

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa



Faculté des Sciences exactes

Mémoire de Master Recherche

En Informatique

Option :

Administration et Sécurité des réseaux

Thème :

---

# Etude des caractéristiques PHY et MAC de la norme IEEE 802.11be à extrême haut débit

---

Réalisé par :

LACHI Mouhoub

ABID Nadjim

Encadré par :

Encadreur	Mr YAZID Mohand Melle	MCA	Université de Béjaïa.
Co-encadreur	MAMMERI Souhila	MAB	Université de Béjaïa.

Soutenu devant le jury composé de :

Présidente	Mme AIT ABDELOUHAB Karima	MCB	Université de Béjaïa.
Examinatrice	Melle AZOUI Aicha	MAA	Université de Béjaïa.

Promotion 2020/2021

# REMERCIEMENT

---

En premier lieu, nous remercions le bon Dieu pour nous avoir donné la force et le courage pour la réalisation de ce travail.

Nous aimerons adresser nos vifs remerciements à Monsieur Mohand YAZID et Melle Souhila MAMMARI pour nous avoir soutenus durant ce travail. Nous souhaitons leur transmettre l'expression de nos reconnaissances et nos plus profond Respect.

Nous tenons aussi à exprimer nos sincères gratitude pour leur encadrement, leur confiance et surtout leur patience durant l'élaboration de ce travail.

Nous remercions tout particulièrement les membres de jury, qui ont accepté de juger ce travail, Mme AIT ABDLOUHAB Karima en tant que présidente, Mlle AZOUI Aicha en tant qu'examinatrice.

# Dédicace

---

*Nous dédions ce modeste travail à :*

**A** nos parents,

**A** nos frères et sœurs,

**A** toute nos familles,

**A** nos amies et collègues, et tous ceux qui nous ont aidé ;



## Table des matières

<b>Table des figures</b> .....	<b>7</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>9</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Chapitre 1 Evolution des réseaux WLANs</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 PRESENTATION DU STANDARD IEEE 802.11</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 DEBIT DANS LES RESEAUX LOCAUX SANS FIL</b> .....	<b>16</b>
1.3.1 LA NORME 802.11L (1997) .....	17
1.3.1.2 La couche MAC 802.11L .....	18
1.3.2 LA NORME 802.11B (1999).....	20
1.3.2.1 La couche physique 802.11b .....	20
1.3.3 LA NORME 802.11A (1999) .....	20
1.3.2.1 La couche physique 802.11a .....	21
1.3.4 LA NORME 802.11G (2003) .....	22
1.3.5 LA NORME 802.11E (2005).....	22
1.3.5.1 La couche MAC 802.11e .....	22
1.3.5.2 Le mécanisme EDCA .....	23
1.3.5.3 Le paramètre TXOPlimit .....	25
1.3.5.4 Le mécanisme HCCA (HCF Controlled Channel Access) .....	25
1.3.6 LA NORME 802.11N (2009) .....	26
1.3.6.1 La couche physique 802.11n .....	26
1.3.6.2 La couche MAC 802.11n.....	28
1.3.7 LA NORME 802.11AC .....	30
1.3.7.1.1 Utilisation des canaux de 80/160 MHz.....	30
1.3.7.1.2 DL MU-MIMO.....	32
1.3.7.1.3 Modulation 256-QAM .....	33
1.3.7.1.4 Le Beamforming .....	33
1.3.7.2 La couche MAC 802.11ac .....	34
1.3.7.2.1 Les méthodes d'accès multi-canaux.....	35

1.3.7.2.2 L'agrégation de trames 802.11ac .....	36
1.3.7.2.3 TXOP Sharing .....	36
1.3.7.2.4 Format de la trame MAC IEEE802.11ac .....	37
1.3.8 LA NORME IEEE 802.11AX .....	38
1.3.8.1 OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access).....	38
1.3.8.2 La modulation d'ordre supérieur de 1024 QAM .....	39
1.3.8.3 DL/UL MU-MIMO .....	39
<b>1.4 CONCLUSION .....</b>	<b>40</b>
<b>2 Chapitre 2 Etude de la norme IEEE 802.11be.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>41</b>
<b>2.2 PRESENTATION DE LA NORME 802.11BE .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3 LA COUCHE PHYSIQUE IEEE 802.11BE.....</b>	<b>42</b>
2.3.1 LE REGROUPEMENT DE CANAUX.....	43
2.3.2 LE MULTIPLEXAGE SPATIAL .....	44
2.3.3 LA REUTILISATION SPATIALE.....	44
2.3.4 LA TECHNIQUE CO-OFDMA ET LA COORDINATION MULTI-AP.....	44
2.3.5 DISTRIBUTED MIMO .....	47
2.3.6 MODULATION D'ORDRE SUPERIEUR DE 4096 QAM.....	48
2.3.7 LA TRANSMISSION BIDIRECTIONNELLE (FULL DUPLEX).....	49
2.3.8 FORMAT DE TRAME PHYSIQUE .....	49
<b>2.4 LA COUCHE MAC 802.11BE.....</b>	<b>51</b>
2.4.1 LE MECANISME HARQ .....	51
2.4.2 LE SCHEMA DE FONCTIONNEMENT MULTI-BANDES/MULTI-LIENS .....	53
2.4.3 TXOP SHARING.....	55
<b>2.5 CONCLUSION .....</b>	<b>56</b>
<b>3 Chapitre 3 Synthèse des travaux de recherche IEEE 802.11be et propositions .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>57</b>
<b>3.2 SYNTHÈSE DE TRAVAUX DE RECHERCHE IEEE 802.11BE .....</b>	<b>57</b>
3.2.1 MAO YANG ET AL [44].....	57
3.2.2 WOJIN AH [45].....	59

3.2.3 SHARAN NARIBOLE ET AL [46] .....	61
3.2.4 DMITRY BANKOV ET AL [47] .....	62
<b>3.5 EVGENY AVDOTIN ET AL [48].....</b>	<b>63</b>
<b>3.3 PROPOSITION D’UNE VERSION AMELIOREE DU SCHEMA TXOP</b>	
<b>SHARING DANS LE CADRE DE LA COUCHE PHY 802.11BE .....</b>	<b>66</b>
<b>3.5 CONCLUSION .....</b>	<b>68</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>71</b>

# Table des figures

---

Figure 1.1 Évolution des normes de débit 802.11 au cours des années. ....	17
Figure 1.2 étalement de spectre par la technique de chipping [11].....	18
Figure 1.3 Les règles d'accès dans DCF avec méthodes d'accès RTS/CTS [28].....	19
Figure 1.4 Principe OFDM [30].....	21
Figure 1.5 architecture de la norme 802.11e [5].....	23
Figure 1.6 structure de CFB [5].....	25
Figure 1.7 SISO vs MISO vs MIMO [8].....	27
Figure 1.8 Regroupement des canaux de 20MHz [8].....	28
Figure 1.9 A-MSDU et A-MPDU [19].....	29
Figure 1.10 Agrégation Hybride A-MPDU A-MSDU [31].....	29
Figure 1.11- Allocation des canaux aux USA [12].....	31
Figure 1.12 - Relation entre canaux primaires/secondaires [13].....	32
Figure 1.13 SU-MIMO vs MU-MIMO [13].....	32
Figure 1.14 - protocole de sondage avec beamforming [26].....	34
Figure 1.15 Méthode statique et dynamique [7].....	36
Figure 1.16 Comparaison de trame 802.11n/802.11ac [16].....	37
Figure 1.17 SOUS-porteuses OFDMA [17].....	38
Figure 1.18 Différence entre 256/1024 QAM [12].....	39
Figure 1.19 DL/UL MU-MIMO.....	40
Figure 2.1 Illustration de la norme 802.11be (Wi-Fi 7)[27].....	42
Figure 2.2 Regroupement des canaux 320Mhz.....	43
Figure 2.3 Bande passante de la 802.11be.....	43
Figure 2.4 - Exemple des phases envisagées pour IEEE 802.11be en mode CSR.....	46
Figure 2.5 simulation de la technique Co-OFDMA [28].....	46

Figure 2.6 Co-Multi PA [30].....	46
Figure 2.7 Distributed MU DL-MIMO 16×16 [31].....	48
Figure 2.8 Modulation 4k QAM.....	49
Figure 2.9 trame physique 802.11be.....	50
Figure 2.10 - Utilisation de HARQ pour 802.11be [40] .....	52
Figure 2.11 Agrégation multi-band/multi-link 802.11be [40].....	54
Figure 2.12 Agrégation ML Synchrone de IEEE 802.11be [40].....	55
Figure 3.1 - Principe de la MB-Opr.....	58
Figure 3.2 - MB-opr avec et sans full duplex.....	59
Figure 3.3 - Un schéma proposé sur un scénario multi-AP coordinated.....	60
Figure 3.4 - Exemple sur AP coordinated proposé.....	61
Figure 3.5 - Reprise de backoff entre STAs non-STR.....	61
Figure 3.6 - Comparisons du débit avec CA-ASYNC et avec d'autres stratégies alternatives.....	62
Figure 3.7 - Exemple de fonctionnement de NUORA. $k=4$ , $f=2$ , STAs 1, 2, 3 ont des données à transmettre .....	64
Figure 3.8 - Exemple of NGRA avec les paramètres $N = 4$ , $k = 4$ , $f = 2$ . STAs 1, 2, 3 ont des données à transmettre.....	65
Figure 3.9 - Exemple de NCRA .....	66

# Liste des tableaux

---

Tableau - 1.1 Comparaison entre les ACs [5].....	24
Tableau 1.2 - longueur de trame 802.11ac/802.11n [9].....	36

# Liste des abréviations

---

<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineering
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>QoS</b>	Quality Of Service
<b>HT</b>	High Throughput
<b>VHT</b>	Very High Throughput
<b>HEW</b>	High Efficiency WLANs
<b>DSSS</b>	Direct Sequence Spread Spectrum
<b>FHSS</b>	Frequency Head Spread Spectrum
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DIFS</b>	DCF Inter-Frame Space
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>RTS/CTS</b>	Request To Send / Clear To Send
<b>PCF</b>	Point Coordination Function
<b>AP</b>	Acces Point
<b>PIFS</b>	PCF Inter Frame Space ,
<b>HR-DSSS</b>	Hate Rate-DSSS
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>IFFT</b>	Transformée de Fourier Inverse
<b>EDCA</b>	Enhanced DCF
<b>HCF</b>	Hybrid Coordination Function
<b>EDCA</b>	Enhanced Distributed Channel Access

<b>QBSS</b>	QoS BSS
<b>HC</b>	Hybrid Coordination
<b>CW</b>	Contention Window
<b>TXOPLimit</b>	Transmission Opportunity Limit
<b>AIFS</b>	Arbitration Inter-Frame Space
<b>SIFS</b>	Short Inter-Frame Space
<b>HCCA</b>	HCF Controlled Channel Access
<b>HT</b>	High Throughput
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple -Output
<b>A-MSDU</b>	Aggregated MAC Service Data Unit
<b>A-MPDU</b>	Aggregated MAC Protocol Data Unit
<b>BA</b>	Block ACk
<b>NDP</b>	Null Data Packet
<b>TXOP</b>	Transmission Opportunity
<b>PIFS</b>	Point Inter-Frame Space
<b>CFB</b>	Contention Free Bursting

<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>EHT</b>	Extremely High Throughout
<b>D-MIMO</b>	Distributed MIMO
<b>CSR</b>	Coordinated Spatial Reuse
<b>SNR</b>	Signal Noise Rate
<b>FD</b>	Full Duplex
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat Request
<b>MB-Opr</b>	Multiband operation
<b>CA-ASYNCR</b>	Constraint Aware Asynchronous Multi-Channel Operations)
<b>PCA</b>	Preliminary channel access
<b>UL</b>	UP Link
<b>PLR</b>	Packet Loss Ratio
<b>NUORA</b>	Noise Resistant Uplink OFDMA Random Access
<b>NGRA</b>	Noise Resistant Group Resource Allocation
<b>NCRA</b>	Noise Resistant Cyclic Resource Allocation
<b>GRA</b>	Group Resources Allocations

# INTRODUCTION GENERALE

---

La nécessité de développement de technologies sans-fil, couplé aux capacités industrielles de miniaturisation des équipements informatique, a mené à la spécification de nombreux standards de réseaux sans fil [21]. C'est ainsi dans ce contexte qu'a été élaboré le standard IEEE 802.11 édicté sous l'égide du comité de standardisation Institute of Electrical and Electronics Engineers ou IEEE.

IEEE 802.11 est l'une des principales technologies utilisées connectant toutes sortes d'appareils, et faisant référence aux réseaux locaux ou WLAN (Wireless Local Area Network), souvent appelé le réseau Wi-Fi (Wireless Fidelity). Depuis son lancement en 1997, ces réseaux ont continuellement évolué grâce à leurs souplesses d'utilisation et leurs faibles coûts de déploiement [27].

Le standard IEEE 802.11 a défini une série de normes pour les réseaux WLAN. A chaque fois qu'une nouvelle norme est proposée, des modifications sont apportées au niveau des deux couches, qui lui sont concernées du modèle d'interconnexion des systèmes hétérogènes OSI (Open System Interconnexion), à savoir : la couche physique (PHY) et la couche de contrôle d'accès au médium MAC (Medium Access Control).

La première norme du standard IEEE 802.11 a été définie en 1997. En 1999, deux extensions de cette norme 802.11a et 802.11b sont venues l'améliorer. En 2003, la norme IEEE 802.11g a été publiée afin de maintenir la compatibilité avec les appareils équipés des interfaces de communication IEEE 802.11b. En 2005, la norme IEEE 802.11e a été conçue en modifiant complètement la couche de contrôle d'accès au médium afin d'offrir une certaine qualité de service QoS (Quality of Service) aux nouvelles applications émergées par le principe de priorité entre les différentes classes de trafic, et via les paramètres de différenciation de services. En particulier, TXOP Limit est un paramètre prometteur assurant la QoS. Il s'agit d'une période de temps durant laquelle, une classe de trafic, envoie une succession de trames de données sans interruption.

Malgré leur réussite, les premières versions des normes des réseaux locaux sans fil, IEEE 802.11a/b/g/e, permettent d'obtenir que quelques Mégabit par seconde, en vue qu'elles sont caractérisées par une efficacité spectrale et une QoS faibles qui sont devenues insuffisantes pour satisfaire la croissance explosive de la demande de capacité de transmissions radio et de couverture. En 2009, IEEE 802.11n a été ratifiée, où le terme HT (High Throughput) est utilisé en référence à ses réseaux. Cette norme a défini de nouvelles techniques plus sophistiquées qui n'ont jamais existé dans les normes qui lui précèdent. Depuis, le groupe TGac (Task Group ac) a travaillé activement pour étendre les réseaux à haut débit vers des réseaux à très haut débit ou VHT (Very High Throughput). Une première version de la norme IEEE 802.11ac a été apparue en 2013 faisant référence aux réseaux WLAN à très haut débit VHT (Very High Throughput), en étendant les principales techniques de sa norme prédécesseur et en proposant de nouvelles techniques pour s'adapter à la nouvelle couche physique.

La couche MAC 802.11ac a connu plusieurs améliorations, elles sont entre autres : les méthodes d'accès multicanaux, adoption pour le schéma d'agrégation A-MPDU, et surtout le

mécanisme TXOP Sharing. Le schéma TXOP Sharing a été proposé afin de rendre possible la combinaison de transmission de multiples trames de données depuis une classe de trafic vers plusieurs utilisateurs possible.

La norme IEEE 802.11ax à très haute efficacité ou HEW (High Efficiency WLANs) marque la dernière étape d'un processus d'innovation continue pour garantir une certaine efficacité réseaux. Elle s'appuie sur les points forts du standard 802.11ac, tout en y ajoutant la flexibilité et l'évolutivité nécessaires pour permettre aux réseaux, aussi bien nouveaux qu'existants, d'exécuter des applications de nouvelle génération.

Cependant avec l'émergence de la vidéo 4k/8k, le débit requis pour la diffusion vidéo continuera de croître jusqu'à des dizaines de Gbits/s. D'autres nouvelles applications vidéo à haut débit et à faible latence se multiplient également. Par conséquent, la prise en charge de ces applications sur un réseau local sans fil dépasse de loin les capacités de la nouvelle norme WLAN – IEEE 802.11ax. C'est pourquoi, des discussions envisageant la spécification d'une nouvelle norme 802.11 sont révélées afin d'améliorer encore la norme 802.11ax vers une norme des réseaux à extrême haut débit EHT (Extremely High Throughput), c'est la norme 802.11be.

Dans ce projet de fin d'étude (de Master), nous nous centrons notre travail sur l'étude des caractéristiques physiques et de contrôle d'accès au médium des réseaux locaux sans fil à extrême haut débit. Nous visons à étudier les performances de la technique TXOP Sharing de la 802.11ac et de l'adapter à la couche physique de IEEE 802.11be.

TXOP Sharing permet à une classe de trafic qui gagne l'accès à un canal élémentaire de 20 MHz, de pouvoir partager sa TXOP avec les autres classes de trafic pour des transmissions simultanées vers plusieurs récepteurs, d'une part. D'autre part, l'un des principaux défis de la 802.11be réside dans la possibilité de réutiliser le spectre spatial sur les canaux larges spécifiés obligatoires de 160 MHz et optionnels de 320 MHz.

D'où l'idée d'adapter le fonctionnement du schéma TXOP Sharing dans le cadre de transmissions multi-bandes/multi-liens. Ceci pourra se réaliser en deux principales étapes : la première étant de combiner le fonctionnement de TXOP Sharing avec le fonctionnement multi-canaux pour supporter les canaux larges. La deuxième étape consiste à intégrer le fonctionnement multi-liens au travers les sous-canaux de 20 Mhz constituant les canaux larges de la couche PHY 802.11be.

Nous présentons, dans ce mémoire, la démarche suivie : ce mémoire contient une introduction générale, trois chapitres et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous allons réaliser une étude approfondie des différentes générations des réseaux locaux sans fil IEEE 802.11,

Dans le deuxième chapitre, nous allons mettre en évidence les caractéristiques physiques et de contrôle d'accès au médium permettant de décortiquer la norme à extrême haut débit IEEE 802.11be (EHT).

Dans le troisième chapitre, nous allons adresser deux synthèses et proposer un nouveau schéma d'accès au canal compatible aux fonctionnalités 802.11be. Pour les synthèses, la première porte sur l'évolution des norme IEEE 802.11 depuis la première jusqu'à la plus

récente, suivie d'une synthèse bibliographique exhaustive liée aux travaux de recherche sur la couche de contrôle d'accès au médium des réseaux WLANs 802.11be.

# CHAPITRE 1 :

---

## 1.1 Introduction

Depuis les années 1990, les communautés de recherche et d'industrie ont commencé à développer plusieurs technologies sans fil, tel que le standard IEEE 802.11. Il est devenu depuis, la technologie utilisée pour les réseaux locaux ou WLAN (Wireless Local Area Network). Ces réseaux ont subi d'importantes révisions au fil des années donnant lieu à l'émergence de nombreuses normes.

À l'heure actuelle, la tendance est à la transmission numérique et à l'utilisation des applications modernes. De ce fait, le défi réside dans la capacité d'accroître les volumes et les débits de transmission des données tout en diminuant les coûts.

Dans ce chapitre, nous allons se focaliser sur le standard IEEE 802.11 et ses normes améliorant le débit. Nous allons particulièrement détailler les modifications apportées à ses réseaux au niveau des deux couches physiques et de contrôle d'accès au médium.

## 1.2 Présentation du standard IEEE 802.11

802.11 est un standard promulgué sous l'égide du comité de standardisation IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) à partir de 1997. Il définit les deux couches basses du modèle OSI (Open Systems Interconnection). Elles sont : La couche physique qui est responsable de l'accès au médium, et la couche de contrôle d'accès au médium qui est la couche MAC (Medium Access Control).

L'ensemble des éléments articulés autour de la dénomination de IEEE 802.11 se sont identifiés comme suit :

- **802** : standard général de base pour le déploiement de réseaux numériques locaux.
- **802.11** : spécifications pour l'implémentation de réseaux numériques locaux à liaison sans fil.

À son arrivée, il s'est mis sur l'utilisation de deux couches physiques et une seule couche de contrôle d'accès au médium. Les deux couches physiques sont : la couche Infra-Rouge (IR) et la couche radio de bande de fréquence 2,4 GHz. Par la suite, plusieurs extensions et modifications ont été apportées.

## 1.3 Débit dans les réseaux locaux sans fil

Les normes 802.11 ont été proposées et améliorées à plusieurs reprises depuis l'approbation du standard initial par l'IEEE en 1997. Ce standard a évolué en passant des normes à faible débit IEEE 802.11/b/a/g, à la norme de Qualité de Service QoS (Quality Of Service) IEEE 802.11e, à la norme à haut débit HT (High Throughput) IEEE 802.11n, puis à la norme à très haut débit VHT (Very High Throughput) IEEE 802.11ac et enfin à la norme à Très Haute Efficacité HEW (High Efficiency WLANs) IEEE 802.11ax.

Les modifications apportées par les normes 802.11b/a/g concernent uniquement la couche physique radio. Pour la norme 802.11e, il s'agit d'une modification de la couche MAC afin de répondre aux besoins en QoS pour les flux de données multimédias. Depuis la définition de la norme 802.11e, toutes les normes successeuses ont introduit de nouvelles techniques que ce soit au niveau PHY ou MAC.

Nous nous intéressons à l'étude des normes 802.11 améliorant la métrique de débit comme illustrées dans la Figure 1.1.

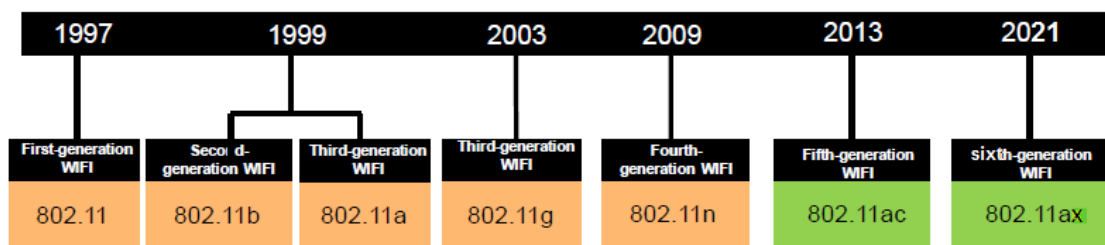


Figure 1.1 - Évolution des normes de débit 802.11 au cours des années.

### 1.3.1 La norme 802.11L (1997)

La norme initiale d'IEEE 802.11 a été définie en 1997, permettant d'atteindre des débits de 1 avec une extension possible à 2 Mbits/s grâce à plusieurs spécifications adaptées soit au niveau physique ou MAC. Souvent le nom 802.11Legacy ou WIFI-1 est utilisé en référence à ses réseaux.

#### 1.3.1.1 LA COUCHE PHYSIQUE

La norme 802.11Legacy définit trois couches physiques : l'une sur infrarouge et les deux autres sur les ondes radio de fréquences 2,4 GHz. La couche physique reposant sur l'infrarouge n'a jamais connu le succès. Sur les deux couches radio, l'une utilise la modulation radio de type DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) et l'autre de type FHSS (Frequency Head Spread Spectrum).

La couche 802.11 DSSS a connu des améliorations, alors que la couche 802.11 FHSS a plus ou moins été abandonnée [1].

**La modulation DSSS** est une technique d'étalement de spectre par des transitions d'état très rapides (*chipping*) qui tendent à étaler le spectre du signal original. La figure 1.2 nous montrent le principe d'étalement de spectre.

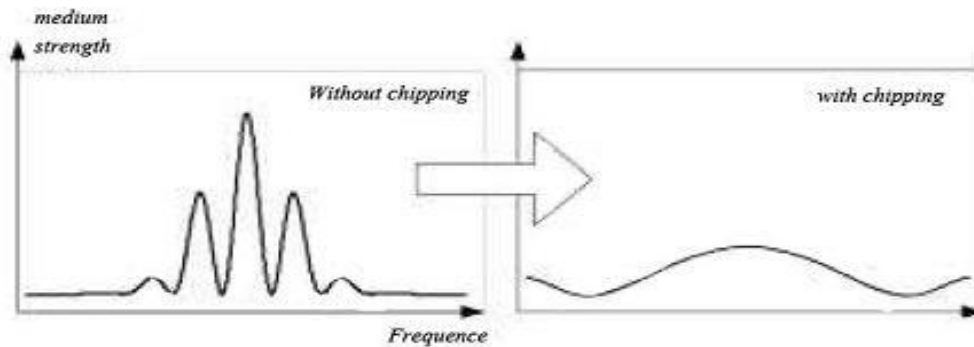


Figure 1.2 - étalement de spectre par la technique de chipping [11].

### 1.3.1.2 La couche MAC 802.11L

La couche MAC s'occupe de coordonner l'accès à la couche physique. Elle définit en particulier comment plusieurs stations sans fil devront partager le temps de parole sur les ondes radio, se connecter à un réseau sans fil et également sécuriser les données échangées.

Elle est composée de deux modes d'accès dont le fonctionnement est complètement différent : le mode distribué DCF (Distributed Coordination Function) et le mode centralisé PCF (Point Coordination Function).

- **DCF** : Il s'agit d'une version améliorée du protocole *CSMA with Collision Avoidance* (CSMA/CA), Pour son fonctionnement, lorsqu'une station 802.11 souhaite transmettre sur le médium, DCF requiert une observation du canal pendant une durée DIFS (DCF Inter-Frame Space) puis choisir un nombre aléatoire de slots.

Ce nombre de slots choisis aléatoirement s'appelle le backoff et celui-ci est décrémenté tant que le canal reste libre. Si le canal est de nouveau occupé durant le décompte du backoff, celui-ci se met en pause jusqu'à ce que le canal soit de nouveau libre et reprendra son décompte après un temps DIFS. Lorsque le backoff arrive à zéro, la station peut alors émettre sa trame. Le backoff est un aspect essentiel de l'efficacité du protocole. Il est tiré dans une fenêtre de contention bornée par 0 et CWmin. Si la taille de cette fenêtre est trop petite, alors plusieurs stations souhaitant accéder au canal risqueraient de tirer le même nombre de slots, ce qui provoquerait une collision. Si à l'inverse cette fenêtre de contention est trop grande, le canal risque d'être sous-utilisé, réduisant de fait l'efficacité du protocole. Pour faire face chaque fois qu'une transmission n'est pas suivie par la réception d'un ACK, la station suppose qu'il y a eu collision, double sa fenêtre de contention et recommence une procédure de contention jusqu'à ce que la borne supérieure atteigne CWmax. En doublant la fenêtre de contention, la station augmente ses chances de tirer un backoff élevé, ce qui permet aux autres stations de bénéficier de l'accès au canal. En procédant ainsi, la méthode DCF contrôle la charge sur le canal en réduisant la contention, car les stations ayant raté leur transmission ont plus de chance d'accéder au canal

plus tard. La station réceptrice vérifie le CRC (Cyclic Redundancy Check) de la trame reçue et envoie une trame d'acquittement à l'émetteur après un SIFS qui est utilisé pour séparer les trames d'un dialogue. La réception de l'acquittement informe l'émetteur du succès de la transmission. Ce standard définit aussi un mécanisme pour palier aux problèmes classiques des réseaux sans fils qui sont : Le terminal caché et les stations exposées, c'est de que les stations peuvent utiliser un protocole MAC optionnel : le RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send) voir figure 1.3 .

Lorsque cette fonction est utilisée, la station émettrice envoie un RTS à la station réceptrice. Cette dernière répond par une trame CTS qui sera entendue par toutes les stations dans la portée de la station réceptrice. Les trames RTS et CTS contiennent des informations PCF (Point Coordination Function) sur la durée d'occupation du réseau nécessaire pour la transmission de données entre la station émettrice et la station réceptrice. Par conséquent, toutes les stations émettrices qui se situent à la portée de la station réceptrice pourront donc différer de ce temps leur accès au medium [21].

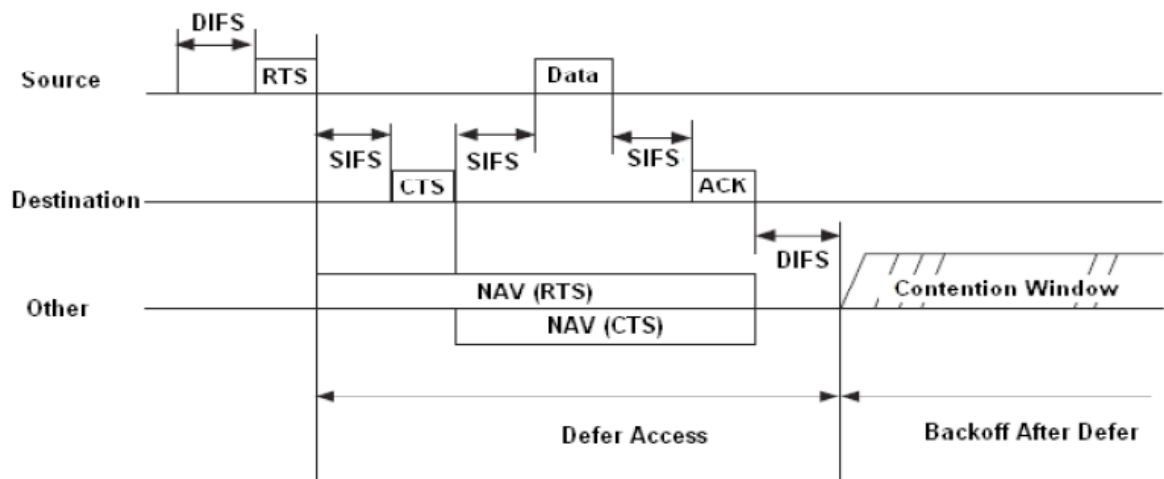


Figure - 1.3 Les règles d'accès dans DCF avec méthodes d'accès RTS/CTS [21].

- **PCF : Point Coordinated Function** est une technique de contrôle d'accès au médium MAC utilisable dans les réseaux sans fil 802.11. Toutes les stations sont reliées (sans fil) à un AP (Acces Point) qui s'occupe de distribuer la parole à chacun, donc logiquement n'est pas utilisable de Adhoc. Puisqu'un AP s'occupe de distribuer la parole, il n'y a plus de collision possible et le temps de latence est donc garanti. L'AP se tourne successivement vers chacune des stations et lui alloue un « temps de parole » plus ou moins long, grâce à une requête *CF-Poll*. Si la station accepte de prendre la parole, elle doit immédiatement acquiescer avec un paquet CF ACK qui acquitte le CF-Poll après un temps d'attente SIFS. Elle peut alors émettre un ou plusieurs paquets pendant cette période. Si elle n'a toujours rien émis au bout d'un court intervalle appelé le *PIFS (PCF Inter Frame Space)*, alors l'AP passe à la station suivante. Les autres stations attendent patiemment.

Le mode PCF permet ainsi de diviser le temps de parole plus équitablement entre les stations et surtout de façon plus fluide et déterministe. En contrepartie, une portion importante de la bande passante peut être gâchée si de nombreuses stations n'ont rien à émettre : lorsque la parole leur est donnée, les autres stations attendent, en définitive, pour rien. Pour limiter cela, mais aussi pour permettre aux stations incompatibles avec le PCF de communiquer, la norme 802.11 impose que le PCF soit toujours accompagné du DCF. Pendant quelques instants, toutes les stations sont en mode PCF et ne parlent que si l'AP auquel elles sont associées leur donne la parole, puis, pendant quelques instants, les stations prennent la parole selon le mode DCF, puis on revient au mode PCF et ainsi de suite [4].

### **1.3.2 La norme 802.11b (1999)**

Après le succès phénoménal de la première norme 802.11L au milieu professionnel, une nouvelle norme 802.11b a été proposée en 1999. C'est une norme permettant des débits de transmission de données allant jusqu'à 11 Mbit/s sur la bande de fréquences des 2,4 GHz. La modification apportée par cette norme concerne seulement la couche physique. Par contre, les concepts définis au niveau de la couche MAC pour la 802.11L sont toujours retenus dans la 802.11b [2].

#### **1.3.2.1 La couche physique 802.11b**

La norme 802.11b a amélioré la technique de modulation initiale DSSS. Cette nouvelle technique est appelée la modulation HR-DSSS (Hate Rate-DSSS). Cette dernière repose sur le principe de base d'étalement de chipping. **La HR-DSSS** est un procédé de modulation du signal numérique basé sur le codage de bits permettant d'obtenir des débits de 5,5 Mbit/s et 11 Mbit/s. Ce débit est atteint grâce à l'utilisation de différents codes de chipping dont le nombre peut aller jusqu'à 64 (ce qui permet de transporter 6 bits d'information (car  $2^6 = 64$ ) en plus des deux bits autorisés par la modulation 4DPSK. Ces codes, de 8 bits de longueur chacun, sont des « codes complémentaires ».

### **1.3.3 La norme 802.11a (1999)**

Durant la même année, la 802.11b a subi une amélioration qui a donné lieu à la naissance d'une nouvelle norme, il s'agit bien de la norme 802.11a. Cette norme a défini une nouvelle technique de Modulation appelée OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) sur la bande de fréquence à 5 GHz, et permettant des débits allant jusqu'à 54 Mbits/s.

### 1.3.2.1 La couche physique 802.11a

Le principe de l'OFDM comme le montre la figure 1.4 consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre. Comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs, par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

Pour que les fréquences des sous-porteuses soient les plus proches possibles et ainsi transmettre le maximum d'information sur une portion de fréquences donnée, l'OFDM utilise des sous-porteuses orthogonales entre elles. Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent pas entre eux. La forme d'onde OFDM en 802.11a est basée sur une IFFT (Transformée de Fourier Inverse) de taille 64. Pour éviter les lobes secondaires en extrémités de la bande. Grâce à cette fonction, les porteuses sont placées dans le spectre de fréquences de telle sorte que les pics de puissance d'une porteuse donnée correspondent aux zéros des autres porteuses. 52 sous-porteuses d'environ 312,5 kHz chacune permettent de couvrir un spectre de 16,66 MHz, qui forme un canal de communication OFDM. Chaque sous porteuse est modulée en PSK (2PSK ou 4PSK) ou en QAM (16QAM ou 64QAM). Parmi eux 4 d'entre elles vont servir à véhiculer des signaux connus appelés <<pilotes>> qui servent à synchroniser les fréquences et à mesurer en permanence les interférences et les décalages de phase, afin de s'y adapter au mieux. Ainsi, les données à émettre sont groupées en symboles de 48 bits en 2PSK (et six fois plus en 64QAM par exemple). Ces symboles sont émis en 48 portions simultanées, une par sous-porteuse.

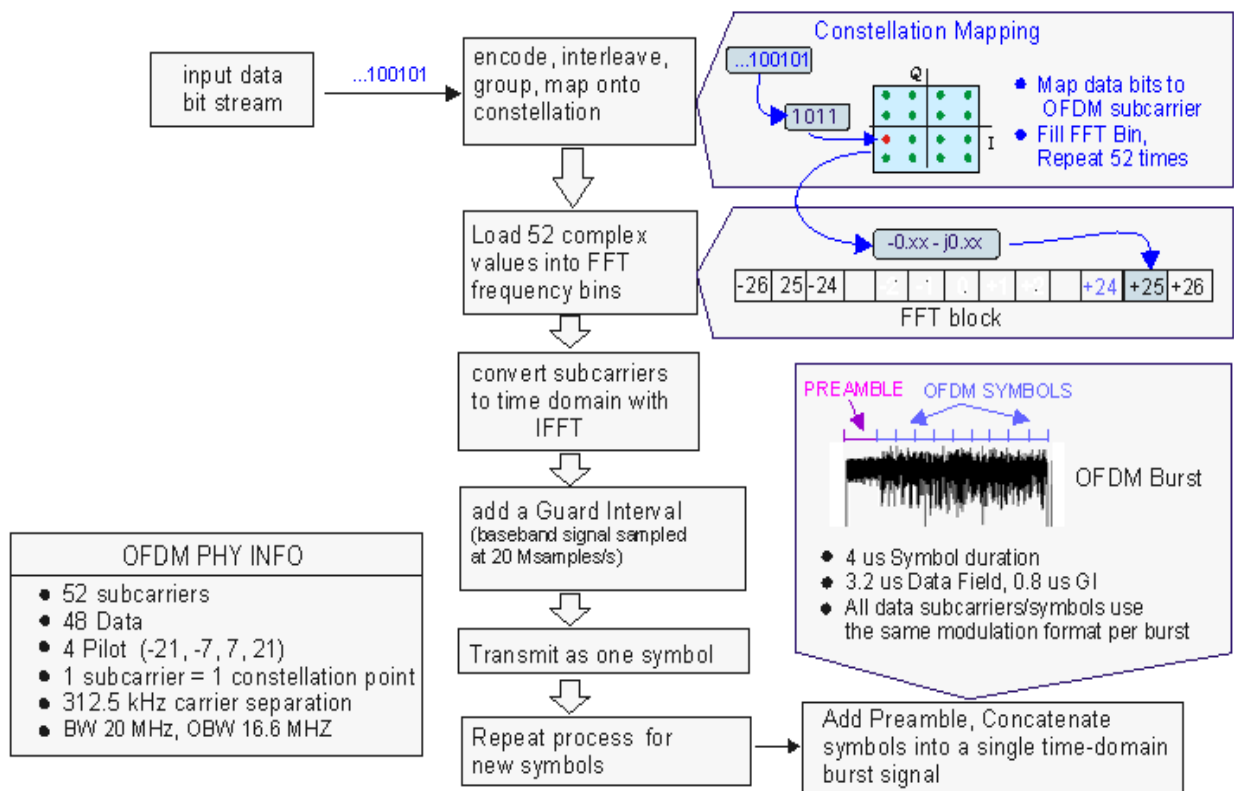


Figure - 1.4 Principe OFDM [14].

### **1.3.4 La norme 802.11g (2003)**

Dans l'objectif d'atteindre des débits de 54 Mbits/s comme dans un réseau 802.11a tout en assurant la compatibilité avec les équipements du réseau 802.11b, la norme IEEE 802.11g a été publiée en 2003. Cette norme a utilisé alors la bande de fréquence de 2,4 GHz avec la modulation OFDM.

### **1.3.5 La norme 802.11e (2005)**

La norme IEEE 802.11e a été approuvée et publiée en 2005 dans l'objectif de répondre aux besoins en QoS pour les flux de données multimédias. Cette norme a connu une amélioration de la couche MAC. La fonction DCF a été améliorée et remplacée par la fonction EDCA (Enhanced DCF) afin de garantir la différenciation à l'accès au canal en distinguant les flux de données prioritaires et non prioritaires.

#### **1.3.5.1 La couche MAC 802.11e**

La 802.11e améliore le DCF et le PCF, grâce à une nouvelle fonction de coordination : la fonction de coordination hybride HCF (Hybrid Coordination Function).

Dans HCF (Voir la Figure 1.5), il existe deux méthodes d'accès au canal : HCCA (HCF Controlled Channel Access) et EDCA (Enhanced Distributed Channel Access). Les stations sans fils opérant sous un réseau avec QoS 802.11e sont appelées QSTA (QoS Station). Un QBSS (QoS BSS) est un BSS qui inclut un HC (Hybrid Coordination) et des stations QSTA. La station QSTA qui joue le rôle de contrôleur central au sein de la même cellule QBSS est appelée le point de coordination hybride HC.

En particulier, quatre classes de trafics, chacune correspond à une station virtuelle ou catégories d'accès ont été définies, avec chacune d'elle sa priorité d'accès au canal suivant ses paramètres de la QoS. La différenciation à l'accès entre les quatre catégories d'accès a été possible au moyen d'un ensemble de paramètres particuliers, sont les paramètres EDCA (ou de QoS). De ce fait, chaque classe de trafic se voit attribuer un niveau de priorité à travers ses propres paramètres, à savoir :

- Le temps d'attente avant l'accès au canal AIFS (Arbitration Inter-Frame Space),
- La fenêtre de contention CW (Contention Window) minimale et maximale (CWmin et CWmax),
- Et l'opportunité de transmission TXOPLimit (Transmission Opportunity Limit).

Les paramètres QoS sont ajustés au cours du temps par le coordinateur hybride et sont annoncés périodiquement à travers les trames balises. Une station 802.11e peut utiliser le canal que pour la durée TXOP. TXOP est défini par un instant de début et une durée. Un intervalle TXOP obtenu suite à une contention au canal est appelé EDCA-TXOP. Quand cet intervalle

est obtenu dans la période contrôlée par le HC, il est appelé HCCA-TXOP. La durée d'une EDCA-TXOP est limitée par la valeur du paramètre QBSS-limit-TXOP régulièrement distribuée par le point d'accès à travers les trames balises (beacon). Ce paramètre permet donc de contrôler la durée maximale d'une transmission en cours ce qui est important pour les délais d'accès et de transmission de l'ensemble des stations.

Une autre amélioration est apportée par cette norme, c'est bien que les stations 802.11e sont maintenant autorisées à transmettre directement des trames à une autre entité du QBSS sans être obligées de passer par le point d'accès. Ce fait permet d'optimiser l'utilisation de la bande passante partagée entre les utilisateurs. Dans le standard 802.11, toutes les communications passaient obligatoirement par le point d'accès dans un réseau à accès centralisé [5].

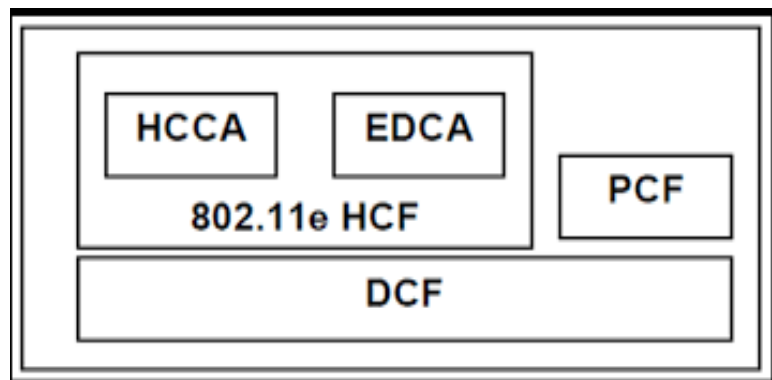


Figure 1.5 - architecture de la norme 802.11e [5].

### 1.3.5.2 Le mécanisme EDCA

Il s'agit d'une amélioration du DCF qui ajoute un système de priorité pour la gestion de l'accès au support. Ce dernier se fait alors selon le niveau de priorité de la trame. Selon la définition du dernier draft de la norme 802.11e, la couche MAC au niveau d'une station est formée de quatre files de transmission dont chacune fonctionne comme une entité de Back-off en mode DCF. La structure de cette couche est illustrée par la figure

La norme IEEE 802.11e a donc défini, au niveau MAC, quatre catégories d'accès : AC relatives aux applications traitées dans les couches supérieures. Chaque catégorie de trafic constitue une file d'attente FIFO. Elles sont notées respectivement :

- **AC\_VO** : pour les applications temps réels tel que la voix
  - **AC\_VI** : pour les applications vidéo
  - **AC\_BE** : pour le trafic « Best Effort
  - **AC\_BK** : pour le trafic Background
- Chaque catégorie d'accès possède son propre temps d'attente avant l'accès au canal. On parle donc du temps entre trame AIFS (Arbitration Inter-Frame Space). Ces catégories de trafic, gèrent huit niveaux de priorités allant de 0 à 7. Les correspondances entre ces priorités et les catégories d'accès sont récapitulées aussi.

- Il est important de signaler que les tailles limites de la fenêtre de contention diffèrent selon la classe de trafic. On parle alors de CWMin [AC] et CWMax [AC]. Chaque AC détient son propre compteur de Backoff qui est désormais compris entre 1 et  $(1 + CW [AC])$ .
- Quand deux ACs finissent en même temps leur durée de Backoff, alors c'est le paquet de plus haute priorité qui sera transmis, les autres entités doivent augmenter leurs fenêtres de Backoff.

Le tableau 1.1 fournit les valeurs des paramètres EDCA concernant le temps (CWmin, CWmax et AIFSN) pour chaque catégorie d'accès où l'AC-VO possède les plus faibles valeurs. En effet, ces flux temps réel nécessitent d'être transmis aux premiers essais et non pas après plusieurs retransmissions causant des délais croissants.

ACs	CWmin	CWmax	AIFSN
AC-BK	31	1023	7
AC-BE	31	1023	3
AC-VI	15	31	2
AC-VO	8	15	2

Tableau - 1.1 Comparaison entre les ACs [5].

- La norme 802.11e a aussi introduit le paramètre TXOP. Il s'agit d'un intervalle de temps pendant lequel une station a le droit d'émettre une séquence de trames. Au niveau de la trame balise, l'AP annonce aussi à chaque AC la limite de l'intervalle TXOP (TXOPLimit [AC]) tout en définissant aussi la date de début de transmission. Durant un temps TXOP, la station peut transmettre plusieurs trames MPDUs en provenance d'une seule AC. Ces trames MPDUs sont espacées d'un espace SIFS (Short Inter-Frame Space) de leurs acquittements. Cette transmission de plusieurs MPDUs est notée CFB (Contention Free Bursting). La figure 1.6 présente la structure du CFB :

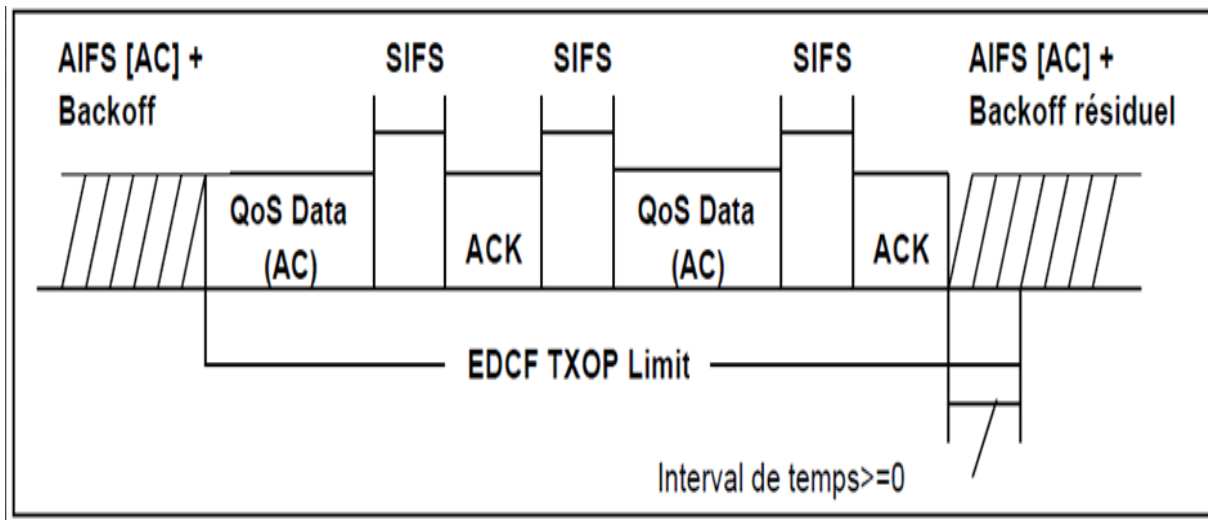


Figure - 1.6 structure de CFB [5].

### 1.3.5.3 Le paramètre TXOPlimit

TXOPlimit est un paramètre prometteur de la QoS qui a été introduit par le standard IEEE 802.11e. C'est un intervalle de temps (dans HCF) au cours duquel une station a le droit d'envoyer une succession de trames (un burst de trames) sans interruption. Cette succession contient un nombre de trames proportionnel à la valeur TXOPlimit. Ce paramètre est utilisé dans les deux mécanismes de QoS, EDCA et HCCA.

### 1.3.5.4 Le mécanisme HCCA (HCF Controlled Channel Access)

La méthode d'accès HCCA : permet un accès au médium sans compétition avec une gestion centralisée de l'accès. Elle utilise un coordinateur hybride HC qui opère au niveau du point d'accès, pour déterminer quelle QSTA a le droit d'émettre.

La fonction HCCA peut donc être décrite comme une amélioration du PCF. Elle implémente les fonctionnalités du PCF et comprend des améliorations qui sont les suivantes :

- Elle donne la possibilité à une QSTA d'émettre plusieurs trames de données dans une seule séquence de transmission tout comme la méthode DCF. Par contre, cette durée de transmission TXOP est définie par HC.
- La TXOP peut avoir une variabilité temporelle permettant ainsi une optimisation de la bande passante.
- Le trafic délivré par le HC et l'allocation des droits de transmission (TXOP), peuvent être programmés pendant la période de contention ainsi que dans toutes les périodes sans contention.
- Les phases d'accès contrôlées dans la période CP sont nommées CAP (Controlled Access Phase).

### 1.3.6 La norme 802.11n (2009)

La norme IEEE 802.11n, a été ratifiée en 2009, où le terme HT (High Throughput) est utilisé en référence à ses réseaux. Cette norme a mis en œuvre plusieurs techniques avancées au niveau physique comme au niveau MAC. Pour son fonctionnement, elle utilise la technique de modulation OFDM sur les deux bandes de fréquences à 2,4 et 5 GHz. Elle est alors compatible à la fois avec les normes IEEE 802.11b et IEEE 802.11g à 2,4 GHz, et avec la norme IEEE 802.11a à 5 GHz.

Au niveau physique, la norme se base sur deux principales transmissions : multi-antennes et multi-canaux. La transmission multi-antennes à travers quatre flux spatiaux à l'émission et à la réception (MIMO 4×4×4), permet jusqu'à quadrupler le débit physique, d'une part. D'autre part, le regroupement de deux canaux adjacents pour obtenir un canal double de 40 MHz permet à son tour de doubler le débit de transmission de données. Au niveau MAC, les schémas d'agrégation de trames et les acquittements groupés ont été apportés.

Par le biais des techniques spécifiées au niveau des deux couches PHY et MAC, les réseaux 802.11n parviennent à offrir des débits de transmission de données pouvant atteindre 600 Mbits/s.

#### 1.3.6.1 La couche physique 802.11n

La 802.11n peut fonctionner sur l'une ou l'autre des bandes de fréquences autorisées pour le WIFI. Cette norme à haut débit a apporté des modifications PHY et MAC qui n'ont jamais existées dans les normes précédentes. La couche physique marque deux principales techniques qui sont :

- **La technologie MIMO (Multiple-Input Multiple -Output)** (Voir figure 1.7) : permet d'utiliser simultanément plusieurs antennes afin de permettre plusieurs émissions spatiales pour les récepteurs et émetteurs, ce qui permet d'augmenter la portée du signal intérieur jusqu'à 70m avec la bande de fréquence 2.4 GHZ et jusqu'à 35 m avec la bande 5 GHZ et le signal extérieur jusqu'à 250m, tandis que elle peut multiplexer de manière spatiale plusieurs flux de données grâce à la multiplicité d'antennes (MIMO 4×4×4) [8].

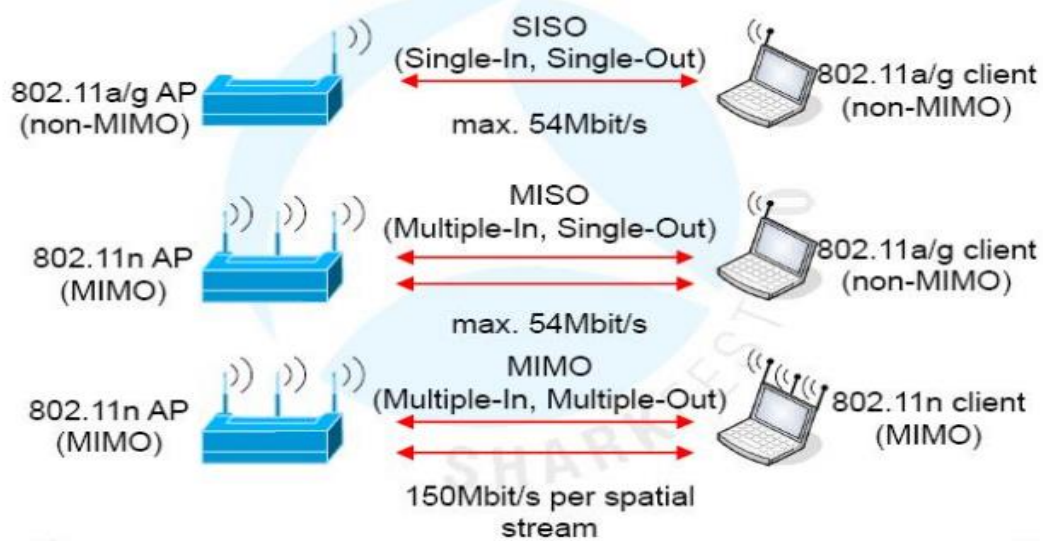


Figure1.7 - SISO vs MISO vs MIMO [8].

- **La technique de regroupement de canaux :** Le regroupement des canaux 802.11n (voir figure 1.8) est une technique visant à augmenter le débit physique tout en augmentant la bande passante du canal de transmission. C'est un moyen d'améliorer les performances du sans-fil en associant deux canaux à 20 Mhz pour ne constituer qu'un seul canal plus large à 40 MHz. L'utilisation simultanée de deux canaux sous forme d'un seul canal groupé améliore les débits des connexions sans fil, d'un seuil maximal de 54 Mbit/s à jusqu'à 300 Mbit/s [7] [8].

D'autres améliorations plus au moins sophistiquées ont contribué à améliorer le débit de 10%, elles sont les suivantes :

- 52 sous-porteuses au lieu de 48 ;
- Un délai de garde plus court entre les symboles OFDM, de 400 ns plutôt que 800 ns ;
- Un préambule plus court ;

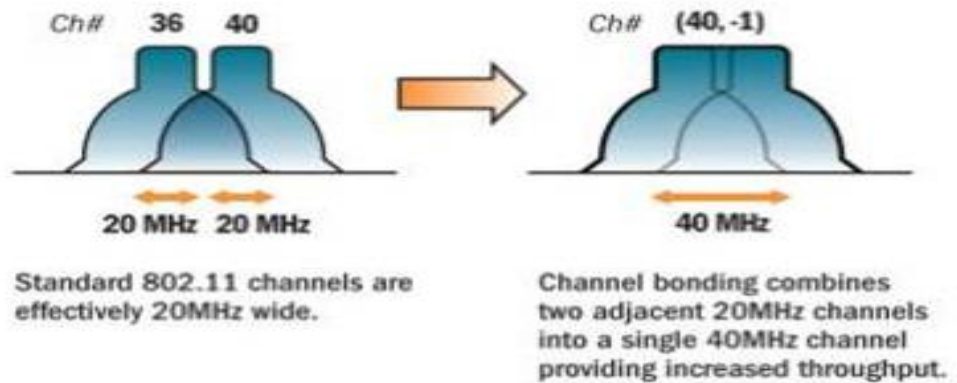


Figure 1.8 - regroupement des canaux de 20MHz [8].

### 1.3.6.2 La couche MAC 802.11n

La couche MAC porte sur les acquittements groupés et particulièrement sur de nouveaux mécanismes d'agrégation de trames, à savoir : A-MSDU (Aggregated MAC Service Data Unit), A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit), et l'agrégation hybride A-MSDU/A-MPDU. En effet, ces mécanismes contribuent à augmenter la quantité de données utile qui peut être transmise. L'agrégation des trames peut réduire considérablement les temps gaspillés générés dans la transmission de trames de longueurs petites. Ceci en regroupant plusieurs sous-trames de longueurs petites en une seule trame agrégée de longueur importante [22].

Des améliorations au niveau MAC sont alors parvenues comme :

- **Agrégation A-MSDU :** L'agrégation des unités de données de service MAC (MSDU) voir la figure 1.9 (a) repose sur le fait que la plupart des points d'accès mobiles et la plupart des piles de protocoles de clients mobiles utilisent Ethernet comme format de trame « natif ». Il collecte les trames Ethernet à transmettre à une ou plusieurs destinations et les encapsule dans une seule trame 802.11n. Ceci est efficace car les en-têtes Ethernet sont beaucoup plus courts que les en-têtes 802.11. Une unité de données de service MAC agrégée (A-MSDU) contient uniquement des MSDU dont les valeurs des paramètres d'adresse de destination et d'adresse d'expéditeur correspondent aux mêmes valeurs d'adresse de récepteur et d'adresse d'émetteur, c'est-à-dire toutes les MSDU sont destinés à être reçus par un seul récepteur, et nécessairement ils sont tous transmis par le même émetteur.
- **Agrégation A-MPDU :** Le concept d'agrégation A-(MPDU) est de rejoindre de multiples sous-trames MAC Protocol Data Unit (MPDU) avec un seul en-tête PHY afin de réduire la surcharge dû aux entêtes PHY. Cette méthode offre un débit MAC plus élevé qu'avec l'utilisation de l'agrégation l'A-MSDU. Toutes les sous-trames MPDUs constituant un A-MPDU devrait être destinées à la même adresse (voir la figure 1.9(b)), la longueur maximale d'un A-MPDU, autrement dit, la longueur maximale de PHY Service Data Unit (PSDU) pouvant être reçue est de 65535 octets. La longueur de délimiteur est de 32 bits, il se compose d'un champ réservé a 4 bits, un champ de la longueur

du MPDU a 12 bits, Cyclic Redundancy Check (CRC) a 8 bits, et d'un champ signature à 8 bits.

- **Agrégation hybride A-MPDU/A-MSDU :** L'agrégation hybride comme le montre la figure 1.10 comprend un mélange d'A-MSDU et d'A-MPDU sur deux étapes. Dans la première étape, les MSDU ont reçu par MAC de la couche supérieure sont mis en mémoire tampon pour un peu de temps jusqu'à ce que les A-MSDU soient formés selon leur identifiant de trafic, leur destination, leur source et la taille maximale de l'A-MSDU. Les A-MSDU complets et d'autres MSDU non agrégées, puis entrent le deuxième étape pour former un A-MPDU. Seulement complet Les A-MSDU et MSDU, et non les fragments d'AMSDU ou de MSDU, pourraient être contenus dans une AMPDU. L'ensemble du schéma d'agrégation se termine quand A-MPDU est créé [23].

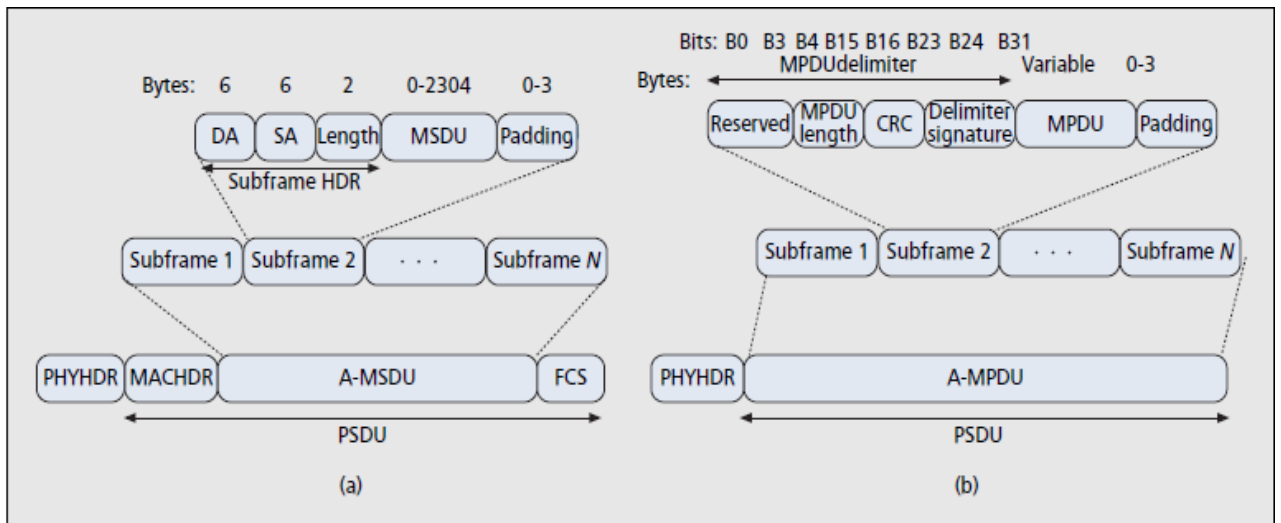


Figure 1.9 - A-MSDU et A-MPDU [19].

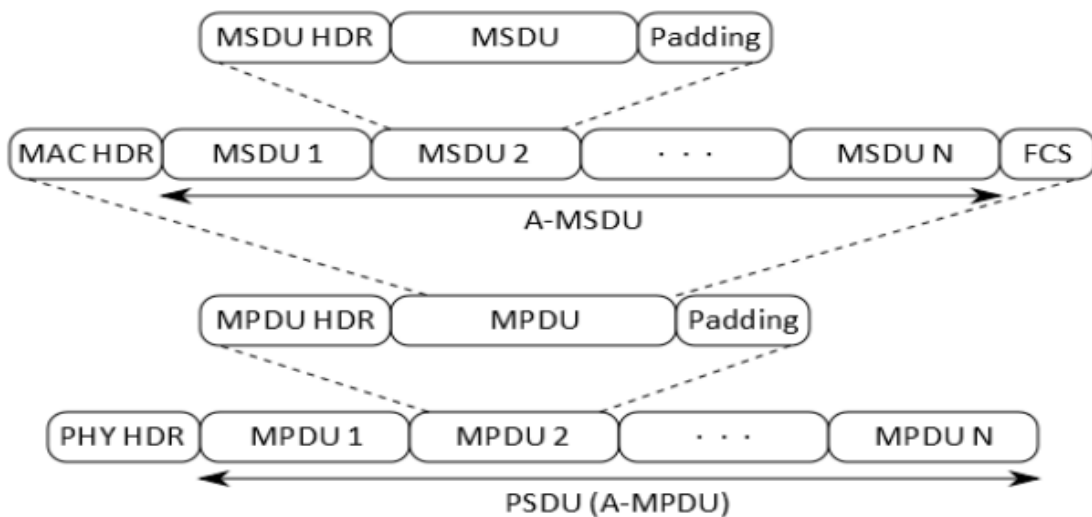


Figure 1.10 - Agrégation Hybride A-MPDU A-MSDU [23].

- **L'utilisation d'acquittements groupés <<Block-ACK>>** : L'accusé de réception de bloc BA(Block ACK) a été initialement défini dans IEEE 802.11e comme un schéma optionnel pour améliorer l'efficacité MAC. L'amendement 802.11n améliore ce mécanisme BA puis rendu obligatoire la prise en charge par tous les appareils compatibles 802.11n. Cette procédure optionnelle permet d'améliorer l'utilisation du médium. En effet, elle permet à une station d'envoyer plusieurs trames sans que ceux-là soient acquittés individuellement. Le bloc de trames pourra être acquitté à la fin de l'envoi du bloc ou une limite TXOPLimit. Par exemple, au lieu d'émettre trois trames en attendant à chaque fois un ACK, soit en tout 6 trames émises, on peut émettre une seule trame agrégée A-MPDU et recevoir un seul Block-ACK.

### 1.3.7 La norme 802.11ac

Le groupe de travail du standard IEEE 802.11 annonce en 2014 la ratification d'une nouvelle norme dans les réseaux locaux sans-fil référencée par la norme VHT. C'est la norme 802.11ac pouvant offrir des débits d'au moins trois fois supérieurs à ceux de la norme 802.11n. La norme 802.11ac est une extension directe des caractéristiques de la norme 802.11n en augmentant la bande passante jusqu'à 160 MHz et en utilisant un nombre d'antennes MIMO allant jusqu'à 8×8×8. Les améliorations et l'introduction de nouvelles techniques au niveau de la couche PHY et MAC donnent lieu à la possibilité d'atteindre des débits allant jusqu'à 7 Gbits/s Nous allons souligner toutes ces améliorations dans les sous-sections suivantes.

#### 1.3.7.1 LA COUCHE PHYSIQUE 802.11AC

De nouvelles technologies ont été adoptées dans le standard 802.11ac, notamment :

- Une largeur de canal de 80 MHz, pouvant aller jusqu'à 160 MHz. Utilisation de différents flux spatiaux en MIMO.
- Support de 8 flux spatiaux au maximum vers un récepteur.
- Modulation en QAM à 256 états.
- Le Beamforming.

##### 1.3.7.1.1 Utilisation des canaux de 80/160 MHz

La norme 802.11ac étend de la technique de regroupement des canaux proposée dans la norme 802.11n, elle supporte le groupement de plusieurs canaux adjacents de 20 MHz pour former des canaux de largeur 40, 80, et 160 MHz. L'amendement spécifie également que deux canaux non adjacents de 80 MHz peuvent être utilisés pour former un canal de 160 MHz.

La figure 1.11 nous montre l'allocation des canaux aux USA.

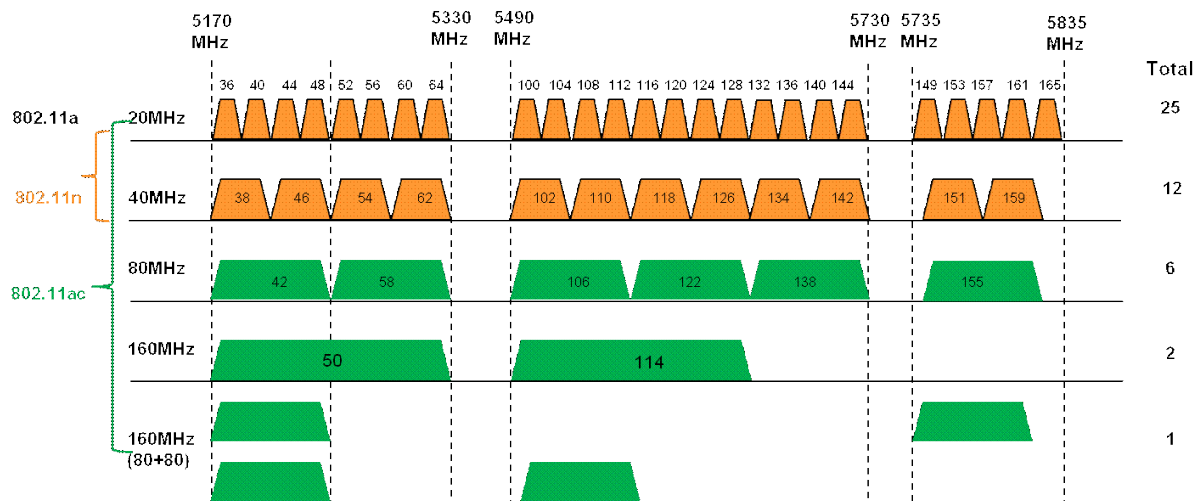


Figure 1.11 - Allocation des canaux aux USA [12].

Si la largeur de bande du canal est de 20 MHz, 40 MHz ou 80 MHz, il existe alors 25, 12 ou 6 canaux qui peuvent être regroupés, respectivement. Par contre, si la bande passante du canal est de 160 MHz, il y a seulement deux canaux adjacents. Par exception, le canal 160 MHz peut être obtenu par une combinaison de deux canaux 80 MHz non adjacents. Le regroupement de canaux permet une combinaison flexible de canaux, par exemple, pour éviter l'utilisation de canaux DFS, deux canaux non DFS 80 MHz peuvent être regroupés dans un canal 160 MHz. avec regroupement de canaux 80 + 80 MHz [9].

La structure des canaux larges est similaire à celle dans la 802.11n, les canaux composés de 40 MHz ou plus large encore, nécessitent toujours un sous-canal primaire de 20 MHz. De plus, les canaux 80 MHz ont un sous-canal primaire 40 MHz (qui comprend le primaire 20 MHz) et un sous-canal secondaire de 40 MHz. La même chose s'applique aux canaux de 160 MHz et 80 + 80 MHz, qui se composent de sous-canaux primaires et secondaires de 80 MHz. [10].

Dans Figure 1.12, nous décrivons la relation entre les sous-canaux primaires et secondaires basés sur les différentes combinaisons de bande passante. Dans tous les cas, le sous-canal élémentaire et primaire de 20 MHz est utilisé pour détection de porteuse afin de garantir qu'aucune autre station ne transmet sur le médium. La distinction d'un sous-canal primaire de 20 MHz est également nécessaire pour garantir la coexistence et la rétrocompatibilité avec les stations des premiers réseaux 802.11.

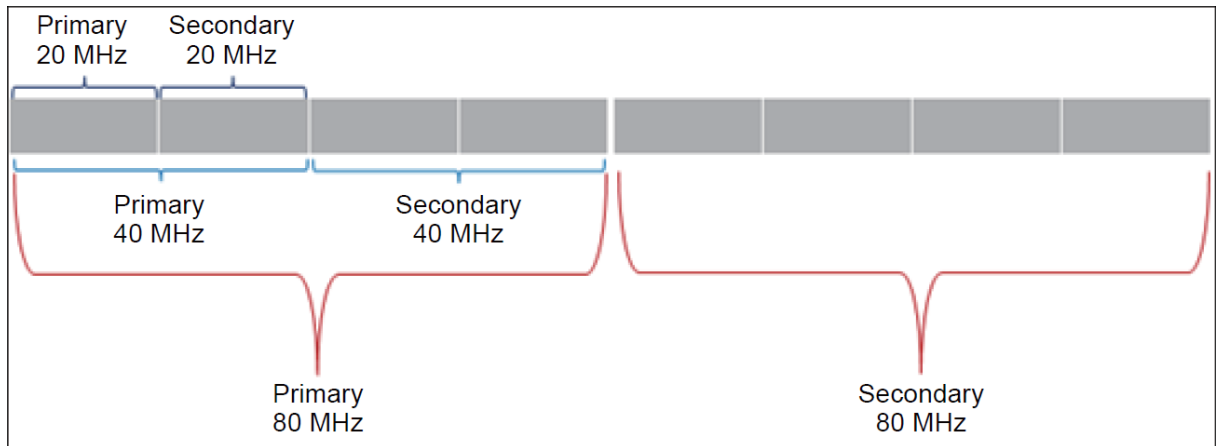


Figure 1.12 - Relation entre canaux primaires/secondaires [13].

### 1.3.7.1.2 DL MU-MIMO

La transmission MU-MIMO (multiple-Input/Multiple-Output) est une nouvelle technologie adoptée par l'amendement 802.11ac pour le WLAN. La figure 1.13 nous montre la différence dans le fonctionnement des deux techniques de transmissions multi-antennes SU-MIMO et MU-MIMO.

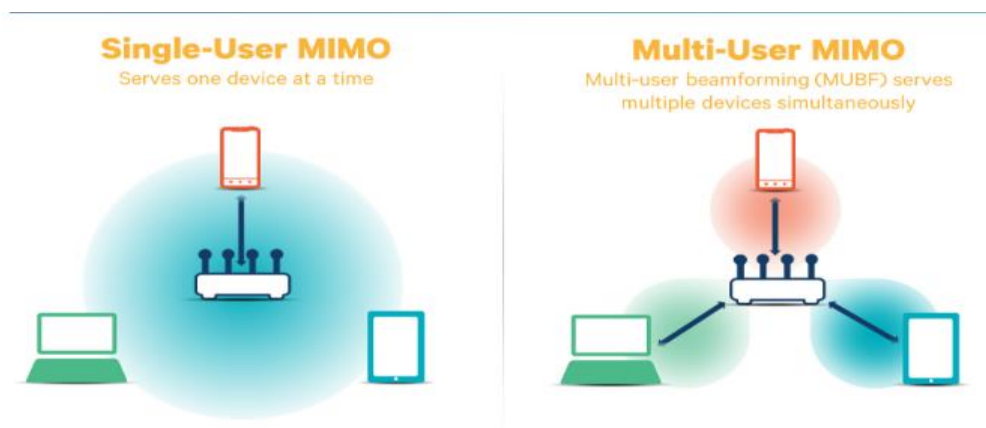


Figure - 1.13 SU-MIMO vs MU-MIMO [13].

- Le SU-MIMO (*Single User*), le plus courant, permet d'envoyer des données via les différentes antennes vers un seul utilisateur à un instant donné ; il impose d'avoir plusieurs antennes dans chaque récepteur. Ce mode permet d'atteindre un débit unitaire plus élevé.
- Le MU-MIMO (*Multi User*) permet de communiquer les fréquences radio et d'émettre des flux de données vers plus de deux utilisateurs, avec par exemple 4 antennes en émission et 2 antennes dans chaque récepteur. Il utilise le mode multiplexage spa-

tial et permet d'augmenter l'efficacité spectrale de débit global sans imposer un nombre élevé d'antennes dans chaque terminal. DL MU-MIMO (DownLink Multi User – Multi-Input-Multi-Output) est une forme de MU-MIMO adoptée dans la norme 802.11ac est Down-Link (DL) MU-MIMO. Elle consiste à envoyer plusieurs flux de données simultanément d'une station émettrice vers plusieurs stations réceptrices dont le nombre est au maximum de quatre. [14]. La particularité de la DL-MUMO réside dans le fait que, lorsque l'émetteur a plus d'antennes que le récepteur, il exploitera le reste de ces antennes pour émettre d'autres flux, en même temps, vers d'autres récepteurs [22].

### **1.3.7.1.3 Modulation 256-QAM**

L'amendement 802.11ac introduit une nouvelle technique de modulation optionnelle plus avancée que celle utilisée de la norme 802.11n, c'est bien la modulation 256-QAM. Les schémas de codage et de modulation utilisés sont de 3/4 et 5/6.

### **1.3.7.1.4 Le Beamforming**

Les premiers routeurs intégrant le beamforming sont apparus en 2008, avec l'avènement de la norme Wi-Fi 802.11n. La 802.11n a été la première version du WiFi à prendre en charge la technologie MIMO, indispensable à la technologie beamforming pour envoyer plusieurs signaux se chevauchant. Mais le beamforming des équipements 802.11n n'a jamais vraiment eu de succès, parce que la spécification ne précise pas comment la formation de faisceaux doit être mise en œuvre. Quelques fournisseurs ont bien lancé des implémentations propriétaires nécessitant l'achat combiné de routeurs et de cartes sans fil pour fonctionner, mais elles n'étaient pas populaires.

Les premiers routeurs intégrant le beamforming sont apparus en 2008, avec l'avènement de la norme Wi-Fi 802.11n.

Avec l'émergence de la norme 802.11ac, tout a changé. Il existe désormais des techniques spécifiques de beamforming pour les équipements WiFi, et la spécification ne requiert pas nécessairement de routeurs 802.11ac pour implémenter la formation de faisceau. Le beamforming est essentiel pour le support MU-MIMO pour s'assurer que la communication du routeur cible efficacement chaque client connecté.

Les informations les plus pertinentes portées par VHT beamforming compressé est les suivantes:

- Le champ de contrôle VHT MIMO, qui contient les dimensions de la matrice, un indicateur de la largeur du canal dans le quelle mesures utilisées pour créer le feedback

matrice ont été prises, et les informations indiquant la taille des entrées du livre de codes

- Le rapport de formation de VHT beamforming compressé contenant la formation de VHT beamforming compressée matrice de rétroaction sous la forme de deux angles, ainsi que le SNR de chaque flux espace-temps moyenné sur l'ensemble des sous-porteuses utilisées.
- Le rapport de formation de beamforming exclusif MU portant les informations explicites utilisées par un multi-utilisateur beamformer afin de créer la matrices de pilotage.

Il faut noter que lors de la transmission d'un VHT NDP (Null Data Packet) cadre d'annonce avec plusieurs stations comme destinations (contrairement à SU-MIMO, où seules une station est servie à la fois), les trames beamforming d'interrogation de rapport doivent être transmises dans afin de récupérer un beamforming compressé rapport de chacune des stations. La figure 1.14, nous présente un exemple de protocole de sondage VHT utilisé lorsque le PA traite plus d'un Faisceau VHT formé. En termes de puissance, de régulation limite la puissance d'émission en fonction du nombre des antennes utilisées à l'émetteur ; donc, la formation de faisceaux d'émission n'augmente pas la plage de distance maximale. La mise en œuvre de la formation de faisceaux d'émission est facultative dans la norme 802.11ac [26].

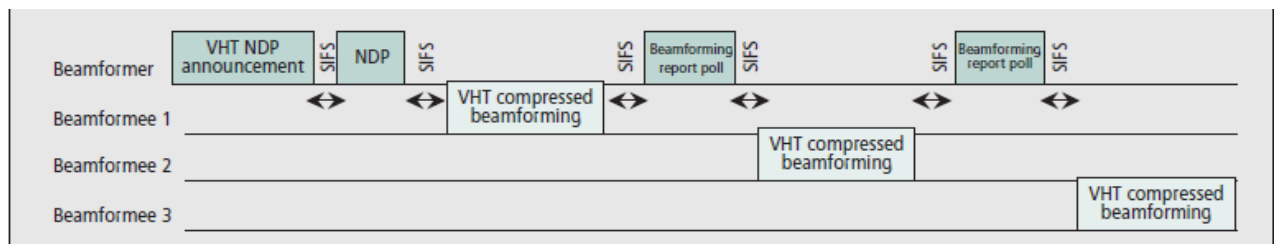


Figure 1.14 - protocole de sondage avec beamforming [26].

### 1.3.7.2 La couche MAC 802.11ac

Lorsque la fonction EDCA a été introduite dans les premiers réseaux 802.11, les couches PHY disponibles à cette époque fonctionnent sous des canaux de 20 MHz. Cependant, avec l'introduction des techniques de regroupement de canaux et de transmissions multi-antennes et multi-utilisateurs au niveau de la couche physique 802.11ac, une mise à niveau des règles de fonctionnement de la couche MAC de ces réseaux a été indispensable. A cet effet, la couche MAC 802.11ac a apporté de nouvelles règles en plus de celles existantes dans la 802.11n. Plusieurs mécanismes ont été alors proposés, à savoir : les méthodes d'accès multi-canaux, modification de format de trames, augmentation de la longueur des trames A-MPDU et l'adoption de la transmission en rafale partagée TXOP (transmission Opportunity) Sharing.

Nous consacrons les sections suivantes pour détailler le fonctionnement de ces mécanismes.

### 1.3.7.2.1 Les méthodes d'accès multi-canaux

Pour accéder aux canaux larges de 80 et 160 MHz, pendant la phase de contention, la STA 802.11ac doit écouter individuellement chacun des sous-canaux de 20 MHz constituant le canal large. Les règles EDCA sont toujours valables pour contrôler l'accès au canal primaire de 20 MHz. Pour cela, la station écoute le canal pour une durée AIFS[AC], si le canal est trouvé libre, la station doit tirer un temps BO aléatoirement depuis l'intervalle  $[0, CW_{min}[AC]]$ . C'est-à-dire le temps Backoff dépend de la valeur de la fenêtre de contention minimale.

Pour gagner les canaux secondaires, la STA en question devra vérifier leur disponibilité pendant une période PIFS (Point Inter-Frame Space) précédant immédiatement l'expiration du temps d'attente BackOff (BO). Bien entendu, les transmissions multi-canaux doivent dans tous les cas inclure le primaire 20 MHz quelle que soit la disponibilité des canaux secondaires. Si au moins un canal secondaire est trouvé occupé durant le temps PIFS, la station doit suivre soit la méthode statique ou la méthode dynamique [24], [25].

- **La méthode statique :** La méthode SMA est basée sur le principe du tout ou rien. Un AC devrait trouver le PCH et tous les SCH inactifs pendant PIFS. Toutefois, si au moins un SCH est occupé, il doit d'abord doubler son CW actuel, puis redémarrer le processus de contention avec un nouveau compteur BO. Une fois que le BO de cet AC atteint la valeur zéro, il accède à tout le canal de 80/160 MHz. En cas d'éclatement sans contention CFB (Contention Free Bursting), il transmet une rafale de trames A-MPDU sur l'ensemble du canal pendant sa période *Limit*. La figure 1.15 (a) illustre un exemple de fonctionnement pour la méthode SMA, où SCH et PCH sont obtenue comme suit :  $NC = 2K$ , où :  $K \in [0, 3]$  et  $NC \leq N$ . Ainsi, la largeur ( $W$ ) d'un large canal est obtenue comme suit :  $W = NC \times 20$  MHz, où le premier canal est considéré comme PCH, et les autres  $NC - 1$  canaux comme SCHs,  $C$  c'est La bande de fréquence qui est divisée en  $N$  canaux élémentaires de 20 MHz chacun [24].
- **La méthode dynamique :** La méthode DMA est plus flexible, un AC peut simplement accéder à la partie disponible de la demande BW (Band Width) si l'ensemble du canal n'est pas disponible pendant PIFS. Dans le cas du CFB, l'AC transmet une rafale de trames A-MPDU sur les canaux disponibles gagnés (PCH et SCH) jusqu'à l'expiration de son *TXOP Limit*. La figure 1.15(b) illustre un exemple de fonctionnement pour la méthode DMA. La liaison de canal ne concerne que la charge utile des trames de données. Cependant, les cadres de contrôle et les en-têtes (PHY et MAC) doivent tous être dupliqués puis transmis sur chaque canal élémentaire de 20 MHz qui constitue le large canal [24].

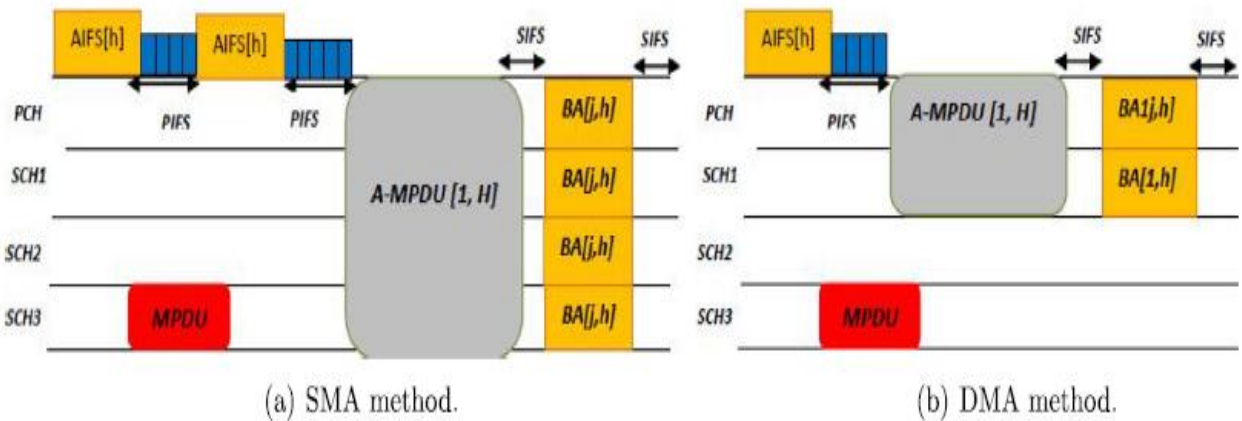


Figure 1.15 - Méthode statique et dynamique [24].

### 1.3.7.2.2 L'agrégation de trames 802.11ac

Dans l'objectif d'augmenter le débit, la norme IEEE 802.11ac améliore le principe d'agrégation de trames utilisés dans la 802.11n en augmentant la taille des A-MSDUs, A-MPDU-s. Ces augmentations sont illustrées dans le tableau 1.2 :

Paramètres	802.11n	802.11ac
A-MSDU	7935	11426
A-MPDU	65535	1048579

Tableau 1.2 - longueur de trame 802.11ac/802.11n [9].

### 1.3.7.2.3 TXOP Sharing

Des Modifications au niveau MAC ont été apportées pour supporter la liaison downlink et l'envoi de multiple flux de données vers plusieurs récepteurs. TXOP Sharing vient des limitations du principe du TXOP déjà existant. En effet, pendant un EDCA TXOP obtenu par une station, seulement les trames appartenant à la même catégorie d'accès sont transmises. Cependant, la transmission simultanée de multiples trames ayant différentes AC est bordée en utilisant le MU-MIMO. L'idée principale du TXOP Sharing est de permettre à un point d'accès d'exécuter les transmissions simultanées aux STAs de multiple réception en employant l'identification de groupe.

Les principales règles de fonctionnement du TXOP Sharing sont données comme suit : chaque EDCAF (EDCA fonction) d'une station émettrice concourt pour TXOP utilisant ses propres paramètres EDCA comme il le fait dans la norme. Une fois qu'un EDCAF remporte un TXOP, il en devient propriétaire de cette TXOP et son AC correspondant devient le

principal AC, tandis que d'autres AC deviennent des AC secondaires. Le CA primaire peut alors décider de partager sa TXOP avec le secondaire ACs pour les transmissions simultanées. Si c'est le cas, le TXOP gagné devient un TXOP multi-utilisateurs (MU-TXOP). Le CA primaire peut également décider quel(s) AC secondaire(s) partager avec lui le gagné TXOP, et quelles destinations cibler pour les transmissions. De plus, la durée du TXOP est déterminée par le limite TXOP du courant alternatif primaire, et le temps de transmission est déterminé par la quantité de données à transmettre par le CA primaire. Une fois que le courant alternatif principal a terminé son transmission, le MU-TXOP est terminé, même si le secondaire ACs ont encore des trames à envoyer [15].

### 1.3.7.2.4 Format de la trame MAC IEEE802.11ac

Comme le montre la figure 1.16, le préambule comprend les champs suivants :

- Legacy Short Training Field (STF): début de la détection des paquets, réglage AGC, fréquence initiale et synchronisation temporelle.
- Legacy Long Training Field (LTF): estimation de canal, fréquence fine et synchronisation temporelle.
- Champ de signal hérité (L-SIG): Usurpe les appareils hérités, indique la longueur du symbole de charge utile VHT.
- VHT-SIG-A: remplace 802.11n HT-SIG, contient VHT PHY mono-utilisateur et certains paramètres MU.
- VHT-STF: similaire à 802.11n HT-STF; permet le réajustement de l'AGC.
- VHT-LTF: similaire à 802.11n HT-LTF; utilisé pour l'estimation de canal.
- VHT-SIG-B: nouveau champ VHT; contient des paramètres supplémentaires par utilisateur.

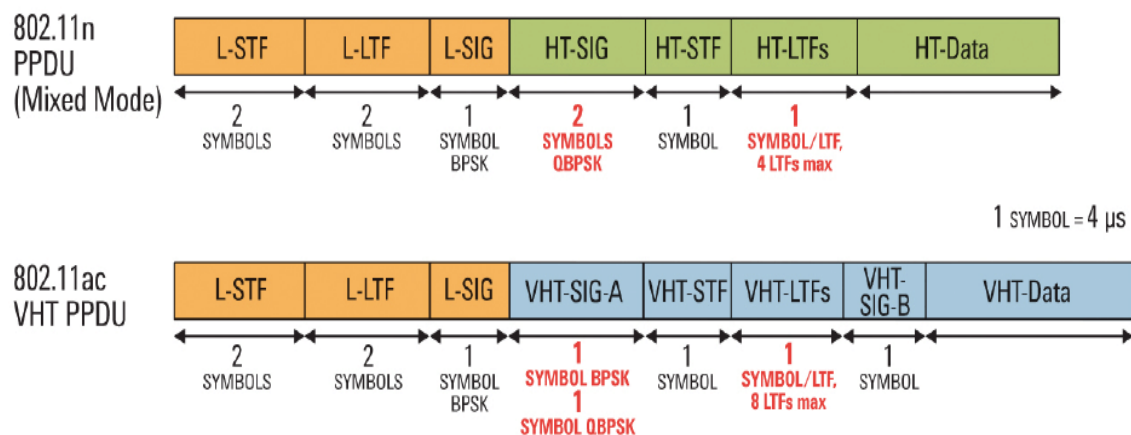


Figure 1.16 - Comparaison de trame 802.11n/802.11ac [16].

### 1.3.8 La norme IEEE 802.11ax

La norme 802.11ax ou appelé WIFI 6 également connue sous la dénomination High-Efficiency WLAN (HEW) conçue par IEEE en février 2021. Ceci afin de pouvoir fonctionner sur tout le spectre fréquentiel entre 1 et 7,1 GHz, si ces bandes sont disponibles, en complément des bandes 2,4 et 5 GHz.

La norme à haute efficacité a prévu d'offrir des débits pouvant atteindre 10 Gbits/s, en introduisant au niveau physique :

- Le canal de 160 MHz comme obligatoire et le canal de 320 MHz comme optionnel,
- La technique de modulation OFDM à accès multiple OFDMA (OFD Multiple Access),
- Les transmissions multi-utilisateurs MU-MIMO dans les deux phases DL et UL,
- La modulation d'ordre supérieur 1024-QAM.
- La communication bidirectionnelle entre un émetteur et un récepteur.
- et d'autres techniques telles que la réutilisation spatiale.

#### 1.3.8.1 OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access)

OFDMA est une technique de multiplexage et de codage des données dérivée du codage OFDM. Il permet d'optimiser pour l'accès multiple d'utilisateurs dans la même largeur de bande. L'OFDMA est principalement utilisée dans le sens de transmission DL MU-MIMO. Le principe de l'OFDMA est de répartir sur un grand nombre de sous-porteuses (min 26, maximum 996) les données numériques que l'on veut transmettre. La figure 1.17 décrit l'utilisation des sous porteuses : celles en noir, en vert et bleu (les plus nombreuses) transportent les données des utilisateurs, celles en rouge, les informations de synchronisation et de signalisation entre les 2 extrémités de la liaison radio.

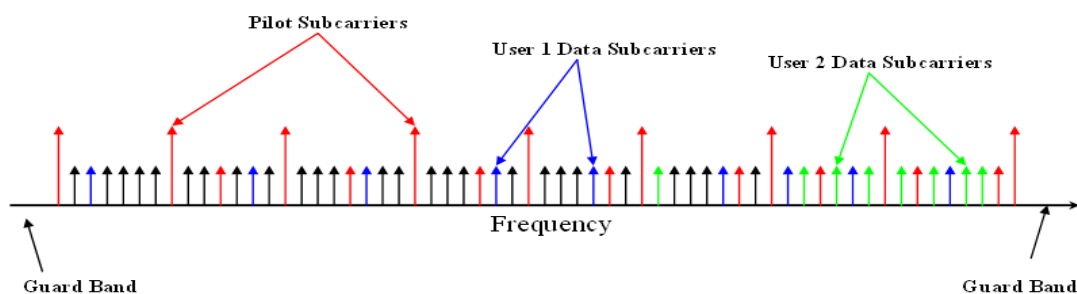


Figure 1.17 - SOUS-porteuses OFDMA [17].

### 1.3.8.2 La modulation d'ordre supérieur de 1024 QAM

Alors que l'ancienne norme 802.11ac est limitée à 256-QAM, la nouvelle norme 802.11ax incorpore un schéma de modulation optionnel extrêmement élevé 1024-QAM, avec un symbole OFDMA comportant 10 bits (voir figure 1.18).

La modulation 1024-QAM permet une augmentation de 25% du débit dans les points d'accès et les appareils Wi-Fi 6 (802.11ax). Elle prévient de permettre une connexion de plus de 30 milliards d'objets. Un débit sans fil plus élevé facilité par 1024-QAM est essentiel pour garantir la qualité de service (QoS) dans les lieux à haute densité tels que les stades, les centres de congrès, les centres de transport et les auditoriums.

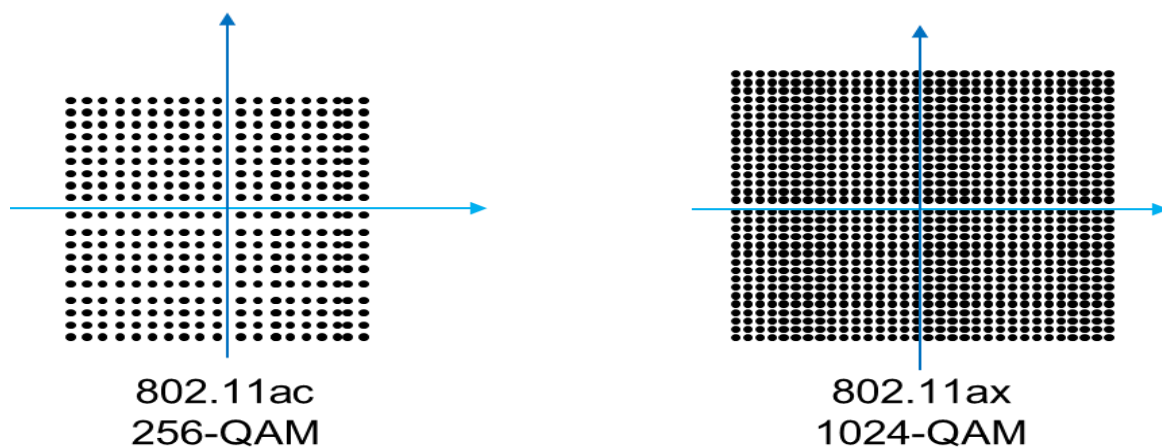


Figure 1.18 - Différence entre 256/1024 QAM [12].

### 1.3.8.3 DL/UL MU-MIMO

La norme IEEE 802.11ac inclut la prise en charge de MU-MIMO mais elle est limitée à 4 flux. De plus, 802.11ac est limité à la transmission en liaison descendante uniquement. De plus, étant donné que 802.11ac est spécifié pour un fonctionnement à 5 GHz uniquement, MU-MIMO ne peut pas être utilisé dans la bande 2,4 GHz. IEEE802.11ax prend en charge jusqu'à 8 transmissions MU-MIMO en liaison descendante et montante pour Bandes 2,4 GHz et 5 GHz. La figure 1.19 montre un scénario MU-MIMO dans lequel un point d'accès 8x8 participe à UL / DL transmissions avec quatre clients en même temps.



Figure - 1.19 DL/UL MU-MIMO [20].

Lorsque OFDMA et MU-MIMO sont utilisés simultanément, c'est-à-dire lorsque les utilisateurs sont multiplexés à la fois en fréquence et en temps domaines. Dans ce cas, la taille minimale de portions de la bande passante PPDU autorisée est de 106 tons.

UL MU-MIMO améliore le débit global et il est utile pour les longues transmissions de paquets en provenance de plusieurs STA ainsi réduire la probabilité de collisions [20].

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base des réseaux locaux sans fil basés sur le standard IEEE 802.11, ainsi que ses différentes normes qui ont contribué ensemble à son développement prodigieux. En particulier, nous avons souligné les principales modifications apportées à ce standard au niveau des couches physique et de contrôle d'accès au médium, à chaque fois qu'une nouvelle norme a été proposée.

Le prochain chapitre portera sur la norme IEEE 802.11be visant à atteindre l'extrême haut débit EHT (Extremely High Throughput) et qui est connue au nom du WIFI-7. En effet, cette norme a été apparue en 2019, elle est toujours en cours de développement. Par contre, il est prévu qu'une version finale de cette norme sera ratifiée le début de l'an 2024.

# Chapitre 2 : L'extrême haut débit dans les réseaux IEEE 802.11

---

## 2.1 Introduction

Avec l'émergence des applications de vidéo 4k/8k, et qui, dans le nombre se multiplient de plus en plus, le débit requis pour leur diffusion continuera de croître jusqu'à des dizaines de Gbits/s. Par conséquent, la prise en charge de ces applications dans les réseaux locaux sans fil dépasse de loin les capacités de la norme 802.11ax.

C'est dans ce contexte qu'a été apparue une nouvelle norme d'IEEE 802.11, c'est la norme IEEE 802.11be à débit extrêmement élevé EHT faisant référence aux réseaux WLANs de septième génération (Wi-Fi 7). Les prémices du Wi-Fi 7 remontent à mai 2019 avec la création d'un groupe de travail TGbe (Task Group IEEE 802.11be). Les travaux sont prévus durer jusqu'en mai 2024, date à laquelle la version finale du Wi-Fi 7 devrait être mise en ligne. La rétrocompatibilité avec les anciens réseaux sera de mise, aussi bien du côté des stations que des points d'accès, notamment avec le Wi-Fi 6.

Cette prochaine norme du Wifi construira ses fondations sur la norme 802.11ax en étendant l'existant et en proposant du nouveau. Ceci afin de pouvoir répondre à l'exigence de débit maximal d'au moins 30 Gbit/s. Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux objectifs de cette nouvelle norme IEEE 802.11be, décrire en détail ses principales et potentielles fonctionnalités et couvrir ainsi l'importance de la question de la compatibilité avec les anciens périphériques IEEE 802.11.

## 2.2 Présentation de la norme 802.11be

Pour atteindre les objectifs de l'EHT, Le groupe TGbe a identifié les réels défis technologiques à relever. Par ailleurs, certaines technologies PHY et MAC améliorées ont été explorées comme solutions potentielles pour surmonter ces défis.

La Figure suivante (Figure 2.1), décrit la définition actuelle de la prochaine norme IEEE 802.11be.

Nous allons définir ces différentes techniques dans la suite de ce chapitre.



Figure 2.1 - Illustration de la norme 802.11be (Wi-Fi 7) [28]

## 2.3 La couche physique IEEE 802.11be

L'amélioration de la technologie physique est le moyen le plus direct permettant d'améliorer le débit. Parmi les techniques dévoilées au niveau de la couche physique, nous citons les suivantes :

- Utiliser la bande 6 GHz (de 5,925 GHz à 7,125 GHz).
- Doubler la bande passante du canal jusqu'à 320 MHz.
- Doubler le nombre maximum de flux spatiaux à 16.
- Utiliser la modulation 4096 QAM dans des configurations spécifiques.
- Opter pour la communication full-duplex : en attribuant des canaux distincts pour transmettre et recevoir simultanément.
- Utiliser la nouvelle version de OFDMA, c'est la méthode d'accès multiple coordonné à répartition orthogonale de fréquences (Coordinated-OFDMA).
- Adopter pour la technologie MIMO distribuée (D-MIMO) qui permet à divers points d'accès d'exécuter des transmissions de données conjointes vers plusieurs STAs, en partageant les fréquences et le temps.

En effet, le fonctionnement sur de multiples liens (Multi-Link Operation) est une nouvelle technique de la couche PHY EHT permettant de transmettre des données de façon simultanée entre des stations à travers les multiples fréquences des canaux. L'objectif étant d'assigner différentes bandes de fréquence à plusieurs flux. Par contre, la coordination entre de multiples points d'accès (multi-AP coordination) est *un ensemble de fonctionnalités permettant d'augmenter le taux de réutilisation spectrale, leurs performances et celles du réseau.*

### 2.3.1 Le regroupement de canaux

Dans le domaine fréquentiel, il s'agit d'opter pour des canaux plus larges allant jusqu'à 320 MHz (voir la Figure 2.2.) dans la fréquence porteuse entre 1 et 7,250 GHz.

En effet, la bande 6 GHz qui est récemment ouverte à l'utilisation ISM, apporte des centaines de MHz disponibles au Wi-Fi 7. Un gain beaucoup plus élevé en débit est alors possible en doublant la bande passante. De plus, TGbe recommande d'exploiter plus efficacement les parties de bandes non adjacentes. Ceci du fait que les parties de la bande non adjacentes facilitent la coexistence de réseaux voisins et fournit un nombre de combinaison de canaux plus élevé si aucun spectre adjacent n'est occupé.

De ce fait, L'EHT prévient un canal large de 240 MHz en regroupant des sous-canaux adjacents de 20 MHz, 160+80 MHz non adjacents, 320 MHz adjacents et 160+160 MHz non adjacents. Désormais, les stations 802.11be peuvent opérer sur les bandes de fréquences à 2.4 GHz, 5 GHz et aussi 6 GHz sur différentes configurations de bandes passantes de canaux telles qu'elles sont illustrées dans la figure 2.3. Où le canal 160 MHz est spécifiée obligatoire, cependant, les canaux de 240 MHz et 320 MHz optionnels [28], [29].

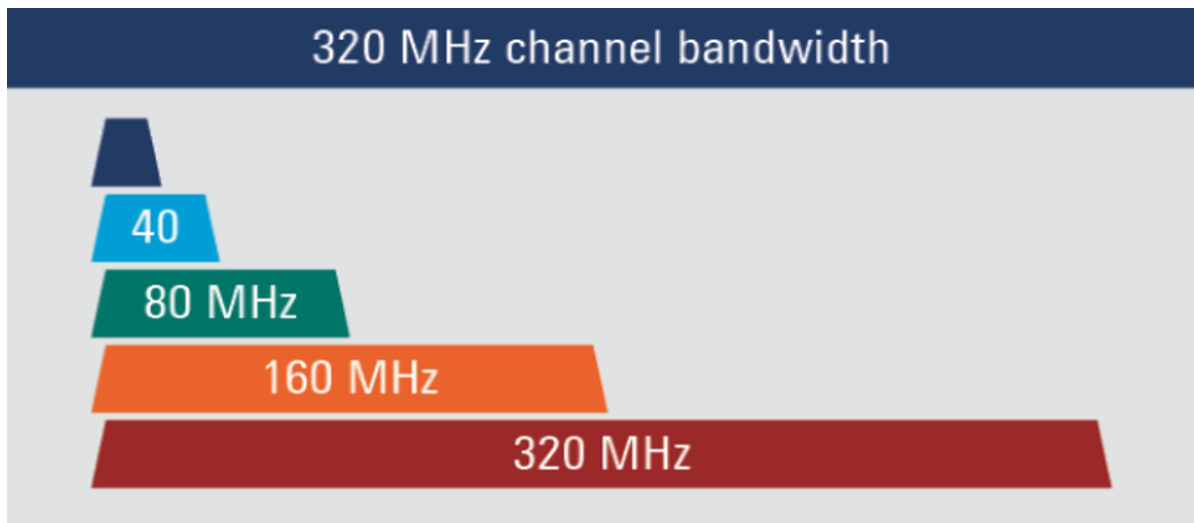


Figure2.2 - Regroupement des canaux 320 MHz

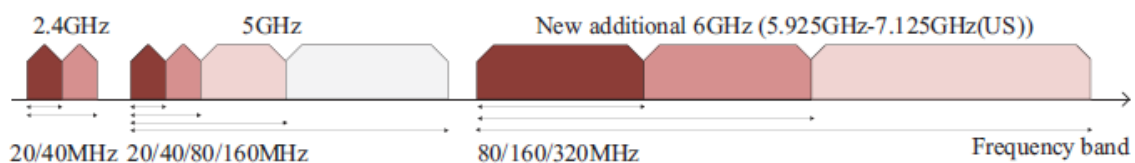


Figure - 2.3 Bande passante de la 802.11be [29]

### **2.3.2 Le multiplexage spatial**

Dans le domaine spatial, IEEE 802.11be double le nombre de flux simultanés en passant de 8 à 16 (MIMO  $16 \times 16 \times 6$ ) sur une liaison sans fil afin de renforcer la capacité de communication multi-antennes. Dans ce contexte, une nouvelle dérivée de la MIMO est proposée, c'est la technologie D-MIMO (Distributed MIMO) que nous allons voir dans la partie suivante.

Dans le cas de la MU-MIMO, le TGbe a convenu de limiter le nombre maximal de stations à 8, avec un nombre de flux spatiaux maximal vers chacune des STAs à 4.

### **2.3.3 La réutilisation spatiale**

La réutilisation spatiale vise à améliorer l'efficacité spectrale en augmentant le nombre de transmissions parallèles dans des déploiements à haute densité.

La 802.11be travaille sur la réutilisation spatiale avec coordination CSR (Coordinated Spatial Reuse), un schéma coopératif dans lequel des BSSs échangent des informations (par exemple, le niveau d'interférence acceptable supporté par les différentes stations) pour améliorer la qualité des transmissions parallèles réalisées.

La CSR opère dans le cadre de multiples points d'accès et peut être mis en œuvre avec une complexité additionnelle relativement faible. En particulier, la réutilisation spatiale converge de plus en plus vers d'autres technologies telles que les méthodes OFDMA et la formation de faisceaux (beamforming). La coordination entre les multiples points d'accès (multi-AP) est l'un des principaux sujets qui ont été discutés jusqu'à présent par les groupes de travail IEEE 802.11be, où les principales applications de la coordination sont : le beamforming coordonné (CBF) et l'OFDMA coordonné Co-OFDMA (Coordinated OFDMA).

### **2.3.4 La technique Co-OFDMA et la coordination multi-AP**

IEEE 802.11be prévient d'intégrer un nouveau mécanisme d'accès aux canaux. Il s'agit d'une extension de la technique OFDMA existante, c'est la technique Co-OFDMA. Cette nouvelle version de OFDMA permet d'optimiser l'efficacité d'utilisation du canal à la fois en temps et en fréquence, en vue que les points d'accès peuvent réserver l'unité de ressource (RU) disponible à leurs stations correspondantes d'une manière coordonnée.

Avec Co-OFDMA, les points d'accès voisins peuvent alors attribuer les mêmes ressources radio pour certaines stations si une telle transmission n'interfère pas, le cas échéant, ils peuvent attribuer différentes ressources pour éviter les interférences (voir l'exemple de la figure 2.6).

Le groupe de travail TGbe a amélioré le schéma existant de la modulation OFDMA en permettant indirectement au propriétaire de la TXOP d'allouer directement les ressources de canal aux STAs de points d'accès voisins. Cette approche nécessite une signalisation ou échange de trames de gestion supplémentaire entre les points d'accès. Cependant, cela peut améliorer l'efficacité du spectre et la flexibilité de la transmission entre de multiples APs [28].

La réutilisation spatiale coordonnée à travers la OFDMA peut s'appuyer sur les phases suivantes :

- **La phase de préparation** : c'est la phase d'écoute (ou de surveillance) du canal où des trames de gestion (ou des trames Beacon) seront échangées entre les APs afin d'évaluer la faisabilité des transmissions parallèles.
- **La phase d'organisation** : C'est la phase où le AP gagnant de la TXOP sélectionne un AP qui sera candidat à prendre la responsabilité de coordination afin de pouvoir partager la ressource radio entre les APs voisins.
- **La phase de communication** : (voir figure 2.4) L'AP coordonnateur envoie une trame de gestion indiquant l'ensemble des APs sélectionnées pour les transmissions simultanées. La trame de gestion peut comprendre des informations telles que la durée de transmission, la puissance de transmission maximale autorisée ou l'allocation de ressources pour les trames d'accusé de réception (ACK). Ensuite, les trames de données et les trames ACK peuvent être échangées entre des stations appartenant aux BSSs autorisés. Dans un BSS donné, la transmission de données, dans le cadre de la CRS, depuis l'AP aux STAs peut être effectuée par liaison descendante OFDMA (DownLink OFDMA). Par contre, les transmissions des trames ACK, dans le cadre de la CRS, depuis les STAs vers l'AP peut être effectuée par la liaison montante OFDMA (UpLink OFDMA) [42].

La faisabilité de transmissions parallèles et coordonnées revient à définir la limitation de puissance physique d'émission requise pour les bonnes réceptions des données du côté des récepteurs.

Les transmissions parallèles et coordonnées seraient être clairement une amélioration potentielle pour de nombreuses configurations de points d'accès, en particulier en réponse à l'utilisation accrue des points d'accès maillés (voir Figure 2.5).

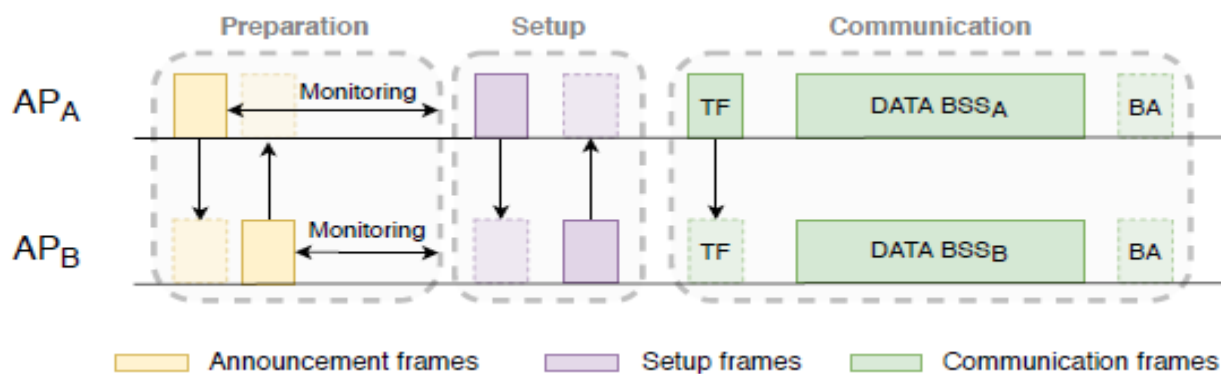


Figure 2.4 - Exemple des phases envisagées pour IEEE 802.11be en mode CSR

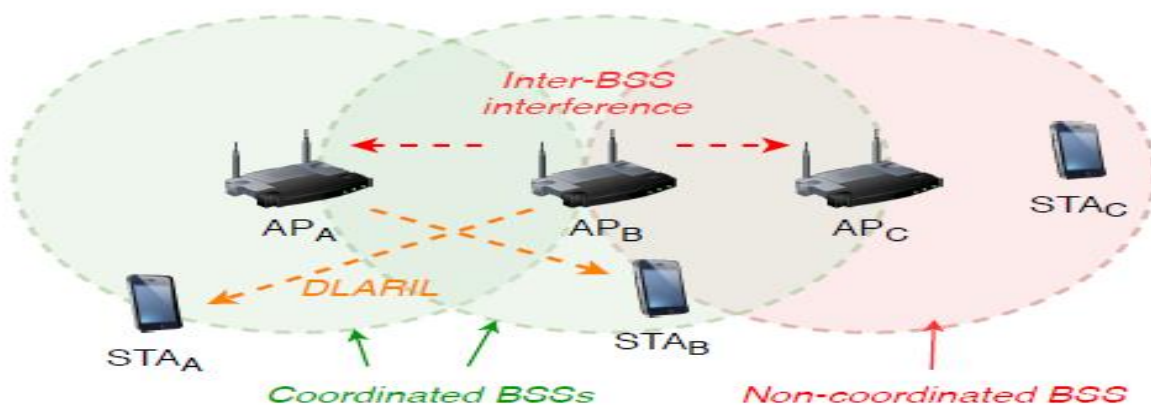


Figure 2.5 - Exemple de transmission Co-OFDMA [42]

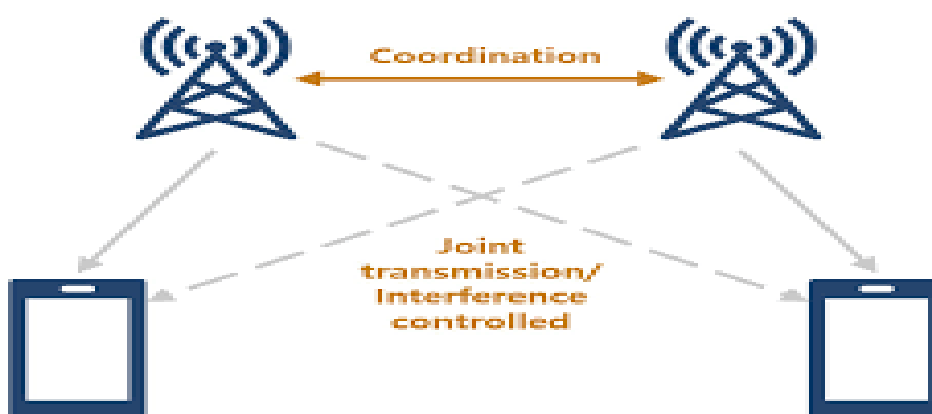


Figure 2.6 - Co-Multi PA [30]

### 2.3.5 Distributed MIMO

La solution la plus élaborée en termes de complexité de coordination envisagée par EHT est une autre amélioration de MIMO, c'est ce qu'on appelle le MIMO multi-utilisateurs distribués D-MIMO où les AP effectuent une transmission et/ou une réception conjointe des données de plusieurs STA en réutilisant les mêmes ressources temps/fréquence. Par rapport aux systèmes avec des points d'accès indépendants, une collaboration étroite entre les points d'accès via D-MIMO peut fournir une couverture étendue, grâce aux gains et à l'amélioration supplémentaires de la formation de faisceau multiplexage spatial qui apporte entre autres : augmentation de la vitesse de transfert de donnée, de la portée et de la décongestion du trafic.

Contrairement à la MU-MIMO du Wi-Fi 6 qui permet aux fabricants d'équipements de réseau de construire des points d'accès avec un arrangement à huit antennes, le 802.11be en générera 16 flux spatiaux (16×16) et cela ouvre la porte au Distributed -MIMO.

La partie "coopérative" de Distributed -MIMO vient du fait que toutes ces antennes ne doivent pas nécessairement être sur un seul point d'accès.

De ce fait, diviser ces antennes entre différents appareils signifierait une meilleure capacité à envoyer différentes données dans différents appareils, ce qui constitue une « résolution spatiale » pour les réseaux à très haute densité et augmenterait ainsi les performances globales du réseau [33].

La réalisation de ces gains nécessite une collaboration inter-AP pour traiter conjointement les données et les CSI de toutes les STA impliqués dans la transmission/réception des données, augmentant ainsi le besoin d'une grande capacité de liaisons filaires à faible latence (par exemple fibre) ou sans fil (par exemple réseau de backhauling à ondes millimétriques). Il est important de souligner que la mise en œuvre de D-MIMO dans EHT nécessiterait la conception d'un nouveau mécanisme d'accès multiple avec anticollision (CSMA/CA), conforme à la réglementation, pour optimiser accès au canal et assurer une bonne coexistence avec des points d'accès indépendants appartenant à la même zone de couverture. Cet aspect, ainsi que les caractéristiques temporelles et fréquentielles et les contraintes de synchronisation de phase imposées par le niveau PHY ont conduit EHT à proposer des implémentations D-MIMO.

La figure 2.6 montre un AP maître qui doit être visible par tous les AP collaborateurs et qui supervise les opérations du cluster. Tout en compromettant théoriquement les performances, la présence d'un point d'accès maître pourrait grandement simplifier les exigences de coordination, par exemple en permettant une synchronisation efficace dans les airs en transmettant une trame de déclenchement de contrôle aux dispositifs collaborateurs [43].

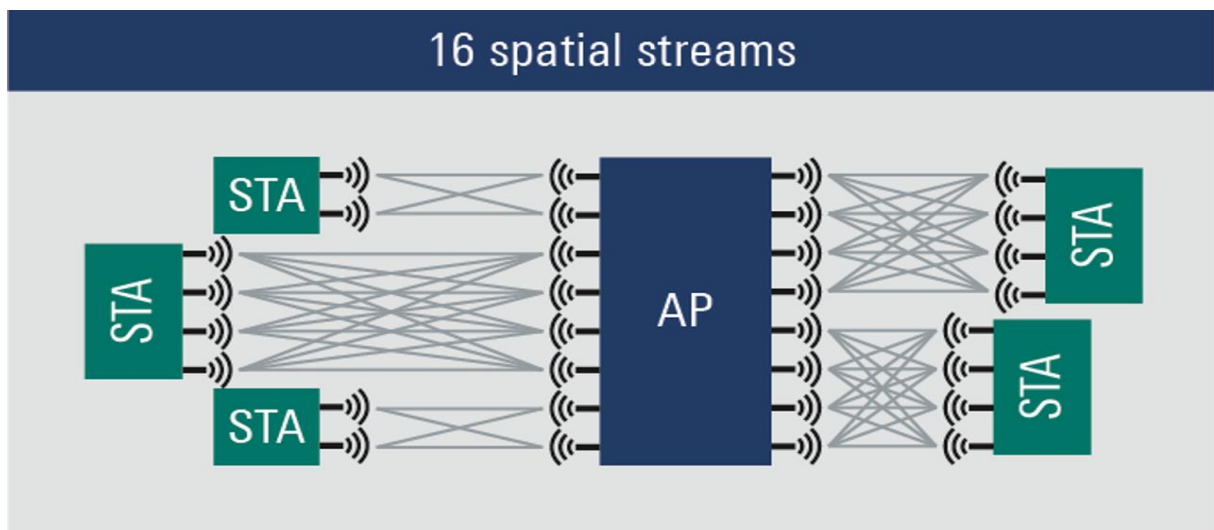


Figure 2.7 - Distributed MU DL-MIMO 16x16

### 2.3.6 Modulation d'ordre supérieur de 4096 QAM

Comme c'est le cas depuis plusieurs générations, la QAM est quadruplée pour arriver à 4096. Le passage de 256 à 1024 du Wi-Fi 6 apportait 25 % de débits en plus. TGbe recommande alors cette nouvelle stratégie de modulation en augmentant le nombre de bits par symbole OFDM à 12, et dont l'utilisation pratique, cependant, ne sera possible qu'en combinaison avec la formation de faisceau (beamforming).

En utilisant la modulation 4096-QAM, le rapport signal sur bruit SNR (Signal Noise Rate) nécessaire du côté du récepteur pour la bonne réception des trames de données est d'environ de 40 dB. Ce qui est trop élevé pour un scénario Wi-Fi typique [31].

Un tel SNR élevé peut être obtenu qu'avec la formation de faisceaux. D'autre part, cette modulation peut être fructueuse lorsque le point d'accès possède de nombreuses antennes mais qui ne serve qu'un nombre minimal de stations en employant que quelques antennes. Dans un tel cas, les transmissions MU (Multi-utilisateurs) ne pourront pas avoir lieu et le nombre de flux spatiaux sera faiblement exploité. Par conséquent, 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.

La figure suivante montre la différence dans la zone de la couverture en utilisant des différentes modulations de QAM 1024 et 4096.

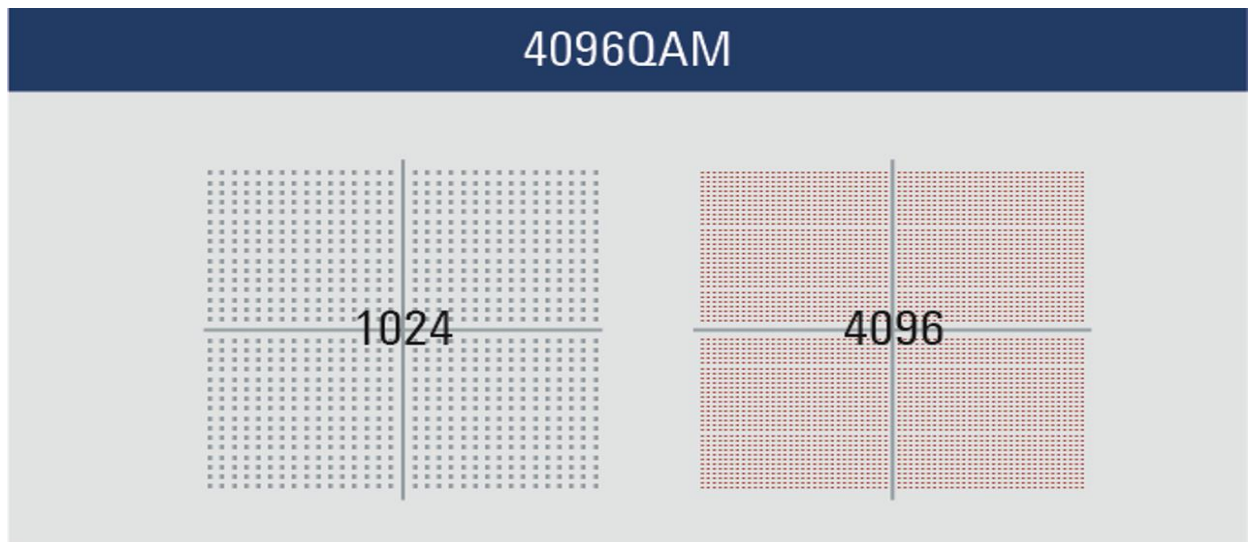


Figure 2.8 - Modulation 4k QAM

### 2.3.7 La transmission bidirectionnelle (Full Duplex)

Une autre technique qui a le potentiel d'être incluse dans les futures normes 802.11 est la transmission bidirectionnelle (Full Duplex). En janvier 2018, le groupe de travail 802.11 a formé un groupe de spécialiste afin d'étudier et d'analyser l'intérêt de la thématique de transmission bidirectionnelle (FD groupe). FD permet des 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(Full Duplex) à des fonctionnalités supplémentaires, comme la réduction des collisions ainsi 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 le FD peuvent transmettre simultanément ce qui augmente le débit. [28]

### 2.3.8 Format de trame physique

Pour prendre en charge toutes les nouvelles fonctionnalités PHY, la norme 802.11be doit modifier les formats de trame. De nombreux changements sont liés au préambule PHY des trames (voir la Figure 2.8).

Une PPDU EHT se compose d'un champ partiel (à savoir champ de formation courte non HT (L-STF), ancien Champ LTF (L-LTF), champ SIG hérité (L-SIG) et héritage répété

champ SIGNAL (RL-SIG)), un champ SIG universel (U-SIG), un champ EHT-SIG, un champ EHT Short Training (EHT-STF), un champ EHT Long Training (EHT-LTF) et un champ Data.

- Le symbole OFDM porte le champ de signal (L-SIG) qui indique quel schéma MCS est utilisé pour la transmission du signal suivant et quelle est la longueur de la trame suivante.

Les valeurs réelles du MCS, de la taille de trame et d'autres paramètres sont transmises dans les symboles d'une trame suivante selon une version particulière.

- Les formats de trame subiront alors des modifications dans la 802.11be et au-delà utiliseront la longueur L-SIG divisible par trois. De plus, les développeurs de EHT ont décidé d'arrêter la mauvaise pratique de l'indication implicite des formats de trame et ont introduit un nouveau champ, nommé SIG universel long à deux symboles OFDM (U-SIG), qui fournirait une compatibilité ascendante. [42]

Le champ L-SIG, le premier symbole après L-SIG doit être BPSK modulé dans un PDU EHT [17]. Pour améliorer la robustesse de L-SIG dans des scénarios extérieurs et identifier le PDU EHT grâce à la détection automatique, le champ RL-SIG est nécessaire et doit être différent du champ RL-SIG dans l'IEEE PDU 802.11ax

- Le champ STF et LTF suivent EHT-SIG et, comme ses analogues dans la norme 802.11ax, ils servent au réglage précis du temps et de la fréquence lorsque MIMO/OFDMA est utilisé.
- Le champ EHT-SIG se compose de champs communs et zéro ou plusieurs champs spécifiques à l'utilisateur. Les le champ commun contient des informations sur l'allocation RU, le codage, MCS, le nombre de flux spatio-temporels, la durée de l'intervalle de garde, etc.

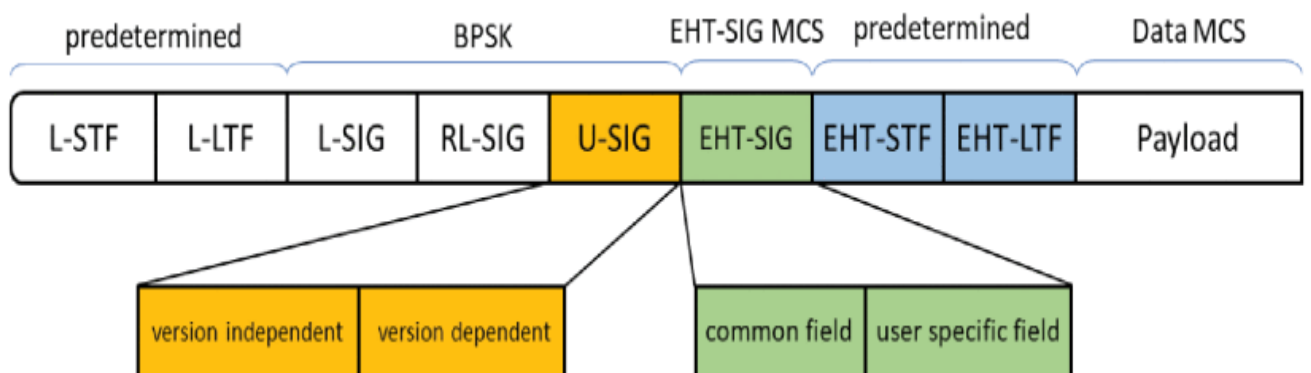


Figure 2.9 - trame physique 802.11be [29]

## 2.4 La couche MAC 802.11be

Parmi les techniques améliorantes la couche MAC 802.11be :

- Le mécanisme HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request),
- Agrégation Multi-bande/Multi-liens,
- Le schéma TXOP.

### 2.4.1 Le mécanisme HARQ

Le TGbe a prévu une nouvelle technique MAC qui est la méthode HARQ que nous allons présenter ci-dessous.

Les systèmes WiFi actuels reposent sur la retransmission des trames MPDU entièrement lorsque celles-ci ne sont pas décodées correctement au niveau du récepteur ou lorsque la trame ACK n'est pas reçue par l'émetteur.

C'est dans ce contexte que de nombreuses contributions proposent d'introduire le mécanisme de demande de répétition automatique et hybride HARQ dans les réseaux EHT.

Etant donné que, HARQ s'avère plus robuste aux erreurs au niveau du récepteur. Il permet à l'émetteur de sélectionner le schéma MCS le plus élevé de manière opportuniste. Soit la transmission se fera de façon rapide sur le bon canal, soit le récepteur extrait quand même des informations depuis le mauvais canal et ainsi décode la trame avec une grande probabilité de demande de retransmission de toute la trame [36].

Le groupe de travail IEEE 802.11be a discuté sur trois méthodes HARQ qui peuvent éventuellement être utilisées, à savoir :

- Chase Combining (CC),
- Punctured CC
- et Incremental Redundancy (IR).

Avec CC, chaque nouvelle tentative contient les mêmes informations que la transmission initiale.

HARQ permet à la trame de retransmission de ne contenir que la partie des bits d'information qui n'a pas été reçue ou encore reçue erronée. Dans ce cas, et tel que indiqué dans la Figure 2.9, pour la retransmission, l'émetteur transmet tous les MPDUs tout en maintenant le même schéma MCS qui a été utilisé à la première transmission de la trame en question. Ce qui peut maintenir le débit de transmission des données élevé.

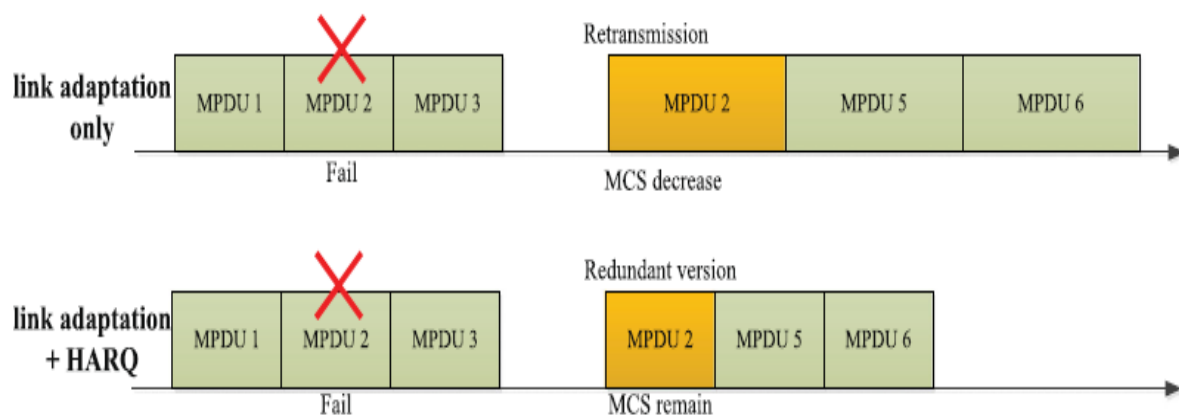


Figure 2.10 - Utilisation de HARQ pour 802.11be [40]

L'un des problèmes les plus cruciaux dans les communications sans fil, est le problème de retransmission de l'intégralité de la trame de données en cas d'erreur de transmission (voir figure 2.10)

En règle générale, dans les réseaux Wi-Fi, chaque MPDU possède un code de contrôle d'intégrité qui servira le récepteur pour déterminer si la trame reçue est correcte ou erronée. Dans le cas échéant, toute la trame MPDU est retransmise à nouveau, dont le mécanisme HARQ procède ainsi. Par conséquent, la transmission génère plus du temps et occupe le canal plus du temps que prévu, on se retrouve alors à retransmettre de trames que de suivre la transmission de nouvelles trames, ce qui peut dégrader la performance globale du réseau.

Pour la retransmission des trames erronées à moindre coût, le groupe a proposé 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 réaction 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 alors ils suggèrent qu'au lieu du remplissage MAC, les blocs HARQ pourraient contenir plusieurs MPDU et leurs fragments. Mais la surcharge de retransmission sera importante si un MPDU fragmenté tombe en panne [38].

C'est pourquoi, le groupe IEEE explique comment implémenter le protocole HARQ pour la norme 802.11be. L'adaptation du mécanisme BA est particulièrement intéressante et convient mieux aux unités MPDU et aux blocks HARQ Block. La surcharge de réaction 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 communication cross-layer PHY-MAC supplémentaire. 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 [34].

## 2.4.2 Le schéma de fonctionnement Multi-bandes/Multi-liens

802.11be prend en charge trois bandes : 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz. Plus important encore, IEEE 802.11be a l'intention d'introduire le fonctionnement multi-band. L'idée centrale est que les points d'accès ou les STA peuvent fonctionner sur plusieurs bandes au même temps et utiliser plusieurs ressources de manière efficace et dynamique, réalisant ainsi l'objectif d'améliorer le débit et de garantir le délai. Le fonctionnement multi-liens est la caractéristique la plus importante du multi-band Opération [41].

Les AP et les STA d'IEEE 802.11be peuvent installer plusieurs radios ce que leur permet de travailler simultanément sur plusieurs bandes. En fait, une seule radio peut également prendre en charge la capacité multi-band, tant que l'interférence entre les bandes adjacentes peut être suffisamment bien éliminée.

Il est nécessaire d'introduire le concept de lien, qui désigne le lien de communication qui peut envoyer et recevoir des trames. Souvent, un lien correspond à une liaison radiofréquence (RF). Différents liens peuvent fonctionner sur une ou sur plusieurs bandes, d'où le concept de multi-link est un peu plus large que multi-band.

IEEE 802.11be permet un périphérique logique MLD (device multi-link) consistant en une série d'entités physiques. Comme montré dans la Fig. 2, un MLD AP logique se compose de plusieurs AP et non-AP MLD se compose de plusieurs STA non-AP. Contrairement à l'héritage IEEE 802.11, la fonction ML d'IEEE 802.11be propose qu'une seule entité se connectant à la couche supérieure (comme la couche réseau), tandis que la fonction ML de l'héritage IEEE 802.11 a proposé que plusieurs entités indépendantes se connectent à la couche supérieure [40].

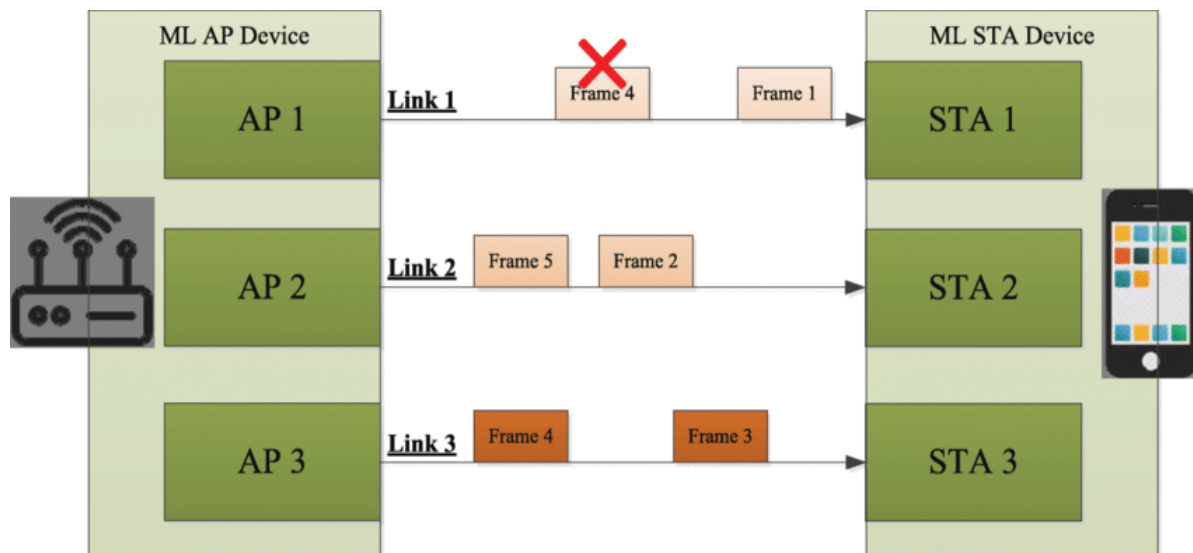


Figure 2.11 - Agrégation multi-bandes/multi-liens 802.11be [40]

Comme aussi le montre la figure 2.11, le fonctionnement Multi-liens au niveau du flux signifie qu'un AP ou STA peut allouer ses multiples flux de trafic aux liens différents, mais l'opération au niveau du flux n'autorise pas la migration des trames de données d'un flux de trafic vers d'autres liens à moins qu'un processus complexe nommé session transfert rapide (FST) est adopté.

L'Opération multi-liens au niveau du paquet fait référence au fait qu'un AP ou STA peut transférer dynamiquement l'un de ses cadres à différents liens. Cela signifie que les données des trames appartenant au même flux de trafic peuvent être hébergées sur différents liens. Si la transmission d'une trame (ex trame 4) échoue sur un lien, le processus de retransmission peut être organisé sur un autre lien. De même, l'accusé de réception de bloc BA (Block Ack) correspondant à la transmission dans un lien peut être envoyé dans d'autres liens. De toute évidence, le fonctionnement multi-liens au niveau du paquet est plus flexible et peut encore améliorer les performances du système, mais un contrôle MAC plus complexe est nécessaire.

Il existe deux types d'agrégation de ML nommés agrégation synchrone et asynchrone

- L'agrégation ML synchrone signifie que les différentes liaisons doivent simultanément transmettre et recevoir simultanément. Ce type est plus adapté aux APs ou STAs qui ne peuvent pas prendre en charge la transmission et la réception simultanées, nommées capacité non STR, en raison de l'interférence du canal adjacent problème.
- L'agrégation ML asynchrone signifie différents les liens peuvent transmettre et recevoir indépendamment, nommés Capacité STR activée.

Un cas particulier d'agrégation ML synchrone fait référence à agréger la bande passante de plusieurs bandes dans une plus large bande passante pour transmettre qu'une seule PPDU. Par exemple, voir PPDU 5 dans la Figure 2.12.

Ce mode est similaire au channel bonding (CB). Le mode normal de L'agrégation ML consiste à envoyer des PPDU indépendants sur plusieurs bandes, par ex. PPDU 1 & 2 ainsi que PPDU 3 & 4. La fonction de gestion est une fonction importante de l'IEEE 802.11, qui contribue la disponibilité et l'efficacité de WLAN.

IEEE 802.11be introduit des opérations multi-band plus fines, il s'agira donc de savoir comment inter-opérer efficacement entre plusieurs bandes, comme le balayage multi-band, association multi-band, authentification multi-band, configuration et mise à jour multi-liens, échange d'informations sur le statut migration rapide des flux de trafic, etc.

A nous jours le groupe IEEE travaille toujours à améliorer l'efficacité de la méthode de multi-band, et plusieurs techniques sont proposées.

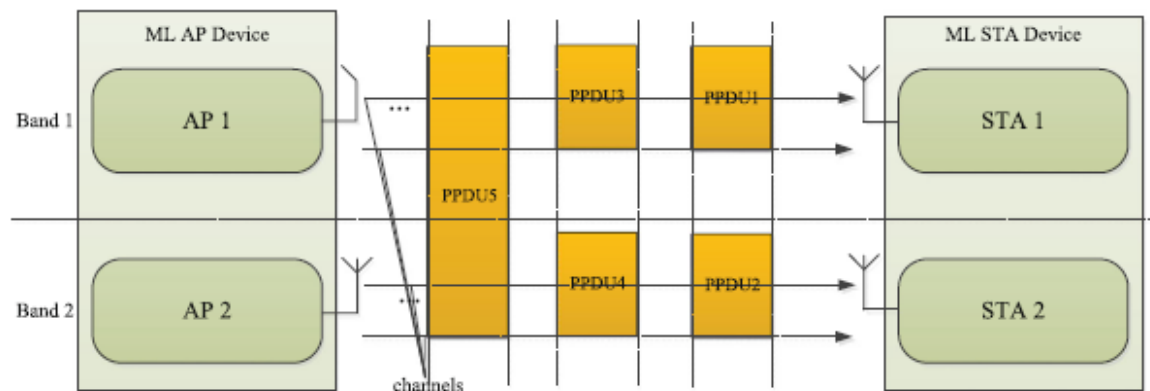


Figure 2.12 Agrégation ML Synchronique de IEEE 802.11be [40]

### 2.4.3 TXOP sharing

Le groupe de travail IEEE discute des modifications des règles TXOP. Dans les normes héritées, ayant obtenu un TXOP, une STA ne peut envoyer que les données d'un seul CA. La 802.11be peut permettre d'utiliser un TXOP de n'importe quel CA pour envoyer le trafic RTA dès que possible. De plus, un PA peut temporairement capturer la propriété TXOP de n'importe quelle STA associée pour fournir le trafic RTA. Le PA peut également accorder l'accès au canal à une autre STA si l'PA 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 [28].

Une retransmission HARQ peut se produire dans une nouvelle TXOP, ce qui nécessite des modifications minimales de la norme 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 STAs. 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 [39].

## 2.5 Conclusion

En conclusion, la norme 802.11be se développe d'une manière totalement différente de ses anciennes. Le vrai défi pour ces générations actuelles de Wifi est de pouvoir réutiliser le spectre spatial offert par la couche physique de façon optimisée, d'une part, et de garantir une meilleure qualité à moindre coût, d'autre part.

Les solutions proposées pour la norme 802.11be sont nombreuses, celles-ci reposent principalement sur la recherche de nouvelles politiques de collaboration entre de multiples points d'accès voisins, afin de réaliser une utilisation efficace des ressources entre les différents réseaux 802.11. On peut citer, dans ce contexte, la technique de modulation OFDMA avec coordination, ou Co-OFDMA. Par ailleurs, grâce au fonctionnement multi-bandes/multi-liens, les stations auront la capacité de transmettre et recevoir des données du même flux de trafic via de multiples interfaces radio. En particulier, ces flux de données dans 802.11be peuvent être transmis dans le cadre de communication bidirectionnelle. Ces variétés de protocoles au niveau physique et leur combinaison, permettra un potentiel à réduire la latence de communication et d'améliorer la productivité. La nouvelle technologie MIMO distribuée, ou D-MIMO, permettra à son tour une utilisation plus optimisée des flux spatiaux, dont le nombre sera augmenté à 16, tout en s'appuyant sur le principe de réutilisation des mêmes ressources dans le temps et dans la fréquence.

Dans le chapitre suivant, nous visons réaliser une étude comparative synthétisant l'évolution des normes du standard IEEE 802.11 depuis la première génération jusqu'à la septième, pour élaborer ensuite un état de l'art lié aux travaux de recherche de la littérature sur les réseaux 802.11be.

# Chapitre 3 Synthèse des travaux de recherche IEEE 802.11be et propositions

---

## 3.1 Introduction

Tandis que l'émergence de la nouvelle norme IEEE 802.11be qui est prévue pour l'année 2022 et une version finale est attendue pour l'année 2024, plusieurs travaux de recherches et propositions sont réalisées par le groupe de travail IEEE et par des chercheurs et professeurs pour perfectionner d'avantage la prochaine norme.

Dans ce chapitre, nous allons faire une synthèse de quelques travaux de recherches sur cette norme. Nous allons ensuite donner une proposition concernant le fonctionnement de TXOP Sharing.

## 3.2 Synthèse de travaux de recherche IEEE 802.11be

### 3.2.1 Mao Yang et al [44]

Les auteurs de cet article ont souligné que le fait d'adapter le fonctionnement multi-bandes n'est pas suffisant pour atteindre l'EHT. Par contre, il est important de faire face aux collisions provoquées par le nombre élevé des STAs dans une seule zone de couverture.

Pour cela, ils ont procédé tout d'abord à une analyse des schémas possibles de Coordination entre les APs et du fonctionnement multi-bandes MB-Opr (Multi-band operation) dans le cadre de transmission bidirectionnelles (full duplex). Ensuite, les auteurs ont proposé un schéma MAC pour la coordination AP et MB-Opr en compatibilité avec la communication full-duplex.

Les auteurs ont comparé la capacité des différents schémas MAC proposés. Ces derniers ont été divisés en 5 types comme suit :

- non MB-Opr,

- MB-Opr uniquement,
- MB-Opr avec coordination des APs,
- MB-Opr avec full-duplex,
- Coordination des APs, full-duplex et MB-Opr.

La figure 3.1 montre le principe de MB-opr proposé. Le schéma MBCB étend directement le regroupement de canaux de Dans l'ancien IEEE 802.11, plusieurs canaux 20 MHz peuvent être combinés en une plus grande bande passante, 40MHz, 80MHz et 160MHz, pour transmettre une unité de données de protocole PHY (PPDU). Notant que tous les canaux liés sont situés dans une bande de fréquence telle que 5 GHz. Dans les appareils IEEE 802.11be, pour atteindre un niveau extrêmement élevé en débit, il est permis de regrouper des canaux depuis différentes bandes de fréquences tels que 5 GHz et 6 GHz, ainsi une bande passante plus large peut être utilisé pour la transmission telle que 80 MHz + 80MHz, et 160MHz + 160MHz. Le principe est représenté dans la figure 3.1 (a).

Le schéma MBA permet aux stations 802.11be de transmettre et recevoir indépendamment des trames PPDU dans plusieurs bandes . Dans ce cas, les statons envoient des PPDU dans chaque bande plutôt que de construire une PDU unifiée en regroupant plusieurs bandes. Comparé au MBCB, le schéma MBA a plus de flexibilité. En fait, une série de thématiques doivent être étudiées pour le schéma MBA. Par exemple, est-il permis à plusieurs bandes de prendre en charge le même ou différents flux de trafic ? Comment adresser des entités dans plusieurs bandes? Comment concevoir les solutions de gestion BSS ? et etc. Le principe est représenté dans la figure 3.1(b).

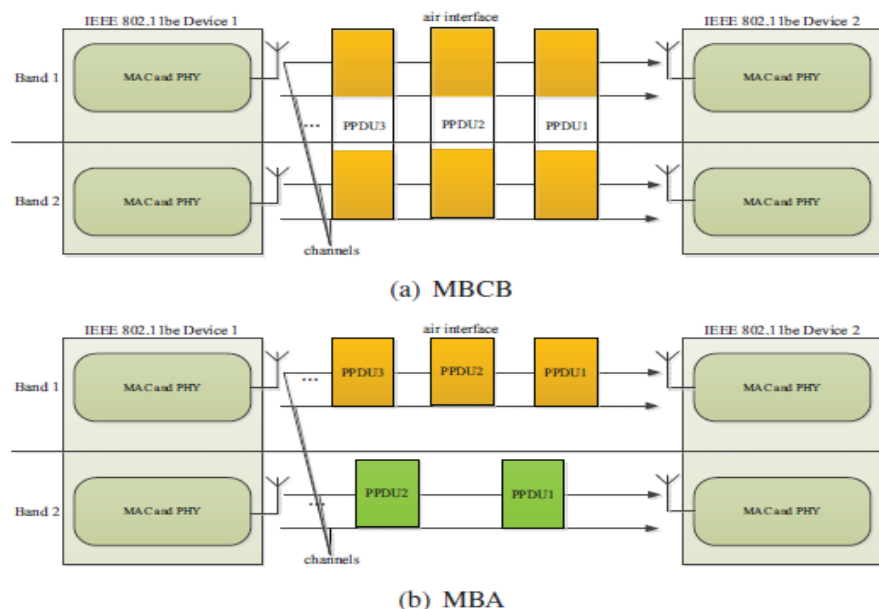


Figure 3.1 - Principe de la MB-Opr.

La figure 3.2 montre comment la station 802.11be utilise elle le schéma MB-Opr en combinaison avec la communication full-duplex..

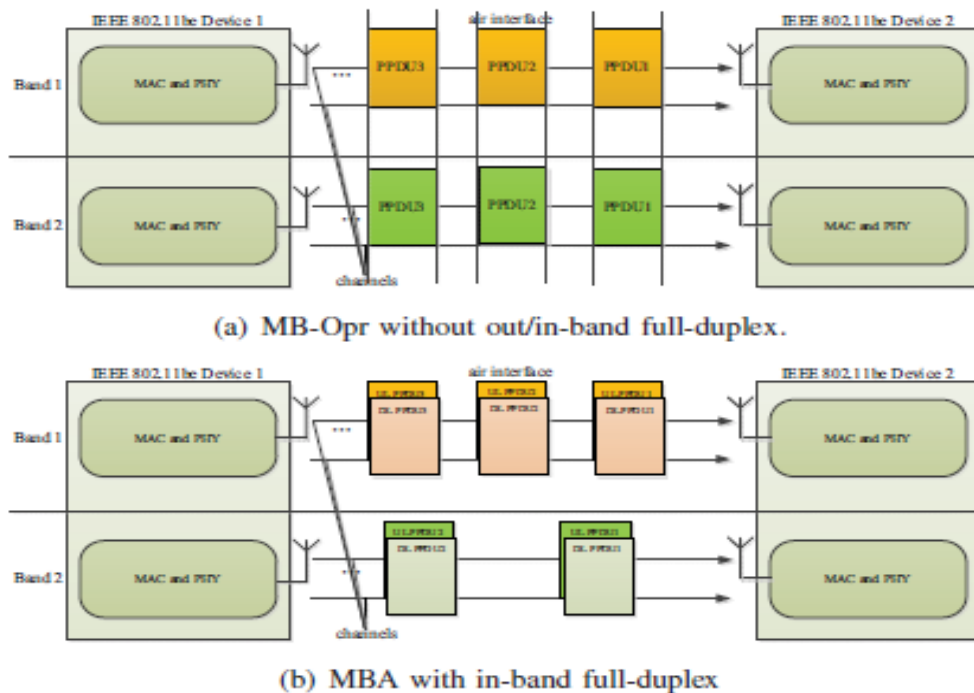


Figure 3.2 - MB-opr avec et sans full duplex.

### 3.2.2 Woojin Ah [45]

Dans cet article, l'auteur a proposé un nouveau schéma de transmission pour IEEE 802.11be. Ce nouveau schéma utilise le concept OFDMA coordonné et multi-AP déjà introduit dans les réseaux IEEE 802.11be. La transmission proposée suit la règle conventionnelle de regroupement de canaux IEEE 802.11 pour permettre aux APs de partager des opportunités de transmission (TXOPs) avec d'autres APs dans des ensembles coordonnés de APs chaque fois qu'une large bande de transmission est disponible

La figure 3.3 montre le schéma proposé. L'auteur considère un scénario dans lequel deux points d'accès de BSS WLAN adjacents dont chacun est dans la plage de transmission de l'autre, appartenant ainsi à un ensemble de AP coordonnés. Supposons que l'un des canaux secondaires d'un BSS chevauche le canal principal de l'autre. Les deux points d'accès peuvent échanger des trames pour une transmission coordonnée en étendant la bande passante du canal de transmission, suivant la politique conventionnelle de regroupement de canaux des normes IEEE 802.11.

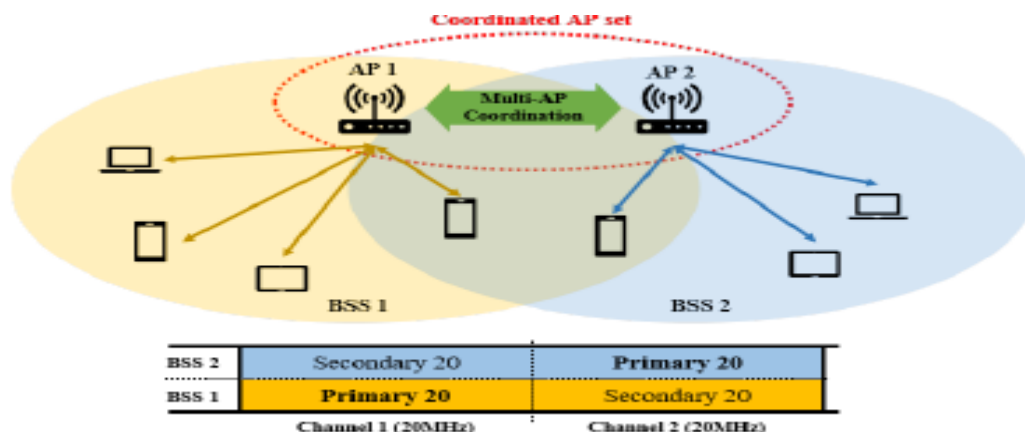


Figure3.3 - Un schéma proposé sur un scénario multi-AP coordinated.

Dans le schéma proposé, la TF est utilisée pour solliciter un PA à proximité afin de lancer une séquence de transmission coordonnée. La séquence générale de transmission du en suivant le schéma proposé est illustrée à la figure 3.4. Chaque fois qu'un AP acquiert un TXOP après avoir terminé sa procédure de retrait, il peut effectuer une transmission à sur un canal large bande si le canal secondaire est inactif pendant un temps PIFS précédant la transmission. Si la transmission à sur un canal large bande est autorisée, le AP peut choisir de transmettre une trame de déclenchement PA (ATF), une variante de TF dont le format général est illustré à la figure 3.5, à d'autres APs répondants dans le même ensemble de APs coordonnés. L'auteur considère qu'il s'agit d'un AP initial, le canal primaire étant occupé par la transmission à large bande. Dans la séquence de transmission coordonnée proposée, le AP initiateur attribue un ou plusieurs des canaux secondaires à l'un des APs répondants. Dans ce cas, le canal assigné doit inclure le canal principal du AP répondant.

L'ATF contient des informations relatives à la transmission coordonnée qui suit immédiatement l'ATF, telles que la durée de l'TXOP, la largeur de bande de l'TXOP, et l'information de canal programmée. Étant donné que tous les APs participants utilisent des canaux mutuellement exclusifs, le régime schéma proposé n'exige aucune information sur la programmation désignation des APs répondants. De plus, chaque AP utilise exclusivement le canal **ré**servéprogrammé, agissant ainsi comme support TXOP pour le canal correspondant.

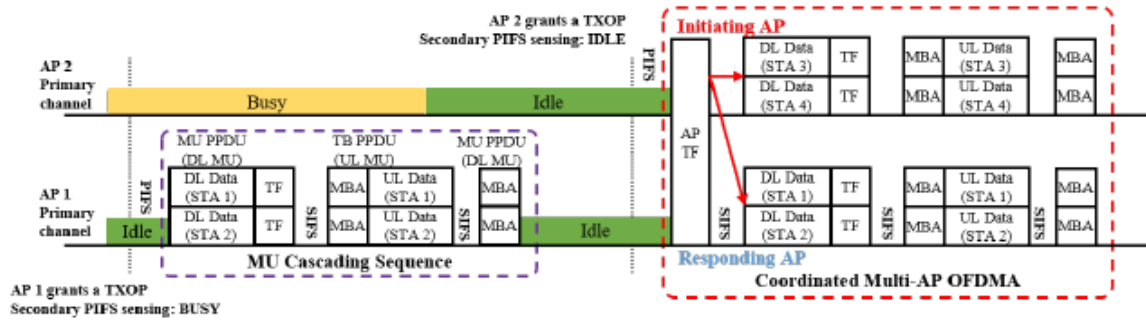


Figure 3.4 - Exemple sur AP coordonné proposé.

### 3.2.3 Sharan Naribole et al [46]

Les auteurs de cet article ont pour objective de maximiser l'utilisation de médium non-STR dans le cadre de fonctionnement multi-canaux asynchrone. Les auteurs ont proposé un nouveau schéma, nommé CA-ASYNC (Constraint Awar Asynchronous Multi-Channel Operations).

• Où les opportunités de reprendre le backoff appliqué en non-STR STAs et APs pour maximiser l'utilisation de médium sont considérées. Comme illustrées dans la figure 3.5, la reprise de backoff est appliquée dans le canal B quand les STAs non-STR ont identifié les trames reçues dans le canal A. Dans la figure 3.5.a et la figure 3.5.b, une prise instantanée des actions CA-ASYNC entre STAs non-STR est illustrée.

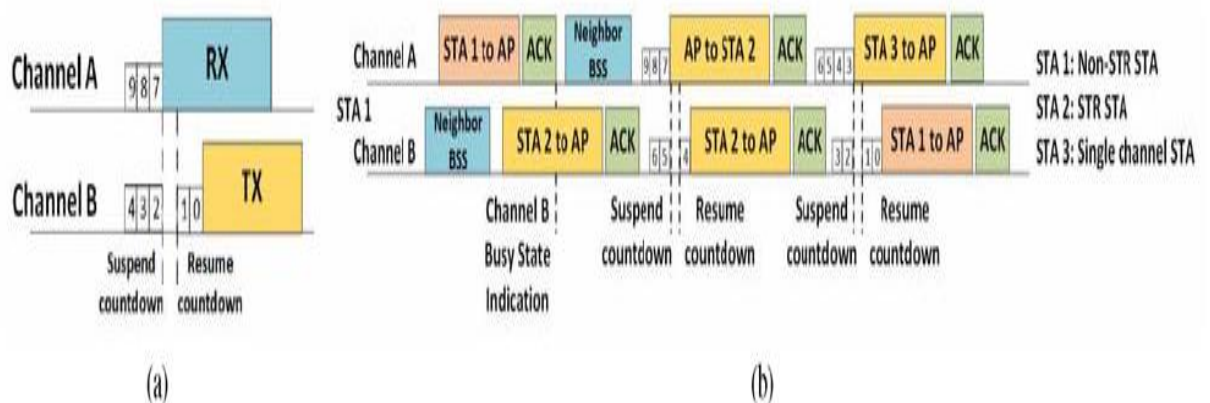


Figure 3.5 - Reprise de backoff entre STAs non-STR.

Les auteurs ont présenté les résultats de l'évaluation des performances, où ils ont d'abord comparé la performance de débit obtenu avec CA-ASYNC par rapport à d'autres stratégies d'agrégation multi-canaux. Ensuite ils ont analysé le taux de réduction des collisions ainsi les améliorations éprouvées par le schéma CA-ASYNC dans le cadre d'accès multi-canaux. Un exemple de résultat de comparaison de performance de débits analysé par les auteurs est illustré dans la figure 3.6. Cette dernière montre que le débit atteint à l'utilisation de CA-ASYNC (indépendamment de TXOP Agrégation) est 4 fois plus élevés que lorsque l'on utilise d'autres stratégies alternatives.

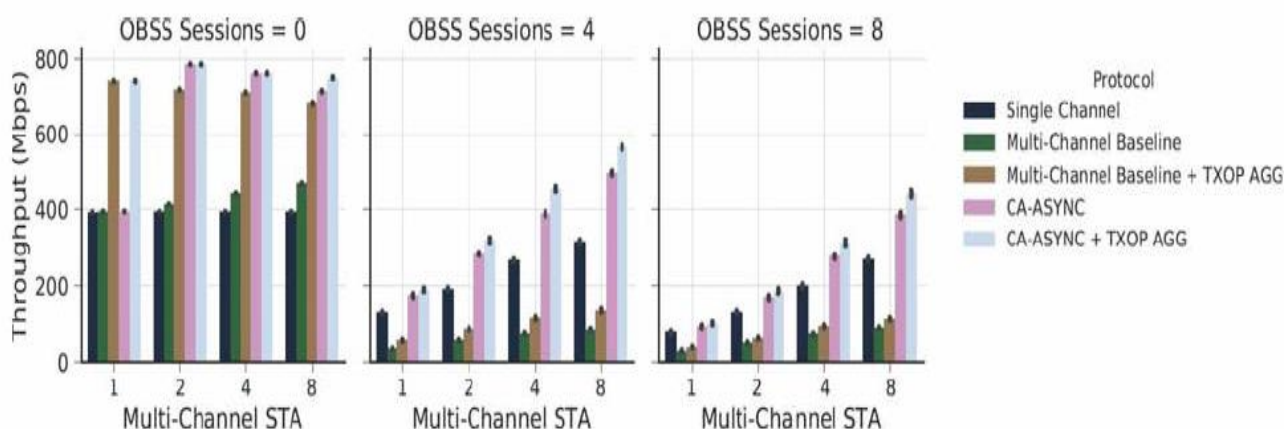


Figure 3.6 - Comparisons du débit avec CA-ASYNC et avec d'autres stratégies alternatives.

### 3.2.4 Dmitry Bankov et al [47]

Les auteurs ont étudié deux approches pour une éventuelle mise en œuvre dans la 802.11be. Les deux approches reposent sur des paramètres d'EDCA pour le trafic RTA afin que les schémas RTA soient servis sans forcément passer par la phase de la contention avec non-Trafic RTA.

La première approche consiste à réduire le temps TXOP limit pour le trafic non-RTA de sorte que le trafic RTA ne va pas attendre trop longtemps la fin des transmissions non-RTA.

La deuxième approche est fondée sur le schéma PCA (Preliminary channel acces) avec RTS/CTS. Pour activer cette approche, la modification 802.11be doit permettre aux STAs de générer un RTS sans présence de trame.

Les auteurs ont développés des modèles mathématiques pour les deux approches et qui peuvent être utilisés pour trouver leur configuration optimale.

Ces modèles développés sont ensuite utilisés pour trouver le gain en efficacité d'utilisation des canaux à partir du PCA et à partir du schéma RTA.

Les auteurs ont mis en évidence que pour le trafic RTA avec exigences de délais moyens ou avec une intensité très élevée, il est préférable de faire diminuer la limite TXOP, tandis que PCA est meilleur pour les délais limités ou des trafics qui ne sont pas trop fréquents. En même temps, la forte variation de l'heure d'arrivée de la base RTA peut réduire l'efficacité de PCA.

### 3.5 Evgeny Avdotin et al [48]

Dans cet article, les auteurs ont étudié le problème du service RTA dans les réseaux Wi-Fi de nouvelle génération avec l'utilisation de l'OFDMA. Ils ont pris en considération le scénario où les STAs RTA transmettent des données en phase UL (UP Link).

Le principal problème auquel le AP est confronté pendant la planification des ressources c'est qu'il ne sait pas quelles STAs exigent des ressources de canaux à un moment donné.

Pour résoudre ce problème, les auteurs ont proposé d'utiliser des algorithmes qui permettront les accès aléatoires, qui ces derniers utilisent l'interrogation implicite des STAs afin de prendre connaissance sur leurs besoins en ressources de canaux

Les auteurs ont montré qu'une telle approche permet non seulement de fournir un faible taux PLR dans le cas de scénarios avec un bruit élevé, mais peut réduire considérablement l'UDR c'est quoi ??? UDR, même pour les scénarios sans bruit.

Dans ce contexte, les auteurs ont proposé trois algorithmes : NUORA (Noise Resistant Uplink OFDMA Random Access), NGRA (Noise Resistant Group Resource Allocation) et NCRA (Noise Resistant Cyclic Resource Allocation).

- NUORA : Ce premier algorithme est une extension de UORA ( Uplink Ofdma Random Access) pour canaux bruités en bruits. Avec l'UORA standard, lorsqu'une STA fait un échec de transmission, la STA fait une nouvelle tentative de transmission dans le créneau suivant. De telles répétitions augmentent le retard. Au même temps, en répétant la trame dans le sens de la fréquence à la place du temps n'augmente pas le délai. Avec NUORA, l'AP alloue  $k$  unité de données RU uniquement pour RA (Rendom access). La STA, qui a des données, envoie une copie de sa trame dans  $f$  RU choisies au hasard, où est le paramètre de l'algorithme.

L'AP alloue  $k$  RU tant qu'il n'y a pas des transmissions réussies dans les RUs allouées. S'il y a uniquement des RUs vides ou des RUs avec des transmissions réussies pendant le slot, le AP repasse en mode d'attente et alloue une RU pour RTA.

Un exemple d'opération NUORA est montré dans la Figure 3.7, où les hachures rouges montrent les RUs de collision, les hachures vertes montrent les RUs qui réus-

sisent, et les chiffres signifient les STAs qui essaient de transmettre dans les RUs correspondantes.

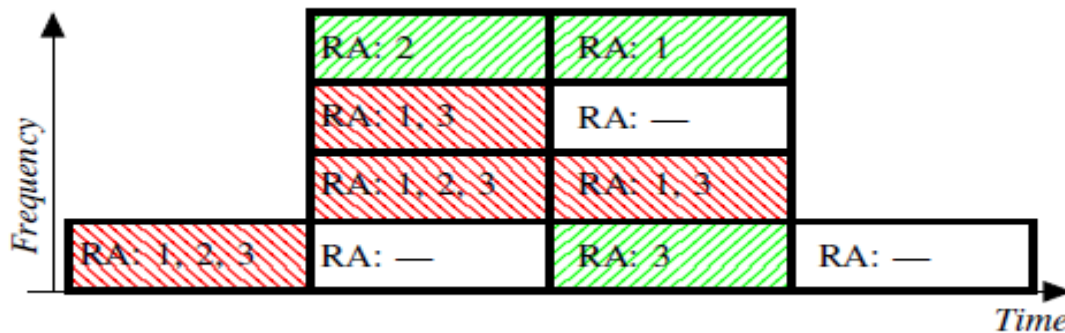


Figure 3.7 - Exemple de fonctionnement de NUORA.

$k=4$ ,  $f=2$ , STAs 1, 2, 3 ont des données à transmettre.

- NGRA : L'idée du NGRA est de répartir la charge sur les RUs, tandis que la plupart des RU restantes ne sont pas utilisées. L'algorithme GRA (Groupe Ressources Allocations) résout ce problème en divisant les STAs en groupes et en allouant une RU à chaque groupe. Les auteurs étendent cette idée dans le schéma NGRA pour rendre les transmissions plus robuste contre le bruit en effectuant  $f$  tentatives de transmission dans un intervalle de temps.

Lorsque l'AP passe en mode de résolution de collision, il marque toutes les STAs comme nécessitant des ressources. Ensuite, l'AP attribue  $f$  UR aléatoirement pour chaque STA marquée. Cependant, lors de l'attribution, il exclut les RUs affectées à  $fN \lfloor STA$ . Les STAs transmettent  $f$  copies de leurs trames de données dans les RUs affectées. Après l'emplacement, le point d'accès marque toutes les STAs qui correspondent à des RUs qui ne contenaient aucune transmission réussie comme non nécessitant de ressources. Dans le créneau suivant, l'AP alloue  $k - 1$  RUs aux STAs qui sont toujours marquées en utilisant la procédure décrite ci-dessus, et alloue également un RU pour RA, qui peut être utilisé par les STA non marquées si elles génèrent soudainement plus de données.

L'AP répète la procédure, et s'il y a des collisions dans les RUs allouée pour RA, alors toutes les STA qui étaient précédemment marquées comme n'ayant pas besoin de ressources sont à nouveau marquées comme ayant besoin de ressources.

Lorsque toutes les STAs RTA ne sont pas marquées comme nécessitant des ressources, le AP arrête la procédure et repasse en mode d'attente et alloue une RU pour RA.

Un exemple de fonctionnement de NGRA est illustré à la Fig 3.8., où « DA : x, y » signifie que les RUs sont affectées à de transmissions par les STAs x et y.

NGRA permet à plusieurs STAs d'utiliser la même RU, ce qui est une solution réalisable en cas de faible intensité de trafic RTA. Cependant, si le trafic devient intense, une telle solution peut en souffrir de collisions.

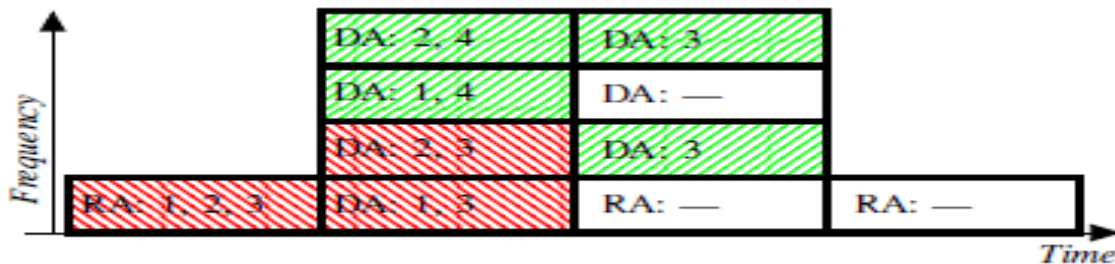


Figure 3.8 - Exemple of NGRA avec les paramètres  $N = 4$ ,  $k = 4$ ,  $f = 2$ . STAs 1, 2, 3 ont des données à transmettre.

- NCRA Une autre approche est la version améliorée de l'CRA (Cyclic Resource Allocations) algorithme. Avec NCRA, l'AP alloue une RU pour chaque RA, tandis que les RU restantes ne seront pas affectées à plus d'une STA. cycliquement Cela permet à chaque STA de transmettre  $f$  copies de leurs trames. Spécifiquement, l'AP alloue RU 0 pour RA, puis alloue les RU  $1...f$  à STA 1, RU  $+1...2f$  à STA 2, etc., jusqu'à ce qu'il atteigne la dernière RU disponible. Les STAs qui ont été attribuées aux RUs utilisent ces RUs pour transmettre leurs trames, tandis que les STAs restantes peuvent utiliser les RUs allouées pour RA s'ils ont des données. Après la fente, l'AP examine les RUs, et attribue à nouveau les RUs aux STAs, qui n'ont pas pu transmettre toute copie de leurs données dans les EF assignées. Puis l'AP continue de parcourir les STAs restantes, en attribuant  $f$  RU à chaque STA. Une telle procédure se répète tant qu'il y a sont des STAs qui n'ont pu transmettre aucune copie de leurs trames dans les RUs allouées ou il y a une transmission infructueuse dans RA. Ensuite, le point d'accès repasse en mode d'attente et alloue une RU pour RA.

Un exemple de fonctionnement de NCRA dans le cas d'un le canal silencieux est illustré dans la Figure 3.9. Une telle approche peut être plus efficace que la NGRA dans le cas où le nombre de STAs n'est pas très élevé. Au en même temps, parcourir toutes les STAs disponibles génère des délais supplémentaires car une STA doit attendre son tour pour transmettre.

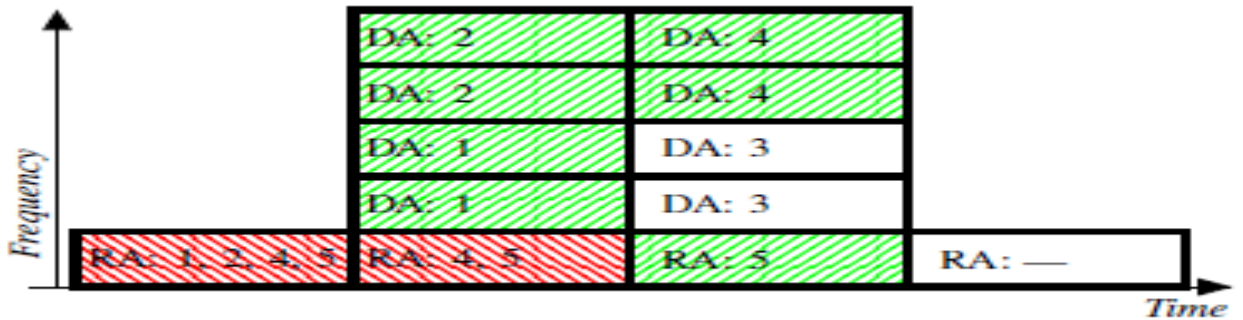


Figure 3.9 - Exemple de NCRA

### 3.3 Proposition d'une version améliorée du schéma TXOP Sharing dans le cadre de la couche PHY 802.11be

Nous proposons une version améliorée du schéma TXOP Sharing de la couche MAC 802.11ac. Il s'agit de modifier le fonctionnement du TXOP Sharing afin de supporter à la fois les transmissions multi-bandes et multi-liens proposées dans la couche PHY 802.11be.

Pour permettre les transmissions multi-canaux, l'idée étant de permettre à une catégorie d'accès gagnante d'une limite TXOP, de partager des sous-canaux de son canal, avec les autres stations physiques. Pour les transmissions multi-liens, il s'agit de partager sur la même partie du canal, ses flux spatiaux avec les autres catégories d'accès appartenant à sa classe.

Au fait, le schéma TXOP Sharing est une version améliorée du schéma TXOP Limit de la 802.11e. Le schéma TXOP Limit permet à une catégorie d'accès (classe de trafic), sur un canal de 20 MHz, d'envoyer une séquence de trames de données sans interruption, depuis un émetteur vers un récepteur.

Cependant, avec l'adoption de la technique de transmission multi-antennes vs multi-utilisateurs dans la couche PHY de la 802.11ac, les règles du schéma TXOP Limit deviennent invalides. C'est pourquoi, le schéma TXOP Sharing a été proposé dans la couche MAC pour les transmissions multi-utilisateurs. L'objectif étant d'exploiter efficacement les flux spatiaux offerts, en permettant une classe de trafic gagnante d'une TXOP, de partager sa TXOP Limit avec les autres catégories d'accès et transmettre simultanément sur le canal radio de 20 MHz.

Cependant, la couche PHY 802.11be opte pour de nouvelles techniques de transmission afin d'assurer la réutilisation spectrale, ces techniques sont entre autres : OFDMA Coordinated, Distributed MIMO et surtout le principe de fonctionnement multi-bandes vs multi-liens.

La transmissions multi-bandes concernent la possibilité de commuter entre les bandes de fréquences à 2.4, 5 et 6 GHz, dont l'objectif principal est de répondre à la question de la compatibilité avec les anciens périphériques IEEE 802.11. Par contre, la transmission multi-liens couvrent à la fois les transmissions multi-canaux et les transmissions multi-antennes.

C'est-à-dire que la station 802.11be peut opérer sur une bande de fréquence à :

- 2,4 GHz : le canal large est de bande passante de 20 MHz et en option de 40 MHz.
- 5 GHz : le canal large est de bande passante de 80 MHz et en option de 160 MHz (ou 80+80 MHz).
- 6 GHz : le canal large est de bande passante de 160 MHz (ou 80 +80 MHz) et en option de 320 MHz (ou 160 +160 MHz), et enfin la possibilité d'utilisation d'un canal de 240 MHz (ou 160 +80 MHz).

La modification que nous proposons consiste d'une part, à modifier le fonctionnement du TXOP Sharing pour permettre les transmissions multi-canaux dans la couche PHY 802.11be à 6 GHz, comme suit :

- Une catégorie d'accès se contente alors d'accéder à un canal de 160, 240 ou 320 MHz,
- Dans la phase de contention, une catégorie souhaitant accéder au canal large, suit les règles d'accès fondamentales statique ou dynamique.
- Une fois l'accès multi-canaux est acquis, elle peut se contenter sur une partie du canal gagné seulement, pour ses transmissions en rafale durant TXOP Limit.
- La catégorie d'accès peut ainsi décider avec quelles autres stations physiques à partager avec elles les autres parties restantes du canal gagné et de sa TXOP. Dans ce cas, elle est considérée comme une catégorie d'accès principale.

- Les autres stations physiques peuvent lancer leurs transmissions simultanément avec l'AC principale sur les différents sous-canaux du canal gagné.
- La désignation des autres stations physiques de d'autres réseaux peut être faites grâce au principe de coordination entre les stations par l'intermédiaire des points d'accès correspondants.
- A noter que, le principe de coordination entre de multiples points d'accès (Coordinated multi-AP) appartenant à de différents BSSs est considéré comme une amélioration innovante sur laquelle se baseront désormais les réseaux 802.11be pour atteindre le EHT.
- Le temps de transmission des catégories d'accès sur les différentes parties du canal gagné est déterminé par le temps TXOP Limit de la catégorie d'accès principale.

La modification que nous proposons consiste d'autre part, à adapter le fonctionnement du TXOP Sharing dans la couche PHY 802.11be à 6GHz pour permettre les transmissions multi-antennes, comme suit :

- Une catégorie d'accès accédant à une partie du canal gagné, peut à son tour, décider de partager son canal avec les autres catégories d'accès appartenant à sa station physique pour exploiter les flux spatiaux offerts par la MIMO.
- Le nombre de flux spatiaux offerts par la couche PHY 802.11be est égale à 16 vers un seul récepteur, et 2 vers au maximum 8 récepteurs.
- Le temps de transmission des catégories d'accès sur une partie du canal gagné est déterminé par le temps TXOP Limit de la catégorie d'accès principale.

### 3.5 Conclusion

L'étude exhaustive des travaux de recherche de la littérature sur les réseaux 802.11be nous a permis de tirer les points forts permettant d'atteindre le EHT, et les méthodes de ses normes prédécesseurs nécessitant des améliorations. C'est pourquoi, nous avons proposé un nouveau schéma d'accès au canal TXOP Sharing 802.11ac permettant des transmissions de multiples trames vers plusieurs récepteurs sous la couche physique 802.11be. C'est-à-dire en tout en tirant les avantages d'accès multi-canaux et multi-bandes.

# Conclusion générale et perspectives

---

Cette partie conclue notre mémoire en résumant nos contributions et en donnant quelques directions concernant nos perspectives.

Nous constatons aujourd'hui que le vrai défi pour les générations actuelles de Wifi est de pouvoir réutiliser le spectre spatial offert par la couche physique de façon optimisée, d'une part, et de garantir une meilleure qualité à moindre coût, d'autre part.

Dans ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à la nouvelle norme de réseaux locaux sans fil IEEE 802.11be à débit extrêmement élevé EHT, dont une version finale de normalisation est prévue d'ici l'an 2024.

En particulier, nous avons apporté de l'intérêt à la technique TXOP Sharing qui a été l'une des techniques clé spécifiée au niveau de la couche MAC 802.11ac pour atteindre le très haut débit. En effet, le schéma TXOP Sharing opère sur un canal de 20 MHz. Cependant, avec l'adoption des canaux larges depuis l'apparition de la 802.11ac, et le fonctionnement multi-bandes et multi-liens en passant de 2,4, 5 et 6 GHz dans la 802.11be, la mise à niveau de ce schéma dans le cadre de cette nouvelle couche physique, devient indispensable.

Dans cette logique, nous avons commencé notre travail par l'étude de l'évolution du standard IEEE 802.11, en mettant en évidence les améliorations PHY et MAC apportées par chaque version 802.11. La deuxième partie de notre travail est consacrée à une présentation détaillée de la norme 802.11be, qui prévient d'atteindre d'extrêmes haut débits de dizaines de Giga bits.

Cette septième génération de Wi-Fi prévient des débits théoriques allant jusqu'à 30 Gbits/s par d'adoption de nouvelles méthodes au niveau des deux couche PHY et MAC, elles sont :

Au niveau PHY,

- Le multiplexage spatial avec un nombre de flux maximum à 16 (MIMO 16×16, la nouvelle technique MIMO distribuée permettant d'exploiter efficacement ce nombre de flux spatiaux pour la transmission une quantité plus importante de flux de données,
- Un canal de transmission large allant jusqu'à 320 MHz. Avec possibilités de transmission sur des canaux non adjacents de 80+80, 160+80, 160 + 160 MHz,
- La réutilisation spatiale en se basant sur le principe de coordination à travers deux méthodes : OFDMA via la coordination entre de multiples points d'accès.
- Le fonctionnement multi-bandes/multi-liens, avec possibilité de basculant entre les bandes de fréquence à 2.4, 5 et 6 GHz.
- La modulation d'ordre supérieur 4096 QAM.

### **Au niveau MAC,**

- Le mécanisme HARQ,
- Les méthodes d'accès multi-canaux,
- L'agrégation multi-bandes/multi-liens.

L'étude exhaustive des travaux de recherche de la littérature sur les réseaux 802.11be nous a permis de tirer les points forts permettant d'atteindre le EHT, et les méthodes de ses normes prédécesseurs nécessitant des améliorations. C'est pourquoi, nous avons proposé un nouveau schéma d'accès au canal TXOP Sharing 802.11ac permettant des transmissions de multiples trames vers plusieurs récepteurs sous la couche physique 802.11be. C'est-à-dire en tout en tirant les avantages d'accès multi-canaux et multi-bandes.

Dans la continuité du travail que nous avons présenté, nous pourrions envisager les perspectives suivantes :

- L'adaptation du schéma RTS/CTS amélioré dans la norme 802.11be.
- Modification du fonctionnement des méthodes statique et dynamique dans le cadre de canaux non-adjacents.

# Bibliographie

---

- [01] [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11\\_\(legacy\\_mode\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11_(legacy_mode)) consulté (21/05/2021).
- [02] Mammeri Souhila et Mazouz Asma, Méthodes d'accès Max multicanaux avec Qos: Etude, proposition et évaluation de performances.
- [03] [https://www.commscope.com/blog/2016/the-theory-of-wi-fi-evolution-and-ieee-802.11-selection/?utm\\_source=ruckus&utm\\_medium=redirect23:21](https://www.commscope.com/blog/2016/the-theory-of-wi-fi-evolution-and-ieee-802.11-selection/?utm_source=ruckus&utm_medium=redirect23:21) consulté (21/05/2021).
- [04] Livre Wifi professionnel édité par Aurélien Geron et Préface de Marc Taieb.
- [05] <http://www.mcours.net/cours/pdf/leilcllic3/leilcllic964.pdf> consulté (21/05/2021).
- [06] HAOUARI Siham et GADOUM Loubna, Modélisation Analytique de la norme IEEE 802.11e mode EDCA Bloc ACK avec les chaînes de Markov.
- [07] [https://www.journaldunet.com/solutions/cloud-computing/1032482-demystifier-le-802-11n-et-son-deploie-ment/#:~:text=Le%20regroupement%20des%20canaux%20sp%C3%A9cifi%C3%A9,seul%20canal%20%C3%A0%2040%20MHz.](https://www.journaldunet.com/solutions/cloud-computing/1032482-demystifier-le-802-11n-et-son-deploiement/#:~:text=Le%20regroupement%20des%20canaux%20sp%C3%A9cifi%C3%A9,seul%20canal%20%C3%A0%2040%20MHz.) Consulté (21/05/2021)
- [08] <https://le-routeur-wifi.com/normes-wifi-802-11/> consulté (22/05/2021).
- [09] Benlala Wissam, Proposition et évolution d'un protocole MAC OFDMA avec des données de longueurs variables dans les réseaux HEW)
- [10] Magazine 0163-6804/13/\$25.00 © 2013 IEEE IEEE Communications Magazine • October 2013
- [11] <https://ecomputernotes.com/digital-electronics/digital/direct-sequence-spread-spectrum> consulté (25/05/2021).
- [12] <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100081215> consulté(25/05/2021).
- [13] <https://laptopsuggest.com/about-technology/what-is-mu-mimo> consulté(26/05/2021).
- [14] [https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm\\_basicprinciplesoverview.htm](https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm) consulté (01/10/2021).
- [15] Enhancement of the TXOP Sharing designed for DL-MU-MIMO IEEE 802.11ac WLANs Réalisés par Mohand Yazid, Adlen Ksentini, Louiza Bouallouche-Medjkoune, et Djamil Aïssani \*LaMOS Research Unit, Faculty of Exact Sciences, University of Bejaia, 06000 Bejaia, Algeria.

[16] <http://pervasivecomputinginfo.blogspot.com/2017/05/ieee-80211ac.html> consulté (26/05/2021).

[17] <https://fr.wikipedia.org/wiki/OFDMA> consulté 05/10/2021

[18]

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fsupport.huawei.com%2Fenterprise> consulté (27/05/2021).

[19] <https://mrnciew.com/2013/04/11/a-mpdu-a-msdu/> consulté (27/05/2021)

[20] <https://www.artista.com/assets/data/pdf/Whitepapers/MU-MIMO-Whitepaper.pdf> consulté (28/05/2021)

[21] Mémoire de thèse doctorat présenté par Lucien Loiseau intitulé De l'exploitation des réceptions opportunistes dans les mécanismes de relayage pour les réseaux sans fil l'Université européenne de Bretagne 2013

[22] Soutenance de thèse doctorat présenté par Me YAZID Mohend sur le thème Evaluation et optimisations des performances des réseaux locaux sans fil IEEE 802.11 en 2015.

[23] Mohand Yazid, Louiza Bouallouche –Medjkoune, Djamil Aïssani sur Performance Study of Frame Aggregation Mechanisms in the New Generation WiFi . et sur site web <http://ceur-ws.org/Vol-1689/paper7.pdf> consulté (01/10/2021).

[24] Souhila Mammeri \*, Mohand Yazid, Louiza Bouallouche-Medjkoune, Asma Mazouz sur Performance study and enhancement of multichannel access methods in the future generation VHT WLAN en 2017.

[25] Souhila Mammeri a, Mohand Yazid a, Rahim Kacimi b, Louiza Bouallouche-Medjkoune a sur Starvation avoidance-based dynamic multichannel access for low priority traffics in 802.11ac communication systems en 2020

[26] Oscar Bejarano and Edward W. Knightly sur IEEE 802.11ac: From Channelization to Multi-User MIMO.

[27]- Soutenance de Doctorat LMD en Informatique Présentée par Melle. Souhila MAMMERRI sur le thème Evaluation et Optimisation des Performances des Réseaux Locaux Sans Fil à Très Haut Débit.

[28]- <https://ieeexplore.ieee.org/document/9090146?denied=>, consulté le (16/06/2021).

[29] High Efficiency Wireless LAN Task Group, "Status of Project IEEE 802.11ay," IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee. [Online].

Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8805284> consulté le 25/06/2021.

[30] A. Asterjadhi and E. Au, Compendium of Motions Related to the Contents of the TGbe Specification Framework Document, Jan. 2020.

[31] S. Schelstraete, D. Dash and I. Latif intitulé Feasibility of 4096QAM et publié en Mars. 2019.

[32] A. Garcia-Rodriguez, D. Lopez-Perez, M. Kasslin, O. Alanen and L. Galati intitulé Coordinated Null Steering for EHT publié en Mai 2019.

[33] S. Vermani, A. Chen, B. Tian and Y. Kim intitulé "Forward Compatibility for WiFi Preamble Design publié en Sep. 2019.

[34] S. Shilo, N. Basson, E. Melzer, Y. B. Arie, M. Reich, D. Ezri, et al., Revisiting HARQ Complexity, Jan. 2020.

[35] J. Kim, T. Song, E. Park, D. Lim and J. Choi, Channel Coding Issue in HARQ, Sep. 2019.

[36] L. Wilhelmsson, S. Moloudi and M. Lopez, Some Results on HARQ Performance in Dense Deployments, Jul. 2019.

[37] I. Latif, S. Schelstraete, D. Dash and H. Wang, HARQ Framing, Jul. 2019

[38] Y. Zhang, H. Zhang, S. Srinivasa, L. Chu, R. Cao and M. Yu, Comparisons of HARQ Transmission Schemes for 11be, Jun. 2019.

[39] R. Duan, M. Ibrahim, W. B. Lee and S. Kandala, Discussion on HARQ, Sep. 2019.

[40] Mao Yang · Bo Li intitulé Survey and Perspective on Extremely High Throughput (EHT) WLAN—IEEE 802.11be.

[41] Naribole S, Kandala S, Lee WB, Ranganath A (2019) Multi-link aggregation considerations. Doc : Ieee 802.11-19/1181r0. IEEE TGbe Proposal, pp 1–9.

[42] Thèse doctorat ,Giuseppe Pedone sur Implementazione ed Ottimizzazione di Tecniche di Ridondanza WiFi a Livello Applicativo en anglais : Implementation and Optimization of Techniques of Level WiFi redundancy Application

[43] Thèse doctorat Boris Bellalta, Cristina Cano & Anders Jonsson Towards Spatial Reuse in Future Wireless Local Area Networks: a Sequential Learning Approach.

[44] Mao Yang, Bo Li, Zhongjiang Yan, Yuan Yan sur AP Coordination and Full-duplex enabled Multi-band Operation for the Next Generation WLAN: IEEE 802.11be (EHT)

[45] Woojin Ahn sur Novel Multi-AP Coordinated Transmission Scheme for 7th Generation WLAN 802.11be

[46] Sharan Naribol Wook Bong Lee ,Srinivas Kandala And Ashok Ranganath Simultaneous Transmit-Receive Multi-Channel Operation In Next Generation WLANs

[47] Dmitry Bankov, Kirill Chemrov, Evgeny Khorov sur Tuning Channel Access to Enable Real-Time Applications in Wi-Fi 7

[48] Evgeny Avdotin, Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov sur Resource Allocation Strategies for Real-Time Applications in Wi-Fi 7