Lan*, mém.de maêtr., Ecole Nationale Supérieure Louis-Lumière, 2012.
- [8] P. AIMON, N. DUMAS, L. FALLET ET S. FOUILLEUX, *Wi-Fi Etude théorique , projet ROBI*. Janvier 2004.
- [9] F. DI GALLO, *WiFi l'essentiel qu'il faut savoir ...* 2003.
- [10] Cisco. *Meraki Datasheet Cloud Management*. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <https://meraki.cisco.com/lib/pdf/meraki-datasheet-cloud-management.pdf>
- [11] MICHAEL SIMON, *La norme Wi-Fi 802.11ax accélère la communication dans les scénarios multiutilisateurs*, pré-publication.
- [12] A. ASTERJADHI AND E. AU, *Compendium of Motions Related to the Contents of the TGbe Specification Framework Document*, document IEEE 802.11- 19/1755r2, Jan. 2020.
- [13] A. CHEN, L. YANG, B. TIAN, Y. KIM, S. VERMANI, AND S. SHELLHAMMER, *320MHz Channelization and Tone Plan*, document IEEE 802.11- 19/0797r1, Jul. 2019.
- [14] E. PARK, D. LIM, J. KIM, AND J. CHOI, *Tone Plan Discussion*, document IEEE 802.11-19/1066r3, Nov. 2019.
- [15] E. PARK, D. LIM, J. KIM, AND J. CHOI, *Phase Rotation for 320MHz*, document IEEE 802.11-19/1493r1, Nov. 2019.
- [16] S. SCHELSTRAETE, D. DASH, AND I. LATIF, *Feasibility of 4096QAM*, document IEEE 802.11-19/0444r0, Mar. 2019.
- [17] W. B. LEE, R. DUAN, M. IBRAHIM, S. KANDALA, AND A. RANGANATH, *16 Spatial Stream Support*, document IEEE 802.11-19/1877r1, Jan. 2019.
- [18] S. VERMANI, B. TIAN, H. SAMPATH, V. JONES, R. D. VEGT, C. LUKASZEWSKI, E. PERAHIA, S. SCHELSTRAETE, R. STACEY, L. CARIOU, X. CHEN, H. ZHANG, S. COFFEY, AND Y. INOUE, *16 Spatial Stream Support in Next Generation WLAN*, document IEEE 802.11-18/0818r3, May 2018.

- [19] E. PERAHIA AND R. STACEY, *Next Generation Wireless LANs : 802.11n and 802.11ac*. Cambridge University Press, 2013.
- [20] X. CHEN ET AL., *Discussions on the PHY features for EHT*, IEEE 802.11-18/1461r0, Sep. 2018.
- [21] B. HART, D. KLOPER, A. MYLES, V. DESAI, P. MONAJEMI, AND M. TANEJA, *Recommended direction for EHT*, IEEE 802.11-18/1549r0, Sep. 2018.
- [22] Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau-ad-hoc>
- [23] L. CARIOU, R. STACEY, X. CHEN, P.-K. HUANG, Y. TANAKA, W. CARNEY, Y. MORIOKA, S. SCHELSTRAETE, H. WANG, C. LUKASZEWSKI, E. PERAHIA, M. PARK, T. WU, AND W. BONG, *EXtreme Throughput (XT) 802.11*, document IEEE 802.11-18/0789r10, May 2018.
- [24] E. KHOROV, *Wi-Fi Time Sensitive Networking*, document IEEE 802.11-17/1734r1, Nov. 2017.
- [25] *IEEE P802.11-Real Time Application (RTA) Technical Interest Group (TIG) Meeting Update*. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <http://www.ieee802.org/11/Reports/rtatig-update.htm>.
- [26] IEEE P802.11-Task Group BE (EHT) Meeting Update. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <http://www.ieee802.org/11/Reports/tgbe-update.htm>
- [27] Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <https://1.ieee802.org/tsn/>
- [28] D. BANKOV, E. KHOROV, A. LYAKHOV, AND M. SANDAL, *Enabling real-time applications in Wi-Fi networks*, Int. J. Distrib. Sensor Netw., vol. 15, no. 5, May 2019, Art. no. 155014771984531.
- [29] J. GROSS, USE CASES, *Requirements and Potential Wireless Approaches for Industrial Automation Applications*, document IEEE 802.11-18/1889r1, Nov. 2018.
- [30] P. THUBERT AND J. HENRY, *Bringing Determinism for IoT Wireless-Sharing 802.15.4 Experience*, document IEEE 802.11-18/1918r0, Nov. 2018.
- [31] E. KHOROV, A. KIRYANOV, A. LYAKHOV, AND G. BIANCHI, *A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs*, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 21, no. 1, pp. 197U216, 1st Quart., 2019.
- [32] E. KHOROV AND D. BANKOV, *Performance Evaluation of Real Time Communications Over Wi-Fi*, document IEEE 802.11-18/1947r4, Mar. 2019.
- [33] D. CAVALCANTI, M. RASHID, G. VENKATESAN, L. CARIOU, AND R. STACEY, *Time-Aware Shaping (802.1Qbv) Support in the 802.11 MAC*, document IEEE 802.11-18/1892r0, Nov. 2018.
- [34] L. HUANG, U. YOSHIO, R. CHITRAKAR, AND Y. DING, *Enabling Uplink Persistent Allocation for EHT*, document IEEE 802.11-19/0806r2, Jul. 2019.
- [35] X. ZUO, K. MENG, G. HU, L. HUANG, R. CHITRAKAR, Y. DING, Y. URABE, T. HANDTE, Y. TANAKA, AND M. ABOUELSEoud, *Use of Uplink Persistent Allocation for RTA*, document IEEE 802.11-19/1538r1, Sep. 2019.
- [36] D. CAVALCANTI, M. RASHID, L. CARIOU, G. VENKATESAN, AND R. STACEY, *Controlling Latency in 802.11*, document IEEE 802.11-18/1160r0, Jul. 2018.
- [37] S. KIM, J. CHOI, J. KIM, I. JANG, T. SONG, AND S. PARK, *Latency analysis for EHT*, document IEEE 802.11-19/0762r1, Jul. 2019.
- [38] S. KIM, J. CHOI, J. KIM, I. JANG, T. SONG, AND S. PARK, *Performance Evaluation of Deterministic Service for EHT*, document IEEE 802.11-19/1523r0, Sep. 2019.
- [39] J. FARKAS, *IEEE 802.1 TSNVA n Introduction*, document IEEE 802.11-19/1298r1, Jul. 2019.
- [40] X. ZUO, K. MENG, A. JAUH, Y. HSU, H. YU, AND L. WANG, *Considerations of New Queue Mechanism for Real-Time Application*, document IEEE 802.11-19/1175r0, Jul. 2019.

- [41] K. IYER AND A. JONES, *Real-time Console Game Network Profile*, document IEEE 802.11-18/1499r0, Sep. 2018.
- [42] K. IYER AND A. JONES, *Packet Prioritization Issues*, document IEEE 802.11-18/1761r1, Oct. 2018.
- [43] S. ADHIKARI, S. VERMA, M. FISCHER, AND V. ERCEG, *Proposals on Latency Reduction*, document IEEE 802.11-20/0005r0, Jan. 2020.
- [44] S. KIM, J. CHOI, J. KIM, I. JANG, T. SONG, AND S. PARK, *Latency Enhancement for EHT*, document IEEE 802.11-19/1524r0, Sep. 2019.
- [45] M. ABOUELSEOUD, K. SAKODA, L. XIN, A. KISHIDA, K. NAGATA, AND S. KIM, *Reducing Channel Access Delay for RTA Traffic*, document IEEE 802.11-19/1960r1, Nov. 2019.
- [46] A. KISHIDA, Y. INOUE, Y. ASAI, Y. TAKATORI, K. NAGATA, X. ZUO, S. KIM, K. SAKODA, M. ABOUELSEOUD, L. XIN, AND F. HSU, *Latency Measurement for 11be Features*, document IEEE 802.11-19/1942r7, Jan. 2019.
- [47] K. STANTON, D. CAVALCANTI, M. RASHID, G. VENKATESAN, L. CARIOU, AND C. CORDEIRO, *Time-Sensitive Applications Support in EHT*, document IEEE 802.11-19/0373r0, Mar. 2019.
- [48] E. KHOROV, A. KIRYANOV, A. LYAKHOV, AND G. BIANCHI, *A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs*, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 21, no. 1, pp. 197U216, 1st Quart., 2019.
- [49] M. S. GAST, *802.11ac : A Survival Guide*. Newton, MA, USA : O'Reilly Media, 2013.
- [50] O. REDLICH, S. SHILO, O. HENCINSKI, O. KLAUSNER, R. J. YU, AND Y. XIN, *Improved Preamble Puncturing in 802.11be*, document IEEE 802.11-19/1190r3, Nov. 2019.
- [51] D. LIM, E. PARK, J. CHUN, AND J. CHOI, *Consideration for EHT-SIG Transmission*, document IEEE 802.11-20/0020r0, Jan. 2020.
- [52] L. CHU, Y. H. KWON, M. KUMAR, H. ZHANG, Y. ZHANG, R. CAO, S. SRINIVASA, AND H.-L. LOU, *BW Negotiation, TXOP Protection With >160MHz PPDU and Puncture Operation*, document IEEE 802.11-20/0062r0, Jan. 2020.
- [53] J. LIU AND Y. SEOK, *Enhanced Resource Allocation Schemes for 11be*, document IEEE 802.11-19/1126r1, Sep. 2019.
- [54] L. HUANG, Y. DING, U. YOSHIO, AND R. CHITRAKAR, *Signaling Support for Multi-RU Assignment*, document IEEE 802.11-19/1868r2, Jan. 2020.
- [55] E. AU, *Compendium of Straw Polls and Potential Changes to the Specification Framework Document*, document IEEE 802.11-20/0566r14, Apr. 2020.
- [56] J. LIU AND S. HU, *Multiple RU Combinations for EHT*, document IEEE 802.11-19/1907r2, Jan. 2020.
- [57] R. PORAT AND S. VANKA, *Multi-RU Support*, document IEEE 802.11-19/1908r4, Jan. 2020.
- [58] E. PARK, D. LIM, J. KIM, J. CHUN, AND J. CHOI, *Multiple RU Aggregation*, document IEEE 802.11-20/0023r2, Jan. 2020.
- [59] S. BARON, P. NEZOU, AND P. VIGER, *Direct Link MU Transmissions*, document IEEE 802.11-19/1117r2, Sep. 2019.
- [60] D. DAS, L. CARIOU, D. AKHMETOV, AND E. RESHEF, *Triggered P2P*, document IEEE 802.11-19/1604r1, Aug. 2019.
- [61] S. KIM, J. CHOI, J. KIM, I. JANG, T. SONG, AND S. PARK, *Latency Enhancement for EHT*, document IEEE 802.11-19/1524r0, Sep. 2019.
- [62] S. KIM, J. CHOI, J. KIM, I. JANG, T. SONG, AND S. PARK, *Performance Evaluation of Deterministic Service for EHT*, document IEEE 802.11-19/1523r0, Sep. 2019.

- [63] E. AVDOTIN, D. BANKOV, E. KHOROV, AND A. LYAKHOV, *Enabling massive real-time applications in IEEE 802.11be networks*, in Proc. IEEE 30th Annu. Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC), Sep. 2019, pp. 1.6.
- [64] K. WANG AND K. PSOUNIS, *Scheduling and resource allocation in 802.11ax*, in Proc. IEEE INFOCOM Conf. Comput. Commun., Apr. 2018, pp. 279.287.
- [65] S. BHATTARAI, G. NAIK, AND J.-M.-J. PARK, *Uplink resource allocation in IEEE 802.11ax*, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), May 2019, pp. 1.6.
- [66] X. LIN, N. B. SHROFF, AND R. SRIKANT, *A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks*, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 24, no. 8, pp. 1452.1463, Aug. 2006.
- [67] X. LIN, N. B. SHROFF, AND R. SRIKANT, *A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks*, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 24, no. 8, pp. 1452.1463, Aug. 2006.
- [68] C. TAYLOR, *The Ultimate Wi-Fi Access Point : Which Wi-Fi 6 Features Define the New Premium Tier ?* Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <https://bit.ly/2xke8in>
- [69] UNIFI AC 802.11AC DUAL-RADIO ACCESS POINTS. ACCESSED : APR. 7, 2020. [Online]. Available : <https://dl.ubnt.com/datasheets/uni/UniFi-AC-APs-DS.pdf>
- [70] P.-K. HUANG, L. CARIOU, R. STACEY, D. BRAVO, A. KLEIN, M. PARK, AND C. CORDEIRO, *Extremely Efficient Multi-Band Operation*, document IEEE 802.11-19/0822r4, Sep. 2019.
- [71] R. CHITRAKAR, L. HUANG, Y. DING, AND Y. URABE, *Multi-Link Acknowledgment*, document IEEE 802.11-19/1512r6, Nov. 2019.
- [72] P.-K. HUANG, L. CARIOU, R. STACEY, D. BRAVO, A. KLEIN, AND C. CORDEIRO, *Multi-Link Operation Framework*, document IEEE 802.11-19/0773r7, Sep. 2019.
- [73] Y. SEOK, G. BAJKO, J. YEE, J. LIU, AND T. PARE, *EHT Multi-Link Operation*, document IEEE 802.11-19/0731r0, May 2019.
- [74] L. CHU, M. KUMAR, H. ZHANG, Y. ZHANG, R. CAO, S. SRINIVASA, AND H.-L. LOU, *Multiple Band Operation Discussion*, document IEEE 802.11-19/0821r3, Sep. 2019.
- [75] A. JAUH, Y. HSU, H. YU, AND L. WANG, *Multi-Band Opinion*, document IEEE 802.11-19/0760r1, May 2019.
- [76] A. JAUH, Y. HSU, H. YU, L. WANG, X. ZUO, AND K. MENG, *Per-Packet Multiple Link Selection*, document IEEE 802.11-19/1100r1, Jul. 2019.
- [77] E. AU, *Compendium of Straw Polls and Potential Changes to the Specification Framework Document*, document IEEE 802.11-20/0566r14, Apr. 2020.
- [78] I. JANG, J. CHOI, J. KIM, S. KIM, S. PARK, AND T. SONG, *Channel Access for Multi-Link Operation*, document IEEE 802.11-19/1144r6, Nov. 2019.
- [79] A. PATIL, G. CHERIAN, A. ASTERJADHI, AND D. HO, *Multi-Link Aggregation : Peak Throughput Gains*, document IEEE 802.11-19/0764r1, Jul. 2019.
- [80] S. HWANG, I. OH, K. KANG, Y. GWAK, H. HONG, AND R. Y. KIM, *Consideration on Multi-Link Operation*, document IEEE 802.11-19/1181r1, Sep. 2019.
- [81] E. KHOROV, A. LYAKHOV, A. KROTOV, AND A. GUSCHIN, *A survey on IEEE 802.11ah : An enabling networking technology for smart cities*, Comput. Commun., vol. 58, pp. 53.69, Mar. 2015.
- [82] A. MIN, M. PARK, L. CARIOU, AND P.-K. HUANG, *Multi-Link Power Save Operation*, document IEEE 802.11-19/1544r5, Jan. 2020.
- [83] A. PATIL, G. CHERIAN, A. ASTERJADHI, AND D. HO, *Multi-Link Operation : Anchor Channel*, document IEEE 802.11-19/1526r3, Jan. 2020.

- [84] R. CHITRAKAR, L. HUANG, Y. DING, AND Y. URABE, *Power Consideration for Multi-Link Transmissions*, document IEEE 802.11-19/1536r2, Nov. 2019.
- [85] E. RANTALA, O. ALANEN, M. KASSLIN, J. MARIN, V.-M. KOLMONEN, D. LOPEZ-PEREZ, L. GALATI, AND A. GARCIA, *Reducing Channel Access Delay*, document IEEE 802.11-19/0402r1, Mar. 2019.
- [86] K. MENG, *RTA Optimization Proposal*, document IEEE 802.11- 18/1543r4, Sep. 2018.
- [87] K. MENG ET AL., *IEEE 802.11 Real Time Applications TIG Report*, document IEEE 802.11-18/2009r6, Mar. 2019.
- [88] A. JAUH, Y. HSU, H. YU, L. WANG, X. ZUO, AND K. MENG, *Conditional Packet Duplication in Multiple Link System*, document IEEE 802.11- 19/1101r1, Jul. 2019.
- [89] S. SHILO, L. EPSTEIN, Y. B. ARIE, AND E. MELZER, *HARQ for EHT.Further Information*, document IEEE 802.11-18/1955r0, Sep. 2018.
- [90] R. PORAT, I. REUVEN, AND A. BLANKSBY, *HARQ Simulation Results*, document IEEE 802.11-19/0798r0, May 2019.
- [91] S. VERMA, R. PORAT, V. ERCEG, A. BLANKSBY, AND S. ADHIKARI, *HARQ Gain Studies*, document IEEE 802.11-18/2031r0, Nov. 2018.
- [92] B. MAKKI, T. SVENSSON, G. CAIRE, AND M. ZORZI, *Fast HARQ over.nite blocklength codes : A technique for low-latency reliable communication*, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 1, pp. 194.209, Jan. 2019.
- [93] L. WILHELMSSON, S. MOLOUDI, AND M. LOPEZ, *Some Results on HARQ Performance in Dense Deployments*, document IEEE 802.11-19/1133r0, Jul. 2019.
- [94] J. KIM, T. SONG, E. PARK, D. LIM, AND J. CHOI, *Channel Coding Issue in HARQ*, document IEEE 802.11-19/1132r2, Sep. 2019.
- [95] I. LATIF, S. SCHELSTRAETE, D. DASH, AND H.WANG, *What Should be the HARQ Unit and Why*, document IEEE 802.11-19/1589r0, Sep. 2019.
- [96] T. SONG, J. KIM, S. KIM, J. KIM, I. JANG, AND J. CHOI, *Consideration on HARQ Unit*, document IEEE 802.11-19/1131r0, Jul. 2019.
- [97] I. LATIF, S. SCHELSTRAETE, D. DASH, AND H. WANG, *HARQ Framing*, document IEEE 802.11-19/0873r1, Jul. 2019.
- [98] S. SHILO, N. BASSON, Y. B. ARIE, E. MELZER, M. REICH, AND D. EZRI, *HARQ With A-MPDU in 11be*, document IEEE 802.11-19/1038r1, Jul. 2019.
- [99] R. DUAN, M. IBRAHIM, W. B. LEE, AND S. KANDALA, *Discussion on HARQ*, document IEEE 802.11-19/1172r1, Sep. 2019.
- [100] S. SHELLHAMMER, Z. DOAN, A. CHEN, B. TIAN, AND Y. KIM, *HARQ Com- plexity*, document IEEE 802.11-19/1080r0, Jul. 2019
- [101] R. DUAN, M. IBRAHIM, W. B. LEE, AND S. KANDALA, *Discussion on HARQ*, document IEEE 802.11-19/1172r1, Sep. 2019.
- [102] J. KIM, T. SONG, E. PARK, J. KIM, AND J. CHOI, *Consideration on HARQ*,document IEEE 802.11-19/0780r0, May 2019.
- [103] L. WILHELMSSON, S. MOLOUDI, AND M. LOPEZ, *Some Results on HARQ Performance in Dense Deploy- ments*, document IEEE 802.11-19/1133r0, Jul. 2019.
- [104] A. STEINER AND S. SHAMAI, *Multi-layer broadcasting hybrid-ARQ strategies for block fading channels*, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 7, pp. 2640.2650, Jul. 2008.

- [105] J.-F. CHENG, *Coding performance of HARQ with BICM. Part I : Uni.ed performance analysis*, in Proc. 21st Annu. IEEE Int. Symp. Pers., Indoor Mobile Radio Commun., Sep. 2010, pp. 976-981.
- [106] S. MAX, C. PETERSSON, AND L. WILHELMSSON, *HARQ System Level Simulation Results*, document IEEE 802.11-19/1858r1, Jan. 2020.
- [107] K. OTERI, L. H. SUN, R. YANG, X. WAN, J. LEVY, AND A. SAHIN, *HARQ in Collision-Free and Collision-Dominated Environments*, document IEEE 802.11-19/0070r0, Jan. 2019.
- [108] Y. DING, L. HUANG, R. CHITRAKAR, AND Y. URABE, *HARQ Punctured CC Performance Evaluation*, document IEEE 802.11-19/1146r0, Sep. 2019.
- [109] S. SHELLHAMMER, Z. DOAN, A. CHEN, AND B. TIAN, *HARQ Simulation Results*, document IEEE 802.11-19/1078r0, Jul. 2019.
- [110] S. SHELLHAMMER, Z. DOAN, A. CHEN, B. TIAN, AND Y. KIM, *HARQ Complexity*, document IEEE 802.11-19/1080r0, Jul. 2019.
- [111] S. SHILO, N. BASSON, E. MELZER, Y. B. ARIE, M. REICH, D. EZRI, AND Y. XIN, *Revisiting HARQ Complexity*, document IEEE 802.11-19/1923r1, Jan. 2020.
- [112] Y. ZHANG, H. ZHANG, S. SRINIVASA, L. CHU, R. CAO, AND M. YU, *Comparisons of HARQ Transmission Schemes for 11be*, document IEEE 802.11 19/0792r2, Jun. 2019.
- [113] *Preparations for Full Duplex DOCSIS 3.1 Technology are Marching Along*. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <https://www.cablelabs.com/preparations-for-full-duplex-docsis-3-1-technology-are-marching-along>
- [114] *802.11 Full Duplex*, document IEEE 802.11-18/0549r0, Mar. 2018.
- [115] *Full Duplex Benefits and Challenges*, document IEEE 802.11-18/0448r1, Mar. 2018.
- [116] *Self-Interference Cancellation in Full Duplex for 802.11*, document IEEE 802.11-18/0880r0, May 2018.
- [117] *Full-Duplex Based MAC Enhancements*, document IEEE 802.11- 18/0864r0, 2018.
- [118] J. SUH, O. ABOUL-MAGD, J. JIA, AND E. AU, *SOMA for EHT*, document IEEE 802.11-18/1462r0, Sep. 2018.
- [119] J. M. MEREDITH, *Study on Downlink Multiuser Superposition Transmission for LTE*, document RP150496, TSG RAN Meeting 67, Mar. 2015.
- [120] E. KHOROV, A. KUREEV, AND I. LEVITSKY, *Experimental Study of NOMA/SOMA in Wi-Fi*, document IEEE 802.11-18/1957r3, Mar. 2019.
- [121] E. KHOROV, A. KUREEV, I. LEVITSKY, AND I. F. AKYILDIZ, *Prototyping and experimental study of non-orthogonal multiple access in Wi-Fi networks*, IEEE Netw., early access, Apr. 22, 2020, doi : 10.1109/MNET.011.1900498.
- [122] E. KHOROV, A. KIRYANOV, A. LYAKHOV, AND G. BIANCHI, *A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs*, IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 21, no. 1, pp. 197-216, 1st Quart., 2019.
- [123] L. CARIOU, *802.11 EHT Proposed PAR*, document IEEE 802.11- 18/1231r6, Mar. 2019.
- [124] D. TAKAHASHI. *Quantenna's Maui Can Automatically Detect Problems in Your Home's Wi-Fi Network*. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <https://bit.ly/2JUs84V>
- [125] *iMaster NCE-Campus*. Accessed : Apr. 7, 2020. [Online]. Available : <https://bit.ly/2UXbLuE>
- [126] S. VERMANI, B. TIAN, AND J. LIU, *Terminology for AP Coordination*, document IEEE 802.11-18/1926r2, Nov. 2018.
- [127] K. AIO, Y. TANAKA, R. HIRATA, K. SAKODA, T. HANDTE, D. CIOCHINA, AND M. ABOUELSEoud, *Coordinated Spatial Reuse Performance Analysis*, document IEEE 802.11-19/1534r0, Sep. 2019.

- [128] J. YUCHEN, G. HUANG, R. J. YU, AND P. LOC, *AP Coordination in EHT*, document IEEE 802.11-19/0801r0, Mar. 2019.
- [129] K. OTERI, H. LOU, L. H. SUN, R. YANG, X. WAN, J. LEVY, AND A. SAHIN, *Coordinated Multi-AP Transmission for EHT*, document IEEE 802.11-19/0071r0, Jan. 2019.
- [130] J. LIU, T. PARE, Y. SEOK, J. WANG, F. HSU, AND J. YEE, *Multi-AP Enhancement and Multi-Band Operations*, document IEEE 802.11-18/1155r1, Jul. 2018.
- [131] X. CHEN, Q. LI, F. JIANG, K. THOMAS, L. CARIOU, S. ROBERT, Z. AVITAL, T. WEISMAN, A. GUREVITZ, AND P.-K. HUANG, *Discussions on the PHY Features for EHT*, document IEEE 802.11-18/1461r1, Sep. 2018.
- [132] L. CHU, Y. HOON KWON, M. KUMAR, H. ZHANG, Y. ZHANG, R. CAO, S. SRINIVASA, AND H.-L. LOU, *Coordinated OFDMA*, document IEEE 802.11-19/1919r2, Jan. 2020.
- [133] S. PARK, J. KIM, S. KIM, I. JANG, T. SONG, N. KIM, AND J. CHOI, *Considerations on Coordinated OFDMA*, document IEEE 802.11-20/0011r0, Jan. 2020.
- [134] R. DOOSTNEJAD, L. CARIOU, D. BRAVO, AND X. CHEN, *Uplink Coordinated Multi-AP*, document IEEE 802.11-19/1903r0, Nov. 2019.
- [135] R. PORAT AND S. PUDUCHERI, *Constrained Distributed MU-MIMO*, document IEEE 802.11-18/1439r0, Sep. 2018.
- [136] M. LOPEZ, D. SUNDMAN, AND H. ASPLUND, *Measurements for Distributed MU-MIMO*, document IEEE 802.11-19/0763r0, May 2019.
- [137] T. GENADIY, L. YUNBO, AND S. SHIMI, *UL Coordination for Throughput Improvement and Interference Reduction*, document IEEE 802.11-19/1979r1, Jan. 2020.
- [138] S. SCHELSTRAETE, D. DASH, AND I. LATIF, *Nulling and Coordinated Beamforming*, document IEEE 802.11-19/0638r0, Mar. 2019.
- [139] R. PORAT AND S. PUDUCHERI, *Joint Processing MU-MIMO.Update*, document IEEE 802.11-19/0384r0, Mar. 2019.
- [140] J. Y. GUO, Y. LI, G. HUANG, M. GAN, Y. ZHOU, AND Y. LI, *Coordinated Spatial Reuse Operation*, document IEEE 802.11-20/0033r1, Feb. 2020.
- [141] A. PATIL, G. CHERIAN, A. ASTERJAGHI, AND D. HO, *Multi-Link : Link Management*, document IEEE 802.11-19/1528r5, Sep. 2019.
- [142] S. PARK, E. PARK, J. KIM, J. CHOI, AND K. RYU, *Multi-AP Transmission Procedure*, document IEEE 802.11-19/0804r0, May 2019.
- [143] R. J. YU, G. HUANG, AND D. LIANG, *Sounding Procedure in AP Collaboration*, document IEEE 802.11-19/1097r0, Jul. 2019.
- [144] K. AIO, Y. TANAKA, R. HIRATA, T. HANDTE, AND D. CIOCHINA, *Consideration on Multi-AP Sounding*, document IEEE 802.11-19/1134r1, Aug. 2019.
- [145] J. LIU, L. MA, S. HU, AND T. PARE, *Joint Sounding for Multi-AP Systems*, document IEEE 802.11-19/1593r3, Nov. 2019.
- [146] L. NAN, S. BO, J. QICHEN, AND F. YONGGANG, *Consideration on Multi-AP Coordination*, document IEEE 802.11-19/1129r2, Sep. 2019.
- [147] B. SUN, D. YANG, AND Y. FANG, *Multi-AP Group Establishment*, document IEEE 802.11-19/1961r2, Jan. 2020.
- [148] K. AIO, Y. TANAKA, R. HIRATA, K. SAKODA, T. HANDTE, D. CIOCHINA, AND M. ABOUELSEUD, *Consideration on Multi-AP Ack Protocol*, document IEEE 802.11-19/1533r0, Sep. 2019.

- [149] W. B. LEE, S. KANDALA, S. NARIBOLE, AND A. RANGANATH , *Virtual BSS For Multi AP Coordination*, document IEEE 802.11-19/1019r0, Jul. 2019.
- [150] R. DOOSTNEJAD, L. CARIOU, F. JIANG, Q. LI, D. BRAVO, AND X. CHEN, *Multi-AP Implicit Channel Sounding*, document IEEE 802.11-20/0089r1, Jan. 2020.
- [151] S. NARIBOLE, S. KANDALA, W. B. LEE, M. RAY, AND A. RANGANATH, *Virtual BSS for Multi-AP Coordination Follow-Up*, document IEEE 802.11- 19/1451r1, Sep. 2019.
- [152] E. KHOROV, A. KIRYANOV, AND A. LYAKHOV, *QoS-aware streaming with HCCA TXOP negotiation in overlapped Wi-Fi networks*, in Proc. Wireless Days (WD), Mar. 2016, pp. 1.3.
- [153] S. SRINIVASA AND H. ZHANG, *Joint Beamforming Simulations*, document IEEE 802.11-19/1094r0, Jul. 2019.
- [154] X. CHEN, *Discussions of Multi-AP JT*, document IEEE 802.11-19/1092r1, Jul. 2019.
- [155] S. VERMANI, B. TIAN, AND V. JONES, *Joint Transmissions : Backhaul and Gain State Issues*, document IEEE 802.11-19/1089r0, Jun. 2019.
- [156] MATHIEU LIEDLOFF, *Algorithmes exacts et exponentiels pour les problèmes NP-difficiles : domination, variantes et généralisations*, THÈSE, université Paul Verlaine, Metz, 2007.
- [157] SAÏDA MERBOUTI, *Ensembles astéroïdaux dans les graphes*, mémoire de MASTER, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, 2014.
- [158] P. BONNET, *Outils de simulation*, Université Lille 1, Lille, 2010.

Résumé

Alors que les clients ont les yeux rivés sur Wi-Fi 6, dans les entrailles du groupe de travail IEEE 802.11 qui crée les normes Wi-Fi, la prochaine génération de Wi-Fi est en cours de développement. A première vue, le nouvel amendement IEEE 802.11be à la norme Wi-Fi n'est rien d'autre qu'une mise à l'échelle de 11ax avec une bande passante doublée et le nombre accru de flux spatiaux, qui, permettent d'atteindre des débits de données de 40 Gbps [4].

Un peu plus profonde dans les activités de la norme 802.11 révèle que 11be prendra en charge les applications en temps réel. En réalité, 11be introduit de nombreux autres changements révolutionnaires dans le Wi-Fi, qui constitueront la base de l'évolution future du Wi-Fi [4]. Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans la perspective d'améliorer les défis de la norme 802.11be en particulier le problème de la Coordination multi-AP.

Dans ce mémoire, nous proposons deux heuristiques qui viennent dans le cadre de remédier au problème d'Equilibrage de charge dans la norme IEEE 802.11be. La première repose sur une méthode qui a pour but de minimiser le nombre de points d'accès du réseau d'une façon à interconnecter toutes les stations, c'est ce qu'on appelle la domination.

La deuxième heuristique repose sur une méthode qui a pour but de répartir la charge du réseau d'une façon équitable, cette méthode consiste à distribuer une tâche à un pool de machines ou de périphériques afin de lisser le trafic réseau, c'est-à-dire de répartir la charge globale vers différentes stations.

Dans le dernier chapitre, on a opté pour le logiciel MATLAB pour la simulation et l'évaluation des algorithmes vu sa facilité et sa capacité de transcrire en langage informatique un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

***Mots clés :** amendement IEEE 802.11be, flux spatiaux, Coordination multi-AP, Equilibrage de charge, domination, MATLAB*

Abstract

While customers rivet their eyes on Wi-Fi 6, in the bowels of the IEEE 802.11 Working Group that creates Wi-Fi standards, the next generation Wi-Fi is being developed. At the very first sight, the new IEEE 802.11be amendment to the Wi-Fi standard is nothing but scaled 11ax with doubled bandwidth and the increased number of spatial streams, which together provide data rates as high as 40 Gbps [4].

A bit deeper dive into the 802.11 activities reveals that 11be will support real-time applications. In reality, 11be introduces many more revolutionary changes to Wi-Fi, which will form a basement for further Wi-Fi evolution [4]. Several research works have been conducted in the perspective of improving the challenges of 802.11be standard especially the problem of Multi-AP Coordination.

In this thesis, we propose two heuristics that come within the framework of remedying the problem of load balancing in the IEEE 802.11be standard. The first one is based on a method that aims at minimizing the number

of access points of the network in a way to interconnect all the stations, it is what we call domination.

The second heuristic is based on a method which aims to distribute the network load in an equitable way, this method consists in distributing a task to a pool of machines or peripherals in order to smooth the network traffic, i.e. to distribute the global load towards different stations.

In the last chapter, we opted for the MATLAB software for the simulation and the evaluation of the algorithms because of its facility and its capacity to transcribe a mathematical problem into computer language, using a writing as close as possible to the scientific natural language.

Keywords : *IEEE 802.11be amendment, spatial flows, multi-AP coordination, load balancing, domination, MATLAB*