

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ A. MIRA-BEJAIA
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT INFORMATIQUE

Mémoire

Présenté par :
M^r MOKTEFI Mohand

Pour l'obtention du diplôme de Magister
Filière : Informatique
Option : Cloud Computing

Thème :

*Proposition et validation d'un protocole MAC
pour les futures générations de réseaux WiFi*

Soutenu le : 14/01/2016

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom		Grade		
M ^r Djamil	AISSANI	Professeur	Université de Béjaïa	Président
M ^{me} Louiza	BOUALLOUCHE	Professeur	Université de Béjaïa	Rapporteur
M ^r Abdellah	BOUKERRAM	Professeur	Université de Béjaïa	Examineur
M ^r Fouzi	SEMCHEDINE	M.C.A	Université de Setif	Examineur
M ^r Mohand	YAZID	M.C.B	Université de Béjaïa	Invité

Année Universitaire : 2015-2016

Remerciements

J'E tiens tout d'abord à remercier dieu qui m'a donné la santé et le courage d'accomplir ce travail.

J'E dois une reconnaissance particulière à Mme L.Bouallouche, mon honorable promotrice, pour la qualité de son orientation tout au long de ce travail. Elle est toujours très disponible et ouverte à la discussion ce qui m'a permis de bénéficier de son grand savoir dans ce domaine de travail.

J'E tiens à adresser mes vifs remerciements et à exprimer ma gratitude à Mr M.Yazid je remercie également le membre de jury d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

J'E peut pas oublier de saluer l'ensemble des dirigeants, travailleurs et étudiants(es) de l'université Abderrahmane Mira Bejaia, en particulier les étudiants(es) de notre promotion.

E^N fin, mes remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail : A
mon frère Juba à titre posthume, ton souvenir
reste à jamais gravé dans ma mémoire. Que
dieu ait pitié de ton âme ; A mes parents, pour tant
de sacrifices consentis et pour tant d'amour à mon
égard que dieu vous accorde une longue vie ; A
mes deux sœurs, pour leur soutien ; A toute
la famille, A mes amis et collègues pour
leurs encouragements et leur affectueuse
présence ; A tous ceux qui
m'ont aidé et A toi qui
lis ce mémoire



"La nature humaine n'est ni bonne ni mauvaise, mais ouverte vers une continuelle transformation et transcendance. Elle n'a qu'une chose à faire, se découvrir elle-même." Marilyn Ferguson,
Les enfants du verseau.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	1
Introduction générale	2
1 Réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11	5
1.1 Introduction	5
1.2 Généralités sur les réseaux sans fil	5
1.2.1 Définition et description des réseaux sans fil	5
1.2.2 Classification des réseaux sans fil	6
1.3 Présentation du standard IEEE 802.11	7
1.3.1 Couches de la norme 802.11	8
1.3.2 Couche physique	9
1.3.2.1 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)	10
1.3.2.2 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	10
1.3.2.3 HR-DSSS (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum)	10
1.3.2.4 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	11
1.3.3 Couche MAC	12
1.3.3.1 Espaces entre deux trames	13
1.3.3.2 Algorithme de backoff exponentiel BEB (Binary Exponentiel Backoff)	13
1.3.3.3 Le mode Distributed Coordination Function (DCF)	14
1.3.3.4 Le mode Point Coordination Function (PCF)	14
1.4 Présentation de l'IEEE 802.11e	15

1.4.1	Méthode HCF basée sur la contention (EDCA)	16
1.5	Agrégation des trames	18
1.6	Conclusion	20
2	Présentation des normes IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad	22
2.1	Introduction	22
2.2	La norme IEEE 802.11ac	22
2.2.1	Fonctionnement obligatoire dans la bande de fréquence 5 GHz	23
2.2.2	Largeurs des canaux pris en charge	23
2.2.3	Couche Physique	24
2.2.3.1	Modulation d'ordre supérieur 256-QAM	24
2.2.3.2	La technique MIMO d'ordre supérieur	26
2.2.3.3	La technique Multi-User MIMO (MU-MIMO)	26
2.2.4	Améliorations de la couche MAC	27
2.2.4.1	Le mécanisme TXOP sharing :	27
2.2.4.2	Les méthodes d'accès multi-canaux	28
2.3	La norme IEEE 802.11ad	30
2.3.1	La bande de fréquence millimétrique	30
2.3.2	La couche physique de la norme IEEE 802.11ad	31
2.3.2.1	Structure d'un paquet 802.11ad	31
2.3.2.2	Systèmes de modulation et de codage	34
2.3.3	La couche MAC IEEE 802.11ad	35
2.3.3.1	Architecture d'un réseau 802.11ad	36
2.3.3.2	Accès au canal IEEE 802.11ad	37
2.3.4	Le protocole BeamForming	39
2.3.5	Fast Session Transfer	40
2.3.6	Procédure de communication dans la norme 802.11ad	40
2.4	Conclusion	42
3	Proposition et validation d'un protocole MAC dans la norme 802.11ad	44
3.1	Introduction	44
3.2	Méthodes d'accès au canal	44
3.2.1	Les protocoles basés sur la contention	44
3.2.2	Méthodes d'accès planifiées (Scheduled)	45
3.3	Etat de l'art sur l'analyse des performance de IEEE 802.11ad	46
3.4	Discussion	52
3.5	Proposition d'un protocole MAC multi-canaux pour les réseaux IEEE 802.11 ad	53
3.5.1	Motivation	53
3.5.2	Contraintes et problématique	53

3.5.3	Fonctionnement général	55
3.6	Modélisation et Validation	57
3.6.1	Modèle analytique de Bianchi	57
3.6.2	Les résultats numériques	60
	Conclusion générale	64
	Résumé	1

Table des figures

1.1	Classification des Réseaux sans fil selon la portée de communication	7
1.2	Notion de cellule dans la norme IEEE 802.11	7
1.3	Architecture type d'un WLAN 802.11	8
1.4	Modèle en couches de la norme 802.11	9
1.5	Décomposition de la bande ISM en sous canaux de 20 MHz	11
1.6	Un canal dans OFDM	12
1.7	Un exemple de transmission en mode DCF	14
1.8	Fonctionnement du mode PCF	15
1.9	Architecture MAC d'IEEE 802.11e [1]	16
1.10	Le mécanisme d'accès EDCA [2]	17
1.11	Une rafale de paquets contrôlé par TXOPlimit [2]	18
1.12	Backoff virtuel des quatres classes de trafic [2]	18
1.13	Agrégation à deux niveaux [56]	20
2.1	Chronologie du standard 802.11	23
2.2	Regroupement des canaux dans la norme 802.11ac [8]	23
2.3	Diagramme de constellation 256-QAM [32]	25
2.4	Multi-User MIMO (MU-MIMO)[37]	26
2.5	Agrégation des trames dans la couche MAC de la norme 802.11ac[37]	28
2.6	Accès statique	29
2.7	Accès dynamique	29
2.8	Spectre électromagnétique [23]	30
2.9	Allocation de bandes de fréquence autours de 60 GHz dans différents pays[57]	31
2.10	Structures de paquets DMG PHY 802.11ad [60]	32
2.11	Variante de préambule exprimées en séquences de Ga128 et de Gb128	33
2.12	La structure du champ Header	34
2.13	Architecture MAC de la norme IEEE 802.11ad	36
2.14	Architecture d'un réseau PBSS IEEE 802.11ad	37

2.15	Super Trame du 802.11ad	37
2.16	Schéma d'aggregation de la norme IEEE 802.11ad	39
2.17	Protocole de training dans le 802.11ad	40
2.18	La procédure de communication dans la norme 802.11ad	41
3.1	Méthodes d'accès FDMA	45
3.2	Méthodes d'accès TDMA	45
3.3	Méthodes d'accès CDMA	46
3.4	Structure de super trame 802.11ad	47
3.5	Efficacité CSMA/CA dans 60 GHz	47
3.6	Efficacité TDMA dans 60 GHz	48
3.7	Efficacité du Polling dans 60 GHz	49
3.8	Différents niveaux du faisceau dans 802.11ad IEEE.	52
3.9	Bénéfice de la communication multi-canaux par rapport à une communication mono-canal	54
3.10	Problèmes multi-canaux du nœud caché et de surdité	55
3.11	Protocole Mac multi-canaux proposé	55
3.12	Modèle analytique de Bianchi	58
3.13	Débit en fonction nombre de canaux	61
3.14	Débit en fonction de la taille MPDU	62
3.15	Le débit en fonction du nombre A-MPDU envoyés	62

Liste des tableaux

1.1	Le nombre de sous canaux utilisés pour le FHSS	10
1.2	Fréquences centrales des sous canaux du mode DSSS	11
1.3	Table de correspondance entre types d'application et les ACs [19]	16
2.1	Résumé des schémas de modulation et de codage (MCS) pour la norme 802.11ac[6]	24
2.2	Les phases TXOP sharing 802.11ac	27
2.3	Résumé des schémas de modulation et de codage (MCS) de la norme 802.11ad .	35
3.1	Les paramètres utilisés dans les simulations	61

Liste des abréviations

A

A-BFT	Association Beamforming Training
AC	Access Category
AC-BE	Best Effort Access Category
ACK	Acknowledgement
AC-VI	Video AC
AC-VO	Voice AC
AGC	Automatic Gain Control
AIFS	Arbitration Interframe Space
A-MPDU	Aggregate MAC Protocol Data Unit
A-MSDU	Aggregate MAC Service Data Unit
AP	Access Point
ASK	Amplitude Shift-Keying
AT	Transmiter Address
ATI	Announcement Transmission Interval

B

BEB	Binary Exponential Back-off
BI	Beacon Interval
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BRP	Beam Refinement Phase
BSA	Basic Set Area
BSC	Base Station Controller
BSS	Basic Service Set
BTS	Base Transceiver Station

C

CBAP	Contention-Based Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CCK	Complementary Code Keying
CEF	Channel Estimation Field
CFP	Contention Free Period
CP	Contention Period
CPB	Period Based Access
CPL	courants porteurs en ligne

	CRC	Cyclic Redundancy Check
	CSI	Cyclic Shifted Identity
	CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
	CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
	CTS	Clear to Send
	CW	Contention Window
D		
	DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
	DCF	Distributed Coordination Function
	DIFS	DCF Interframe Space
	DLP	Direct Link Protocol
	DMG	Directional Multi-Gigabit
	DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
	DS	Distribution System
	DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
	DTI	Data Transmission Interval
	DTP	Dynamic Tone Pairing
	DTT	Data Transfer Time
E		
	EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
	EDCF	Enhanced DCF
	EPCF	Enhanced PCF
	ESS	Extended Service Set
F		
	FCS	Frame Check Sequence
	FFT	Fast Fourier Transform
	FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
	FSK	Frequency Shift Keying
	FST	Fast Session Transfer
G		
	Gbps	Gigabit per second
	Ghz	Gigahertz
	GI	Golay Interval
	GSM	Global System for Mobile
H		
	HB	High Band
	HC	Hybride Coordination

I	HCCA	Hybrid Controled Centention Access
	HCF	HC Function
	HCS	Header Check Sequence
	HD	High Definition
L	IBBS	Independant Basic Service Set
	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
	IFS	Inter-frame Spacing
	IR	Infrared
	ISM	Industrial, Scientific and Medical
	ISO	International Organization for Standardization
M	LAN	Local Area Network
	LB	Low Band
	LDPC	low-density parity-check
	LLC	Link Logical Control
	LTE	Long Term Evolution
N	MAC	Medium Access Control
	Mbps	Megabit per second
	MCS	Modulation and Coding Scheme
	MHz	Megahertz
	MIMO	Multiple In Multiple Out
	mmWave	millimeter wave
	MPDU	MAC Protocol Data Unit
	MSC	Mobile services Switching Center
	MU-MIMO	Multi-user MIMO
O	MU-TXOP	Multi-user TXOP
	NAV	Network Allocation Vector
	NRZ	Non-return-to-zero
P	OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
	OSI	Open Systems Interconnection
P	PBSS	Personal BSS
	PCF	Point Coordination Function

Q	PCLP	Physical Layer Convergence Protocol
	PCP	PBSS Central Point
	PDU	Protocol Data Unit
	PHY	Physical Layer
	PIFS	PCF Inter-Frame Spacing
	PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
	PMD	Physical Medium Dependent
	PPDU	PHY Protocol Data Unit
	PSDU	PHY Service Data Unit
R	PSK	Phase Shift Keying
	QAM	Quadrature Amplitude Modulation
	QAP	QoS-enhanced AP
	QoS	Quality of Service
	QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
S	QSTA	Quality STA
	RFID	Radio-frequency identification
	RSNA	robust security network association
	RSSI	Received Signal Strength Indicator
T	RTS	Request to Send
	SC	Single Carrier
	SFD	Start Frame Delimiter
	SIFS	Short Interframe Space
	SLS	Sector Level Sweep
	SNR	Signal-to-Noise Ratio
	SP	Service Period
	SS	Sector Sweep
	STA	Station
T	STF	Short Training Field
	TDMA	Transmission Dynamic Medium Access
	TEB	Taux d'erreur Binaire
	TID	Transmitter IDentificator
	TSPEC	Traffic Specification
	TXOP	Transmit Opportunity

U

UB	Ultra band
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
US	United States
UWB	Ultra-wideband

V

VA-MSDU	video aggregation MSDU
VHT	Very High Throughput
Voip	Voice over IP

W

WBAN	Wireless Body Area Network
Wifi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personnal Area Network
WVAN	Wireless Video Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

ACTIVE

Introduction générale

Le monde moderne connaît une évolution fulgurante des technologies sans fil qui se distingue par l'apparition de la technologie IEEE 802.11. En fait, les technologies 802.11 ou bien WLAN (*Wireless Local Area Network*) ont une adoption de marché mondial considérable portant la commodité d'accès sans fil à large bande pour des milliers d'utilisateurs à domicile, au bureau et HotSpot qui était jadis l'apanage des applications spécialisées, ou des connexions occasionnelles dans les salles de conférences. L'épanouissement des technologies 802.11 revient aux multiples avantages qu'elles offrent (mobilité, faible coûts, etc.). Grâce à la norme IEEE 802.11, il est possible de créer, de déployer facilement des réseaux locaux sans fils à haut débit avec une architecture souple, similaire à un réseau local (LAN) et moins onéreuse avec une possibilité de se déplacer librement.

L'essor des technologies IEEE 802.11 a créé un insatiable besoin de débit pour satisfaire un monde d'utilisateurs addictifs aux appareils mobiles, capables de traiter de la vidéo en haute définition (HD) en streaming, de la voix sur IP (VoIP) et un transfert de données plus rapide. Face à de telles exigences, les débits de transfert de données dans les technologies 802.11 ont évolué à un rythme sidérant de 1 Mbps dans la première génération 802.11, de 11 Mbps dans la 802.11b, à 54 Mbps dans la 802.11 a/g et jusqu'à 600 Mbps dans la dernière modification de la norme 802.11n. La norme 802.11n est rapide mais s'avère insuffisante pour satisfaire les exigences actuelles de performances, en particulier dans le streaming vidéo et les jeux en 3D et la manipulation d'un nombre important croissant de connexion à un AP.

Prévoyant ces défis, en Mai 2007, le groupe de travail IEEE 802.11 a lancé un projet qui porte le nom "Very High Throughput" (VHT) pour étudier les prochaines générations 802.11 [44], dont le premier objectif était d'augmenter le débit d'au moins 1 Gbps pour être partagé par des périphériques à un point d'accès dans une bande moins de 6 GHz, avec la possibilité de fonctionner dans un lien unique à 500 Mbps et le deuxième objectif était la performance d'un lien unique d'au moins 1 Gbps dans la bande 60 GHz.

Les normes IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad étaient le fruit de l'opération VHT [54]. En effet, la norme IEEE 802.11ac est conçue pour être utilisée dans le spectre 5GHz qui est moins sensible aux interférences que le spectre 2.4 GHz. Le spectre 2.4Ghz est utilisé abondamment

par les normes WiFi actuelles, les communications sans fil Bluetooth, et où il n'existe qu'un seul canal de 40 MHz non chevauchant disponible, alors que la bande 5 GHz fournit 11 canaux de 40 MHz non-chevauchant. Pour toutes ces raisons, le groupe de travail IEEE 802.11ac a considéré que la bande des 5 GHz comme une solution pour un très haut débit et une haute qualité de service dans les communications WiFi.

Par ailleurs, depuis de longues années, les basses fréquences ont été largement exploitées pour combler au besoin de débit et d'offrir plusieurs types de services. À mesure que le nombre d'applications et les besoins croissent, les basses fréquences ont commencé à être saturées de sorte qu'on est passé par translation à des bandes de fréquences plus élevées. La norme 802.11ad est développée pour une utilisation dans un spectre beaucoup plus élevé de l'ordre de 60 GHz qui permet d'atteindre en théorie un débit maximal allant jusqu'à 7Gbps [18], une valeur dix fois supérieure à ce qu'autorise l'actuelle norme IEEE 802.11n opérant dans les bandes 2,4 GHz et 5 GHz.

L'exploitation de la bande de fréquence millimétrique 60 GHz par la norme 802.11ad aura d'importantes répercussions sur son architecture protocolaire, il devient donc impératif de concevoir des nouveaux mécanismes pour la couche MAC et PHY afin de permettre le déploiement dans cette bande, d'une part, et d'atteindre des débits plus élevés d'ordre Gbps, d'autre part.

La norme 802.11ad donc va indubitablement intéresser la communauté scientifique pour arriver à la maturation de cette norme et de parfaire son fonctionnement tout en respectant les exigences actuelles en terme de débit et de qualité de service.

Nous voulons donc dans ce mémoire apporter notre contribution en proposant une nouvelle méthode d'accès à la couche MAC pour la norme 802.11ad susceptible d'améliorer efficacement les performances du réseau. Comme la bande 60 GHz offre quatre canaux disjoints plus large (2,16 GHz), cette nouvelle proposition concernant l'accès au medium sera basée sur l'utilisation de plusieurs canaux.

Ce mémoire est scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre fournit une description générale des réseaux locaux sans fil et une présentation du standard IEEE 802.11.
- Le deuxième chapitre présente les principales améliorations des deux couches PHY et MAC des deux normes IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad supportant des débits d'ordre Gbps.
- Le troisième chapitre expose l'ensemble des travaux existants sur les méthodes d'accès à la couche MAC pour la norme IEEE 802.11 ad, ainsi qu'une proposition d'une nouvelle méthode d'accès à la couche MAC après une synthèse critique de l'ensemble de ces travaux. La fin de ce chapitre est une présentation et analyse des résultats obtenus après la simulation de la nouvelle méthode d'accès à la couche MAC pour la norme IEEE 802.11ad.

CHAPITRE 1

Réseaux sans fil et le standard IEEE 802.11

1.1 Introduction

L'enjeu des réseaux sans fil est de fournir les mêmes services aux utilisateurs que les réseaux filaires, avec en plus la mobilité. Il existe plusieurs architectures de réseaux sans fil selon la couverture désirée : les LAN (Local Area Network) sans fil pour un rayon de communication de quelques centaines de mètres. Cependant, quand la couverture nécessaire est plus large, les réseaux mobiles (GSM, UMTS, ...) sont à considérer. Dans ce chapitre, nous allons présenter les réseaux sans fil, en mettant en revue certaines définitions concernant l'architecture et la classification de ces réseaux. Sachant que la plus grande partie de ce chapitre sera consacrée à l'étude du standard IEEE 802.11, où nous aborderons les spécificités des couches physique PHY et accès au medium MAC ainsi que des concepts relatifs à l'amélioration de ces deux dernières.

1.2 Généralités sur les réseaux sans fil

1.2.1 Définition et description des réseaux sans fil

Un réseau est un ensemble de nœuds reliés entre eux par des liens ou canaux de communication dans le but d'échanger des informations. Selon le type de nœuds, on distingue les réseaux de télécommunication dans lesquels les nœuds sont les stations mobiles, les stations de base BTS (Base Transceiver Station), les contrôleurs des stations de base BSC (Base Station Controller), les commutateurs MSC (Mobile services Switching Center) et les réseaux informatiques dans lesquels les nœuds sont les ordinateurs, les imprimantes, les routeurs, les switchers ou tout autre équipement informatique [7]. Selon le type de canaux de communication, on distingue : les réseaux filaires qui utilisent un canal de transmission matériel (le câble coaxial, les paires torsadées, la fibre optique) et les réseaux sans fils.

Les réseaux sans fil sont ceux qui utilisent le canal air pour communiquer en utilisant les ondes hertziennes, les infrarouges ou le laser. L'utilisation des réseaux sans fil procure plusieurs avantages, notamment :

- L'usage facile dans les endroits à câblage difficile ;
- La réduction du temps de déploiement et d'installation ;
- La réduction des coûts d'entretien ;
- L'augmentation de la connectivité ;
- La réduction de l'encombrement ;
- La portabilité, le nomadisme et même la mobilité ; etc.

1.2.2 Classification des réseaux sans fil

Un réseau informatique sans fil, transmettant des données, est constitué d'équipements appelés nœuds. En fonction de leur étendue et de leur domaine d'application, ces réseaux sont catégorisés en cinq types.

- **Les réseaux de corps sans fil (WBAN, Wireless Body Area Network) :** cette technologie de réseau sans fil est basée sur les radiofréquences qui consistent à interconnecter sur, autour ou dans le corps humain de minuscules dispositifs pouvant effectuer des mesures (capteurs) ou agir de façon active (actionneurs). Ces capteurs très miniaturisés, disposant d'une grande autonomie et utilisant des courants de très faible puissance, sont capables de dialoguer avec un centre de service distant, pour alerter un service d'urgences hospitaliers, par exemple [24].
- **Les réseaux personnels sans fil (WPAN, Wireless Personal Area Network) :** dans cette catégorie, on retrouve les réseaux sans fil à l'échelle humaine dont la portée maximale est limitée à quelques dizaines de mètres autour de l'utilisateur (bureaux, salles de conférence, etc.). On y trouve les standards, tels que : Bluetooth, Ultra Wide Band (UWB), Zigbee, RFID et HomeRF [46].
- **Les réseaux locaux sans fil (WLAN, Wireless Local Area Network) :** c'est la catégorie des réseaux locaux sans fil dont la portée va jusqu'à 500 m, pour les applications assurant la couverture d'un campus, un bâtiment, un aéroport, un hôpital, etc. On y trouve les standards tels que le Wi-Fi (Wireless Fidelity) et les HIPERLAN [46].
- **Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN, Wireless Metropolitan Area Network) :** ce type de réseau utilise le même matériel que celui des réseaux WLAN. Mais la zone de couverture peut aller jusqu'à 50 Km. C'est dans cette catégorie que l'on classe les WiMAX et les HiperMAN [46].
- **Les larges réseaux sans fil (WWAN, Wireless Wide Area Network) :** c'est la catégorie de réseaux cellulaires mobiles dont la zone de couverture est très large, à l'échelle mondiale. Dans cette catégorie, on peut citer le réseau GSM et ses extensions (GPRS, EDGE), le CDMA et l'UMTS [27].

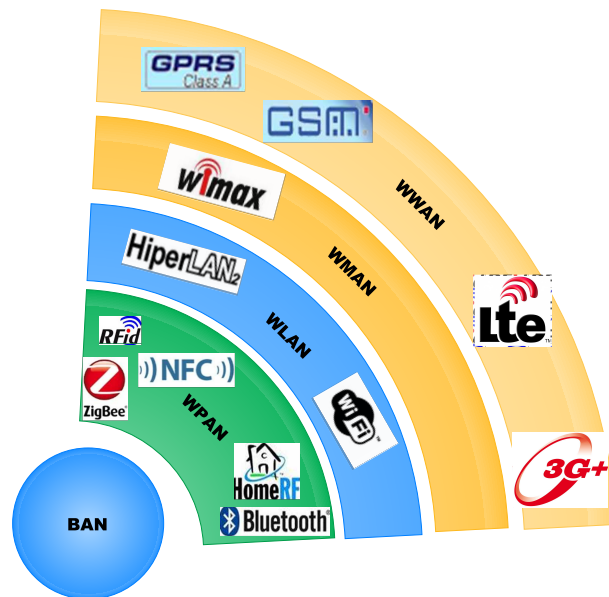


FIGURE 1.1 – Classification des Réseaux sans fil selon la portée de communication

1.3 Présentation du standard IEEE 802.11

Les réseaux Wi-Fi proviennent de la norme IEEE 802.11, qui définit une architecture cellulaire. Un groupe de terminaux munis d'une carte d'interface réseau 802.11 s'associent pour établir des communications directes. Ces dernières forment alors un BSS (Basic Service Set). La zone occupée par les terminaux d'un BSS peut être une BSA (Basic Set Area) ou une cellule [27].

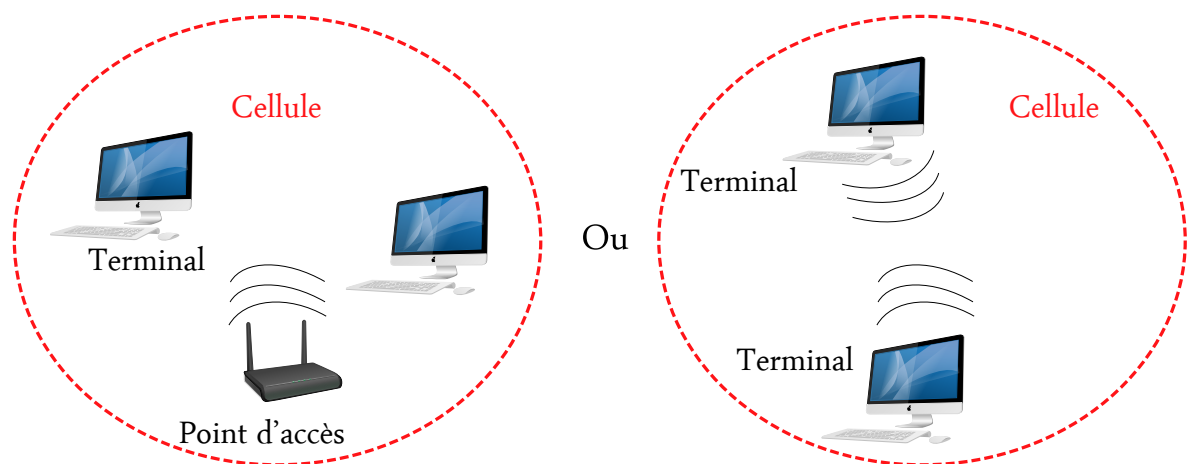


FIGURE 1.2 – Notion de cellule dans la norme IEEE 802.11

Le plus souvent, une cellule est contrôlée par une station de base appelée point d'accès. Ce mode est aussi appelé mode infrastructure, car les terminaux proches d'un point d'accès

vont pouvoir utiliser un ensemble de services fournis par ce dernier. Il est cependant possible d'établir des communications ad-hoc permettant une communication directe entre terminaux, sans passer par l'infrastructure centrale.

Une vue complète des éléments architecturaux proposés par l'IEEE 802.11 peut se résumer par le schéma suivant :

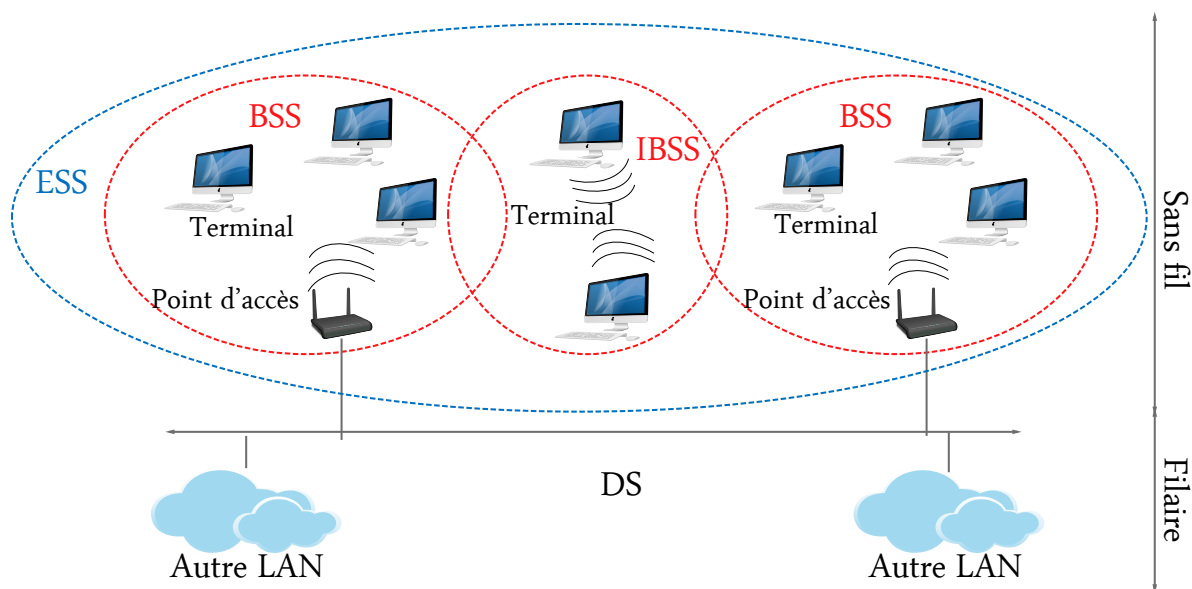


FIGURE 1.3 – Architecture type d'un WLAN 802.11

On distingue les éléments suivants :

- La cellule de base appelée BSS (Basic Service Set)
- La cellule de base en mode ad-hoc appelée IBSS (Independent Basic Service Set)
- Le point d'accès appelé AP (Access Point)
- L'ensemble des équipements du réseau sans fil appelé ESS (Extended Service Set)
- L'épine dorsale appelée DS (Distribution System)

Typiquement, une cellule est contrôlée par un AP et les différentes cellules (encore appelées BSS) sont reliées à une épine dorsale DS qui permettra le transfert de données au sein d'un même ESS ainsi que la communication avec des réseaux filaires.

En mode ad-hoc, un groupe de terminaux forment un IBSS et communiquent au sein de cet IBSS sans avoir recours à des tiers.

1.3.1 Couches de la norme 802.11

A l'instar des autres normes 802.x, 802.11 couvre la couche physique et la couche accès au médium. Le schéma suivant présente les couches en question, positionnées par rapport au

modèle de référence OSI (Open Systems Interconnection) de l'ISO (International Organization for Standardization) :

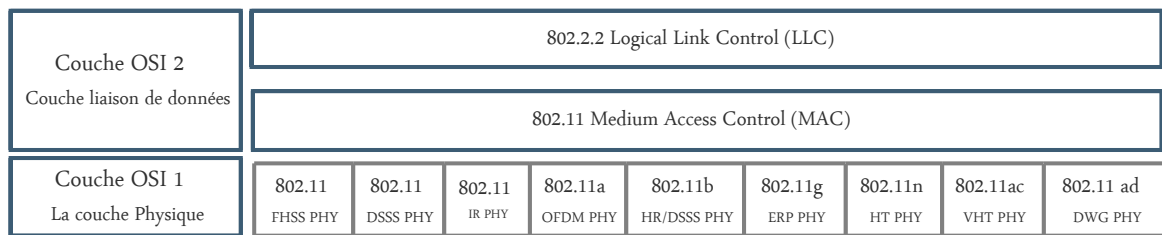


FIGURE 1.4 – Modèle en couches de la norme 802.11

1.3.2 Couche physique

La couche physique a pour rôle de transporter correctement la suite de signaux 0 ou 1 que l'émetteur souhaite envoyer au récepteur. Elle est subdivisée en deux sous-couches, PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) et PMD (Physical Medium Dependent). La sous-couche PMD s'occupe de l'encodage des données, tandis que la sous-couche PLCP prend en charge l'écoute du support. Elle fournit pour cela un CCA (Clear Channel Assessment), qui est le signal utilisé par la couche MAC pour savoir si le support est occupé ou non.

Notons que depuis la publication du standard IEEE 802.11, plusieurs variantes de la couche physique sont apparues, afin d'accroître la portée et le débit des communications :

IEEE 802.11-1997 est la première norme 802.11 sortie en 1997 et qui permettait d'atteindre des débits de 1 ou 2 Mbps en utilisant des méthodes de codage basées sur Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS) et Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) dans la bande des 2.4 GHz.

IEEE 802.11b-1999 a rapidement supplanté IEEE 802.11 en permettant d'atteindre des débits allant jusqu'à 11 Mbps. Pour atteindre de tels débits en utilisant la même méthode de codage DSSS, IEEE-802.11b remplace la méthode de modulation Barker Code utilisée dans IEEE-802.11 par la méthode Complementary Code Keying (CCK).

IEEE-802.11a-1999 utilise la modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dans la bande des 5 GHz, pour atteindre des débits allant jusqu'à 54 Mbps. La bande de fréquence 5GHz étant moins utilisée que celle des 2.4 GHz, la norme IEEE-802.11a possède un avantage dans la mesure où elle subit moins d'interférence. Cependant, cette fréquence élevée pénètre plus difficilement les murs et réduit la zone de couverture des appareils.

IEEE-802.11g-2003 fonctionne dans la bande 2.4 GHz, mais en utilisant la même technique de modulation OFDM que IEEE 802.11a, fournissant ainsi les mêmes débits allant jusqu'à 54 Mbps.

IEEE-802.11n-2009 amène les dernières modifications à ce jour pour atteindre des débits al-

lant jusqu'à 600 Mbps. Ces débits sont possibles en utilisant la technique multi-antennes connue sous le nom de Multiple Input, Multiple Output (MIMO) ainsi que le regroupement de deux canaux de 20 MHz pour former un canal de 40 MHz.

1.3.2.1 FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

FHSS désigne une technique d'étalement de bande fondée sur le saut de fréquence, dans laquelle la bande ISM des 2.4 GHz est divisée en 79 canaux ayant chacun 1 MHz de largeur de bande. Pour transmettre des données, l'émetteur et le récepteur s'accordent sur une séquence de sauts précise qui sera effectuée sur ces 79 sous-canaux. La couche FHSS définit trois ensembles de 26 séquences, soit au total 78 séquences de sauts possibles.

La transmission de donnée se fait par l'intermédiaire de sauts d'un sous-canal à un autre, sauts qui se produisent toutes les 300 ms, selon une séquence prédéfinie. Celle-ci est définie de manière optimale de façon à minimiser les probabilités de collision entre plusieurs transmissions simultanées. Si une station ne connaît pas la séquence de sauts des canaux, elle ne peut pas récupérer ses données [27].

Cette technique était utilisée auparavant dans les transmissions militaires pour les sécuriser. Lors de la libération de la bande ISM, en 1985, les militaires ont également rendu libre l'usage de FHSS. La bande ISM n'étant pas allouée de la même manière dans tous les pays, il existe des disparités dans le nombre de canaux utilisés (voir la table 1.1).

Pays	Etats-Unis	Europe	Japon
Nombre de canaux utilisés	79	79	23

TABLE 1.1 – Le nombre de sous canaux utilisés pour le FHSS

1.3.2.2 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Par analogie à la FHSS, la technique d'étalement du spectre DSSS divise la bande ISM en sous-bandes. Cependant, la division se fait en 14 canaux de 20 MHz chacun. Vue la largeur 83.5 MHz de la bande ISM, il n'est pas possible de placer, sans recouvrement, les 14 canaux adjacents (voir la figure 1.5). Ainsi, le spectre détermine une fréquence centrale dans chaque canal espacée de 5 MHz par rapport à ses voisines (voir la table 1.2).

1.3.2.3 HR-DSSS (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum)

En juillet 1998, une nouvelle couche physique utilisant toujours la bande des 2,4 GHz a été ajoutée au modèle déjà existant. Cette quatrième couche physique utilise une extension du

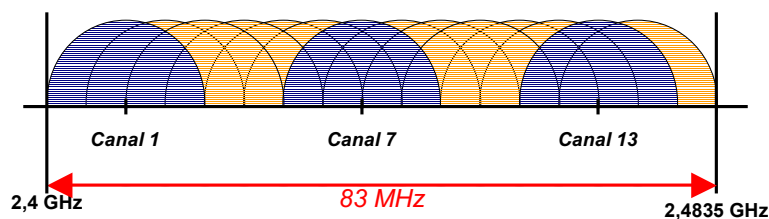


FIGURE 1.5 – Décomposition de la bande ISM en sous canaux de 20 MHz

Canal	Fréquence centrale (GHz)
1	2.412
2	2.417
3	2.422
4	2.427
5	2.432
6	2.437
7	2.442
8	2.447
9	2.452
10	2.457
11	2.462
12	2.467
13	2.472
14	2.477

TABLE 1.2 – Fréquences centrales des sous canaux du mode DSSS

DSSS appelé High Rate DSSS (HR/DSSS) qui permet d'atteindre des débits de 5,5 et 11 Mbps. Le HR/DSSS utilise une meilleure technique de codage appelé Complementary Code Keying (CCK) qui a pour principale propriété d'être facilement détectable par le récepteur même si l'environnement radio est fortement bruité.

1.3.2.4 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

Une des options retenues par l'IEEE pour augmenter le débit au-delà des 11 Mbps est l'utilisation de la technique Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Apparue dans les années 60, elle est également utilisée dans les réseaux CPL, l'ADSL et certaines des communications de téléphonie mobile. L'OFDM consiste à diviser le canal en de multiples sous canaux.

La porteuse elle-même est donc divisée en sous porteuses (subcarriers) par l'émetteur. C'est au récepteur de reconstituer la communication, à partir de ces différentes informations. La fréquence utilisée devient donc un multiplexage de sous fréquences (Division Multiplexing). Pour

éviter les interférences, les sous porteuses sont traitées par une transformation de Fourier nommée Fast Fourier Transform (FFT). Cet algorithme échantillonne les différentes sous porteuses, de façon à ce que le niveau correspondant à l'information sur l'une d'elles, corresponde à des niveaux nuls sur les autres. Cette transformation de la fréquence est dite orthogonale (Orthogonal Frequency) [27].

En OFDM, le risque d'interférence entre symboles, qui pourrait arriver en même temps au récepteur, par le biais de chemins différents (multipath) est multiplié. Ainsi, un délai d'attente est respecté entre deux envois. Appelé "Guard Interval" (GI), cette temporisation est de 0,8 s (800 nanosecondes) en 802.11a et 802.11g. Si l'environnement le permet, ce paramètre peut être réduit à 0,4 s en 802.11n draft. Ainsi, le temps total d'envoi du symbole, incluant le GI passe de 4 s à 3,6 s, ce qui augmente encore un peu plus le débit possible.

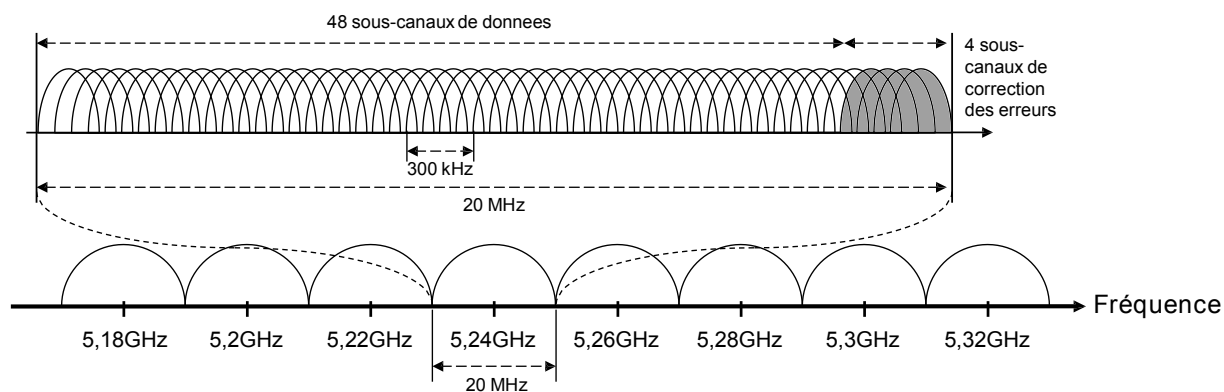


FIGURE 1.6 – Un canal dans OFDM

1.3.3 Couche MAC

Le standard IEEE 802.11 définit aussi la sous-couche de contrôle d'accès au médium (MAC) pour les points d'accès ainsi que pour les stations mobiles. Ce contrôle comprend l'authentification, l'association, l'accès au médium ainsi qu'une procédure de chiffrement optionnelle.

L'accès au médium est une fonction très importante car elle indique à la station si elle peut émettre ou non. Deux modes sont définis dans ce standard :

- le mode PCF (Point Coordination Function) qui peut être utilisé uniquement dans les architectures basées sur une infrastructure ;
- le mode DCF (Distributed Coordination Function) qui peut être utilisé dans n'importe quelle architecture 802.11.

C'est ce dernier mode qui est surtout implanté dans la plupart des cartes sans fil et points d'accès.

1.3.3.1 Espaces entre deux trames

La norme 802.11 définit quatre types d'espace IFS (Inter Frame Space) entre deux trames. Ils sont classés du plus court au plus long :

- **SIFS (Short IFS)** est le plus court de tous. Il est utilisé pour la transmission des trames ACK, CTS, réponse à un polling et des rafales de trames issues d'une même station ;
- **PIFS (PCF IFS)** est utilisé en mode PCF. Il permet aux transmissions PCF de gagner l'accès au médium par l'utilisation d'un IFS plus petit que celui utilisé pour la transmission des trames en DCF ;
- **DIFS (DCF IFS)** est le plus couramment utilisé (avec le SIFS). Il est utilisé en mode DCF comme temps minimal d'attente avant transmission ;
- **EIFS (Extended IFS)** est utilisé lorsqu'il y a détection de collision. Ce temps relativement long par rapport aux autres IFS est utilisé comme inhibiteur pour éviter des collisions en série.

Les valeurs des différents PIFS et DIFS sont calculées de la manière suivante :

$$PIFS = SIFS + SlotTime \quad (1.1)$$

$$DIFS = SIFS + 2 * SlotTime \quad (1.2)$$

où

Slot Time = durée minimale pour déterminer l'état du canal + temps aller retour + temps de propagation.

La valeur de SIFS est fixée par la couche physique et est calculée de telle façon que la station émettrice sera capable de commuter en mode réception pour pouvoir décoder le paquet entrant.

1.3.3.2 Algorithme de backoff exponentiel BEB (Binary Exponenttial Backoff)

Le backoff est une méthode bien connue pour résoudre les conflits entre stations voulant avoir accès au support. Cette méthode demande que chaque station choisisse un délai d'attente aléatoire compris entre 0 et la taille d'une fenêtre de contention de valeur CW qui est égale à un certain nombre de slots, et d'attendre ce nombre de slots avant de transmettre, toujours en vérifiant qu'une autre station n'a pas accédé au support avant elle.

Le backoff exponentiel signifie qu'à chaque fois qu'une station choisit un slot et provoque une collision, la durée d'attente aléatoire est augmentée exponentiellement (doublée à la tentative de transmission suivante).

Le standard 802.11 définit l'algorithme de backoff exponentiel comme devant être exécuté

dans les cas suivant :

- Quand la station écoute le support avant la première transmission d'un paquet et que le support est occupé,
- Après chaque transmission,
- Après une transmission réussie.

Le seul cas où ce mécanisme n'est pas utilisé est quand la station décide de transmettre un nouveau paquet et que le support a été libre pour un temps supérieur au DIFS.

1.3.3.3 Le mode Distributed Coordination Function (DCF)

C'est une méthode de contention basée sur le modèle de CSMA/CA. Cette méthode est utilisée à la fois dans le mode ad hoc et dans le mode infrastructure. La figure 1.7 donne un exemple d'accès au canal avec cette méthode. Comme dans le CSMA/CA, pour qu'une station puisse émettre, elle doit d'abord commencer par écouter la présence éventuelle d'une porteuse. Si le canal est libre alors la station a le droit d'émettre et peut procéder à la transmission de sa trame. Si le canal est déjà occupé, elle retarde sa transmission jusqu'à ce que le canal soit libre. Lorsque le canal est libre de nouveau, la station doit d'abord attendre un temps DIFS puis choisir un nombre aléatoire de slots. 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.

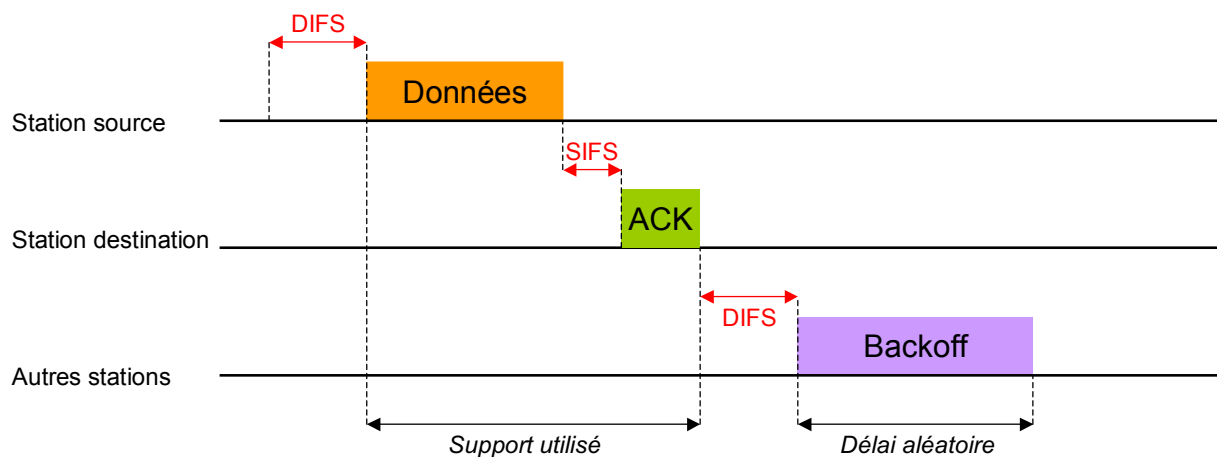


FIGURE 1.7 – Un exemple de transmission en mode DCF

1.3.3.4 Le mode Point Coordination Function (PCF)

Le mode DCF introduit un mode d'accès à compétition, l'acquisition du support n'est pas bornée et, par conséquent, ce mode de transmission ne convient pas aux données ayant des

exigences temporelles strictes comme les flux multimédias (données isochrones). Ainsi, la norme introduit un mode d'accès optionnel : le PCF (Point Coordination Function), le PCF divise le temps en deux périodes :

- la première période correspond à la mise en œuvre du mode PCF, elle est dite Contention Free Period (CFP) ;
- la seconde période utilise la méthode d'accès de base (DCF), elle est dite Contention Periode (CP) [46].

Dans la première période (CFP), les stations n'émettent leurs données que sur invitation explicite de l'AP auquel elles sont associées. Puis dans la seconde période, toutes les stations peuvent émettre leurs données en utilisant l'accès traditionnel à compétition du mode DCF. Les différentes périodes sont délimitées par des trames balises qui indiquent la durée de chaque phase. En mode PCF, une station "pollée" doit répondre dans un intervalle de temps prédéterminé (PIFS), sinon le point d'accès passe à la station suivante. À tout moment, le point d'accès peut mettre fin à la période de PCF et basculer en mode DCF par l'envoi d'une trame CF-End (Contention Free End). La première période correspond à la mise en oeuvre du mode PCF, elle est dite Contention Free Period (CFP) ;

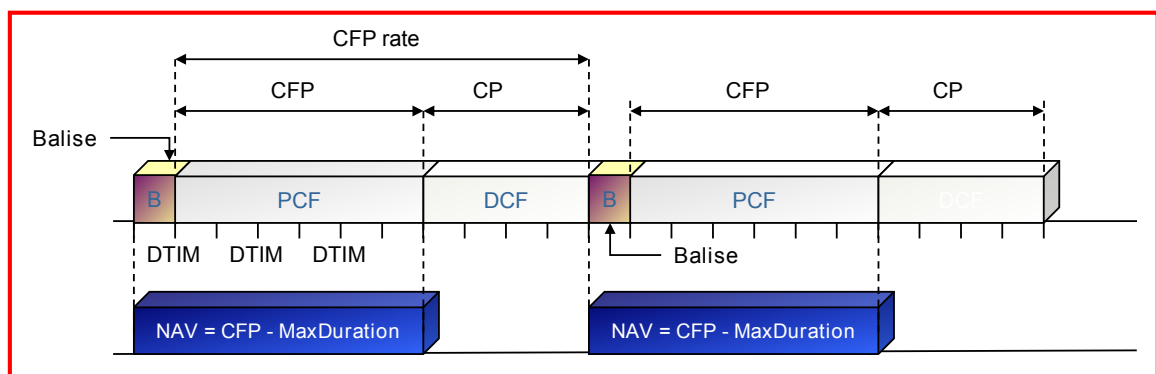


FIGURE 1.8 – Fonctionnement du mode PCF

1.4 Présentation de l'IEEE 802.11e

Afin de pallier aux limitations des mécanismes DCF et PCF à garantir de la qualité de service (QoS), le groupe 802.11e a défini un seul mécanisme d'accès au médium HCF qui combine les deux nouveaux mécanismes EDCA et HCCA. HCF est basé sur l'utilisation d'une supertrame contenant deux phases d'opération, Contention Period (CP) et Contention Free Period (CFP). EDCA est utilisé seulement dans la phase d'opération CP, alors que HCCA peut être associé aux deux phases.

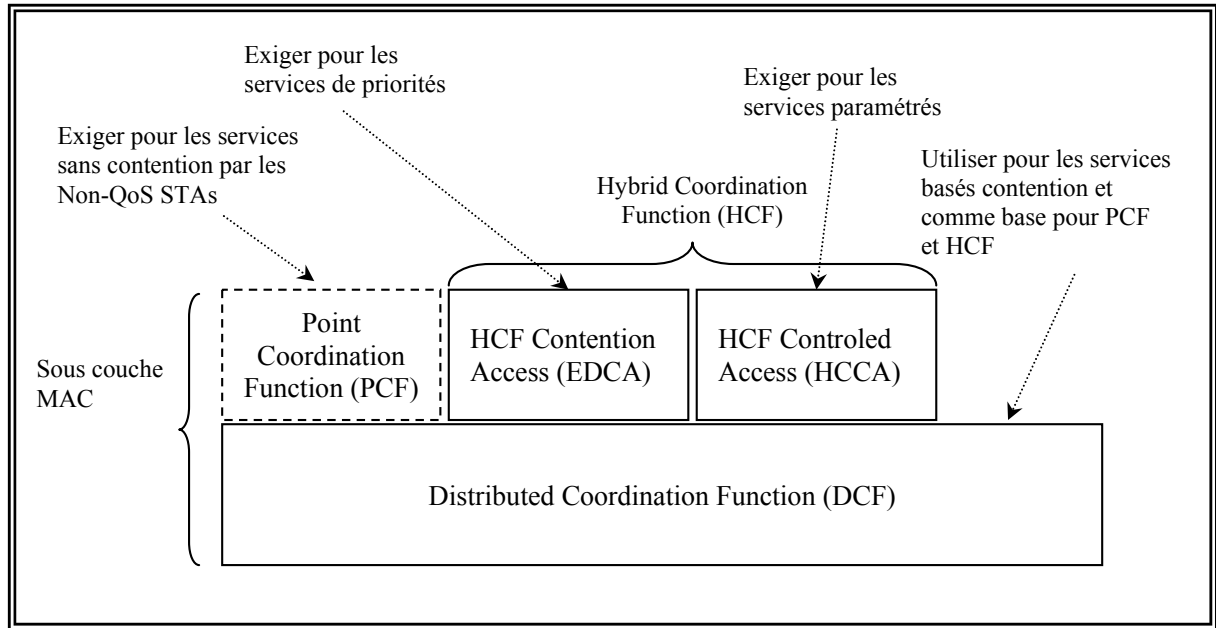


FIGURE 1.9 – Architecture MAC d'IEEE 802.11e [1]

1.4.1 Méthode HCF basée sur la contention (EDCA)

Dans EDCA, la prise en charge de la QoS est réalisée par le biais de l'introduction de plusieurs catégories d'accès (AC) au niveau de chaque station avec QoS (QSTA) [20]. EDCA définit quatre ACs où chaque AC correspond à un niveau de priorité et pouvant être utilisé par un type de trafic [52]. Pour faciliter le choix des ACs à utiliser avec le type du trafic, le groupe 802.11e a proposé une table de correspondance entre les spécifications IEEE 802.1D (voir la table 1.3) et les ACs de IEEE 802.11e.

Priorité	UP (comme User Priority dans 802.1D)	désignation 802.1D	AC	Désignation (instructive)
Plus basse ↓ Plus haute	1	BK	AC_BK	Background
	2	—	AC_BK	Background
	0	BE	AC_BE	Best Effort
	3	EE	AC_BE	Best Effort
	4	CL	AC_VI	Video
	5	VI	AC_VI	Video
	6	VO	AC_VO	Voice
	7	NC	AC_VO	Voice

TABLE 1.3 – Table de correspondance entre types d'application et les ACs [19]

Par ailleurs, chaque AC est une variante améliorée du protocole DCF, qui comme le montre la Figure 1.10 rivalise pour l'obtention d'une opportunité de transmission ou transmission opportunity (TXOP) en utilisant un ensemble de paramètres d'accès au canal. Cet ensemble est préalablement défini par EDCA et contient les paramètres suivants [31] :

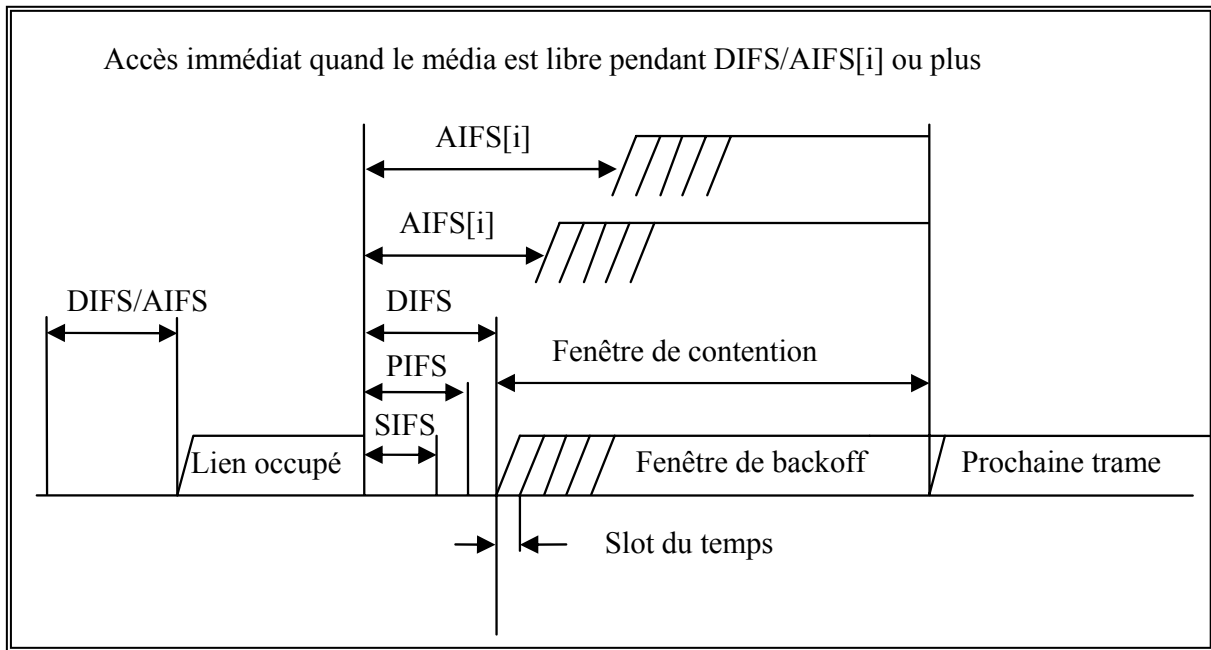


FIGURE 1.10 – Le mécanisme d'accès EDCA [2]

- La valeur minimale de la fenêtre de contention $CW_{min}[AC]$: la valeur CW_{min} est différente pour chaque AC, ainsi une petite valeur permet à une classe plus prioritaire d'obtenir plus de TXOP qu'une classe moins prioritaire.
- La valeur maximale de la fenêtre de contention $CW_{max}[AC]$: similairement à CW_{min} , cette valeur est définie pour chaque AC suivant sa priorité.
- L'espacement inter-paquet ou Arbitrary Inter frame Space $AIFS[AC]$: Chaque AC fait appel à la procédure de backoff après que le canal soit libre pour une période égale à $AIFS[AC]$ plutôt que DIFS. La valeur du $AIFS[AC]$ est calculée comme suit :

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] * SlotTime$$

La valeur du $AIFSN[AC]$ est égale ou supérieure à 2.

- $TXOP_{limit}[AC]$: après qu'une station ait gagné une TXOP, elle est autorisée à transmettre consécutivement un nombre de paquets (burst de paquets) appartenant à la même AC (Figure 1.11). Le temps d'attente entre la réception d'un ACK pour un paquet i et l'envoi du paquet $i + 1$ est SIFS. Le paramètre $TXOP_{limit}$, spécifie dans ce cas la limite du nombre de paquets à transmettre dans ce burst. Il est à noter que ce paramètre est optionnel dans EDCA, et s'il n'est pas activé, alors chaque station est autorisée à transmettre un seul paquet à la fois.
- La collision Virtuelle : il peut arriver que dans une station, deux temps backoff correspondant à deux AC expirent au même moment, causant ainsi une collision virtuelle. Dans ce cas, l'ordonnanceur de la couche MAC 802.11e résout cette collision virtuelle en allouant

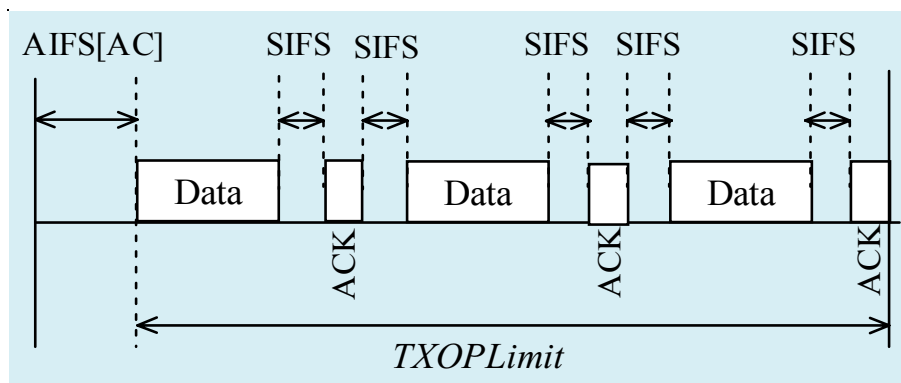


FIGURE 1.11 – Une rafale de paquets contrôlé par TXOPLimit [2]

le TXOP à l'AC le plus prioritaire. Similairement à une collision dans le canal, les autres AC feront appel à la procédure de backoff et retarderont leur transmission (Figure 1.12).

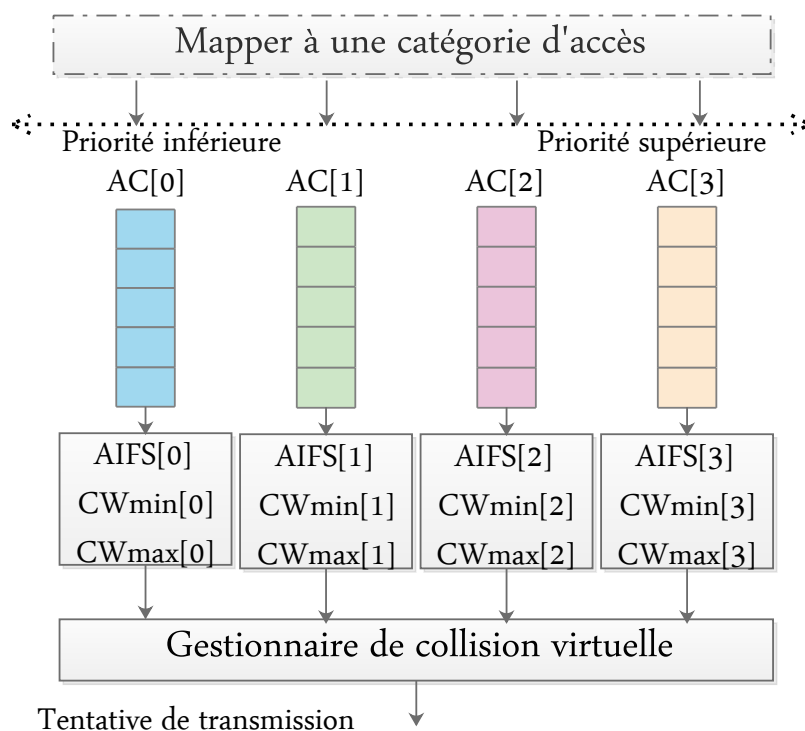


FIGURE 1.12 – Backoff virtuel des quatres classes de trafic [2]

1.5 Agrégation des trames

L'agrégation permet à plusieurs MSDUs et MPDUs d'être envoyés dans une seule transmission, réduisant les frais d'overhead causés par la contention et l'espace inter trame, et en

augmentant ainsi le débit réalisable. L'amendement de la norme 802.11n introduit deux types d'agrégation de données : l'agrégation de MSDU et l'agrégation MPDU [55].

La solution A-MSDU consiste à regrouper plusieurs trames possédant la même source, la même destination et la même classe de trafic WMM (le cas échéant) en une longue trame agrégée. Pour cela, les données de ces trames sont collées les unes à la suite des autres (sans leurs en-têtes), et un seul en-tête et un seul code d'intégrité (CRC) sont rajoutés à l'ensemble. Tandis qu'une trame normale peut contenir jusqu'à 2304 octets de données (plus éventuellement les octets nécessaires au cryptage), la taille d'une trame agrégée A-MSDU peut atteindre 8 kilo-octets, soit 8192 octets (plus les octets nécessaires au cryptage). La solution A-MSDU permet ainsi de réduire considérablement la perte de temps entre les trames, et le temps passé à transmettre des en-têtes. Malheureusement, elle a un gros inconvénient ; en effet, puisque les trames agrégées sont plus longues, le risque qu'une erreur s'y glisse pendant la transmission est très importante, on doit alors renvoyer toute la trame agrégée. Dans un environnement bruité, on risque ainsi de perdre plus de bande passante à renvoyer les trames agrégées mal transmises que ce que l'A-MSDU permet de gagner avec la diminution du nombre d'en-têtes et de l'espace entre les trames. C'est pourquoi les points d'accès 802.11n adaptent généralement la taille des trames agrégées A-MSDU en fonction des conditions.

La solution A-MPDU consiste également à agréger des trames qui ont la même source, la même destination et la même classe de trafic WMM. Cependant, cette fois-ci les trames sont simplement collées bout à bout et envoyées en un seul bloc (la trame agrégée A-MPDU). La quantité maximale de données que peut contenir une trame agrégée A-MPDU est de 64Ko, soit 65536 octets (plus les octets nécessaires au cryptage). Le risque qu'une erreur se glisse dans cette trame agrégée est très important, mais heureusement chaque trame contenue dans la trame agrégée contient toujours son propre en-tête et surtout son propre code de contrôle d'intégrité (CRC), ce qui permet au destinataire, en cas d'erreur de transmission, de rejeter uniquement la (ou les) trame(s) défectueuse(s), et non l'ensemble de la trame agrégée. En environnement peu bruité, l'A-MSDU est un peu plus efficace que l'A-MPDU, car il supprime les en-têtes des trames ; mais inversement, en environnement bruité, l'A-MPDU est plus efficace car il limite les répétitions.

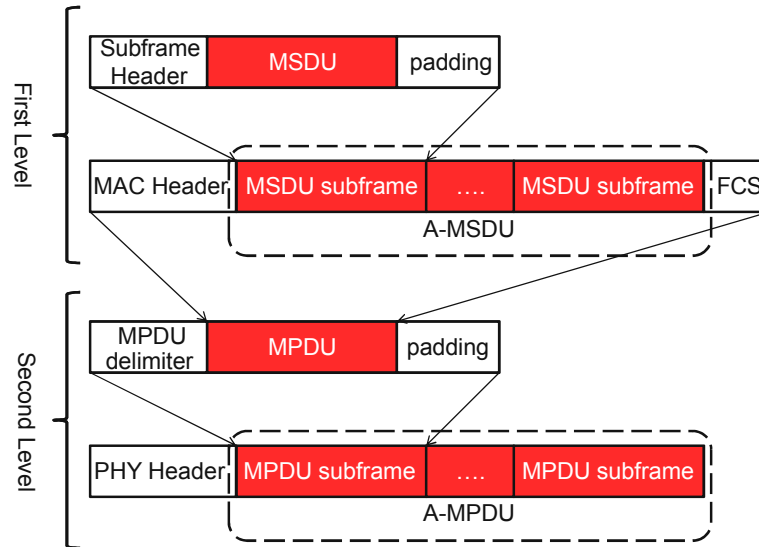


FIGURE 1.13 – Agrégation à deux niveaux [56]

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description succincte des réseaux sans fil et nous nous sommes focalisés sur le standard IEEE 802.11, notamment le fonctionnement de ses différentes couches en se référant au modèle OSI.

Le standard IEEE 802.11 a subi plusieurs améliorations et modifications dans la couche physique et la couche MAC afin d'améliorer la qualité de service et de satisfaire les exigences des utilisateurs. Nous essayons dans le prochain chapitre, de disséquer le fonctionnement de deux nouvelles générations Wi-Fi (la norme IEEE 802.11ac et la norme IEEE 802.11ad) qui sont caractérisées par l'obtention d'un débit d'ordre de quelques Gbps.

CHAPITRE 2

Présentation des normes IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad

2.1 Introduction

Le Wi-Fi a poussé la performance et l'expérience de l'utilisateur sans fil pour garantir qu'il suit le rythme d'avènement des applications gourmandes en terme de bande passante, tels que le transfert de gros fichiers (par exemple, des films HD en BluRay, des images RAW non compressées, etc.), le streaming vidéo HD, écran sans fil et cellulaire data offload. De gros efforts et travaux sont en cours dans IEEE sur deux nouvelles normes susceptible de secouer le monde sans fil et qui ont un débit plus rapide que celui d'Ethernet, en l'occurrence IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad.

Dans ce chapitre, nous présenterons en détails le fonctionnement des deux nouvelles générations Wi-Fi : la norme 802.11ac et la norme 802.11ad.

2.2 La norme IEEE 802.11ac

La norme IEEE 802.11ac est la cinquième génération des normes de réseau Wi-Fi, qui offre des débits supérieures à 1 Gbps pour permettre par exemple la vidéo de haute qualité en streaming, la synchronisation et la sauvegarde des données, presque instantanée pour les ordinateurs portables, les tablettes et les téléphones mobiles qui sont devenus nos compagnons de tous les jours.

Dans cette section, nous présentons les principales améliorations et modifications des couches physique et MAC dans la norme IEEE 802.11ac permettant d'atteindre des débits supérieures à 1 Gbps.

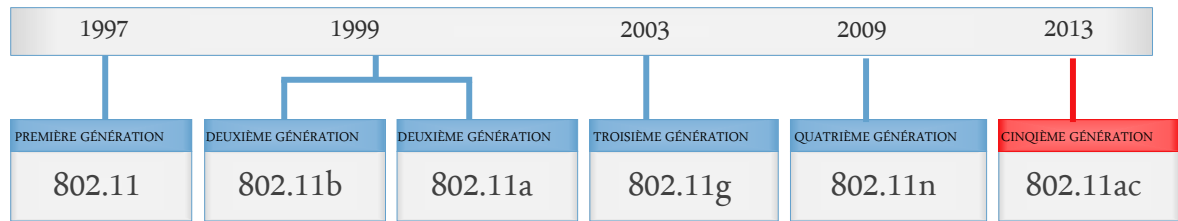


FIGURE 2.1 – Chronologie du standard 802.11

2.2.1 Fonctionnement obligatoire dans la bande de fréquence 5 GHz

Les normes Wi-Fi précédentes comme 802.11a/b/g/n opèrent toutes dans la bande de fréquence 2.4 GHz et pour la norme 802.11n facultativement dans la bande de fréquence 5 GHz. Par contre, la Norme 802.11ac opère seulement dans la bande de fréquence 5 GHz.

La bande de fréquence 2.4 GHz est susceptible à l'interférence par les anciens appareils Wi-Fi, ainsi que de nombreux appareils ménagers. La bande de fréquence 5 GHz a relativement réduit l'interférence et il y a un nombre plus grand de canaux qui ne se chevauchent pas (25 canaux sans chevauchement dans les États-Unis) par rapport à la bande 2,4 GHz (3 canaux sans chevauchement aux États-Unis) [42]. La norme 802.11ac devrait donc tirer parti de l'interférence réduite et une plus grande flexibilité de multiples canaux disponibles dans la bande de fréquence 5 GHz pour des performances accrues.

2.2.2 Largeurs des canaux pris en charge

La norme IEEE 802.11ac introduit les bandes de fréquences 80 MHz et 160 MHz, outre les 20 MHz et 40 MHz spécifiés dans la norme 802.11n. La norme 802.11ac exige de tous les périphériques de supporter les canaux 20, 40 et 80 MHz dans la bande 5 GHz et facultativement le canal 160 MHz [54]. Les canaux 80 MHz peuvent être uniquement formés par la combinaison de deux canaux 40 MHz adjacents et qui ne se chevauchent pas. Le canal optionnel 160 MHz peut être formé par la combinaison de deux canaux 80 MHz adjacents ou bien de deux non adjacents. Les largeurs des canaux supportées par la norme 802.11ac sont illustrées dans la Figure 2.2.

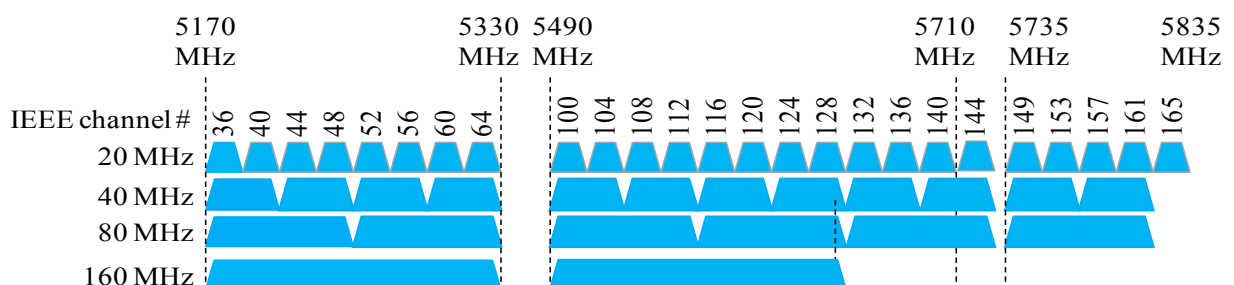


FIGURE 2.2 – Regroupement des canaux dans la norme 802.11ac [8]

Une bande passante plus large permet d'atteindre des débits de données plus élevés. En mode 160 MHz, le débit de données maximal qu'on peut atteindre en utilisant huit flux spatiaux avec une modulation 256 QAM et un taux de codage 5/6 est de 6,933 Gbit/s. La table 2.1 montre les débits maximum possible de la norme 802.11ac en fonction de la technique de modulation et de codage pour une bande passante donnée et un nombre de flux spatiaux donné.

Taux 802.11ac sélectionnés en Mbps (short guard interval, 1, 2, 3, 4, 8 SS)	MCS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	MODULATION & RATE	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16-QAM 1/2	16-QAM 3/4	64-QAM 2/3	64-QAM 3/4	64-QAM 5/6	256-QAM 3/4	256-QAM 5/6
	20 MHz 1X SS	7.2	14.4	21.7	28.9	43.3	57.8	65.0	72.2	86.7	—
	20 MHz 2X SS	14.4	28.9	43.3	57.8	86.7	115.6	130.0	144.4	173.3	—
	20 MHz 4X SS	28.9	57.8	86.7	115.6	173.3	231.1	260.0	288.9	346.7	—
	20 MHz 8X SS	57.8	115.6	173.3	231.1	346.7	462.2	520.0	577.8	693.3	—
	40 MHz 1X SS	15.0	30.0	45.0	60.0	90.0	120.0	135.0	150.0	180.0	200.0
	40 MHz 2X SS	30.0	60.0	90.0	120.0	180.0	240.0	270.0	300.0	360.0	400.0
	40 MHz 4X SS	60.0	120.0	180.0	240.0	360.0	480.0	540.0	600.0	720.0	800.0
	40 MHz 8X SS	120.0	240.0	360.0	480.0	720.0	960.0	1080.0	1200.0	1440.0	1600.0
	80 MHz 1X SS	32.5	65.0	97.5	130.0	195.0	260.0	292.5	325.0	390.0	433.3
	80 MHz 2X SS	65.0	130.0	195.0	260.0	390.0	520.0	585.0	650.0	780.0	866.7
	80 MHz 4X SS	130.0	260.0	390.0	520.0	780.0	1040.0	1170.0	1300.0	1560.0	1733.3
	80 MHz 8X SS	260.0	520.0	780.0	1040.0	1560.0	2080.0	2340.0	2600.0	3120.0	3466.7
	160 MHz 1X SS	65.0	130.0	195.0	260.0	390.0	520.0	585.0	650.0	780.0	866.7
	160 MHz 2X SS	130.0	260.0	390.0	520.0	780.0	1040.0	1170.0	1300.0	1560.0	1733.3
	160 MHz 4X SS	260.0	520.0	780.0	1040.0	1560.0	2080.0	2340.0	2600.0	3120.0	3466.7
	160 MHz 8X SS	520.0	1040.0	1560.0	2080.0	3120.0	4160.0	4680.0	5200.0	6240.0	6933.3

TABLE 2.1 – Résumé des schémas de modulation et de codage (MCS) pour la norme 802.11ac[6]

2.2.3 Couche Physique

2.2.3.1 Modulation d'ordre supérieur 256-QAM

Dans la norme 802.11n, la modulation d'ordre supérieur est de 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Six bits d'informations codées peuvent être représentés dans une constellation de 64-QAM. La norme 802.11ac a augmenté la configuration de la constellation à 256-QAM [53]. Ce qui fournit une augmentation progressive au niveau des débits de données de 33 % par rapport à la 11n. Cette augmentation est réalisée en représentant huit bits codés par un

symbole au lieu de six. Il convient de noter cependant que le rapport signal-sur-bruit (SNR) est important pour 256-QAM par rapport à 64-QAM [45]. Car, les symboles de la constellation 256-QAM sont plus proches les uns des autres.

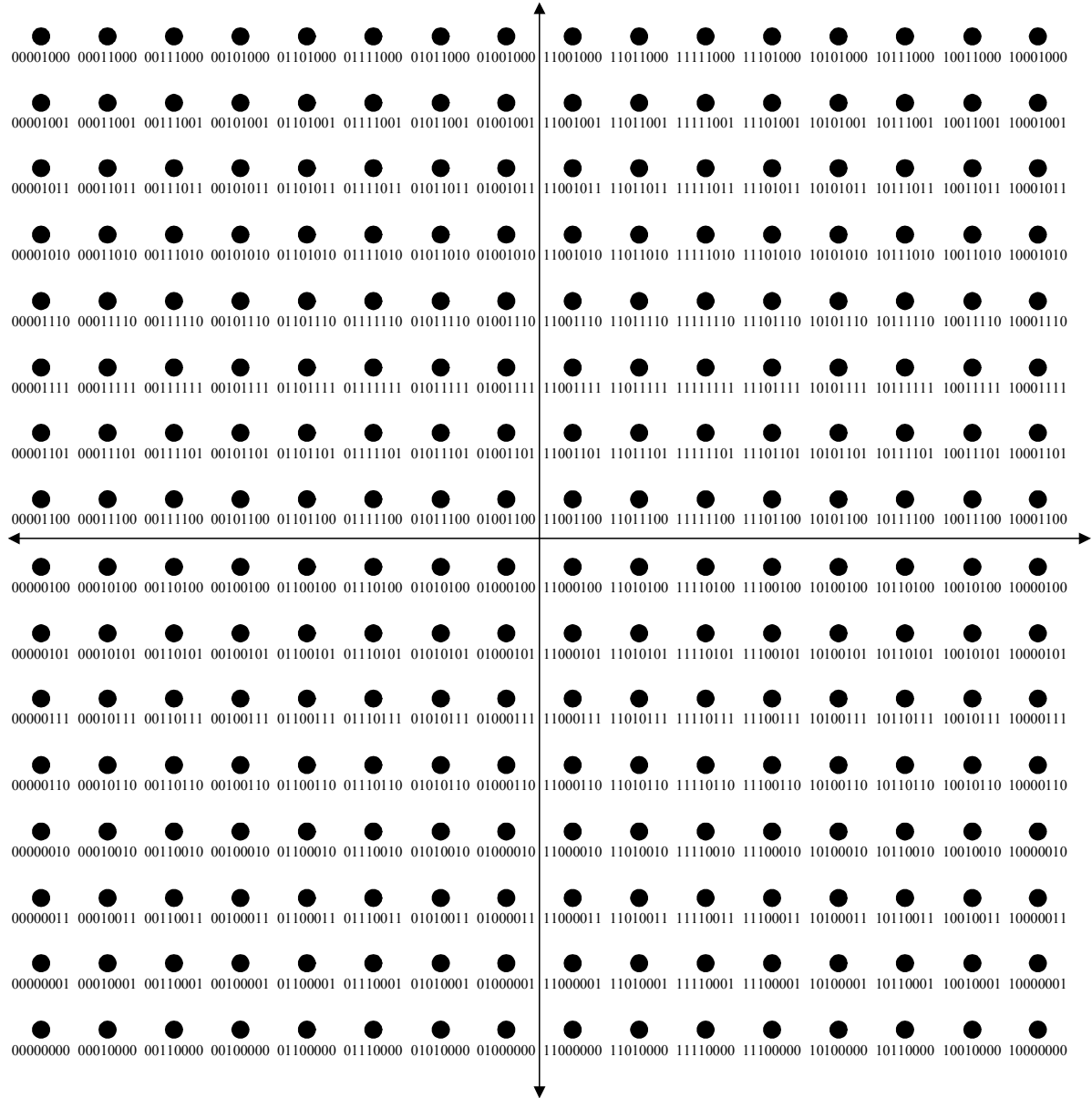


FIGURE 2.3 – Diagramme de constellation 256-QAM [32]

2.2.3.2 La technique MIMO d'ordre supérieur

La norme IEEE 802.11n a été la première norme qui a introduit la technique de transmission multiple-input, multiple-output (MIMO) et cette norme permet au maximum quatre flux MIMO d'être envoyés à un seul appareil à la fois. Par conséquent, elle augmente le débit par rapport aux normes antérieures telles que 802.11a/b/g. La norme 802.11ac augmente encore le nombre maximum de flux MIMO de quatre à huit [25]. Une station 802.11ac peut désormais recevoir jusqu'à huit flux spatiaux, pour doubler son débit (voir la figure 2.4).

2.2.3.3 La technique Multi-User MIMO (MU-MIMO)

La norme 802.11ac est la première norme Wi-Fi qui a introduit la technique de transmission multi-utilisateurs MIMO (MU-MIMO). En MU-MIMO, l'AP peut servir plusieurs stations simultanément. Cette technique permet à un AP émetteur d'envoyer plusieurs paquets simultanément à plusieurs stations [32]. Ceci est réalisé en utilisant jusqu'à huit flux spatiaux qui peuvent être divisés entre quatre stations au maximum. Chaque station individuelle peut avoir un maximum de quatre flux spatiaux dans une transmission MU-MIMO.

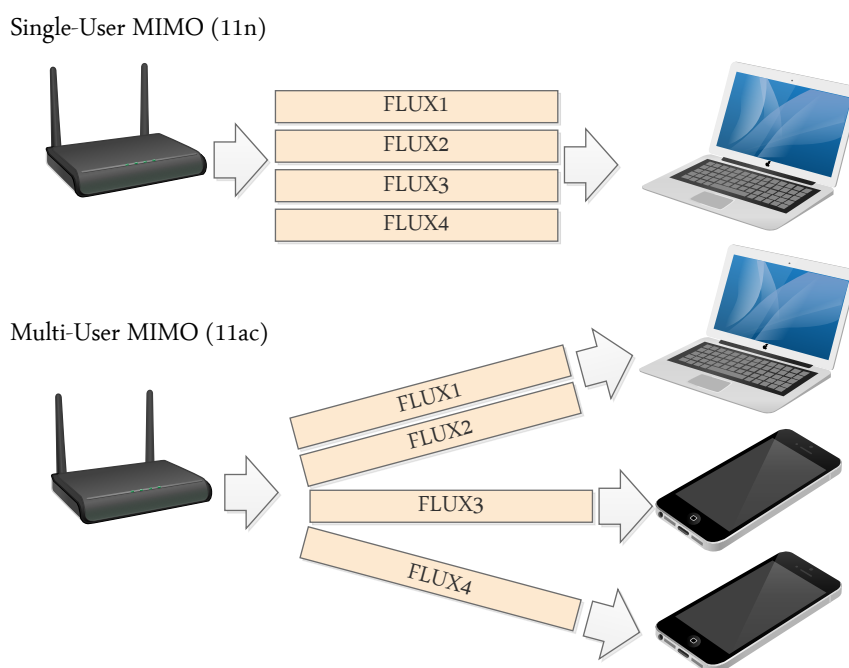


FIGURE 2.4 – Multi-User MIMO (MU-MIMO)[37]

Phases	Principe du TXOP 802.11n	Principe du TXOP sharing 802.11ac
Initiation	Se produit une fois que les règles d'EDCA permettent l'accès au support	la même que la TXOP actuelle 802.11
Phase de partage	elle n'est pas utilisée	se produit après le mode d'initiation et avant le mode de transmission de trame multiples
Transmission de trame multiples	Commence lorsqu'un EDCAF permet à une AC de transmettre plusieurs trames	Commence lorsque un EDCAF permet à plusieurs trames des séquences d'échange simultanées

TABLE 2.2 – Les phases TXOP sharing 802.11ac

2.2.4 Améliorations de la couche MAC

2.2.4.1 Le mécanisme TXOP sharing :

Pour prendre en charge plusieurs flux de données à plusieurs stations réceptrices simultanément, la norme 802.11ac améliore la couche MAC en proposant une nouvelle technique appelée TXOP sharing, qui est l'extension de TXOP. L'idée de proposer TXOP sharing provient des limitations de TXOP EDCA. En effet, lors d'une TXOP EDCA obtenue par une station, seules les trames appartenant à la même AC sont transmises. De cette manière, de multiples trames appartenant à différentes ACs ne sont pas autorisées à être transmises simultanément.

L'idée principale de TXOP sharing est de permettre à l'AP d'effectuer des transmissions simultanées vers plusieurs STAs réceptrices en utilisant l'ID de groupe. Avec ce système, chaque EDCAF d'un AP utilise ses propres paramètres EDCA pour concourir une TXOP. Quand une EDCAF gagne une TXOP, il sera le propriétaire de cette TXOP, et son AC associée est considérée comme AC primaire et le reste des ACs sont secondaires. Nous pouvons parler de multi-utilisateurs TXOP (MU-TXOP) lorsque l'AC primaire permet aux ACs secondaires de partager la TXOP pour des transmissions simultanées. Par conséquent, l'AP a deux types de destinations : primaire et secondaire, qui sont respectivement ciblées par les trames de données de l'AC primaire et des ACs secondaire [13].

Nous pouvons avoir une seule AC primaire et plusieurs AC secondaires, mais il pourrait y avoir plusieurs destinations (primaire et secondaire). Comme il est indiqué dans Tableau.2.2, la norme 802.11ac ajoute une nouvelle phase dans le mécanisme de partage des TXOPs. Dans cette période, c'est l'AC primaire qui décide quel AC secondaire est autorisée à partager la TXOP, ainsi que les destinations (primaire et secondaire) ciblées pour les transmissions. En outre, la durée de la TXOP est définie en fonction de la limite TXOP de l'AC primaire et le temps de transmission est basé sur la durée de la quantité de données prévue à transmettre par l'AC primaire. La période MU-TXOP est terminée lorsque l'AC primaire termine sa transmission, même si l'AC secondaire a plus de trames à transmettre.

La norme 802.11n introduit comme une partie essentielle de ses améliorations de la couche MAC, deux mécanismes d'agrégations de trames A-MSDU et A-MPDU afin d'améliorer l'efficacité de la couche MAC. Il est également possible de combiner à la fois les deux mécanismes A-MSDU et A-MPDU, qui est désigné comme l'agrégation hybride A-MSDU / A-MPDU. Les auteurs dans [49] présentent une description détaillée de ces trois mécanismes d'agrégation de trames. D'autre part, les principales améliorations de la couche MAC de 802.11ac sont centrées autour de sa capacité de fonctionnement multicanaux. En particulier, la norme 802.11ac prend en charge A-MSDU et A-MPDU dont la taille maximale A-MSDU et la taille maximale A-MPDU sont augmentées de 7935 à 11406 octets et de 65535 à 1048575 octets, respectivement [38], pour une amélioration de son efficacité MAC avec l'augmentation des débits de données PHY.

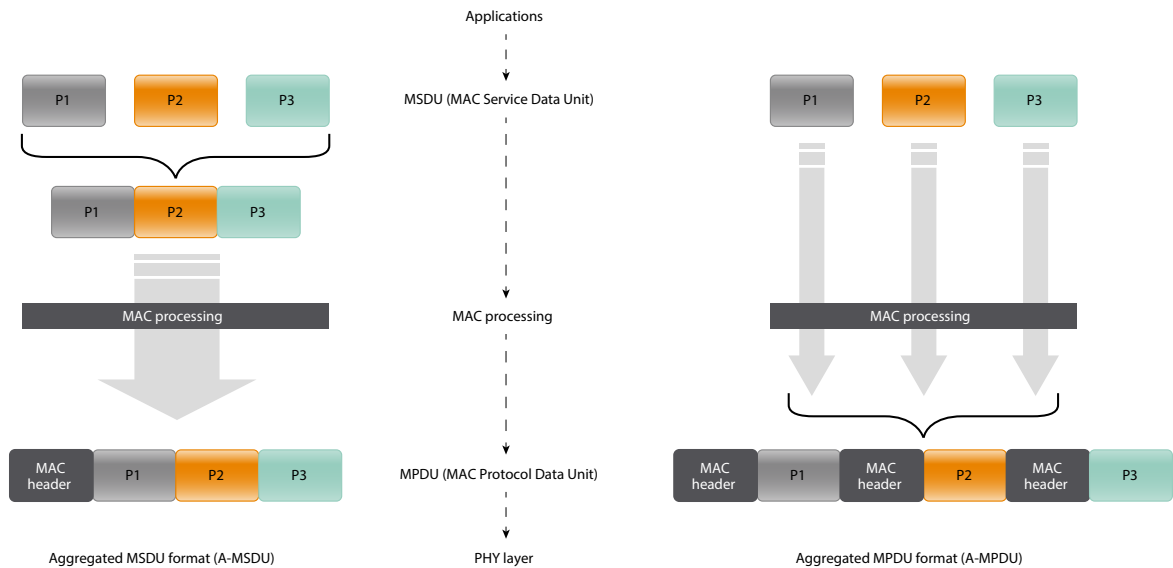


FIGURE 2.5 – Agrégation des trames dans la couche MAC de la norme 802.11ac[37]

2.2.4.2 Les méthodes d'accès multi-canaux

La norme 802.11ac étend les méthodes d'accès au canal de la norme 802.11n proposées dans le cas des canaux 80 et 160 MHz. Pour pouvoir transmettre un PPDU (Physical Layer Convergence Protocol Data Unit) dans un canal 80 MHz par une station 802.11ac deux conditions doivent être remplies :

- (i) le canal primaire suit la méthode d'accès EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) pour être inactif pendant une durée DIFS (Coordination Function Distributed Inter-Frame Spacing) plus un compteur de back-off.
- (ii) tous les trois canaux secondaires doivent être inactifs pendant une durée PIFS (PCF Inter-frame Spacing) procédant immédiatement à l'expiration du compteur back-off.

Dans le cas où l'un des canaux secondaires est occupé, la station peut suivre des règles d'accès statiques, ou dynamiques, telles qu'elles sont dictées dans la norme 802.11n [39].

L'accès statique au canal : les stations 802.11ac écoutent exclusivement le canal primaire durant une période égale à $DIFS + Backoff$. Si le canal primaire est libre durant cette période, et tous les canaux secondaires sont libres pendant un PIFS avant l'expiration du Backoff, la station transmet sur toute la largeur des canaux regroupés. Si un canal secondaire n'est pas libre durant un PIFS avant l'expiration du backoff, la station diffère sa transmission et choisit un autre Backoff dans la fenêtre de contention courante. Plus que le canal est large, plus la probabilité d'accès à ce canal est faible. La Figure 2.6 donne un schéma explicatif pour la méthode d'accès statique sur un canal de 80 MHz [22].

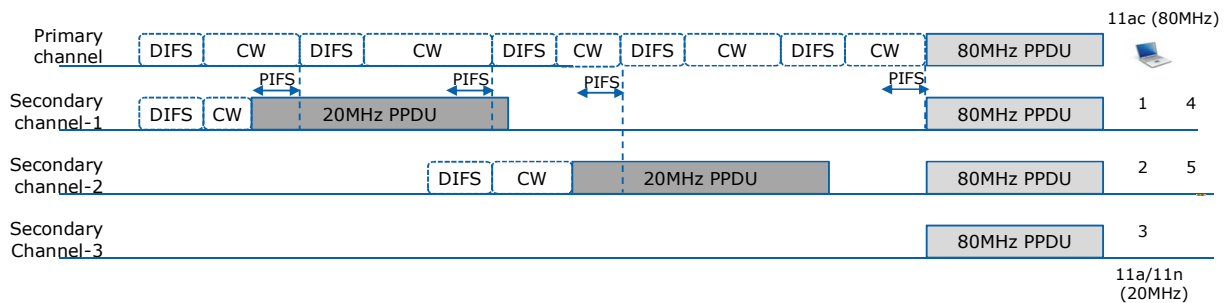


FIGURE 2.6 – Accès statique

L'accès dynamique au canal : la station de la norme 802.11ac peut tenter de transmettre sur un canal étroit en utilisant 20 MHz ou 40 MHz à la place. Cela dépendra du CCA de chaque canal. C'est clairement une approche plus souple qui permet l'allocation des ressources plus efficace parce que la station peut toujours transmettre sur une fraction de la bande passante d'origine. Toutes les transmissions doivent toujours inclure le canal primaire afin d'informer le destinataire de quels canaux l'émetteur utilisera. La Figure 2.7 donne un exemple explicatif pour la méthode d'accès dynamique sur un canal de 80 MHz [22].

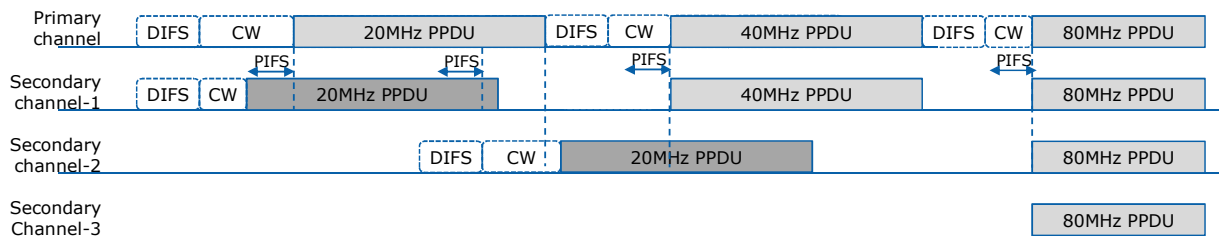


FIGURE 2.7 – Accès dynamique

2.3 La norme IEEE 802.11ad

La norme IEEE 802.11ad est une nouvelle génération sans fil opérant dans la bande millimétrique 60 GHz qui permet d'avoir un débit qui avoisine 7Gbps, par conséquent, des modifications au niveau des deux couches MAC et physique sont inéluctables.

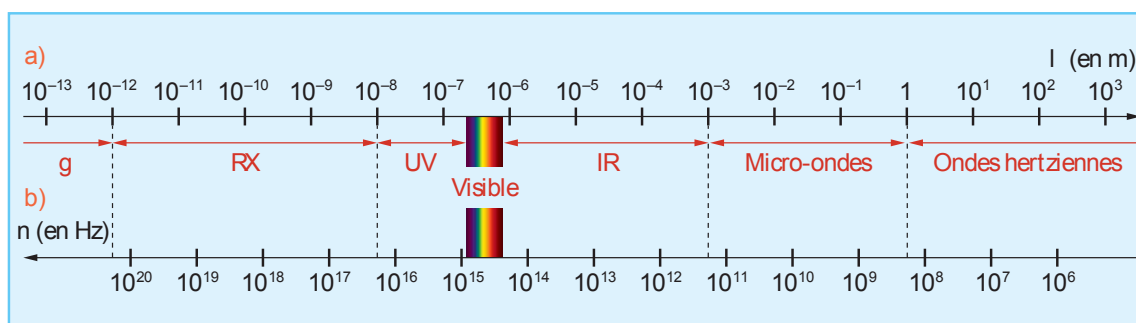
Cette section donne les principales améliorations de la couche physique et de la couche MAC dans cette norme pour permettre le déploiement de la bande fréquence millimétrique 60 GHz.

2.3.1 La bande de fréquence millimétrique

En observant le spectre radio pour la partie des fréquences basses [100MHz -10 GHz], on remarque une concentration d'applications et de normes, ce qui ne laisse qu'une bande libre assez réduite. L'exploitation des bandes de fréquences élevées représente donc une solution très intéressante. D'autre part, afin d'atteindre des débits élevés, il fallait monter en fréquence et cela est devenu possible avec les progrès des technologies et des méthodes de conception permettant de travailler jusqu'à des fréquences de quelques centaines de GHz.

La bande de fréquence millimétrique correspond à la partie du spectre électromagnétique caractérisée par des longueurs d'onde de 1 centimètre à 1 millimètre. Actuellement, elle présente un sujet de recherche très intéressant afin de tirer le maximum de profit des avantages de cette bande.

D'autre part, étant donné que la portée des systèmes à 60 GHz est très réduite et la puissance autorisée est très faible, les interférences entre différents utilisateurs de ces systèmes devraient être très faibles.



Doc. 6 Les domaines des ondes électromagnétiques a) longueur d'onde ; b) fréquence.

FIGURE 2.8 – Spectre électromagnétique [23]

2.3.2 La couche physique de la norme IEEE 802.11ad

Cette section fournit un bref résumé de la couche physique des ondes millimétriques définie dans l'article 21 de l'amendement IEEE 802.11ad 2012 [3]. Pour maintenir la généralité dans le texte de la spécification et de simplifier les descriptions fonctionnelles à l'avenir, le groupe IEEE a introduit une nouvelle terminologie pour identifier les performances plus élevées PHYs ;

- VHT qui est l'abréviation de très haut débit, est une bande de fréquences qui a une fréquence de démarrage en dessous de 6 GHz à l'exclusion de la bande 2,4 GHz.
- DMG qui est l'abréviation de direction multi-gigabit, se rapporte à fonctionner dans une bande fréquence qui contient un canal avec une fréquence de départ au-dessus de 45 GHz.

Ces termes remplacent les anciennes appellation pour spécifier les bandes de fréquence LB (Low Band à 2,4 GHz), HB (High Band à 5 GHz) et UB (Ultra Band à 60 GHz).

Ainsi, en utilisant la nouvelle terminologie, l'article 21 de l'IEEE 802.11ad 2012 définit le PHY DMG, qui est la couche physique déployée dans la bande "60 GHz" à partir de 57 GHz à 66 GHz ; sous réserve de la variation régionale documentée dans la figure 2.9 [5].

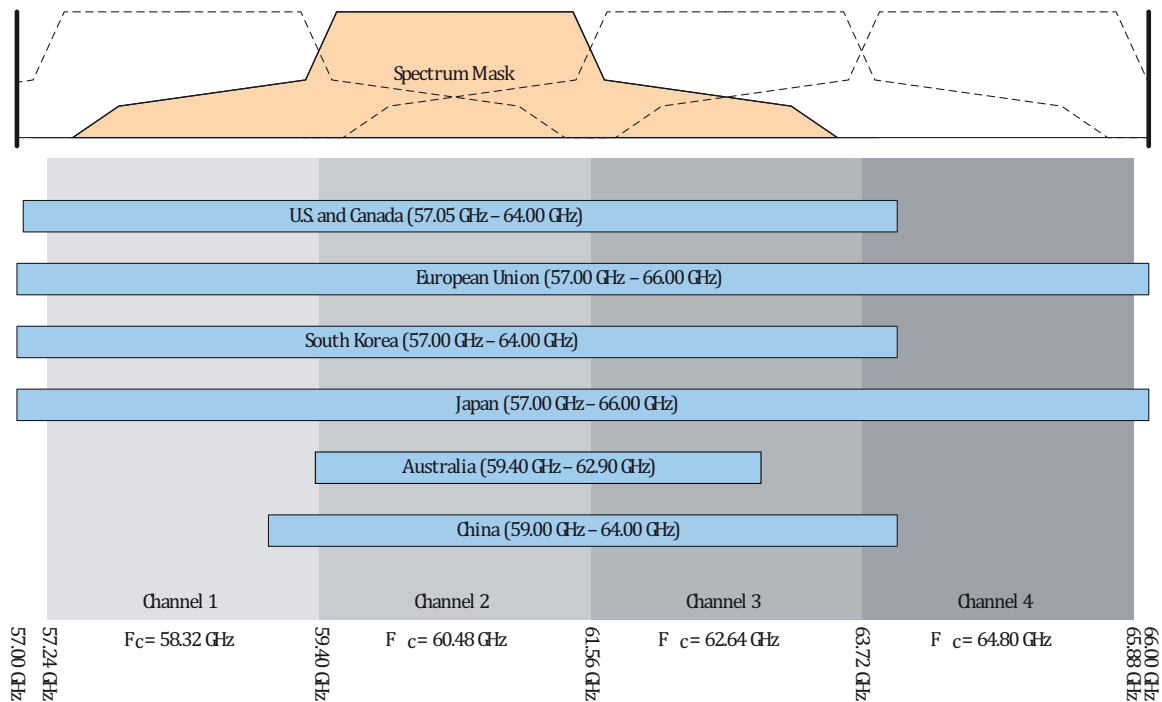


FIGURE 2.9 – Allocation de bandes de fréquence autour de 60 GHz dans différents pays[57]

2.3.2.1 Structure d'un paquet 802.11ad

La couche physique DMG PHY de la norme IEEE 802.11ad supporte trois méthodes de modulations distinctes :

- **La modulation Spread-Spectrum** ; ce mode est utilisé pour la signalisation et l'échange des messages de contrôle afin d'établir et de surveiller les connexions entre les différents dispositifs. Supporter ce mode est donc obligatoire pour tous les appareils. MCS0 a été sélectionnée pour fournir une transmission très robuste qui peut résister aux différentes interférences possibles dans le canal. Concernant le préambule (STF) est plus long que dans les autres paquets et cela pour rendre la transmission plus robuste [4].
- **La modulation Single Carrier (SC)** ; en mode SC, la transmission est de 385 Mbit/s à 4,620 Gbit/s en fonction de la MCS. Pour supporter les périphériques mobiles qui sont sensibles à la consommation d'énergie, un mode en plus (en option) "low-power SC mode" avec un encodeur d'économie d'énergie a été défini [58].
- **La modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)** ; pour atteindre des débits de données les plus élevés [59].

Chaque type de couche physique a un rôle et une structure de paquet distincte, représentée dans la figure 2.10. Beaucoup de soins ont été pris afin d'aligner les structures de paquets, notamment les préambules pour simplifier l'acquisition du signal, le traitement et l'identification du type de la couche physique dans le récepteur [15].

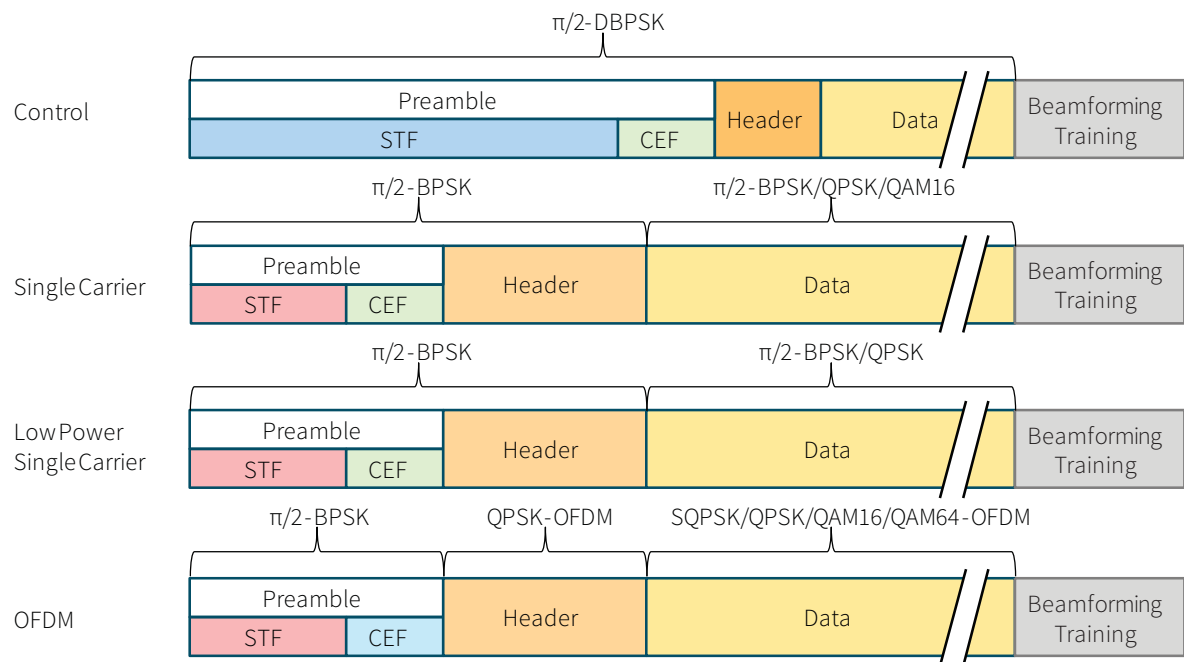


FIGURE 2.10 – Structures de paquets DMG PHY 802.11ad [60]

Préambule

Les trois types de paquets ont en commun une structure de préambule essentiellement composée de deux champs :

- Short Training Field (STF) :
 - Estimation de timing ;
 - Réglage de la AGC.
- Channel Estimation Field (CEF) :
 - Estimation de canal de transmission.

Ces champs sont construits à partir de la répétition des séquences de Golay p/2-BPSK modulés qui sont décrits en détail dans la figure 2.11.

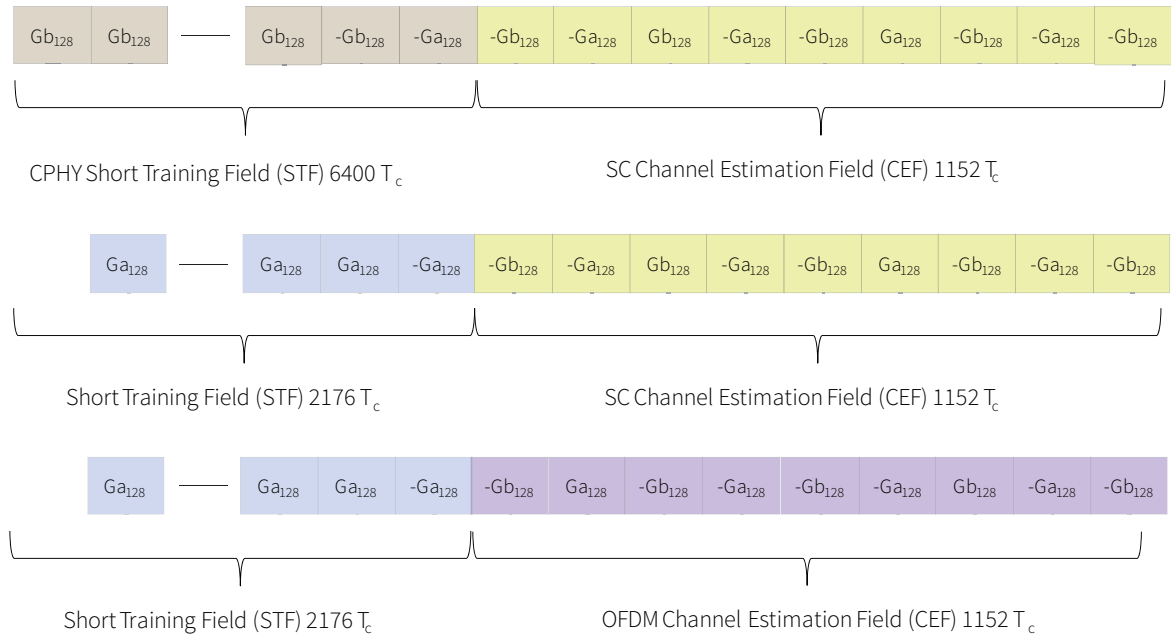


FIGURE 2.11 – Variantes de préambule exprimées en séquences de Ga128 et de Gb128

a) Header

Dans tous les cas, le préambule est suivi d'un champ Header qui transmet des informations concernant le reste du paquet. En particulier, il signale le type de la modulation et le codage (MCS) étant utilisé pour la partie payload du paquet [4].

Certains de ces champs les plus importants sont :

Scrambler Initialization : Ce champ définit le point de départ pour le brouilleur.

MCS : Ce champ indique le schéma de modulation et de codage utilisé dans le champ payload (une partie du paquet).

Length : Ce champ indique le nombre d'octets de données dans le champ payload.

Training Length : Ce champ indique la longueur du beamforming optionnel à la fin du paquet.

HCS : Il s'agit d'une somme de contrôle CRC-32 sur les bits d'entête.

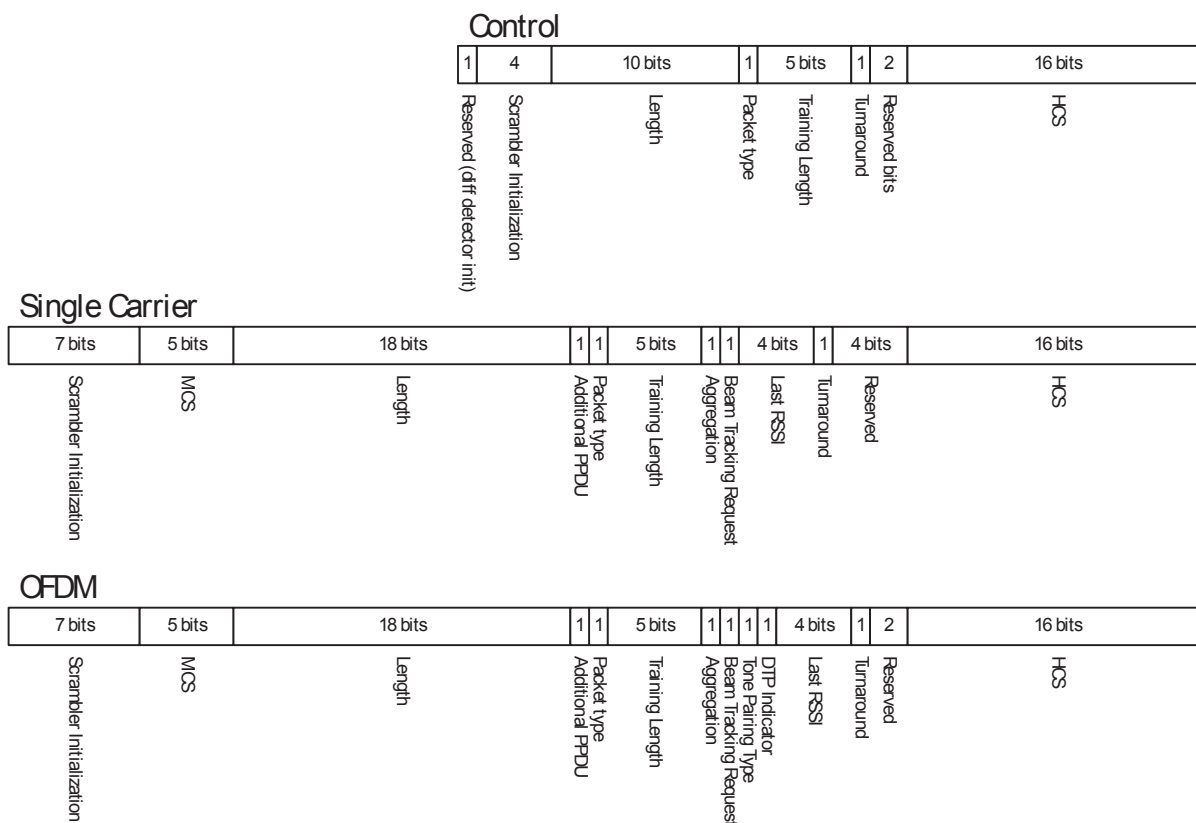


FIGURE 2.12 – La structure du champ Header

Packet Type : Ce fanion indique si le champ beamforming training est configuré pour l'émetteur ou pour le récepteur.

b) Beamforming Training

Ce champ est facultatif et peut être ajouté à tous les paquets. Il comprend les informations de la formation de faisceau.

c) Payload

Le contenu champ Payload (charge utile) de paquets est un flux d'octets. Comme mentionné précédemment, le champ Longueur d'en-tête quantifie le contenu utile de la charge utile. Avant le codage, les données du champ Payload, en fonction de la longueur choisie, peut être prolongée par une petite quantité de bits, en utilisant "des bits de bourrage", de sorte que le processus de codage produit un nombre entier de blocs ou de symboles de modulation [4].

2.3.2.2 Systèmes de modulation et de codage

La spécification IEEE 802.11ad compile 32 schémas de modulation et de codage différents. Cependant, nous pouvons rapidement simplifier la liste des MCS en la divisant en quatre clas-

sifications de base voir la table 2.3 [21].

MCS	Modulation	Bit Rate (Mbps)
Control PHY (CPHY)		
0	DBPSK	27.5
Single Carrier (SC)		
1	$\pi/2$ -BPSK	385
2	$\pi/2$ -BPSK	770
3	$\pi/2$ -BPSK	962.5
4	$\pi/2$ -BPSK	1155
5	$\pi/2$ -BPSK	1251.25
6	$\pi/2$ -QPSK	1540
7	$\pi/2$ -QPSK	1925
8	$\pi/2$ -QPSK	2310
9	$\pi/2$ -QPSK	2502.5
10	$\pi/2$ -16QAM	3080
11	$\pi/2$ -16QAM	3850
12	$\pi/2$ -16QAM	4620
OFDM		
13	SQPSK	693
14	SQPSK	866.25
15	QPSK	1386
16	QPSK	1732.5
17	QPSK	2079
18	16-QAM	2772
19	16-QAM	3465
20	16-QAM	4158
21	16-QAM	4504.5
22	64-QAM	5197.5
23	64-QAM	6237
24	64-QAM	6756.75
Low Power SC		
25	$\pi/2$ -BPSK	626
26	$\pi/2$ -BPSK	834
27	$\pi/2$ -BPSK	1112
28	$\pi/2$ -QPSK	1251
29	$\pi/2$ -QPSK	1668
30	$\pi/2$ -QPSK	2224
31	$\pi/2$ -QPSK	2503

TABLE 2.3 – Résumé des schémas de modulation et de codage (MCS) de la norme 802.11ad

2.3.3 La couche MAC IEEE 802.11ad

Le standard 802.11ad, qui entre dans le cadre des WLANs très hauts débits, définit une couche physique, un protocole d'accès au médium ainsi qu'un protocole de beamforming spé-

cifiques à la bande 57-66 GHz [21]. L'architecture générale de ce standard est présentée dans la Figure 2.13. Sur cette figure on retrouve à gauche la structure classique des WLANs de type 802.11 sur la bande ISM et UNII. La méthode d'accès de base est DCF (CSMA/CA) au-dessus duquel on retrouve les mécanismes définis pour la prise en compte de la QoS. A droite, nous avons la nouvelle structure de la MAC pour la bande 57-66GHz [3].

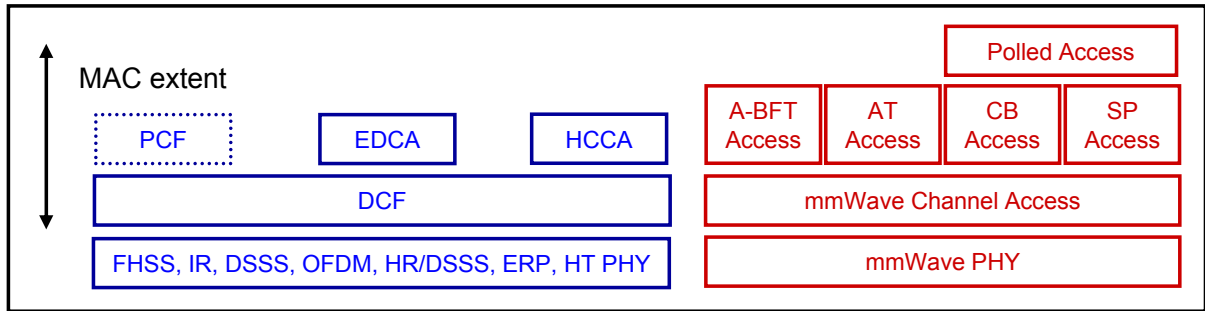


FIGURE 2.13 – Architecture MAC de la norme IEEE 802.11ad

2.3.3.1 Architecture d'un réseau 802.11ad

La norme 802.11 définit deux types d'architecture réseau connue sous le nom de l'Infrastructure Basic Service Set (BSS) et Independent BSS (IBSS). L'infrastructure BSS est caractérisée en ayant une station dédiée, le point d'accès (AP) qui donne accès au réseau pour les stations sans fil (STAs) associées à ce AP. L'IBSS est conçue pour la communication paire à pair sans la nécessité d'un AP.

En tenant compte des caractéristiques des scénarios d'utilisation importantes (par exemple, absence de AP, toutes les stations du réseau peuvent être alimentées par batterie, etc.) et les défis de la communication bidirectionnelle dans la bande 60 GHz. Les infrastructures BSS et IBSS ne sont pas bien adaptées pour certains scénarios d'utilisation de la bande 60 GHz.

Par conséquent, une nouvelle architecture de réseau nommée comme Personal BSS (PBSS) est définie dans la spécification IEEE 802.11ad (voir la figure 2.14). Semblable à l'IBSS, l'architecture PBSS est un type de réseau ad hoc IEEE 802.11 dans lequel les stations sont capables de communiquer directement entre elles et ne s'appuyant pas sur un dispositif spécial comme un AP.

Par opposition à l'IBSS, dans le PBSS une STA est nécessaire pour assumer le rôle de point central PBSS (PCP). Le PCP permet la synchronisation de base pour la PBSS ainsi que la répartition des périodes de service et des périodes basées sur la contention [18].

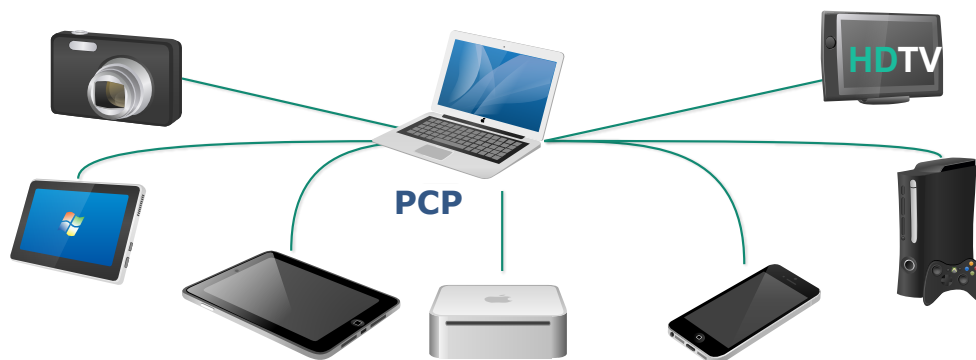


FIGURE 2.14 – Architecture d'un réseau PBSS IEEE 802.11ad

2.3.3.2 Accès au canal IEEE 802.11ad

L'accès au canal en IEEE 802.11ad se produit pendant l'intervalle de beacon (BI) qui est coordonné à l'aide d'un schedule(planning). Le PCP génère un planning et le communique aux stations en utilisant le beacon à ondes millimétriques et Announce frame. Le BI est l'intervalle de temps entre deux beacon consécutifs. Le beacon interval est appelé la super-trame de 802.11ad et comprend un intervalle d'émission du balise (BTI), un intervalle de transfert de données (DTI), et en option association beamforming training time (A-BFT) ou des intervalles de transmission de l'annonce (ATI) (voir la figure 2.15). Le DTI peut inclure une ou plusieurs périodes de service (SPs) et contention-based access periods (CBAPs) [13].

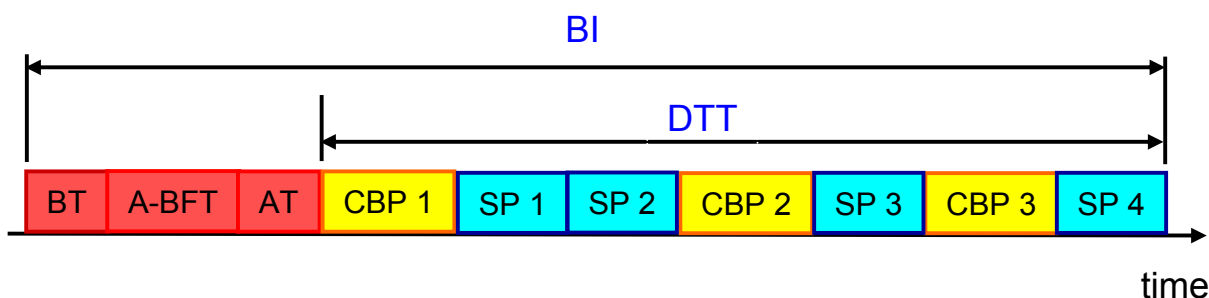


FIGURE 2.15 – Super Trame du 802.11ad

Le beacon interval IEEE 802.11ad MAC est principalement divisé en 4 parties :

1. DTT – data transfer time
2. BT – beacon time
3. A-BFT – association beamforming training time
4. AT – announcement time

a) Association de BT/Directional : Représente la partie de la super-trame où le beacon est transmis. Le temps qui s'écoule entre la transmission de deux balises successives est le

Beacon Interval (BI). Seul le coordinateur Personal basic service set Coordination Point (PCP) est autorisé à émettre des trames balises.

Dans cette période, l'AP/PCP diffuse les beacons dans différentes directions et détermine l'intervalle directionnel de beacons approprié. Quant les stations reçoivent les beacons sur leurs directions supportées, ils les scannent pour commencer le mécanisme de beamforming avec l'AP/PCP dans la période d'A-BFT.

b) A-BFT/Beamforming : Cette période donne la continuité au processus beamforming initié par une transmission de beacon durant la période BT. La période A-BFT est employée pour exécuter la formation initiale de beamforming entre une station et un AP/PCP. La technique de Beamforming utilise des antennes directionnelles pour réduire les interférences et pour permettre une transmission de données plus rapide dans des longues distances.

Pendant le processus de beamforming, deux dispositifs lancent des communications pour affiner leurs réglages d'antenne, et de déterminer la capacité de données suffisantes afin d'obtenir une meilleure qualité des communications directionnelles. Le Beamforming est celui qui convient le mieux pour des communications à ondes millimétriques dans la gamme 60 GHz car il permet à de nombreux éléments d'antenne à être emballés dans une très petite zone [13].

c) AT : Temps d'annonce : AT effectue la gestion des trames de request-response échangées entre AP/PCP et les stations.

d) CBP/agrégation des trames , Agrégation-ACK et agrégation bidirectionnelle avec ACK : L'accès pendant le CBP est basé sur un mécanisme d'accès modifié d'EDCA 802.11e qui est très bien adapté aux communications bidirectionnelles. Chaque priorité d'accès transmet des données basées sur le mécanisme d'accès CSMA/CA. La période CBP offre une transmission de données améliorées en garantissant un débit élevé pour les délais requis dans les applications à 60 GHz. Dans la période de transmission d'un trafic diffusé un échange des trames d'agrégation et Agrégation-ACK est accompli dans la phase CBP [13].

La norme IEEE 802.11ad s'appuie sur un nouveau schéma d'agrégation qui prend en charge les trafics vidéo appelé agrégation vidéo MSDU (VA-MSDU). Une trame VA-MSDU se compose d'une sous-en-tête MAC avec une Head Check Sequence (HCS) et des MSDUs agrégés qui contient une sous-trame FCS. Une sous-en-tête MAC comprend les informations d'une MSDUs agrégés et Agrégation avec ACK (A-ACK) bitmap. La structure d'une trame MAC VA-MSDU est donnée par la figure 2.16. La longueur maximale d'une seule MSDU d'une VA-MSDU est 1Mbytes y compris le champ SFCS, tandis que 16 Mo est la longueur maximale autorisée pour des MSDUs agrégés. Une VA-MSDU Bidirectionnelle est activée en utilisant l'agrégation et l'agrégation ACK bitmap.

e) SP/le mécanisme d'accès TDMA : L'accès pendant les périodes SPs est prévu pour des stations spécifiques. Ce mode de fonctionnement partagé dans la bande 60 GHz avec les différents ensembles d'exigences forment un grand défi pour la conception de la couche MAC. Par exemple, les applications telles que l'affichage sans fil sont exigeantes en matière de la

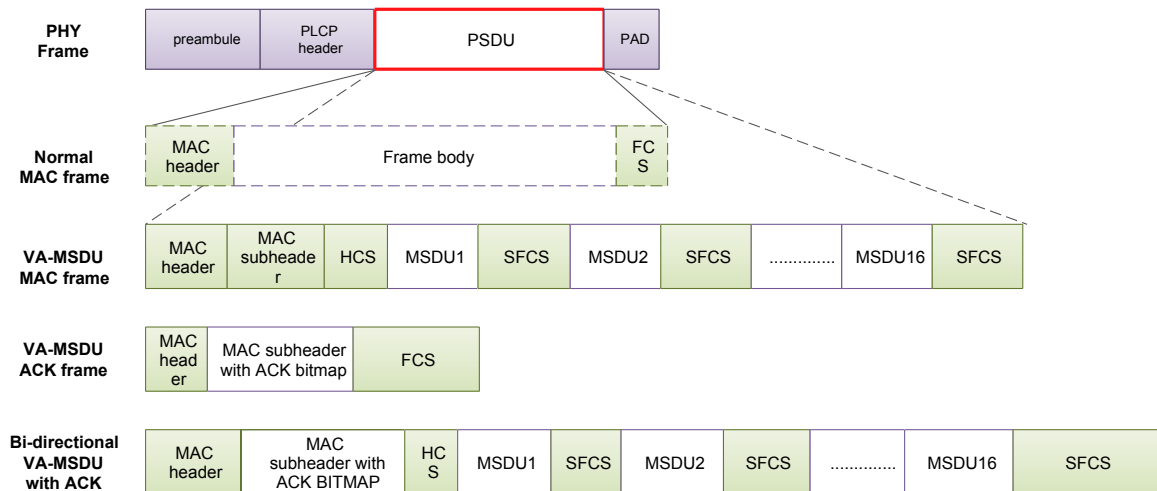


FIGURE 2.16 – Schéma d'aggrégation de la norme IEEE 802.11ad

qualité de service, en plus de leur sensibilité aux délais et de la gigue. D'autres applications comme la navigation sur Web sont moins sensibles à la gigue mais très sensible aux temps de réponse.

Dans le mécanisme d'accès MAC 802.11ad, la période de beacon comprend à la fois les mécanismes d'accès à la couche MAC TDMA et CSMA. En fait, TDMA est nécessaire pour les applications vidéo en raison de sa prise en charge de la QoS et offre une meilleure efficacité, tandis que CSMA/CA est utilisé pour les applications en rafale comme la navigation Web, car il garantit une latence moyenne inférieure à TDMA. Le polling est un moyen très efficace pour faire face à l'allocation dynamique et la réaffectation des temps dans le canal. En outre, le mécanisme polling fournit une plus grande priorité d'accès au support pour la période d'accès CSMA/CA [13].

2.3.4 Le protocole BeamForming

Le beamforming est l'optimisation du faisceau de l'antenne directive. Il permet à un émetteur de focaliser son faisceau vers le récepteur désiré. Le protocole de beamforming est basé sur l'échange de trames de type Sector Sweep (SS). Il se déroule en deux étapes (figure 2.17) [17] :

- Un balayage des secteurs ou Sector Level Sweep (SLS) : durant cette étape, l'initiateur et le récepteur s'échangent des trames de training dans le but de choisir leur meilleur secteur de transmission [29].
- Un affinement dans le secteur choisi ou Beam Refinement Phase (BRP) : durant cette étape, l'initiateur et le récepteur choisissent leur meilleur beam dans le secteur choisi pendant la phase précédente.

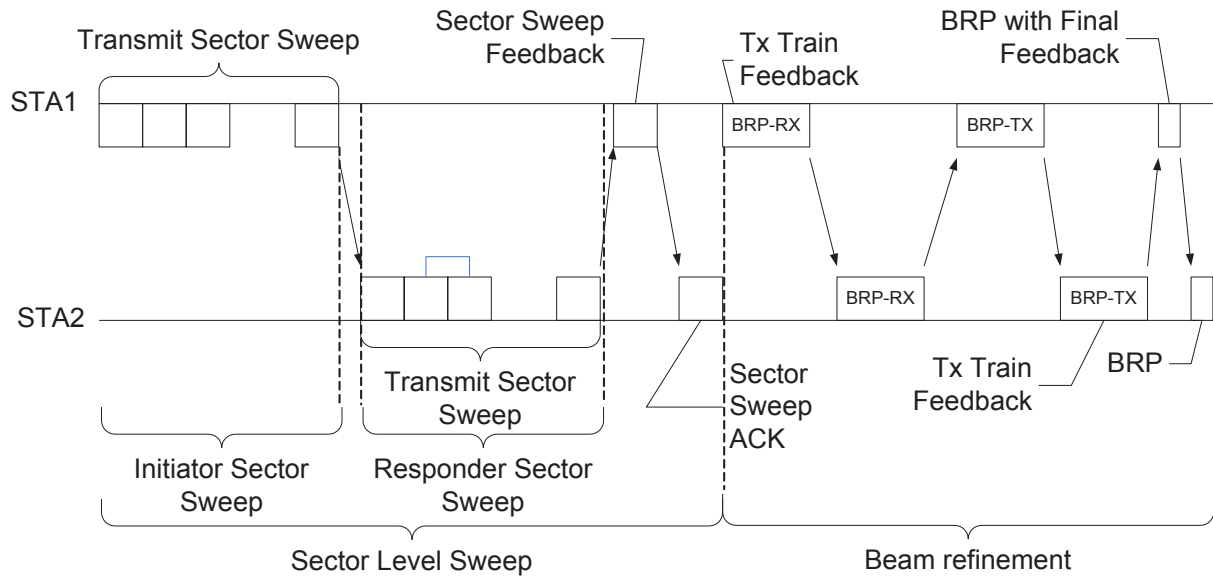


FIGURE 2.17 – Protocole de training dans le 802.11ad

2.3.5 Fast Session Transfer

L'une des innovations majeures dans le cahier des charges de 802.11ad est l'introduction d'un mécanisme MAC multi-canaux qui prend en charge le transfert rapide d'un lien d'un groupe à un autre groupe. Ceci est également connu comme FST (Fast Session Transfer) [33]. Le transfert rapide de session permet un basculement automatique des transmissions entre les trois bandes de fréquence 2,5 GHz/5 GHz/60 GHz.

Toutefois, afin d'assurer un transfert sans collision entre les bandes, le projet de spécification de la norme IEEE 802.11ad introduit ce qu'on appelle FST transparent. En FST transparent, une station utilise la même adresse MAC dans deux groupes de canaux. En faisant cela, il n'y a aucune incidence sur la liaison qui existe entre la couche supérieure (par exemple IP) et la couche MAC, rendant le FST complètement transparent. Pour accélérer le temps de commutation dans le FST, plusieurs autres améliorations sont faites telles que la clé de sécurité mise en place avant le FST, l'allocation des ressources multi-bandes, et le bloque d'acquiescement sur plusieurs bandes sont définies dans le projet de spécification IEEE 802.11ad [18].

2.3.6 Procédure de communication dans la norme 802.11ad

La procédure de communication peut être résumée comme suit : Après avoir été mis sous tension, le PCP/AP scanne les canaux pour sélectionner un canal approprié et il initialise le BSS comme indiqué dans Fig 2.18. Le PCP commence donc à transmettre le beacon d'information.

Lorsqu'un dispositif envoie une demande d'association à un PCP particulier, ce dispositif écoute périodiquement le beacon jusqu'à ce qu'il trouve le PCP, qui renvoie à son tour une réponse d'association pour ajouter le dispositif par la suite. S'il est prévu pour la sécurité (Robust Security Network Association (RSNA)), un élément d'information est envoyé avec une

réponse d'association à l'appareil par le PCP.

Ensuite, pour transmettre les données, un SP request est envoyé par le dispositif au cours de la période disponible pour le SP et le PCP renvoie un SP reponse avec le SP alloué. Enfin, lorsque le PCP est éteint il envoie des informations de balise pour de-authentication et dissocier tous les périphériques, puis s'éteint [9].

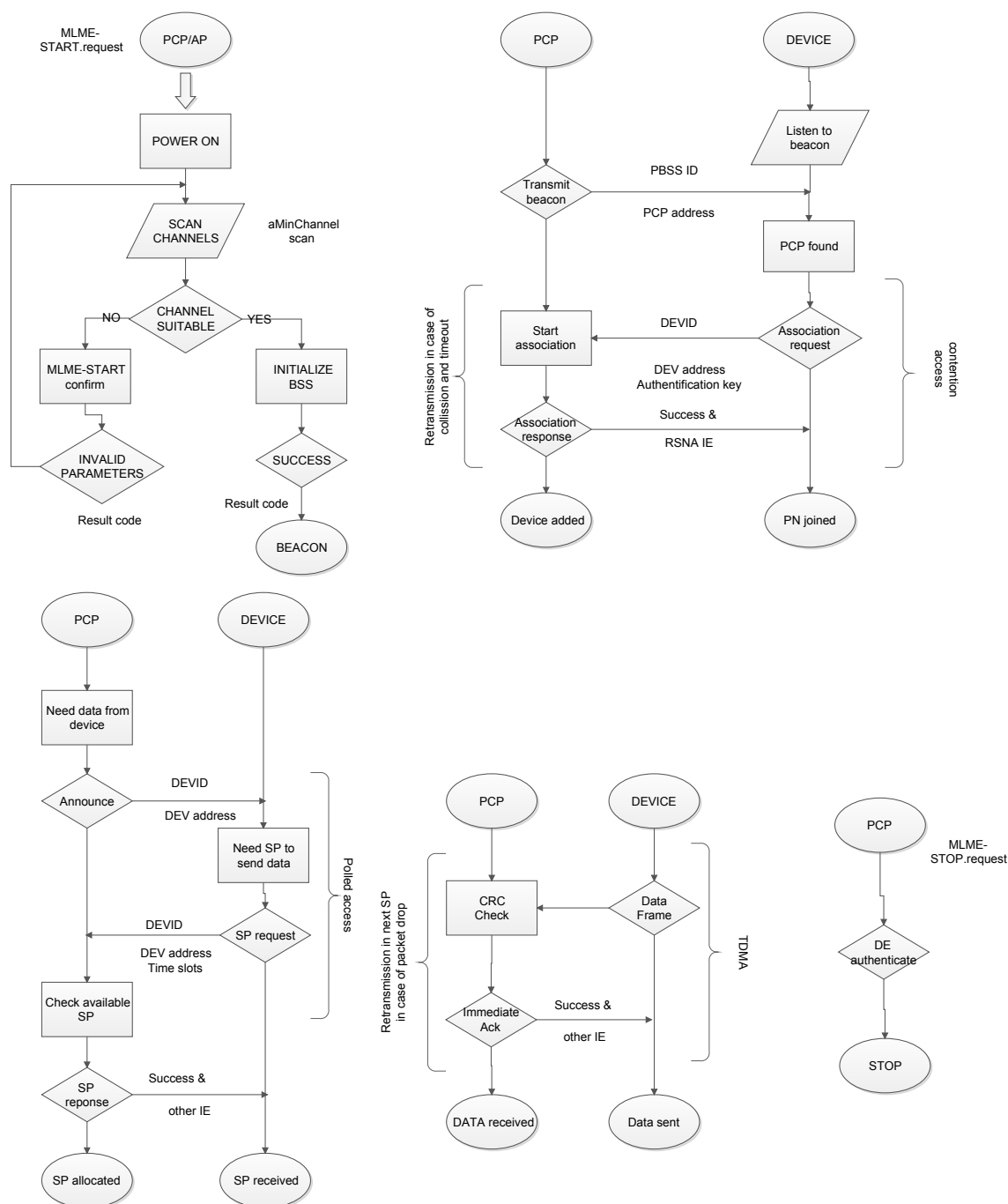


FIGURE 2.18 – La procédure de communication dans la norme 802.11ad

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les différentes avancées réalisées par les groupes 802.11ac (dont le thème est le très haut débit) et 802.11ad (ayant pour thème l'extrêmement haut débit) où nous avons réussi à démystifier leur fonctionnement qui permettait notamment d'atteindre un débit d'ordre de quelques Gbps. Ces deux groupes ont adopté deux philosophies distinctes afin d'atteindre ces débits élevés. Pour la norme IEEE 802.11ac, leur philosophie consiste à l'introduction des quatre perfectionnements dans la couche physique qui se traduit par l'utilisation des canaux plus larges 80/160MHz, l'introduction d'une modulation d'ordre supérieur qui utilise le codage 256QAM, l'utilisation de plusieurs flux spatiaux et enfin l'utilisation des multiples utilisateurs MIMO. Pour l'accès au médium, la norme IEEE 802.11ac a défini deux méthodes d'accès aux canaux multiples qui sont l'accès statique et l'accès dynamique. Par contre dans la norme IEEE 802.11ad, l'approche de cette norme réside dans l'augmentation de la bande de fréquences utilisée. En passant à 60 GHz directement et l'utilisation de la technique de modulation OFDM pour atteindre un débit d'ordre 7 Gbps.

Nous avons constaté aussi que la bande de fréquence millimétrique 60GHz dont elle opère la norme 802.11ad est peu exploitée par les technologies sans fil et qui offre des canaux plus larges par rapport à la norme 802.11ac. Cet avantage qui caractérise la norme 802.11ad nous a incités à la considérer dans notre étude et qui fait l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 3

Proposition et validation d'un protocole MAC dans la norme 802.11ad

3.1 Introduction

L'arrivée du Wi-Fi à haut débit, basé sur la norme 802.11ad, aura un impact non négligeable sur le monde sans fil. Il permettra aux appareils mobiles de bénéficier d'une avancée technologique révolutionnaire en termes de débit et de capacité. Par conséquent, la communauté scientifique doit fournir des efforts conséquents afin d'arriver à la maturation de cette norme.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'ensemble des travaux qui se trouvent dans la littérature et qui sont consacrés particulièrement à l'évaluation des performances de la couche MAC pour la nouvelle norme 802.11ad ; pour proposer par la suite un nouveau protocole d'accès à la couche MAC pour cette norme avec une évaluation des performances.

3.2 Méthodes d'accès au canal

Le but d'un protocole MAC est de gérer l'accès au canal de transmission sans fil afin de garantir un partage efficace du canal entre les nœuds. Il y a deux grands types d'accès : accès basé sur la contention (aléatoire) et accès sans contention (organisé).

3.2.1 Les protocoles basés sur la contention

Les protocoles basés sur la contention reposent sur un accès aléatoire au médium, de façon compétitive, pouvant conduire à des collisions en cas de plusieurs tentatives simultanées. La majorité de ces protocoles reposent sur les techniques d'accès suivantes : Aloha, Aloha slotté, CSMA et CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

3.2.2 Méthodes d'accès planifiées (Scheduled)

FDMA (Frequency Division Multiple Access)

Qui divise la ressource canal en plusieurs bandes de fréquences pouvant être de largeur variable. Les fréquences sont attribuées aux différentes stations selon leur besoin.

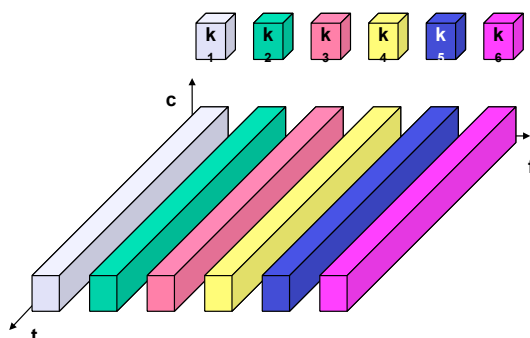


FIGURE 3.1 – Méthodes d'accès FDMA

TDMA (Time Division Multiple Access)

Est un multiplexage temporel utilisé dans chaque canal ou voie. Le principe est de découper le temps et de le partager entre plusieurs utilisateurs, chaque utilisateur aura donc un intervalle bien précis pour envoyer ses données. Cet intervalle est appelé **Time slot**. Durant une transmission, un utilisateur occupera toute la bande passante qui lui était offerte.

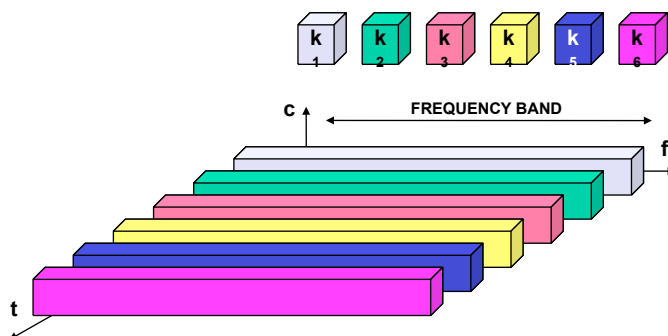


FIGURE 3.2 – Méthodes d'accès TDMA

CDMA (Code Division Multiple Access)

Qui consiste à allouer aux différentes stations la bande passante globale mais avec un code tel que tous les signaux sont émis en même temps. Le récepteur étant capable de déterminer les signaux à capter en fonction du code et de la puissance associée.

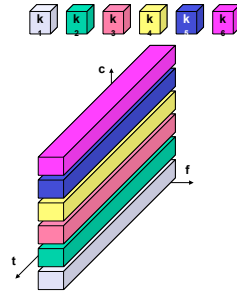


FIGURE 3.3 – Méthodes d'accès CDMA

3.3 Etat de l'art sur l'analyse des performance de IEEE 802.11ad

Dans la littérature, il existe de nombreux documents sur la norme IEEE 802.11ad en général, les aspects PHY de celle-ci et peu de travaux sur l'analyse des performances de la couche MAC IEEE 802.11ad. Dans cette section, nous faisons un survol des différents travaux liés à l'évaluation des performance de la couche MAC de la norme IEEE 802.11ad.

Shankar [47] (2009), Park et al. [40] (2008) et Perahia et al. [43] (2010) présentent une proposition de couche MAC hybride dans le cadre de la standardisation de la nouvelle génération de réseaux WLANs à très haut débit. La technique d'accès proposée utilise une structure de super-trame présentée sur la figure 3.4. L'allocation de la super-trame est décrite dans le beacon intervalle (BI). Cette allocation contient une ou plusieurs périodes d'accès avec contention, une ou plusieurs parties d'accès en TDMA et une partie d'accès réservée au polling. La présence de diverses techniques d'accès dans la super-trame a pour but d'assurer une très grande flexibilité. Ce qui introduit tout de même une complexité au niveau de l'implémentation [16]. Il est proposé de procéder à une identification de la technique d'accès la mieux adaptée pour une application particulière afin d'aboutir à des implémentations simplifiées. Une architecture basée sur la technique d'accès TDMA où l'allocation et le contrôle du réseau sont assurés par un coordinateur est présentée dans [26]. Les communications sur les tranches allouées par le coordinateur peuvent s'effectuer entre le coordinateur et les équipements du WVAN (Wireless Video Area Network) ou entre les équipements eux mêmes sans l'intervention du coordinateur. Cette proposition met l'accent sur la simplicité et évite ainsi la surcharge engendrée par les techniques de type CSMA/CA ou Polling.

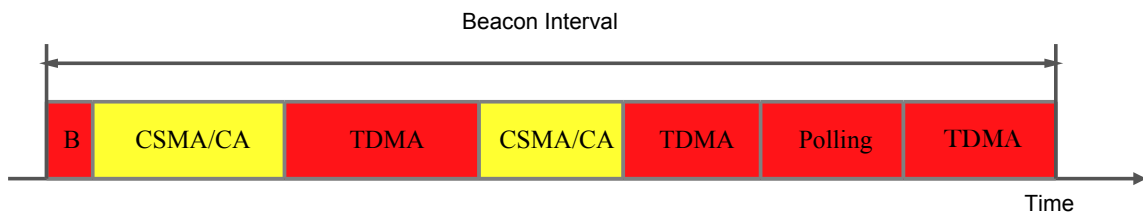


FIGURE 3.4 – Structure de super trame 802.11ad

Cordeiro [16] (2009) : présente une évaluation de performances (par méthode analytique), des différents mécanismes d'accès susceptibles d'être utilisés à 60GHz :

- Le CSMA/CA utilisé dans le standard 802.11.
- Le TDMA utilisé dans les réseaux cellulaires et le WiMAX.
- Le Polling utilisé dans le Bluetooth.

L'évaluation du mécanisme CSMA/CA démontre que son efficacité est étroitement liée à la taille des slots. Réduire la taille des slots, de $32\mu s$ à $8\mu s$ conduit à doubler l'efficacité du protocole. L'évaluation du TDMA démontre de très bonnes performances pour une taille de

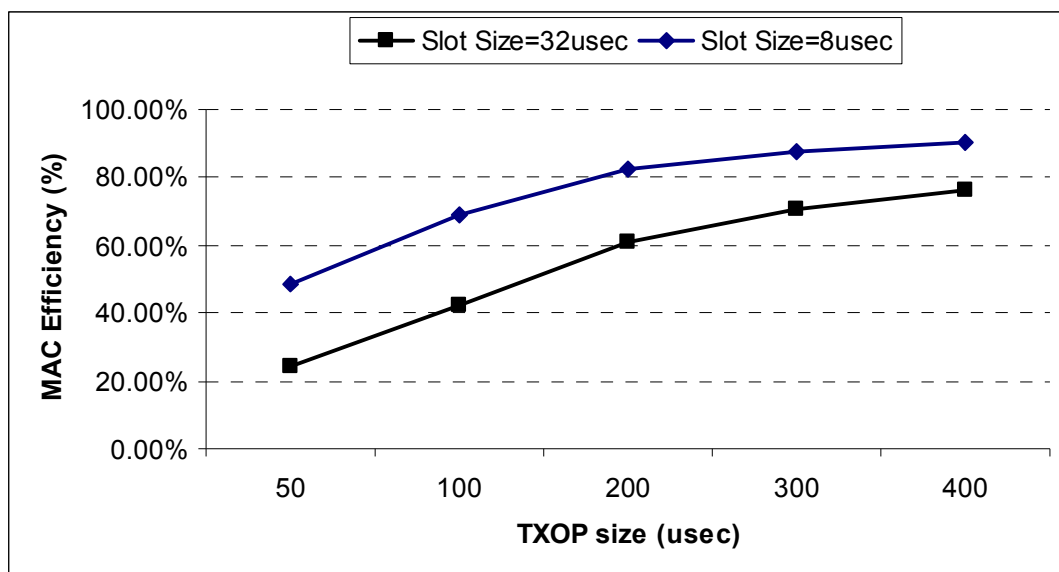


FIGURE 3.5 – Efficacité CSMA/CA dans 60 GHz

MSDUs de 15 Kbytes, son efficacité étant trois fois supérieure à celle du CSMA/CA. Un autre avantage de ce mécanisme est qu'il permet une gestion simplifiée de la consommation d'énergie. Connaissant à l'avance leur instant d'accès, les nœuds en TDMA peuvent être aisément mis en mode basse consommation. Le problème majeur posé par ce protocole est la scalabilité, lorsque plusieurs réseaux se recouvrent. Un autre inconvénient mentionné dans [31] est la latence relativement élevée avec cette méthode. Ce qui est dû au fait qu'un nœud doit toujours procéder à une réservation avant son accès. Enfin, l'évaluation du polling démontre de meilleurs perfor-

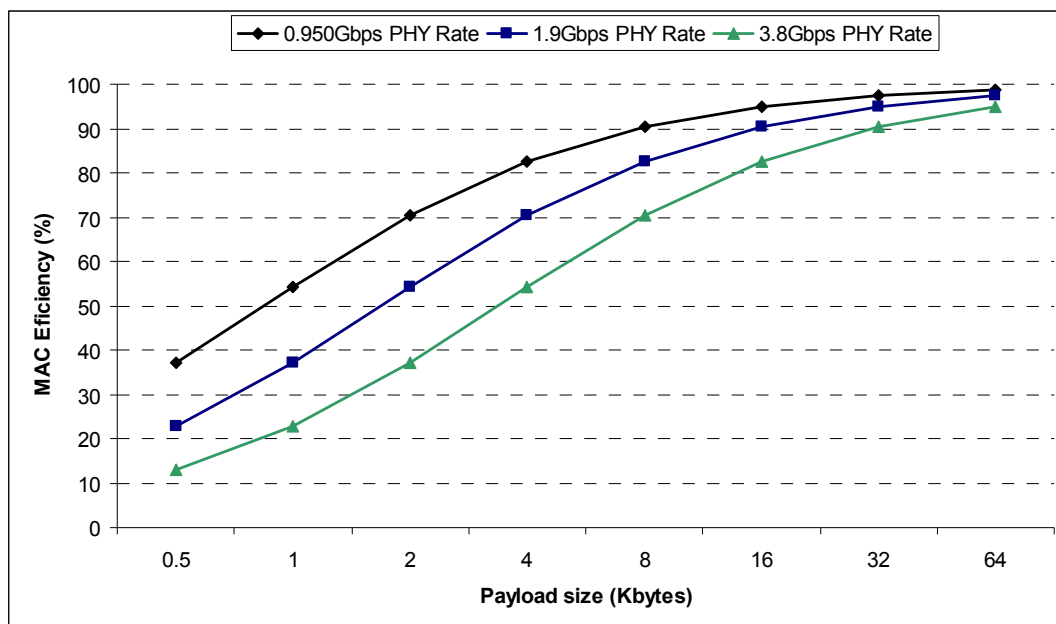


FIGURE 3.6 – Efficacité TDMA dans 60 GHz

mances que celle du CSMA et s'approchant de celles du TDMA. Contrairement au TDMA, l'utilisation du mode omnidirectionnel n'est pas impérative en polling, vu que les esclaves communiquent exclusivement avec le maître. L'inconvénient majeur de ce mécanisme est sa faible adaptation à la nature statistique du trafic. Il conduit à un gaspillage de bande passante par l'interrogation des nœuds même si ces derniers n'ont aucun trafic à émettre.

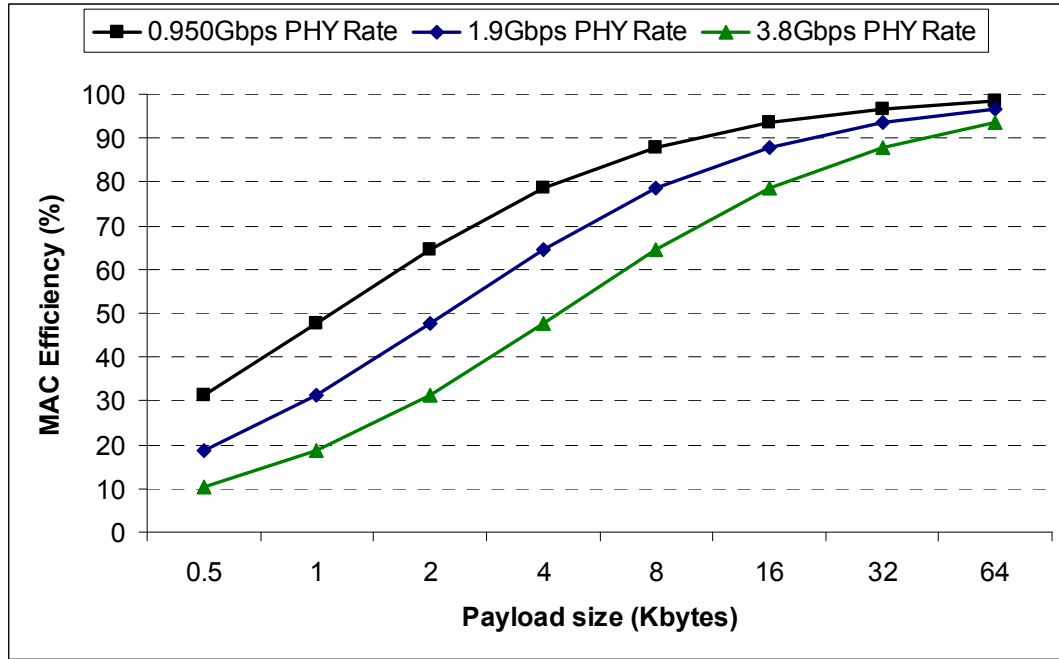


FIGURE 3.7 – Efficacité du Polling dans 60 GHz

Cordeiro et al. [18] (2010) ont décrit les principales modifications des composantes des couches MAC et PHY incluses dans le projet de la norme IEEE 802.11ad actuelle, et qui permettent des débits de données multi-Gbps. Ils ont présenté également un ensemble complet de résultats de simulation avec Opnet sur des cas d'utilisation typique (dans un salon et une salle de conférence).

Perahia et al. [43] (2010) ont donné un aperçu sur la norme IEEE 802.11ad, qui est en passe de définir la prochaine génération multi-Gbps Wi-Fi.

Perahia and Gong [44] (2011) ont décrit les canaux 802.11ac, la conception PHY, les modifications de la couche MAC, et DL-MU-MIMO. Pour la norme 802.11ad, ils ont présenté la nouvelle architecture Personal Basic Service Set (PBSS) vue précédemment, la nouvelle couche physique, l'amélioration de la couche MAC et le fonctionnement de beamforming.

Charfi et al. [12] (2012) donnent un aperçu des nouveaux mécanismes de contrôle d'accès au support (MAC) qui sont à la hausse aujourd'hui. Ils se sont concentrés sur les mécanismes d'accès au canal de la norme IEEE 802.11 et IEEE 802.11e MAC déjà existés, ainsi que ceux qui sont en cours de développement, tels que IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad et IEEE 802.11aa.

La couche MAC de la norme 802.11ad consiste en couche MAC basique et une couche MAC améliorée pour atteindre un haut débit. Les fonctionnalités de bases de la couche MAC sont basées sur la norme d'origine 802.11 et d'autres normes 802.11 disponibles tels que 802.11e et 802.11n.

Par conséquent, la norme 802.11ad supporte les mécanismes d'accès MAC existants dans les

normes 802.11a/b/g, DCF, PCF et HCF du 802.11e.

La couche MAC améliorée de la norme 802.11ad inclut des nouvelles fonctionnalités pour atteindre un débit élevé d'ordre de quelques Gbps, pour faire face à une communication bidirectionnelle, et supporter la bande 60GHz avec l'amélioration de la qualité de service.

Lorsqu'on regarde le format de la super-trame 802.11ad donnée dans Fig 3.4, nous pouvons encore découvrir ces améliorations. Cette super-trame se compose des parties suivantes :

- Beacon Time (BT) : représente la partie de la super-trame où le beacon est transmis. Le temps qui s'écoule entre la transmission de deux balises successives est le Beacon Interval (BI). Seul le coordinateur Personal basic service set Coordination Point (PCP) est autorisé à émettre des trames balises.
- Association and BeamForming Training (A-BFT) : représente la partie de la supertrame où s'effectue le beamforming.
- Contention Period Based Access 1 (CPB1) : représente la première période d'accès avec contention de la super-trame.
- Announcement Time (AT) : dans cette partie, le PCP transmet des trames de commande et de gestions. Ces trames peuvent également être transmises par un autre nœud du réseau à condition qu'il soit autorisé.
- Service Period (SP) : dans cette partie, le PCP attribue le support aux nœuds du réseau grâce à un mécanisme de Polling.
- Data Transfer Time (DTT) : représente la partie de la super-trame où l'échange des données tient lieu entre les différentes stations. Cette partie se compose d'un ou plusieurs Contention Period Based Access (CPB), et d'un ou plusieurs Service Period (SP). Dans les CPBs, la méthode d'accès est le CSMA/CA, tandis que les SP sont des tranches de temps garanties à une station particulière.

Charfi et al. [13] (2013) ont examiné les différentes améliorations de la couche physique et MAC pour les normes 802.11ac, 802.11ad et 802.11aa qui fournissent une satisfaction de la qualité de service pour une transmission en temps réel des flux multimédia dans les WLANs.

Mandke and Nettles [35] (2010) et Singh et al. [48] (2011) ont discuté de la possibilité d'une architecture à double bande pour les réseaux 802.11ad où la bande 2,4/5 GHz pourrait être utilisée pour le mécanisme de contention, et plus tard la bande 60 GHz pourrait être utilisé pour la transmission de données.

Park et al. [41] (2009) ont considéré un support avec qualité de service (QoS) pour des scénarios d'utilisation qui fournissent la vidéo haute définition compressé avec d'autres applications de données avec 60 GHz dans un environnement relativement dense. Les auteurs ont finalement conclu que la combinaison des méthodes d'accès à la couche MAC comme TDMA, avec soit CSMA ou polling serait efficace pour une qualité de service garantie avec l'utilisation de canal efficace.

Chen et al. [14] (2013) ont conçu un protocole d'accès aléatoire avec une communication

bidirectionnelle et coopérative, soit D-CoopMAC pour la norme IEEE 802.11ad. Ils ont utilisé un modèle de chaîne de Markov 3-D pour l'analyse des performances du protocole proposée D-CoopMAC et affirment que D-coop MAC surpasse le protocole d'accès à la couche MAC IEEE 802.11ad. Pour évaluer les performances de la couche MAC IEEE 802.11ad, ils ont considéré que l'effet de SP sur CBAP dans l'analyse de performance.

Hemanth and Venkatesh [28] (2014) ont présenté une modélisation et analyse des performances analytique pour la partie CBAP de la méthode d'accès à la couche MAC 802.11ad en utilisant les chaînes de Markov. Le modèle d'arrivée de Poisson a été considéré dans l'évaluation des performance de débit et de délai.

Kim and Kang [30] (2013) ont proposé une méthode appelée PCPA (Priority-Based Contention Period Allocation) pour le mécanisme d'accès au medium CSMA/CA directionnel. La méthode PCPA améliore le débit en limitant l'accès à la période de contention selon le type de trafic. Les résultats numériques montrent que la méthode proposée surpasse plus de deux fois par rapport à celle de la norme 802.11ad. Différentes largeurs de faisceau et efficacité de rayonnement sont considérées. Les résultats montrent que la largeur du faisceau étroit permet plus de débits.

Chandra et al. [11] (2014) ont étudié la partie CBAP du protocole d'accès à la couche MAC IEEE 802.11ad en utilisant des antennes directionnelles avec une analyse détaillée de performances du mécanisme CSMA/CA en tenant compte des différents temps fournis pour sélectionner un niveau de faisceau Qo (Quasi-omni) (voir la figure 3.8). Ils ont démontré qu'un algorithme de sélection adaptative des largeurs de faisceau au niveaux Qo en considérant la distribution spatiale des stations est très efficace et a permis de réaliser une amélioration significative du débit MAC. Ils ont démontré aussi que les performances de l'approche de la largeur de faisceau fixe se détériore avec l'augmentation du nombre des stations tandis que l'approche des largeurs de faisceau adaptative est capable de maintenir un débit stable.

Les résultats numériques ont montré que par rapport à l'allocation de largeur de faisceau fixe, l'allocation de largeur de faisceau adaptative améliore l'utilisation du canal jusqu'à 20-30% et réduit la durée requise de CBAP de 40-50% pour les conditions de réseau données.

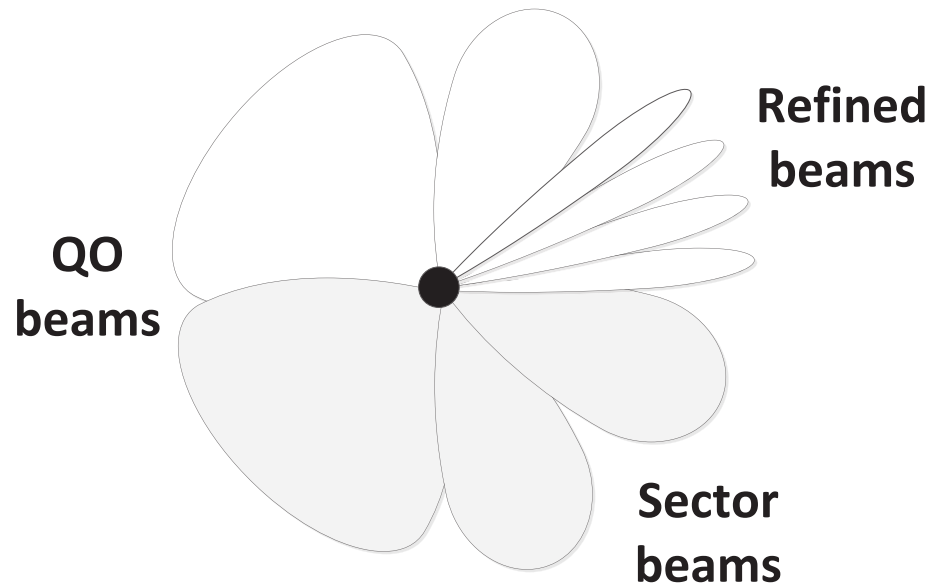


FIGURE 3.8 – Différents niveaux du faisceau dans 802.11ad IEEE.

3.4 Discussion

Après avoir étudié l'ensemble des littératures relatives à l'évaluation des performances de la couche MAC de la norme 802.11ad, on a constaté qu'il y a peu de travaux qui ont traité cette problématique. Ces travaux consistent à une proposition d'une méthode d'accès hybride à la couche MAC avec une évaluation de performance analytique, qui sera par la suite la méthode d'accès au medium de base prise dans l'amendement 802.11ad. Pour donner un aperçu sur le fonctionnement général de la couche MAC tel qu'il est décrit dans l'amendement 802.11ad voir [12, 18, 43, 44].

La totalité des techniques d'accès au medium proposées pour la norme 802.11ad s'articule sur l'utilisation d'un seul canal de transmission bien que cette norme offre quatre canaux disjoints avec une largeur de 2,16 GHz qu'on pourra tirer profit pour améliorer le débit. Dans la suite de ce chapitre, nous proposons d'expérimenter l'utilisation d'un mécanisme d'accès multi canaux pour la norme 802.11ad.

3.5 Proposition d'un protocole MAC multi-canaux pour les réseaux IEEE 802.11 ad

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que la norme 802.11 ad offre quatre canaux disjoints de largeur 2,16 GHz, leur utilisation est libre et n'est soumise à aucune licence. Pour tirer profit de cet avantage, nous proposons une nouvelle méthode d'accès au médium pour la norme 802.11ad basée sur l'utilisation de multi-canaux et qui aura un impact positif sur l'augmentation du débit.

Notre objectif, dans cette section, est de présenter en détail le protocole MAC multi-canaux proposé et la démarche que nous avons adoptée pour valider ce protocole.

3.5.1 Motivation

IEEE 802.11ad propose quatre canaux non recouverts, l'utilisation de ces quatre canaux simultanément au niveau des protocoles MAC (MAC multi-canaux) peut améliorer considérablement le débit du réseau par rapport aux protocoles MAC mono-canal. En effet, plusieurs transmissions concurrentes peuvent se dérouler sur différents canaux disjoints de façon simultanée.

Pour illustrer le bénéfice de la communication multi-canaux par rapport à la communication mono-canal, nous considérons le scénario suivant : Un système de communication composé de 8 stations nommées (Sta1, Sta2, Sta3, Sta4, Sta5, Sta6, Sta7 et Sta8) pour effectuer les quatre transmissions de données suivantes : la 1^{re} entre Sta1 et Sta2, la 2^{me} entre Sta3, Sta4, la 3^{me} entre Sta5 et Sta6 et enfin la 4^{me} entre Sta7 et Sta8. Dans la figure 3.9, les deux sous-figures (a) et (b) représentent respectivement le cas d'une transmission mono-canal et le cas d'une transmission multi-canaux avec 4 canaux non recouverts disponibles (numérotés de 1 à 4). Dans le cas mono-canal, les quatre transmissions se font de façon exclusive, l'une après l'autre tandis que dans le cas multi-canaux, les quatre transmissions peuvent se produire simultanément dans le premier slot, ce qui aboutit à un gain de quatre fois le débit.

3.5.2 Contraintes et problématique

Nous discutons des problèmes qui peuvent être rencontrés dans la conception d'un protocole MAC multi-canaux selon les travaux [16,17,18]

Problèmes multi-canaux du nœud caché

Un nœud est appelé un terminal caché multi-canaux [51] s'il interfère avec un de ses voisins par une tentative de transmission après la commutation sur le même canal. Ce problème se produit en raison qu'un émetteur-récepteur ne peut fonctionner que sur un seul canal à la fois

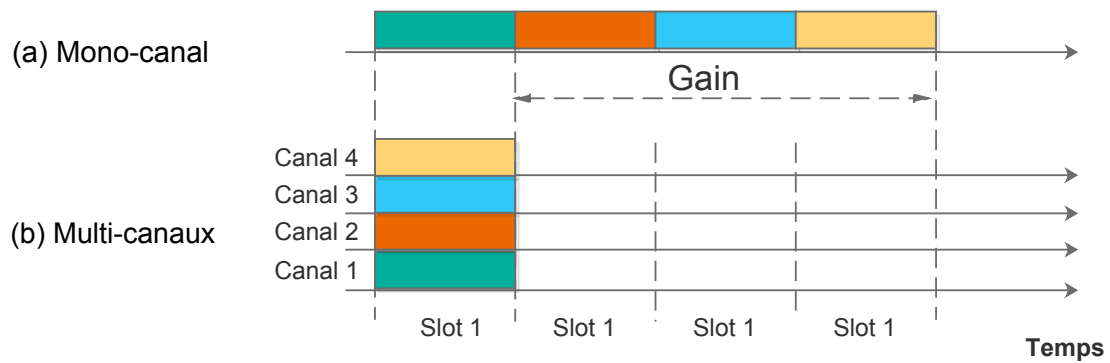


FIGURE 3.9 – Bénéfice de la communication multi-canaux par rapport à une communication mono-canal

et d'où un noeud n'a pas connaissance des activités des canaux utilisés par les noeuds voisins [50].

Considérons le scénario de la figure (a) où nous avons 3 communications. Après l'échange de contrôle RTS/CTS entre D et C sur le canal 1, D et C s'accordent sur le canal 3. Pendant le transfert de données entre D et C, A et B s'accordent sur le canal 2 et démarrent le transfert de données sur ce canal. A l'issue de la transmission de D vers C, C initie un rendez-vous vers D. N'ayant pas la connaissance que le canal 2 est déjà utilisé par A et B, C et D s'accordent pour utiliser le canal 2. Par conséquent, une collision se produit au niveau des noeuds récepteurs B et D.

Le problème de surdité

Le problème de surdité [34] se produit quand un noeud tente continuellement de contacter un autre noeud qui est occupé sur un canal différent. Cela entraînera une tentative échouée. Pour le mécanisme CSMA/CA de la norme IEEE 802.11, cela signifie que le contact sera retardé après un backoff jusqu'à ce que le nombre maximal de tentatives expire.

Considérons le scénario de la figure (b) où nous avons 3 communications. Après avoir échangé des trames de contrôle RTS/CTS sur le canal 1, B et A démarrent le transfert de données sur le canal 3. Pendant ce temps, C et D s'accordent sur le canal 2 et démarrent leur transmission de données sur ce canal. A l'issue de la communication entre B et A, B souhaite communiquer avec le noeud C. N'ayant pas écouté le rendez-vous entre C et D, B envoie son RTS sur le canal 1 de rendez-vous. Par conséquent, C ne peut pas recevoir les trames RTS qui lui sont adressées puisqu'il est sur le canal 2 en activité de transfert avec D. Malheureusement, les multiples renvois du RTS, qui surchargent le canal inutilement, seront perdus jusqu'à ce que le noeud B abandonne la trame de données. Lorsque cette situation se répète, le noeud émetteur peut conclure à tort que le noeud destinataire est inaccessible ou défaillant.

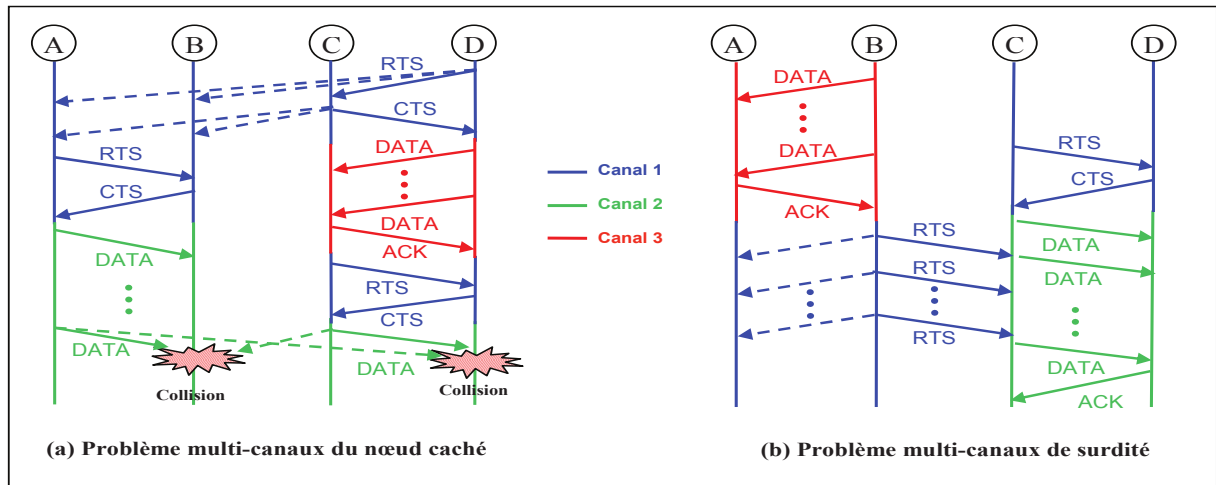


FIGURE 3.10 – Problèmes multi-canaux du nœud caché et de surdité

3.5.3 Fonctionnement général

Le talent d'Achille de notre proposition consiste à utiliser les 04 canaux simultanément dans la méthode d'accès à la couche MAC de la norme 802.11ad. Ces canaux seront repartis en un seul canal réservé aux trames de contrôle et les trois canaux restants seront dédiés aux transmissions de données

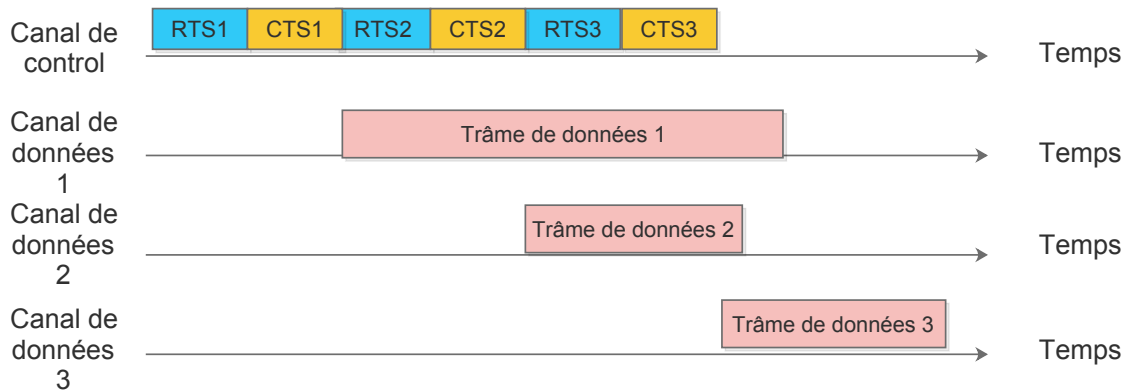


FIGURE 3.11 – Protocole Mac multi-canaux proposé

Une table de canaux à N entrées (N est le nombre des canaux de données). Chaque entrée de la table correspond à un canal de données qui se compose d'un bit appelé *dispo* indiquant la disponibilité des canaux, et une minuterie appelée *timer* indiquant la durée restante d'un canal pour qu'il soit disponible. A chaque fois que le canal devient indisponible ($dispo = 0$), son temporisateur est configuré pour expirer après une durée de transmission de données. Lorsque le délai expire, le canal correspondant est disponible ($dispo = 1$). Par défaut, quand un nœud rejoint le réseau, tous ses bits de avail-bits sont mis à zéro.

Un entier *prefer* variable prend les valeurs de 0   N . Si non nul, cette variable indique

qu'un nœud préfère concourir pour le canal de données indexé par *prefer*. Si zéro indique pas de préférence.

Étape 01 : La sélection des canaux.

Le nœud *A* sélectionne un canal de données en inspectant sa table des canaux. Parmi les canaux de données disponibles, le canal indexé par *prefer* est sélectionné si cette variable est non nulle et disponible. Sinon, l'un des canaux de données disponibles est choisi au hasard. Si aucun canal de données n'est disponible, le nœud attend que l'une des minuteries *timer* expire.

Étape 02 : Confirmation du canal

Supposons que le canal de données *x* est sélectionné. Le nœud *A* insère l'indice *x* dans son paquet RTS et l'envoie sur le canal de commande en utilisant le mécanisme DCF CSMA/CA de la norme 802.11.

Étape 3 : la négociation du canal

Quand le nœud *a* reçoit le paquet RTS, il inspecte l'état du canal *x* dans sa table des canaux. Si *x* est disponible, le nœud *a* répond à *A* avec un paquet CTS contenant l'indice *x*. Ensuite, il commute sur le canal de données *x* et attend un paquet de données. Si le canal *x* n'est pas disponible, le nœud *a* répond à *A* avec un paquet CTS de Rejet contenant l'index 0 et une liste de ses canaux de données disponibles, et reste sur le canal de contrôle.

Si le nœud *A* reçoit un CTS confirmant, il passe sur le canal *x* et transmet le paquet de données à *a*. Si *A* reçoit un CTS Rejetant, il sélectionne au hasard un canal disponible dans sa table des canaux en tenant compte de la liste des canaux inclus dans le paquet CTS, il insère l'indice de ce canal dans un paquet RTS et commence un nouveau cycle de contention sur le canal de contrôle .

Etape 4 : transmission de données

Dès la réception du paquet de données, le nœud *a* répond par un ACK sur le canal de données *x*, puis commute sur le canal de contrôle. Lors de la réception du paquet ACK, *A* passe également de retour sur le canal de contrôle. La transmission de paquets *a* est terminée avec succès.

Étape 5 : Mise en disponibilité des canaux

Après que *A* retourne au canal de contrôle, il définit sa variable *prefer* à *x* ; *A* également mis *dispo* à indisponible et commence *timer* pour tous les autres canaux de données à l'exception *x*. Le nœud *a* définit sa variable *prefer* et le tableau des canaux de la même manière. Le nœud *A* recommence l'étape 1 s'il existe un paquet dans sa file d'attente de transmission'

3.6 Modélisation et Validation

Dans cette section, nous présenterons une évaluation de performances analytique de la nouvelle méthode d'accès à la couche MAC pour la norme 802.11ad basée sur l'accès multicanaux en utilisant le modèle de Bianchi [10] .

3.6.1 Modèle analytique de Bianchi

La principale contribution du modèle de Bianchi est le calcul du débit de saturation. Le modèle calcule également la probabilité d'un échec de transmission de paquets en raison d'une collision. Il suppose que le canal est dans des conditions idéales, c'est à dire, il n'y a pas de terminal caché.

Bianchi utilise une chaîne de Markov bidimensionnelle de $m + 1$ étages de backoff dans lequel chaque étage représente le compteur de temps backoff pour un nœud (voir la figure 3.12). Une transition aura lieu lors d'une collision ou une transmission réussie, d'un étage supérieur vers l'étage le plus bas.

Ce modèle adopte une échelle de temps discret et entier. Dans cette échelle de temps, t et $t + 1$ correspondent au début de deux slots de temps consécutifs. Chaque station décrémente son compteur de backoff au début de chaque slot time. Notez que, la décrémentation du backoff est arrêtée lorsque le canal est occupé. L'intervalle de temps entre t et $t + 1$ peut être beaucoup plus long que le slot de temps, car il peut comporter une transmission de paquet ou une collision.

Chaque état de la chaîne de Markov bidimensionnelle est représentée par $s(t), b(t)$, où $b(t)$ est un processus stochastique représentant le compteur de temps backoff pour une station donnée et $s(t)$ est un processus stochastique représentant l'étape de backoff $(0, 1, \dots, m)$ pour une station à l'instant t .

Ce modèle suppose que dans chaque tentative de transmission, quel que soit le nombre de retransmissions subis, chaque paquet entre en collision avec une probabilité constante et indépendante p . En d'autres termes, p est la probabilité que, dans un slot de temps, au moins une des $N - 1$ autres stations transmet correctement. Si, à l'état d'équilibre chaque station restante transmet un paquet avec une probabilité π , p peut être écrite comme suit :

$$p = 1 - (1 - \pi)^{N-1} \quad (3.1)$$

Considérons $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}, i \in (0, m), k \in (0, W_{i-1})$ la distribution stationnaire de la chaîne. Une transmission se produit lorsque le backoff est égale à zéro. Ainsi, nous pouvons écrire la probabilité qu'une station émet dans un slot de temps choisi au hasard comme suit :

$$\pi = \sum_{i=1}^m b_{i,0} \quad (3.2)$$

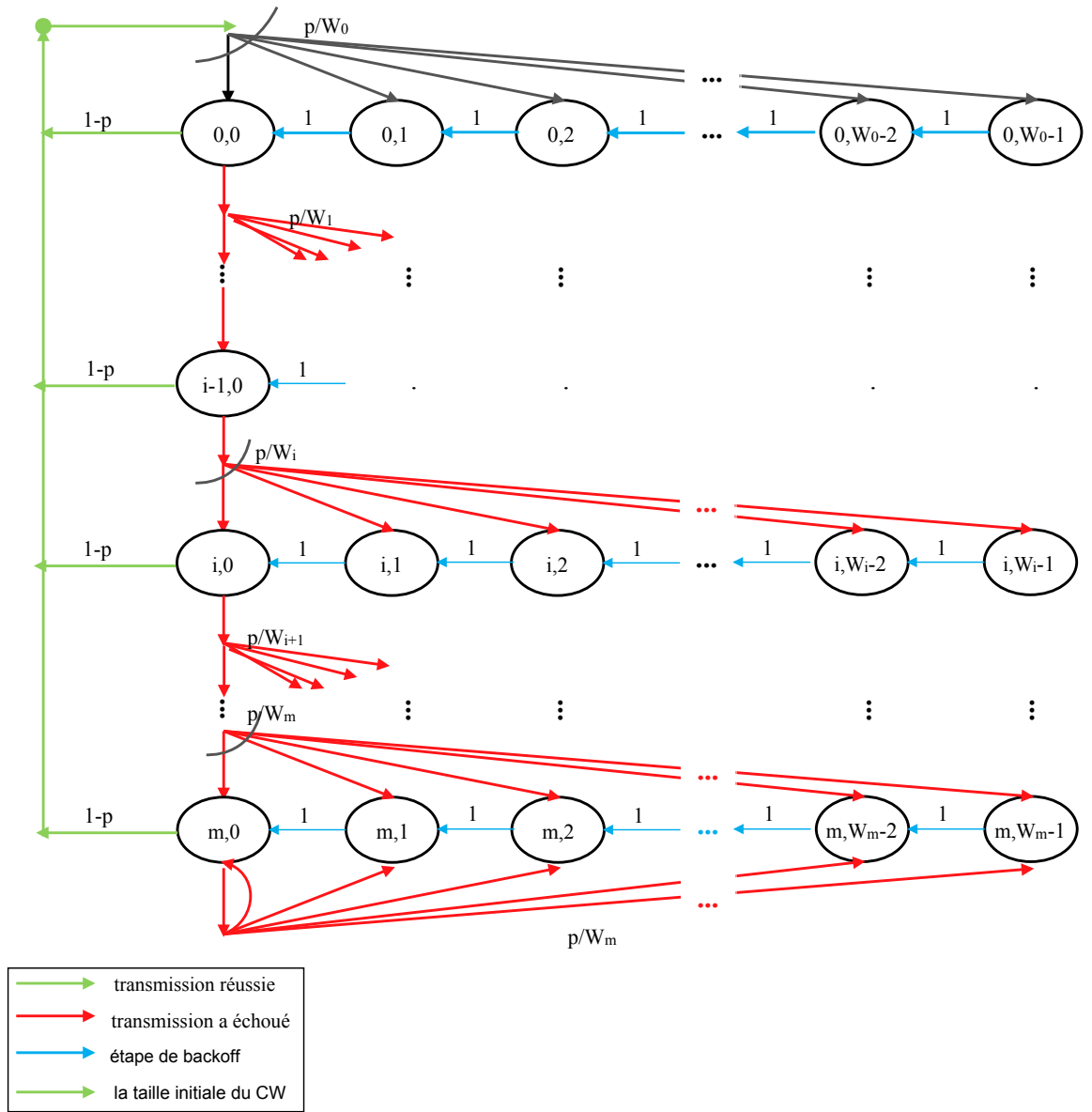


FIGURE 3.12 – Modèle analytique de Bianchi

Pour la chaîne de Markov ci-dessus, il est facile d'obtenir une solution pour $b_{i,0}$ en fonction de p et nous pouvons écrire la distribution stationnaire de la chaîne pour les $b_{i,0}$, $b_{m,0}$, et $b_{i,k}$:

$$\begin{cases} b_{i,0} = p^i b_{0,0}; & 0 < i < m \\ b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0}; & 0 \leq i \leq m, 0 < k < W_{i-1} \\ b_{i,k} = \frac{W_{i-k}}{W_i} b_{i,0}; & 0 \leq i \leq m, 0 < k < W_{i-1} \end{cases} \quad (3.3)$$

Bianchi modélise le comportement d'une seule station avec une Chaîne de Markov à temps discret (DTMC) et obtient la probabilité stationnaire τ que la station transmet une trame dans

un slot de temps choisi aléatoirement.

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(w + 1) + p(W(1 - (2p)^m))} \quad (3.4)$$

Où

W : la taille minimale de la fenêtre de contention.

m : le nombre maximal de retransmission.

P : probabilité de collision.

cas mono canal

Soit P_{tr} la probabilité qu'il y ait au moins une transmission dans un slot time considéré. Lorsque n nœuds concurrencent sur le même canal et chacun transmet avec probabilité τ :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \pi)^n \quad (3.5)$$

Soit P_s la probabilité qu'une transmission est réussie sachant P_{tr} :

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \pi)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1 - \pi)^{n-1}}{1 - (1 - \pi)^n} \quad (3.6)$$

En étudiant les deux événements qui peuvent se produire dans un slot de temps, Bianchi exprime la métrique de débit S de la méthode d'accès DCF en fonction de la valeur calculée τ

$$S = \frac{P_s P_{tr} T_{payload}}{(1 - P_{tr})\sigma + P_s P_{tr} T_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} = \frac{P_s P_{tr} T_{payload}}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} T_s} \quad (3.7)$$

Telles que :

P_{tr} : La probabilité qu'il y a au moins une transmission dans le réseau pendant un slot de temps donné

P_s : La probabilité qu'une transmission est réussie sachant P_{tr} .

$T_{payload}$: La taille moyenne de la partie de données dans une trame.

σ : la durée d'un slot vide.

T_s (resp T_c) est la durée moyenne d'occupation du medium par une transmission réussi (resp une collision).

cas multicanaux

Si un canal est composé de k canaux, il ya n/k nœuds se rivalisent à chaque canal, par conséquent,

$$P(k)_{tr} = 1 - (1 - \pi)^{n/k} \quad (3.8)$$

Soit P_s la probabilité qu'une transmission est réussie sachant P_{tr} :

$$P(k)_s = \frac{n\tau(1 - \pi)^{n/k-1}}{P_{tr}} \quad (3.9)$$

$$S = \frac{P(k)_s P(k)_{tr} T_{payload}}{(1 - P(k)_{tr})\sigma + P(k)_{tr} T_s} \quad (3.10)$$

$$S = \frac{E[\text{Payload information transmitted in a slot time}]}{E[\text{Duration of slot time}]} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} T_s = RTS + SIFS + \sigma + CTS + SIFS + \sigma + H + L + SIFS + ACK + DIFS + \sigma \\ T_c = RTS + DIFS + \sigma \end{cases} \quad (3.12)$$

3.6.2 Les résultats numériques

Dans cette partie, nous présentons les résultats numériques de la solution proposée en utilisant le modèle Bianchi afin d'évaluer ses performances par rapport à la solution existante. Nous utilisons MATLAB [36] pour résoudre numériquement les deux équations non linéaires 3.5 et 3.8. Les valeurs du système sont celles spécifiées dans [9, 14, 41] et résumées dans le tableau 3.1.

Au début, nous avons considéré l'impact de la variation du nombre des canaux par rapport au nombre des stations dans le système. La Figure 3.13 montre que le débit global de chaque station est amélioré à chaque fois qu'on augmente le nombre des canaux malgré le nombre accru des stations dans le réseau.

Ensuite, nous avons estimé les effets de la taille MPDU sur la performance du protocole proposé et le protocole MAC monocanal. Supposons que la taille de MSDU est égale respectivement à 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 et 8000. La figure 3.14 montre que le débit du système augmente avec l'augmentation de la taille de MSDU dans les deux variantes de protocole MAC. On remarque aussi que cette augmentation est considérablement importante dans le protocole MAC multicanaux proposé. Cela est dû au nombre de canaux larges disponibles dans le système.

Paramètre	Valeur
SIFS	$2.5\mu s$
DIFS	$13.5\mu s$
ACK	14 Octets
channel bit rate	05Gbps
slot time (σ)	$5\mu s$
propagation delay (δ)	100 ns
CWmin	15
CWmax	1023
MAC header	18 Octets
PHY header	40 Octets
T_c	Header + L + DIFS + δ
T_s	Header + L + SIFS + δ + ACK + DIFS + δ
Max MPDU (CBAP)	7995 octets
m	5

TABLE 3.1 – Les paramètres utilisés dans les simulations

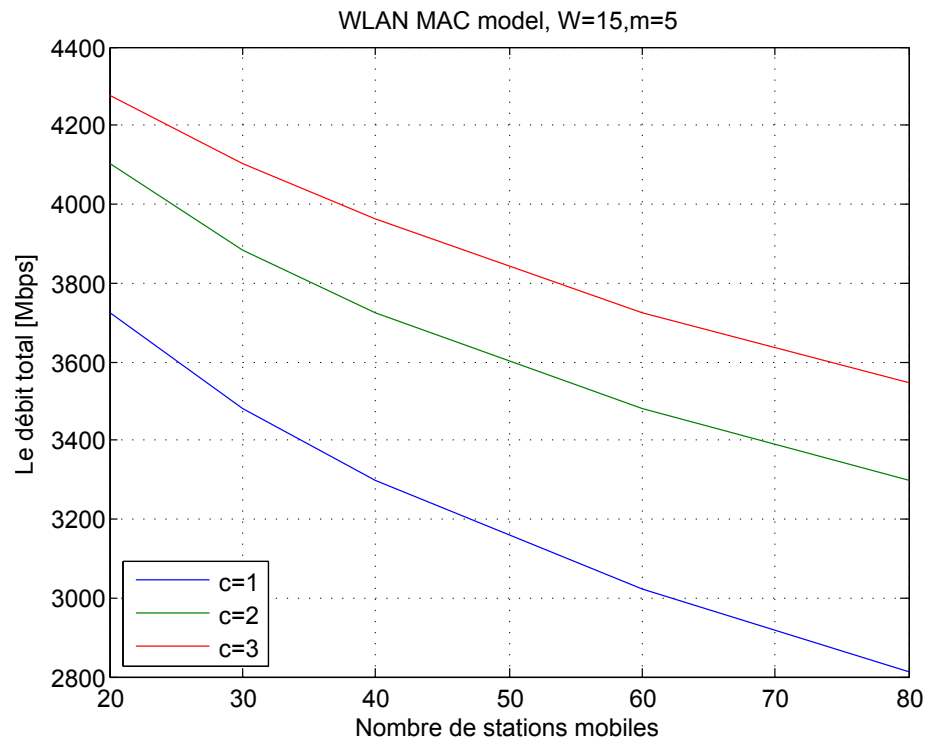


FIGURE 3.13 – Débit en fonction nombre de canaux

Enfin, nous avons analysé la variation du nombre A-MPDU envoyé dans un système composé de 100 stations en utilisant la méthode d'accès multicanaux proposée et une méthode d'accès monocanal. Les résultats numériques sont représentés dans la figure 3.15. On remarque avec aisance dans la figure 3.15 que le débit du système augmente positivement d'une manière proportionnelle avec le nombre de A-MPDU envoyé.

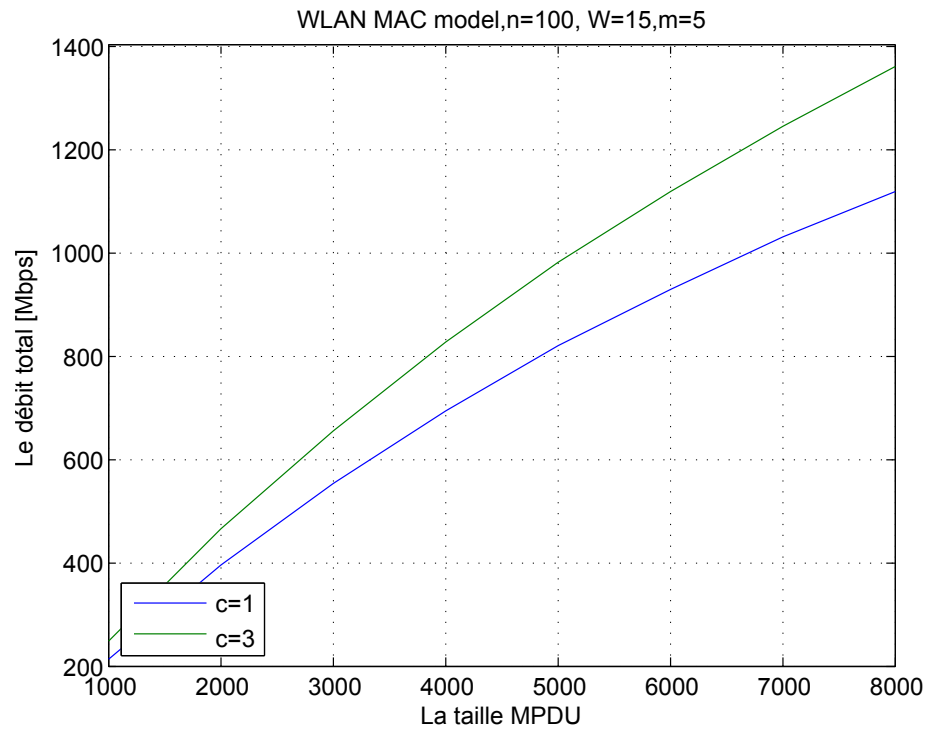


FIGURE 3.14 – Débit en fonction de la taille MPDU

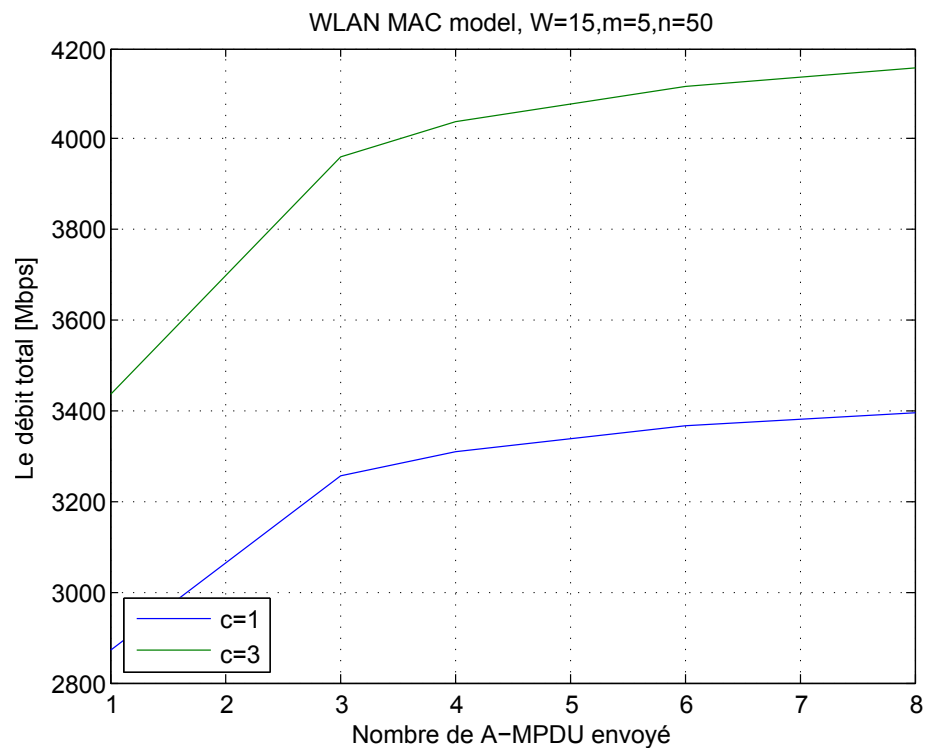


FIGURE 3.15 – Le débit en fonction du nombre A-MPDU envoyés

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l'art sur l'ensemble des travaux liés à la couche MAC de la norme 802.11ad, qui sont présentés dans la littérature pour l'amélioration de cette

couche. Cela nous a conduit à faire une proposition d'une approche qui doit exploiter l'avantage du nombre de canaux libres à la fois pour l'accès au medium dans la nouvelle génération 802.11ad. L'évaluation de performance de cette méthode montre son efficacité notamment quand le nombre des stations mobiles est important par rapport aux méthodes d'accès classiques.

Conclusion générale

L'objectif de base de ce mémoire est de proposer une nouvelle méthode d'accès au medium pour les nouvelles générations Wi-Fi en tenant compte des insuffisances des méthodes d'accès au medium existantes. Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord présenté les réseaux sans fil, leur classement selon le rayon de communication. Nous nous sommes intéressé à un type particulier du réseau sans fil qui est les réseaux WLAN précisément la norme 802.11. Afin d'appréhender le fonctionnement de la norme 802.11, nous avons décortiqué les différentes couches protocolaires, leur fonctionnement et les problèmes liés à chaque couche. Ainsi que, nous avons mis l'accent sur les principales améliorations de la norme 802.11 qui sont en constante évolution et ont vu le jour sous les appellations IEEE 802.11 b/a/g/n.

Par la suite, nous avons réalisé une étude sur les deux nouvelles générations sans fil la 802.11ac et la 802.11ad. Nous avons en particulier mis en évidence les principales modifications dans leurs couches physiques et couches MAC permettant d'atteindre des débits de l'ordre de quelques Gbps. En fait, la norme IEEE 802.11ac est le successeur de la norme 802.11n, qui se diffère par l'introduction des quatre perfectionnements de la couche physique qui sont : (i) l'utilisation des canaux plus larges 80/160MHz (ii) introduction d'une modulation d'ordre supérieur qui utilise le codage 256QAM (iii) utilisation de plusieurs flux spatiaux. (iv) utilisation des multiples utilisateurs MIMO. Pour l'accès au medium, la norme IEEE 802.11ac a défini deux méthodes d'accès aux canaux multiples qui sont l'accès statique et l'accès dynamique.

Par contre, la norme 802.11ad utilise des canaux de largeur 2,16 GHz, elle intègre également un mécanisme de "transfert rapide de session" qui permet un basculement automatique des transmissions entre les trois bandes de fréquence 2,5GHz/5GHz/60GHz et l'introduction de trois types de modulations : La modulation Spread-spectrum pour la signalisation et l'échange des messages de contrôle, la modulation Single carrier qui est peu énergivore pour les appareils sensible où l'énergie est une ressource rare et enfin la modulation Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) afin d'atteindre des débits de données les plus élevées.

Dans ce travail nous nous sommes essentiellement intéressés à la norme 802.11ad qui utilise une nouvelle bande de fréquence millimétrique 60 GHz qui sera le sujet de notre étude.

Pour cela, nous avons synthétisé l'ensemble des travaux liés à la couche MAC de la norme 802.11ad qui nous paraissait très utile et nécessaire afin de bien comprendre son fonctionnement. Cette étude critique, nous a conduits à proposer une nouvelle approche d'accès à la couche MAC basée sur l'accès multicanaux. Pour faire une comparaison avec la méthode d'accès existante monocanal, nous avons représenté différents comportements liés à l'évaluation de performances en se basant sur le modèle analytique de Bianchi. Les résultats de ces scénarios ont montré que notre méthode d'accès à la couche MAC offre de meilleures performances, notamment en terme de débit.

Ce travail a fait naitre de nouvelles idées de recherche qui peuvent être exploitées pour assurer la continuité dans ce domaine telles que :

- Faire une évaluation de performance de la couche physique de la norme 802.11ad dans la bande de fréquences 60 Ghz.
- Voir la possibilité d'utiliser la bande de fréquence millimétrique pour les réseaux WPAN, avec une analyse de performances.
- Il serait intéressant d'envisager un modèle complet des couches MAC et PHY du 802.11ad et de l'intégrer dans des simulateurs Open source, tels que Ns2.

Bibliographie

- [1] (2005). IEEE Standard for Information technology Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 8 : Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. *IEEE Std 802.11e-2005 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003))*, pages 1–212.
- [2] (2007). IEEE Draft Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 3 : 3650-3700 MHz Operation in USA (Amendment to IEEE 802.11-2007). *IEEE Unapproved Draft Std P802.11y D7.0*.
- [3] (2012). IEEE Approved Draft Standard for LAN - Specific Requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 3 : Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band. *IEEE P802.11ad/D9.0, July 2012 (Draft Amendment based on IEEE 802.11-2012)*, pages 1–685.
- [4] AgilentTechnologies (2012a). IEEE 802.11ad PHY Layer Testing. Agilent application note.
- [5] AgilentTechnologies (2012b). Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained. Agilent application note.
- [6] ArubaNetworks (2014). 802.11ac in-depth. White paper.
- [7] Atelin, P. (2008). *Wi-Fi - Réseaux sans fil 802.11 : Technologie - Déploiement - Sécurisation*. Editions ENI, 2 edition.
- [8] Bejarano, O., Knightly, E. W., and Park, M. (2013). IEEE 802.11ac : from channelization to multi-user MIMO. *Communications Magazine, IEEE*, 51(10) :84–90.

-
- [9] Bhusal, R. and Moh, S. (2014). Qualitative and Quantitative Comparison of IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11ad for Multi-Gbps Local Communications. *Wireless Personal Communications*, 75(4) :2135–2149.
 - [10] Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *on IEEE Journal Selected Areas in Communications*, 18(3) :535–547.
 - [11] Chandra, K., Prasad, R. V., Niemegeers, I. G., and Biswas, A. R. (2014). Adaptive beam-width selection for contention based access periods in millimeter wave WLANs. In *11th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 458–464.
 - [12] Charfi, E., Chaari, L., and Kamoun, L. (2012). Upcoming wlans mac access mechanisms : An overview. In *8th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pages 1–6.
 - [13] Charfi, E., Chaari, L., and Kamoun, L. (2013). PHY/MAC Enhancements and QoS Mechanisms for Very High Throughput WLANs : A Survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 15(4) :1714–1735.
 - [14] Chen, Q., Tang, J., Wong, D., Peng, X., and Zhang, Y. (2013). Directional Cooperative MAC Protocol Design and Performance Analysis for IEEE 802.11ad WLANs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(6) :2667–2677.
 - [15] Choi, S.-W., Kim, J.-H., and Kim, I.-G. (2012). A system design for IEEE802.11ad. In *18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pages 668–671.
 - [16] Cordeiro, C. (2009). Evaluation of Medium Access Technologies for Next Generation Millimeter-Wave WLAN and WPAN. In *ICC Workshops*, pages 1–5.
 - [17] Cordeiro, C. (2013). The pursuit of tens of gigabits per second wireless systems [industry perspectives]. *Wireless Communications, IEEE*, 20(1) :3–5.
 - [18] Cordeiro, C., Akhmetov, D., and Park, M. (2010). IEEE 802.11ad : Introduction and Performance Evaluation of the First Multi-gbps Wifi Technology. In *ACM International Workshop on mmWave Communications : From Circuits to Networks*, mmCom '10, pages 3–8, New York, NY, USA. ACM.
 - [19] Didi née Lahfa, F. (2010). *Qualité de Service dans les réseaux locaux sans fil de type IEEE 802.11*. PhD thesis, Laboratoire de Recherche Systèmes Technologies de l'Information et de la Communication, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen.
 - [20] El Masri, M. (2009). *Contribution à la qualité de service dans les réseaux d'accès sans fil*. PhD thesis, INSA de Toulouse France.

-
- [21] Emami, S. (2013). *UWB Communication Systems : Conventional and 60 GHz Principles, Design and Standards*. Springer.
- [22] Fares, C. and Imad, K. (2014). Proposition et Simulation d'une méthode MAC multicanaux dans les Réseaux très haut débits IEEE 802.11ac. Master's thesis, U.A.M.B (département informatique).
- [23] FCC (2013). Part 15 Rules for Unlicensed Operation in the 57-64 GHz Band. FCC13-112.
- [24] Gao, Y., Liu, X., Zheng, Y., Diao, S., Toh, W., Wang, Y., Zhao, B., Je, M., and Heng, C.-H. (2014). A low power interference robust IR-UWB transceiver SoC for WBAN applications. In *Ultra-Wideband and 60 GHz Communications for Biomedical Applications*, pages 23–44. Springer.
- [25] Gast, M. S. (2013). *802.11 ac : A survival guide*. " O'Reilly Media, Inc."
- [26] Gilbert, J. M., Doan, C. H., Emami, S., and Shung, C. B. (2008). A 4-Gbps Uncompressed Wireless HD A/V Transceiver Chipset. *Micro, IEEE*, 28(2) :56–64.
- [27] Géron, A. (2009). *Wifi professionnel : La norme 802.11, le déploiement, la sécurité*. Dunod, 3 edition.
- [28] Hemanth, C. and Venkatesh, T. (2014). Performance analysis of contention-based access periods and service periods of 802.11ad hybrid medium access control. *IET Networks*, 3(3) :193–203.
- [29] Kim, J. and Molisch, A. F. (2013). Enabling Gigabit services for IEEE 802.11ad-capable high-speed train networks. In *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pages 145–147.
- [30] Kim, Y. and Kang, H. (2013). Priority-based contention period allocation for directional CSMA/CA in smart home. In *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pages 402–406.
- [31] Ksentini, A. (2005). *Qualité de service (QoS) dans les réseaux locaux sans fil basés sur la technologie IEEE 802. 11*. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise.
- [32] Lauer, J. (2010). 256 QAM Mapping. *IEEE 802.11-10/0857r0 document*.
- [33] Laurent, C. and Labs, O. (2010). Fast session transfer. IEEE 802.11-10/491r2 document.
- [34] Maheshwari, R., Gupta, H., and Das, S. R. (2006). Multichannel MAC Protocols for Wireless Networks. In *on 3rd Annual IEEE Communications Society Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, SECON '06*, volume 2, pages 393–401.

-
- [35] Mandke, K. and Nettles, S. M. (2010). A Dual-band Architecture for Multi-gbps Communication in 60 GHz Multi-hop Networks. In *Proceedings of the 2010 ACM International Workshop on mmWave Communications : From Circuits to Networks*, mmCom '10, pages 9–14, New York, NY, USA. ACM.
- [36] MATLAB (2010). *version 7.10.0 (R2010a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- [37] Motorolasolutions (2012). What you need to know about 802.11ac. White Paper.
- [38] Ong, E. H., Knecht, J., Alanen, O., Chang, Z., Huovinen, T., and Nihtila, T. (2011). IEEE 802.11ac : Enhancements for very high throughput WLANs. In *IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 849–853.
- [39] Park, M. (2011). IEEE 802.11ac : Dynamic Bandwidth Channel Access. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–5.
- [40] Park, M., Cordeiro, C., Perahia, E., and Yang, L. L. (2008). Millimeter-wave multi-Gigabit WLAN : Challenges and feasibility. In *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC)*, pages 1–5.
- [41] Park, M., Cordeiro, C., Perahia, E., and Yang, L. L. (2009). QoS Considerations for 60 GHz Wireless Networks. In *IEEE GLOBECOM Workshops*, pages 1–6.
- [42] Patil, P. H. and Kamkhedkar, S. V. (2014). IEEE 802.11ac : The New Gigabit Wi-Fi Standard. *International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online) : 2319 – 6734*, 3(5) :56–61.
- [43] Perahia, E., Cordeiro, C., Park, M., and Yang, L. L. (2010). IEEE 802.11ad : Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi. In *IEEE 7th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 1–5.
- [44] Perahia, E. and Gong, M. X. (2011). Gigabit Wireless LANs : An Overview of IEEE 802.11Ac and 802.11Ad. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 15(3) :23–33.
- [45] Rohde and Schwarz (2012). 802.11ac technology introduction. White Paper.
- [46] Servin, C. (2006). *Réseaux & télécoms - 2ème édition - Cours avec 129 exercices corrigés (Informatique)*. Dunod.
- [47] Shankar, N. (2009). MAC Channel Access in 60GHz. IEEE 802.11-09/572r0.
- [48] Singh, H., Hsu, J., Verma, L., Lee, S. S., and Ngo, C. (2011). Green operation of multi-band wireless LAN in 60 GHz and 2.4/5 GHz. In *IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 787–792.

-
- [49] Skordoulis, D., Ni, Q., Chen, H.-H., Stephens, A. P., Liu, C., and Jamalipour, A. (2008). IEEE 802.11n MAC frame aggregation mechanisms for next-generation high-throughput WLANs. *Wireless Communications, IEEE*, 15(1) :40–47.
- [50] So, J. (2006). *Design and evaluation of multi-channel multi-hop wireless networks*. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-champaign, Urbana Illinois.
- [51] So, J. and Vaidya, N. H. (2004). Multi-channel mac for ad hoc networks : Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '04*, pages 222–233, New York, NY, USA. ACM.
- [52] Taher, N. C., Doudane, Y. G., and El Hassan, B. (2009). A complete and accurate analytical model for 802.11 e EDCA under saturation conditions. In *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications AICCSA*, pages 800–807. IEEE.
- [53] Van Nee, R. (2011). Breaking the Gigabit-per-second barrier with 802.11ac. *Wireless Communications, IEEE*, 18(2) :4–4.
- [54] Verma, L., Fakharzadeh, M., and Choi, S. (2013). Wifi on steroids : 802.11 ac and 802.11 ad. *Wireless Communications, IEEE*, 20(6) :30–35.
- [55] Wang, C.-Y. and Wei, H.-Y. (2009). IEEE 802.11n MAC Enhancement and Performance Evaluation. *Mobile Networks and Applications*, 14(6) :760–771.
- [56] Xiao, Y. (2005). IEEE 802.11n : enhancements for higher throughput in wireless LANs. *Wireless Communications, IEEE*, 12(6) :82–91.
- [57] Yong, S.-K., Xia, P., and Valdes-Garcia, A. (2011). *60GHz Technology for Gbps WLAN and WPAN : From Theory to Practice*. Wiley Publishing.
- [58] Zaaimea, M., Touhami, R., Hamza, A., and Yagoub, M. (2013). Design and performance evaluation of 802.11ad phys in 60 GHz multipath fading channel. In *8th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WoSSPA)*, pages 521–525.
- [59] Zaaimea, M., Touhami, R., and Yagoub, M. (2014). Very high throughput evaluation of emerging mmWave WLANs. In *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pages 1295–1299.
- [60] Zhang, C., Xiao, Z., Wu, H., Zeng, L., and Jin, D. (2011). Performance analysis on the OFDM PHY of IEEE 802.11ad standard. In *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, pages 708–713.

Résumé

L'évolution des réseaux sans fil Wi-Fi a conduit à de multiples propositions et ramifications dans la famille du standard IEEE 802.11, qui sont les conséquences directes de l'augmentation des besoins en termes de connectivité et de mobilité. La diversité des appareils de communication mobiles (laptops, tablettes, Smartphones, ...), et des services accédés (streaming vidéo, jeu, ...) entraîne un besoin de normes garantissant des connexions à très haut débit et une qualité de service satisfaisante.

Les normes IEEE 802.11ac et IEEE 802.11ad tentent de répondre à ces nouvelles aspirations en proposant des débits allant jusqu'à 1 Gbps, ayant chacune ses propres caractéristiques. Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la norme IEEE 802.11ad qui se distingue par l'utilisation de la bande de fréquence de 60GHz, et qui offre quatre canaux disjoint de 2,16 GHz.

Nous proposons ainsi une nouvelle méthode d'accès à la couche MAC basée sur l'accès multicanaux de la norme IEEE 802.11 ad. Une étude de performances de notre proposition ainsi que les résultats numériques obtenus confirment que cette nouvelle méthode permet une augmentation considérable en terme de débit par rapport à celles qui existent.

Mots-clé : IEEE 802.11ad, 60 GHz, multi-Gbps, accès multi-canaux, modélisation, Évaluation de performance.

Abstract

The evolution of Wi-Fi wireless networks has led to many proposals and ramifications in the IEEE 802.11 standard family, which are the direct consequences of the increasing needs in terms of connectivity and mobility. The diversity of mobile communication devices (laptops, tablets, smartphones, ...), and accessed services (video streaming, games, ...) urges the need for standards that can ensure very high throughput connections and a satisfying quality of service.

The IEEE 802.11ad and the IEEE 802.11ac standards are trying to meet these new aspirations by offering rates up to 1 Gbps, each with its own characteristics. We will focus, in this report, on the IEEE 802.11 ad standard that stands out for the use of the 60 GHz frequency band, and offers 4 disjoint channels of 2.16 GHz.

Thus, we propose a new access method to the MAC layer based on the multi-channel access of the IEEE 802.11ad standard ad. A study of the performance of our proposal and the obtained numerical results confirm that this new method allows a significant increase in terms of throughput compared to existing ones.

Keywords : IEEE 802.11ad, 60 GHz, multi-Gbps, multi-channel access, modeling, performance evaluation.

ملخص

تطور الشبكات اللاسلكية واي فاي أدى إلى طرح العديد من المقترحات والتفرعات في أسرة القياسات IEEE 802.11. هذه المقترحات والتفرعات جاءت كنتائج مباشرة للاحتياجات المتزايدة من حيث الاتصال والتنقل. تنوع أجهزة الاتصالات المتنقلة (حواسيب محمولة، حواسيب لوحية، هواتف ذكية...)، والخدمات (تدفق الفيديو، و الألعاب...) يؤكد على ضرورة وضع معايير يمكن أن تضمن الاتصال بسرعة تدفق عالية جدا وجودة خدمة مرضية.

يحاول المعياران IEEE 802.11 ac و IEEE 802.11 ad تلبية هذه التطلعات الجديدة من خلال تقديم معدلات تدفق تصل إلى 1 غيغابايت في الثانية. لكل منهما سلاته الخاصة، ولكن نركز في هذا العمل على معيار IEEE 802.11 ad الذي يتميز باستخدام نطاق التردد 60 غيغاهرتز و يقدم 4 قنوات منفصلة 2.16 غيغاهرتز.

في هذا العمل نقترح طريقة جديدة للوصول إلى طبقة MAC استنادا على الدخول متعدد القنوات للمعيار IEEE 802.11ad. دراسة أداء اقتراحنا بالإضافة إلى النتائج الرقمية المحصل عليها تؤكد أن الطريقة المقترحة تسمح بزيادة كبيرة من حيث سرعة التدفق مقارنة مع الطرق الموجودة.

كلمات أساسية: IEEE 802.11ad، IEEE 802.11ac، 60 غيغاهرتز، متعدد غيغابايت في الثانية، تكوين الشعاع، WLAN، 802.11، mmWave، الأجيال المستقبلية لـ WLAN، Single-Carrier/OFDM، التكنولوجيات الجديدة MAC، التأكيد.