

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abderrahmane MIRA de Béjaia
Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique



Mémoire Présenté pour L'obtention du Diplôme de Master
en Informatique

Spécialité : Réseaux et Sécurité

Évaluation de performances de la couche MAC 802.11bn dédiée à l'IoT

Présenté par :
RABAHI Kamilia
BOUCHAKAL Thaldja

Sous la direction de : Dr M. Moktefi

Défendu le 30/06/2025, devant le jury composé de :

M ^e S.Ouyahia	M.C. classe/ B	Présidente de jury
M ^e L. Bouallouche	Professeur	Examinatrice
M ^e N. Bouadem	M.C. classe/ B	Examinatrice
M ^r M.Sadi	M.C. classe/ B	Examinateur

Année Universitaire 2024 – 2025

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au sein du département Informatique, à l'Université Abderrahmane Mira campus Targa Ouzemmour, Béjaia.

Tout d'abord, nous remercions énormément Dieu, le tout puissant, de m'avoir accordé la force, le courage et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Nous tenons ensuite à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, Mr MOKTEFI Mohand, pour son encadrement attentif, ses conseils constructifs tout au long de la réalisation de ce travail.

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

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

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

DÉDICACE

Kamilia RABAHI

Je dédie ce travail :

À deux personnes très chers à moi, mes parents, ma source de vie et d'affection, Rachida GUETTAF et Hamid RABAHI,

À mon cher et unique frère Mezyane et sa femme Amira.

À mes chères sœurs Cylia et Milissa.

À ma moitié, mon âme sœur, mon fiancé Mouad qui m'a soutenu tout au long de mon chemin.

À mon oncle Hamza , à toute ma famille et mes amis que je connais.

À mon binôme Thaldja qui a partagé avec moi tous les moments difficiles ainsi que ceux de joie.

c'est grâce à vous que j'ai pu enfin surmonté les obstacles. Chaque mot de tendresse, chaque expression d'amour et chaque geste d'attention ont été autant de raisons qui m'ont poussée à aller de l'avant et à donner le meilleur de moi-même.

Avec tout mon amour et ma gratitude,

Kamilia RABAHI

Thaldja BOUCHAKAL

Je dédie ce modeste travail à

Mon père Abaderrahmane, mon pilier dans la vie, qui a toujours veillé à mon bonheur. Ses conseils avisés et son soutien constant m'ont guidée tout au long de mon parcours.

Ma maman Laldja, qui a su être ma lumière dans les moments sombres. Son amour, sa présence indéfectible ont été essentiels à l'accomplissement de ce travail.

Mes chères soeurs, Djomana, Chabha, Dalila, Zoulikha, Maksouda, Ferroudja et Nabiha, pour leurs encouragements et leur soutien dans les moments difficiles ont été pour moi d'un réconfort inestimable.

Mon chère et unique frère Mabrouk, pour sa présence rassurante et son affectation.

Mes beaux-frères Lhocine, Nassim et Ryadh pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Ma chère nièce Retadj, ainsi que mes neveux Rachid, Wassim, Ilyan et Aylan.

Mon binôme Kamilia avec qui j'ai traversé les moments difficiles comme les instants de bonheur.

Mes amis et mes plus proches.

Du fond du coeur, avec amour et gratitude.

Thaldja BOUCHAKAL

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	IV
Table des figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Introduction générale	1
I Généralités sur les réseaux sans fil	3
I.1 Introduction	4
I.2 Principes fondamentaux des réseaux sans fil	4
I.3 Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture	4
I.3.1 Réseaux personnels sans fil (WPAN)	5
I.3.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN)	5
I.3.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)	6
I.3.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN)	6
I.4 Standard IEEE 802.11 (Wi-Fi)	6
I.5 Nouvelles générations de normes	7
I.5.1 Norme 802.11ax (Wi-Fi 6)	7
I.5.1.1 Gestion efficace des utilisateurs (OFDMA, MU-MIMO)	7
I.5.1.2 1024-QAM	9
I.5.1.3 BSS coloring	10
I.5.2 Norme 802.11be (Wi-Fi 7)	11
I.5.2.1 Innovations majeures du Wi-fi 7	11

I.5.2.2	OFDMA optimisé	11
I.5.2.3	Mode multi-lien (MLO)	11
I.5.2.4	Accès multi-liens au canal	12
I.5.3	Norme 802.11bn (Wi-Fi 8)	12
I.5.4	Modes de Fonctionnement du Wi-fi	13
I.5.4.1	Mode infrastructure	13
I.5.4.2	Mode Ad hoc	15
I.5.5	Couches de la norme IEEE 802.11	16
I.5.5.1	Couche MAC	16
I.5.5.2	Couche Physique	23
I.6	Conclusion	24
II	ÉTAT DE L'ART ET TRAVAUX CONNEXES	25
II.1	Introduction	26
II.2	Travaux connexes	26
II.2.1	Fiabilité Ultra Élevée et Optimisation de l'Accès au canal dans le Wi-fi 8	26
II.2.2	Coordination Multipoint d'Accès et Réutilisation Spatiale	28
II.2.3	Opérations Multi-Liaison et Technologies Émergentes	31
II.3	Tableau comparatif	32
II.4	Conclusion	33
III	Évaluation de performance du Standard 802.11bn	34
III.1	Introduction	35
III.2	Introduction à l'évaluation de performance	35
III.2.1	Rôle de l'évaluation de performance	35
III.2.2	Principe d'évaluation de performance	35
III.2.3	Techniques d'évaluation de performance	36
III.2.3.1	Technique basée sur la mesure	37
III.2.3.2	Technique basée sur la modélisation	37
III.3	Problématique et Proposition	39
III.3.1	Problématique	39
III.3.2	Solution proposée	39
III.3.3	Réutilisation spatiale coordonnée C-SR	40
III.3.3.1	Definition	40
III.3.3.2	Procédure C-SR	40
III.3.4	Notre Modèle Analytique	41

Table des matières

III.3.4.1	Hypothèses de modélisation	41
III.3.4.2	Notre chaîne de Markov	41
III.4	Résolution numérique	47
III.4.1	Résolution du modèle avec Matlab	47
III.4.2	Paramètres utilisés	47
III.4.2.1	Résultats et discussion	48
III.5	Conclusion	50
	Conclusion générale	51
	Bibliographie	52

TABLE DES FIGURES

I.1	Classification des réseaux sans fil selon l'étendus géographique.	4
I.2	Les normes du Wi-fi.	7
I.3	OFDMA dans la norme 802.11ax.	8
I.4	256-QAM.	10
I.5	1024-QAM.	10
I.6	Mode de transmission Multi-link.	12
I.7	Mode infrastructure.	14
I.8	Ensemble de service étendu.	14
I.9	Mode Ad Hoc.	15
I.10	Les couches de la norme IEEE 802.11.	16
I.11	Le mécanisme DCF	19
I.12	Le mécanisme PCF	20
I.13	Le mécanisme CSMA/CA.	21
I.14	Problème des nœuds cachés.	22
I.15	Le mécanisme CSMA/CA avec RTS/CTS.	22
III.1	Classification des techniques d'analyse des systèmes	36
III.2	Notre chaîne de Markov.	42
III.3	Le débit du DCF classique et du 802.11bn avec C-SR sous l'effet du bruit.	49
III.4	Airtime utile du DCF classique et du 802.11bn avec C-SR sous l'effet du bruit.	49
III.5	Airtime perdu du DCF classique et du 802.11bn avec C-SR sous l'effet du bruit.	50

LISTE DES TABLEAUX

I.1	Comparaison des normes récentes.	13
II.1	Tableau comparatif des travaux de l'axe 2.	32
III.1	Paramètres utilisés.	48

Liste des abréviations

ACK	Acknowledgment
AGV	Automated Guided Vehicle
AMR	Adaptive Multi-Rate
AP	Access Point
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identification
CBF	Channel Beamforming Feedback
CCK	Complementary Code Keying
CFO	Carrier Frequency Offset
CFP	Contention-Free Period
CP	Contention Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
C-SR	Coordinated Spatial Reuse
CTMC	Continuous-Time Markov Chain
CW	Contention Window

DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF Inter-Frame Space
DPS	Dynamic Puncturing Scheme
DS	Distribution System
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIFS	Extended Interframe Space
ESS	Extended Service Set
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HEW	High Efficiency Wireless
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Interframe Space
IoT	Internet of Things
IR	Infrared
ISO	International Organization for Standardization
JT	Joint Transmission
LLC	Logical Link Control
MAC	Media Access Control
MAPC	Coordination Multi-AP
MAB	Multi-Armed Bandit
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output

MLD	Multi-Link Device
MLO	Multi-Link Operation
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output
NAV	Network Allocation Vector
NIC	Network Interface Card
NPCA	Non-Primary Coordinating AP
OBSS/PD	Overlapping Basic Service Set / Preamble Detection
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OQPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
PDA	Power Delay Profile
PCF	Point Coordination Function
PHY	Physical Layer
PIFS	Point Coordination Interframe Space
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RTS	Request To Send
RU	Resource Unit
SCA	Single-Channel Access
SDPS	Spatial Domain Partitioning and Scheduling
SIFS	Short Inter-Frame Space
SR	Spatial Reuse
SSID	Service Set Identifier

STA	Station
TDMA	Time Division Multiple Access
TXOP	Transmission Opportunity
UDB	Upper Confidence Bound
UHR	Ultra High Reliability
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
U-SIG	User Signal
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

Introduction générale

La technologie wi-fi (Wireless Fidelity), est devenue indispensable à notre quotidien. Elle utilise les ondes radio pour établir des connexions sans fil entre divers dispositifs électroniques et réseaux informatiques, Créée au 20e siècle. Le wi-fi a connu des progrès technologiques continus en réponse aux demandes croissantes en termes de capacité, de latence, de fiabilité et de densité d'utilisateurs.

Au fil des différentes générations de normes IEEE 802.11, les performances du wi-fi se sont continuellement améliorées, en améliorant l'efficacité et la gestion des utilisateurs grâce à des techniques avancées comme OFDMA et MU-MIMO. L'introduction en 2019 de la norme 802.11ax (Wi-fi 6) a marqué une avancée significative qui a permis des vitesses théoriques allant jusqu'à 9,6 Gbit/s. De plus, elle a introduit des innovations comme la coloration BSS et la modulation 1024-QAM.

La norme suivante 802.11be (Wi-fi 7), récemment commercialisée, représente une amélioration des performances avec augmentation des débits théoriques allant jusqu'à 30 Gbit/s grâce à l'introduction de nouvelles fonctionnalités telles que le fonctionnement multi-liens (MLO), l'optimisation OFDMA et l'accès multi-liens au canal. Les développements permettent une meilleure gestion du trafic, une réduction de la latence et une expérience utilisateur améliorée, en particulier dans les situations avec des densités élevées d'appareils et d'applications.

L'évolution se poursuit avec la prochaine norme 802.11bn (wi-fi 8), qui a été spécifiquement conçue pour répondre aux besoins de l' Internet des objets (IoT). Une inspiration à fournir des avancées notables en matière de fiabilité extrêmement élevée, d'optimisation de l'accès aux canaux et de coordination multipoint tout en intégrant les technologies émergentes pour répondre aux exigences des futurs réseaux de câbles. L'objectif est de fournir une connectivité non filaire toujours meilleure, adaptée aux utilisations exigeantes et aux applications critiques.

Ce mémoire de fin d'études se concentre sur l'évaluation des performances de la norme 802.11bn (wi-fi 8), dont la finalisation est prévue aux alentours de 2030, en la comparant aux générations précédentes, telles que 802.11ax (wi-fi 6) et 802.11be (wi-fi 7). Ce travail, qui est divisé en trois grandes sections, ce qui permet de comprendre bien les caractéristiques de cette norme et distinguer ce qu'elle a apporté de plus en terme de débit et d'efficacité spectrale (100 Gbit/s visé), en abordant des généralités sur les réseaux sans fil et l'évolution du 802.11, ainsi que les techniques et les innovations significatives introduites par les dernières générations de wi-fi.

Le premier chapitre introduit des généralités sur les réseaux sans fil, en détaillant leur fonctionnement, et les évolutions des normes wi-fi, notamment les versions 802.11ax, 802.11be, 802.11bn. Une attention particulière est accordée à la structure des couches (traditionnels) PHY et MAC du standard IEEE 802.11.

Le deuxième chapitre est consacré à des travaux de recherche sur des techniques innovantes utilisées dans la norme IEEE 802.11bn visant à atteindre une fiabilité ultra élevée, avec une attention particulière portée à la réutilisation spatiale coordonnée multi-AP (C-SR) qui est une approche prometteuse visant à orchestrer

plusieurs transmissions simultanées afin d'améliorer les performances. Une revue des principales contributions de la littérature sera effectuée, suivie d'une évaluation comparative pour mettre en évidence les orientations de recherche dominantes.

Le troisième chapitre sera porté sur une introduction à l'évaluation de performance suivie d'une modélisation analytique du protocole 802.11bn tout en considérant les surcoûts de coordination du mécanisme C-SR dans un canal imparfait (bruit). En présentant les diverses phases de développement, nous conclurons par une résolution numérique de notre modèle sous MATLAB, accompagnée d'une analyse des résultats obtenus.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX SANS FIL

I.1 Introduction

Un réseau sans fil (wireless network) désigne une infrastructure numérique ou informatique permettant de connecter plusieurs appareils ou systèmes via des ondes radio. Ce type de communication a connu une croissance significative ces dernières années en raison de l' introduction et de la normalisation des technologies WLAN (Wireless Local Area Network), dont la norme IEEE 802.11 est communément appelée Wi-fi.

L'objectif de ce chapitre est de décrire les fondements des réseaux sans fil et l'évolution du standard IEEE 802.11, en mettant en évidence ses composants clés. Une attention particulière sera portée à la couche MAC en examinant divers mécanismes d'accès aux médias qui régissent la gestion des transmissions sans fil.

I.2 Principes fondamentaux des réseaux sans fil

Un réseau sans fil (Wireless network) est un système de communication reliant deux terminaux ou plus via les ondes électromagnétiques (radio et infrarouge). Ce type de réseau permet de communiquer même sur de longues distances. En effet, il peut être facilement perturbé par d'autres ondes, ce qu'on appelle des interférences. Pour éviter cela, des règles ont été mises en place pour limiter la puissance utilisée et définir quelles fréquences peuvent être utilisées selon le type d'usage.

I.3 Classification des réseaux sans fil selon la zone de couverture

Les réseaux sans fil peuvent être regroupés en quatre catégories distinctes pour faciliter leur classification et leur compréhension (voir la figure I.1) [1].

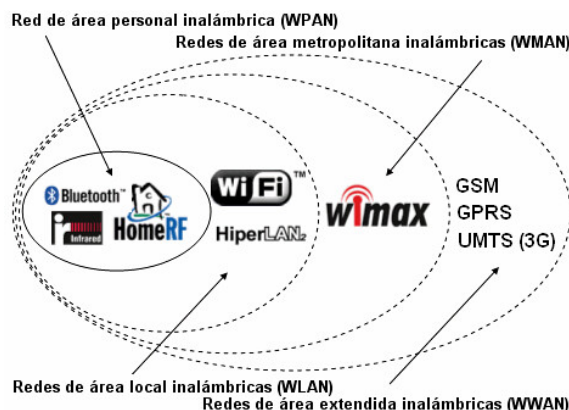


FIGURE I.1 – Classification des réseaux sans fil selon l'étendus géographique.

I.3.1 Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Les réseaux personnel sans fil (WPAN, Wireless Personal Area Network) sont des réseaux sans connexion fibre optique qui ont une faible portée de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau repose généralement sur des périphériques (tels que des appareils domestiques, des téléphones, etc.) ou un assistant personnel (PDA) relié à un ordinateur sans liaison filaire, ou il peut même permettre une communication non câblée entre deux machines relativement proches l'une de l'autre [2][3]. Plusieurs technologies sont employées pour les WPAN, parmi les quelles on trouve :

- **Bluetooth** : Standard lancé en 1994 par Ericson et normalisé par L'IEEE 802.15.1. Son débit théorique est de 1 Mbps, mais concrètement, il ne dépasse pas 720 Kbps. Le Bluetooth a pour principal avantage une faible consommation d'énergie, ce qui le rend particulièrement adapté à l'utilisation sur de petits périphériques [2][3].
- **HomeFR** : HomeRF (pour Home Radio Frequency), technologie WPAN lancée en 1998, proposant un débit théorique de 10 Mb/s avec une portée d'environ 50 à 100 mètres sans amplificateur. La norme HomeRF, soutenue notamment par Intel, a été abandonnée en janvier 2003, car les fondateurs de processeurs sont désormais mis sur les techniques WI-FI [2][3].
- **ZigBee** : Technologie connue sous la norme IEEE 802.15.4, offrant des liaisons sans fil à très faible consommation d'énergie, est conçue pour les petits dispositifs électroniques (appareils électroménagers, jouets, ...) [2].

Zigbee permet d'atteindre un débit théorique de 250 Kb/s avec une portée maximale de 100 mètres et opère dans la bande de fréquence 2,4 GHz mettant en œuvre la modulation OQPSK (offset quadrature phase-shift keying) et la technique d'étalement spectral DSSS (Direct Séquence Spread Spectrum) pour la transmission des données [3].

I.3.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN)

Les réseaux WLAN (Wireless Local Area Network) sont des réseaux sans fil qui peuvent couvrir une zone aussi grande qu'un réseau d'entreprise local, avec une portée approximative de cent mètres. Les réseaux utilisent des fréquences radio pour relier des appareils, tels que des ordinateurs portables et d'autres équipements électroniques ou informatiques, à Internet dans des environnements professionnels, tels que des immeubles de bureaux ou d'autres structures.

Les WLAN sont basés sur la norme IEEE 802.11 et offrent une gamme de bandes passantes, de 1 à 54 Mbit/s [4][5].

Il existe plusieurs technologies concurrentes, à savoir : Wi-fi (802.11), HiperLAN, etc.

I.3.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Le réseau WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), connu sous le nom de Boucle locale radio (BLR), est un réseau sans fil basé sur la norme IEEE 802.16 qui permet d'atteindre un débit théorique de 1 à 10 Mbit/s pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication.

La norme de réseau métropolitain sans fil la plus connue est le WiMAX, permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres [5][6].

I.3.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN)

Les réseaux étendus sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) sont connus également sous le nom de réseau cellulaire mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus, puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil.

Les différentes technologies sont les suivantes [5][6] :

- **GSM** (Groupe Spécial Mobile).
- **GPRS** (General Packet Radio Service).
- **UMTS** (Universal Mobile Telecommunication System).

I.4 Standard IEEE 802.11 (Wi-Fi)

Après l'essor du standard IEEE 802.11, plusieurs versions ont été réalisées afin d'améliorer la performance en termes de débit et de latence. On en parle alors, de la technologie connue aujourd'hui sous le nom de Wi-fi.

Le Wi-fi est apparu après que la WI-FI Alliance (anciennement Wireless Ethernet Compatibility Alliance) a fait appel à la société Interbrand pour trouver un nom plus attractif à « 802.11 Direct Sequence », qui était alors le terme employé pour la technologie Wi-fi. Le terme WI-FI est donc une marque déposée qui permet la création des WLAN à haut débit, à condition que l'appareil connecté ne soit pas trop éloigné du point d'accès, il couvre un ensemble de protocoles de communication sans fil. Ces protocoles de communication sont régis par les normes IEEE 802.11 qui spécifient l'interopérabilité entre des équipements conformes à ces normes [7].

Les standards internationaux IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) constituent une série de normes définissant les caractéristiques des réseaux locaux sans fil (WLAN)[8]. Depuis l'introduction de la première norme du standard en 1997, les technologies n'ont cessé de progresser. Cependant, des améliorations significatives des performances, notamment en termes de débit, de latence, d'efficacité spectrale dans les environnements denses, ont été rendues possibles par l'introduction du wi-fi 6 (802.11ax) et, plus récemment, du wi-fi 7 (802.11be). Le Wi-fi 7 introduit des innovations permettant de répondre aux besoins croissants des applications immersives

et temps réel. Aujourd’hui, les travaux en cours sur Wi-fi 8 (802.11bn) visent à aller encore plus loin, en explorant des mécanismes de coordination multi-AP avancée, la réutilisation spatiale optimisée et une ultra-haute fiabilité, afin de répondre aux exigences strictes des communications critiques et des réseaux IoT de nouvelle génération (voir la figure I.2) [9].

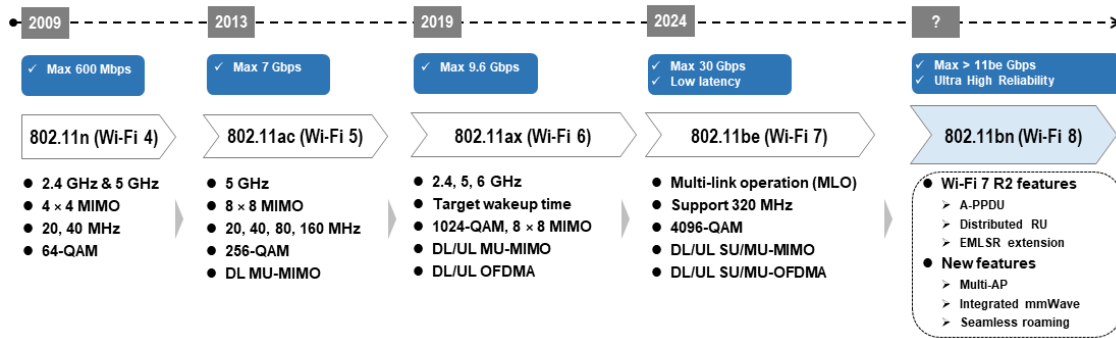


FIGURE I.2 – Les normes du Wi-fi.

Après l’essor de ce standard (IEEE 802.11), plusieurs versions ont été réalisées afin d’améliorer la performance en termes de débit et de latence.

I.5 Nouvelles générations de normes

Afin de répondre aux besoins croissants en bande passante, en densité de connexions et en faible latence, les normes Wi-fi ont connu plusieurs évolutions majeures au fil du temps. Chaque nouvelle génération introduit des améliorations significatives en termes d’efficacité, de capacité et de performance, tout en maintenant la compatibilité avec les générations précédentes. Les normes récentes, allant du Wi-fi 6 au Wi-fi 8, visent à répondre aux exigences des applications modernes, allant du streaming haute définition aux communications industrielles critiques.

I.5.1 Norme 802.11ax (Wi-Fi 6)

Le 802.11ax, également connu sous le nom de Wi-fi 6 ou HEW (High Efficiency WLAN), fonctionne à la fois dans les bandes de fréquences de 2,4 GHz et de 5 GHz de plus, il utilise la technologie OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour améliorer l’efficacité du réseau et la gestion simultanée de multiples appareils.

La norme IEEE 802.11ax offre de nombreux avantages, notamment des débits de transmission plus élevés, tant le taux de transmission théorique que pratique. Elle a une rétrocompatibilité avec l’ensemble des normes précédentes (802.11a, b, g, n et ac) [10][11][12].

I.5.1.1 Gestion efficace des utilisateurs (OFDMA, MU-MIMO)

- **OFDMA :**

Le Multiple Access par Division de Fréquence Orthogonale (OFDMA) est une caractéristique introduite avec le 802.11ac. Le standard cellulaire 4G LTE (Long Term Evolution) utilise actuellement OFDMA. L'OFDMA optimise l'utilisation du spectre de fréquence en créant davantage de sous-porteuses (Unités de Ressources) pour répondre aux besoins en bande passante de plusieurs clients différents. L'OFDMA est une version multi-utilisateur du multiplexage par répartition en fréquence orthogonale à utilisateur unique (OFDM), où des sous-ensembles de porteuses appelés sous-porteuses sont attribués aux utilisateurs. Les radios 11ax sont également compatibles avec OFDM pour assurer la rétrocompatibilité avec les clients a, g, n et ac (voir la figure I.3) [13]

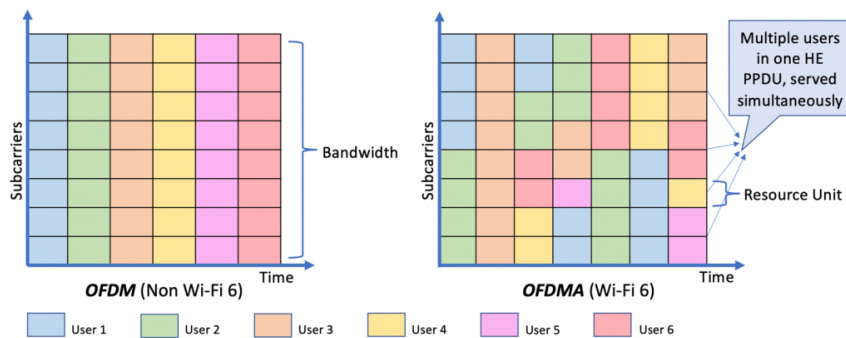


FIGURE I.3 – OFDMA dans la norme 802.11ax.

On appelle unités de ressources (RUs) les allocations de fréquence plus petites. Ils permettent à un point d'accès de synchroniser la communication (à la fois montante et descendante) avec plusieurs clients assignés à des unités de ressources spécifiques. En divisant les canaux en sous-porteuses plus petites, il est possible de transmettre des données à plusieurs utilisateurs. Cette transmission simultanée profite de coûts réduits au niveau MAC. Il bénéficie également d'une diminution des frais généraux liés à la contention des supports. Selon les besoins du client, le point d'accès peut choisir d'attribuer la totalité de la bande passante à un seul client ou de la diviser pour en servir plusieurs. L'OFDMA permet une meilleure réutilisation des fréquences et une latence réduite, ce qui le rend globalement plus efficace [14].

- **MU-MIMO :**

La technologie MU-MIMO permet à un point d'accès de servir simultanément plusieurs clients, en fonction du nombre de canaux ou de flux sans fil qu'il supporte. Bien que cette fonctionnalité ait déjà été présente dans la norme 802.11ac, le système MIMO multi-utilisateur intègre désormais les communications en montée. Avec l'intégration du 8x8, introduite dans la modification 802.11n, les points d'accès récents peuvent dorénavant gérer simultanément quatre clients MUMIMO 2x2 en transmissions montantes et descendantes. MU-MIMO collabore avec OFDMA pour faciliter la communication simultanée de plusieurs clients sur diverses bandes de fréquences et flux spatiaux [15].

La majorité des points d'accès 802.11ac destinés aux entreprises proposent quatre chaînes de transmission et quatre chaînes de réception par point d'ac-

cès. On le désigne sous le terme de modèle 4x4. Bien que les standards 802.11n et 802.11ac autorisaient en théorie l'établissement d'une structure 8x8, aucun des chipsets professionnels ne supportait cette fonctionnalité. Dans la norme 802.11ac, les coûts élevés et les bénéfices restreints associés aux chipsets 8x8 n'ont pas favorisé l'adoption de cette configuration. Avec l'évolution des technologies radio, les caractéristiques 8x8 seront enfin complètement supportées sur le marché avec la majorité des chipsets d'entreprise 802.11ax. Le passage de formats comportant peu d'antennes (par exemple, 2x2 ou 4x4) à des formats tels que le 8x8 augmente la vitesse de transmission et améliore grandement la fiabilité grâce aux antennes supplémentaires pour l'émission et la réception. Les 8 émetteurs et récepteurs facilitent l'atteinte de débits supérieurs pour les clients situés près d'un point d'accès 802.11ax, tout en offrant la capacité de servir les clients qui se trouvent à distance. Les points d'accès 8x8 devraient augmenter la portée de 10 à 20%, ce qui signifie que moins de points d'accès seront requis par zone de couverture. Grâce à l'utilisation de huit antennes d'émission et de réception, la puissance par voie radio est réduite, ce qui aide à renforcer la fiabilité du signal radiofréquence à des vitesses de transmission plus importantes. Cela est également avantageux pour les clients de longue date. Effectivement, un client 802.11ac avec plusieurs antennes génère des vitesses plus importantes que les modèles 4x4 à des niveaux de puissance RF équivalents [16].

I.5.1.2 1024-QAM

[9] la modulation d'amplitude en quadrature (QAM) permet une transmission plus efficace d'un plus grand nombre de paquets en modulant simultanément l'amplitude et la phase du signal. Une densité de constellation plus élevée avec la modulation 1024-QAM, tandis que la norme 802.11ac supporte la modulation 256-QAM. Dans un contexte idéal où uniquement un client serait positionné à proximité du point d'accès, on pourrait augmenter le débit jusqu'à 2,5 fois atteignant ainsi un transfert de 1,2 Gbit/s par canal spatial. Lorsque combinée à l'OFDMA, la modulation 1024-QAM améliore significativement le seuil de bruit, offrant des performances supérieures avec une bande passante de 20 MHz ou moins [15].

la modulation 256-QAM permet la transmission de 8 bits en utilisant le symbole OFDM. La 1024-QAM fournit une augmentation de 25 % de l'efficacité spectrale due au fait de porter ce chiffre à 10 bits. En raison de la densité accrue, le signal de bruit a une importance unique, compte tenu de la faible marge d'erreur liée à la modulation 1024-QAM. Durant les dernières années des méthodes de filtrage DSP plus précises ainsi que des technologies radio perfectionnées ont été mises sur le marché afin de permettre à cette densité croissante de se traduire par des vitesses de transmission plus élevées, même dans des situations moins qu'idéales (voir la les figures I.4 et I.5) [17].

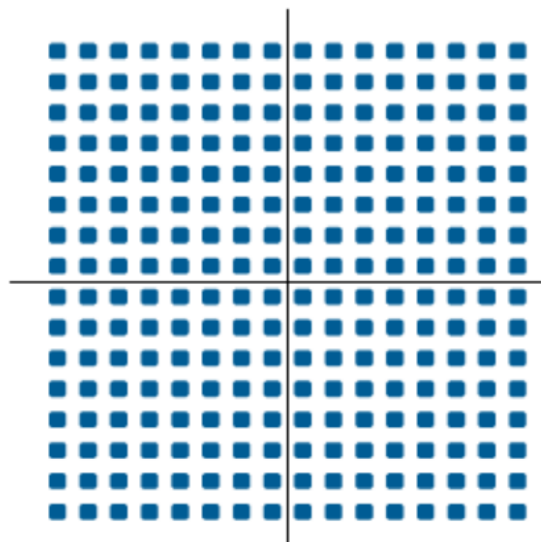


FIGURE I.4 – 256-QAM.

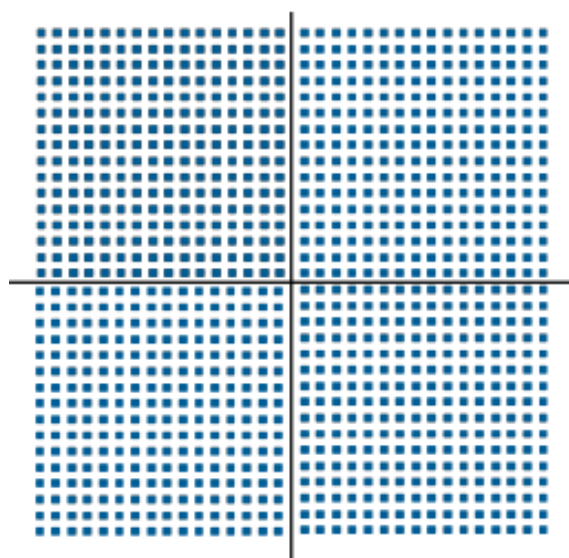


FIGURE I.5 – 1024-QAM.

I.5.1.3 BSS coloring

La méthode de coloration de réseau est une approche qui favorise une utilisation plus optimale de la bande passante disponible. Il est conçu pour distinguer les transmissions issues de différents ensembles de services de base (BSS) opérant sur le même canal, en leur attribuant une couleur distincte. Cette couleur correspond à une valeur de 6 bits intégrée dans le préambule de la couche physique. On peut se servir d'un maximum de 63 couleurs distinctes, la couleur 0 signifiant que le mécanisme est inactif [15][18]

I.5.2 Norme 802.11be (Wi-Fi 7)

Une nouvelle génération de technologie sans fil, 802.11be, également appelée Wi-Fi 7, a été créée pour offrir des vitesses de transmission extrêmement élevées (jusqu'à 40 Gbps), une latence plus faible et un réseau avec une plus grande capacité. Une nouvelle technologie appelée opération multi-liaison (MLO), qui permet une transmission simultanée sur plusieurs bandes (2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz). Wi-fi 7 est idéal pour les applications exigeantes comme la réalité virtuelle, les jeux en cloud, les environnements industriels ou les maisons intelligentes, tout en restant rétrocompatible avec les normes Wi-fi précédentes. La norme intègre également la technologie Full Duplex, qui améliore l'efficacité des réseaux sans fil [12][19].

I.5.2.1 Innovations majeures du Wi-fi 7

Le Wi-fi 7 (802.11be) fait évoluer la couche physique des normes précédentes en doublant la largeur des canaux jusqu'à 320 MHz et en augmentant le nombre de flux spatiaux MU-MIMO jusqu'à 16, ce qui multiplie par quatre la capacité de transmission par rapport au Wi-fi 6. Il utilise une technique de modulation plus sophistiquée, la 4096-QAM, qui améliore le taux de transfert nominal d'environ 20 %, bien que cette méthode exige un rapport signal sur bruit élevé, facilité par l'usage du beamforming [10]. La norme met en place un format de trame universel (U-SIG) afin de garantir la compatibilité ascendante et de favoriser la coexistence de divers formats au sein d'un même réseau. Elle prend en charge l'agrégation de canaux non contigus (comme 160+160 MHz) permettant une utilisation efficace du spectre même en cas de fragmentation. Afin d'optimiser la gestion des canaux, une approche de sondage implicite qui s'appuie sur la réciprocité des canaux est prévue, diminuant ainsi la surcharge liée à l'obtention des informations concernant l'état du canal. Ces avancées permettent au Wi-fi 7 d'atteindre des débits théoriques proches de 46 Gbit/s, près de cinq fois plus rapides que le Wi-fi 6, tout en optimisant la capacité, la vitesse et la fiabilité des réseaux sans fil [20].

I.5.2.2 OFDMA optimisé

Le 802.11be utilise une méthode de planification proche à celle du 802.11ax, où un point d'accès (AP) est en mesure de commencer des transmissions MUE en direction descendante ou montante en exploitant l'OFDMA et/ou le MIMO. Elle introduit une innovation permettant d'allouer plusieurs unités de ressource (RU) à une unique station (STA), offrant ainsi une nouvelle dimension de flexibilité en termes de planification. En outre, l'exécution de plusieurs liens peut nécessiter une synchronisation de planification [20].

I.5.2.3 Mode multi-lien (MLO)

Le Wi-fi 7 a introduit une avancée révolutionnaire en permettant nativement l'opération multi-liens, offrant simultanément des débits de transmission de

données élevées et une latence extrêmement faible . Malgré la capacité des chipsets contemporains à gérer plusieurs connexions en même temps, ces dernières restent indépendantes, ce qui limite leur efficacité. La norme 11be a pour objectif d'atteindre une synchronisation entre les liaisons qui optimise l'utilisation des ressources du canal et prévient les interférences dans les environnements surchargés [21].

I.5.2.4 Accès multi-liens au canal

La technique multi-liaisons permet à un Multi-Lens (MLD) d'accéder au canal et de transmettre des données de manière asynchrone via plusieurs liaisons, couvrant différentes bandes de fréquences telles que 2, 4, 5 et 6 GHz. Même si la probabilité d'interférence entre ces bandes est faible en raison de leur distance spectrale élevée, les appareils connectés à un MLD peuvent néanmoins interférer entre eux, notamment s'ils profitent de canaux proches. Cette interférence complique les transmissions et réceptions parallèles. Afin de remédier à ce problème, en complément des multi-liens asynchrones, des transmissions synchrones sont prévues, bien que cela puisse entraîner une diminution du débit due à un accès moins fréquent au canal. Une autre stratégie envisagée consiste à suspendre toute émission lorsqu'un récepteur associé est en cours de réception, forçant ainsi le MLD à interrompre temporairement les transmissions sur les bandes voisines afin de garantir une bonne réception des données (voir la figure I.6) [22][20].

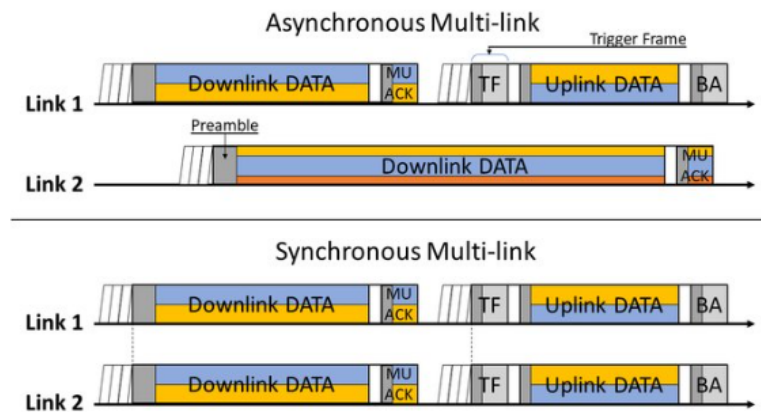


FIGURE I.6 – Mode de transmission Multi-link.

I.5.3 Norme 802.11bn (Wi-Fi 8)

La nouvelle génération de Wi-Fi, nommée Wi-Fi 8, a été développée pour améliorer encore les performances dans les environnements densément peuplés et en réseau, tels que les grandes infrastructures et les réseaux Internet des objets. Suite au succès du Wi-Fi 7, des techniques plus récentes comme la coordination multi-AP et la réutilisation coordonnée spatialement ont été introduites pour maximiser l'utilisation du spectre, minimiser les interférences et améliorer la

qualité du service même lorsque plusieurs appareils sont connectés en même temps [23][24].

Wi-Fi 8 vise une connectivité plus efficace, plus intelligente et mieux adaptée aux besoins futurs de l'internet des objets et des applications en temps réel (voir le tableau I.1)

Caractéristiques	802.11ax	802.11be	802.11bn
Débit maximal	9,6 Gbit/s	23-30 Gbit/s	100 Gbit/s (visé)
Bandes	2,4/5/6 GHz	2,4/5/6 GHz	2,4/5/6 GHz (supposé)
Largeur de canal max	160 MHz	320 MHz	>320 MHz (estimé)
Modulation	1024-QAM	4096-QAM	inconnue
Technologie clé	OFDMA, MU-MIMO	MLO, Multi-RU	MAPC, C-SR
Commercialisation	Depuis 2021	A partir de 2024	Année 2030 (estimé)

TABLE I.1 – Comparaison des normes récentes.

I.5.4 Modes de Fonctionnement du Wi-fi

Il existe différents types d'équipement pour la mise en place d'un réseau sans fil wi-fi :

- **Les adaptateurs sans fil ou cartes d'accès** (en anglais wireless adapters ou network interface controller, noté NIC) : il s'agit d'une carte réseau à la norme 802.11 permettant à une machine de se connecter à un réseau sans fil. Les adaptateurs Wi-fi sont disponibles dans de nombreux formats (carte PCI, carte PCMCIA, adaptateur USB, carte compactFlash, ...). On appelle station tout équipement possédant une telle carte.
- **Les points d'accès** (notés AP pour access point, parfois appelés bornes sans fils) permettant de donner un accès au réseau filaire (auquel il est raccordé) aux différentes stations avoisinantes équipées de cartes wi-fi.

Le standard 802.11 définit deux modes opératoires :

- Le mode infrastructure dans lequel les clients sans fils sont connectés à un point d'accès. Il s'agit généralement du mode par défaut des cartes 802.11b.
- Le mode ad hoc dans lequel les clients sont connectés les uns aux autres sans aucun point d'accès [8].

I.5.4.1 Mode infrastructure

Dans le cadre de l'infrastructure, chaque appareil (appelée STA) se connecte à un point d'accès par le biais d'une connexion sans fil. L'unité constituée du

point d'accès et des stations présentes dans sa zone de couverture est dénommée ensemble de services de base (en anglais, basic service set ou BSS) et forme une cellule. Chaque BSS est désigné par un BSSID, qui est un identifiant de 6 octets (48 bits). Dans le mode infrastructure, le BSSID se réfère à l'adresse MAC du point d'accès (voir la figure I.8) [8] [25].

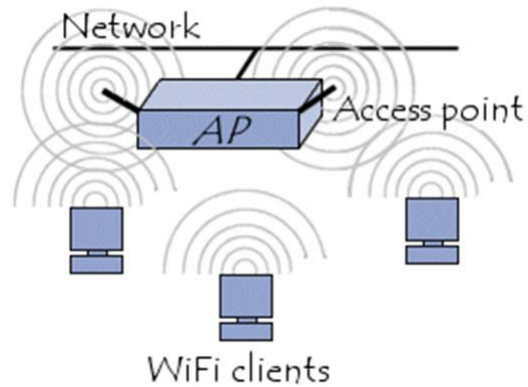


FIGURE I.7 – Mode infrastructure.

Il est possible de connecter divers points d'accès entre eux (ou plus précisément, plusieurs BSS) par un moyen de liaison connu sous le nom de système de distribution (DS pour Distribution system), dans le but de former un ensemble élargi de services (extended service set ou ESS). Le système de distribution (DS) peut être mis en œuvre via un réseau câblé, une connexion filaire entre deux points d'accès ou une infrastructure sans fil, en fonction de l'architecture mise en place (voir la figure I.8) [8][26][25].

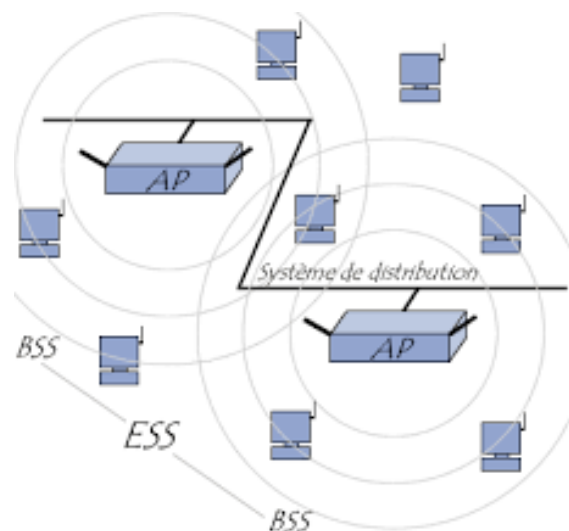


FIGURE I.8 – Ensemble de service étendu.

Un ESS est repéré par un ESSID (Service Set Identifier), c'est-à-dire un identifiant de 32 caractères de long (au format ASCII) servant de nom pour le

réseau. L'ESSID, souvent abrégé en SSID, représente le nom du réseau et représente en quelque sorte un premier niveau de sécurité dans la mesure où la connaissance du SSID est nécessaire pour qu'une station se connecte au réseau étendu.

Quand un utilisateur mobile se déplace à travers l'ESS et change de BSS, l'adaptateur réseau sans fil de son appareil peut basculer vers un autre point d'accès en fonction de la qualité du signal reçu de différents points d'accès. Grâce au système de distribution, les points d'accès échangent des informations sur les stations et facilitent, si nécessaire, la transmission des données provenant des stations mobiles. La capacité des stations à « passer de manière transparente » d'un point d'accès à un autre est connue sous le nom d'itinérance (en anglais, roaming) [8][26].

I.5.4.2 Mode Ad hoc

En configuration ad hoc, les appareils clients sans fil s'interconnectent pour créer un réseau de pair à pair (peer to peer en anglais), c'est-à-dire une structure où chaque machine agit simultanément comme client et comme point d'accès (voir la figure I.9) [27].

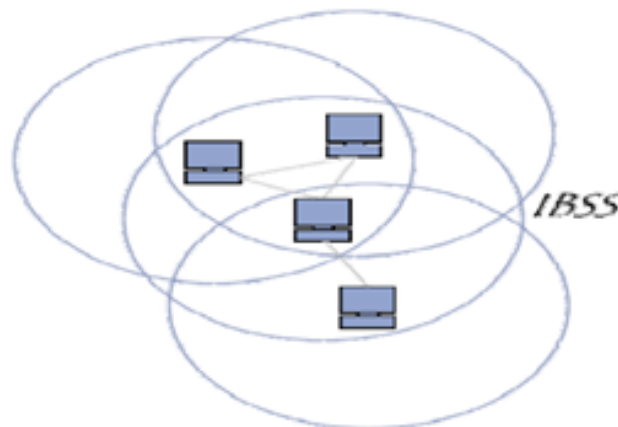


FIGURE I.9 – Mode Ad Hoc.

L'ensemble formé par les différentes stations est appelé ensemble de services de base indépendants (en anglais, independent basic service set, abrégé en IBSS). Un IBSS est ainsi un réseau sans fil constitué au minimum de deux stations et n'utilisant pas le point d'accès. L'IBSS constitue donc un réseau éphémère permettant à des personnes situées dans une même salle d'échanger des données. Il est identifié par un SSID, comme l'est un ESS en mode infrastructure.

Dans un réseau ad hoc, l'étendue du BSS indépendant est fixée en fonction de la portée de chaque station. Cela implique que si deux stations du réseau sont situées hors de portée l'une par rapport à l'autre, elles ne seront pas en mesure de communiquer, même si elles détectent d'autres stations. Effectivement, à l'opposé du mode infrastructure, le mode ad hoc ne dispose pas d'un

mécanisme de distribution capable de transmettre les paquets d'un dispositif à un autre. Par conséquent, un IBSS est, par définition, un réseau sans fil limité [8].

La distinction entre l'ad hoc et le mode infrastructures réside dans la capacité de ce dernier à faciliter la communication directe entre tous les appareils. Il n'y a pas de point central de surveillance de la communication entre les appareils. Cependant, l'infrastructure réseau nécessite un point d'accès qui surveille la communication sans fil et offre plusieurs avantages significatifs par rapport aux réseaux ad hoc. Par exemple, un réseau fonctionnant en mode infrastructure peut offrir une sécurité plus élevée, des vitesses de transfert de données potentiellement plus rapides et la possibilité d'intégrer un réseau filaire [28][29].

I.5.5 Couches de la norme IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 se rapporte aux deux premières couches du modèle OSI, à savoir la couche physique et la couche de liaison de données, ou plus précisément la partie inférieure de cette dernière, également appelée la couche de contrôle d'accès au support (MAC) (voir la figure I.10) [5].

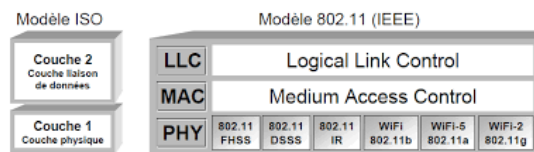


FIGURE I.10 – Les couches de la norme IEEE 802.11.

I.5.5.1 Couche MAC

Selon les normes de réseau informatique IEEE 802.x, la sous-couche de contrôle d'accès au média, ou MAC, représente la couche inférieure de la couche de liaison de données dans le modèle OSI. Elle joue le rôle d'interface entre la section logicielle qui gère la connexion d'un nœud (Contrôle de liaison logique) et la couche physique (matérielle) [30].

La couche MAC, fréquemment décrite comme le « cerveau » du réseau, propose une multitude de fonctionnalités pour le fonctionnement des réseaux locaux sans fil 802.11. En règle générale, elle est chargée de la gestion et de l'entretien des communications entre les stations 802.11 (cartes réseau sans fil et points d'accès) en orchestrant l'accès à une fréquence radio partagée et en ayant recours à des protocoles qui optimisent les transmissions sur un support sans fil.

La sous-couche MAC s'occupe principalement de [30] :

- Sélectionner les trames reçues en ne retenant que celles qui sont à son intention, tout en contrôlant leur adresse MAC de destination.

- Identifier le commencement et la conclusion des trames dans le flux binaire réceptionné depuis la couche physique.
- Identifier les fautes de transmission, par exemple grâce à une somme de contrôle (checksum) fournie par l'émetteur et contrôlée par le destinataire.
- Marquer les trames transmises en ajoutant des données (telles que des bits additionnels) dans ou entre elles, afin de permettre au récepteur de déterminer leur point de départ et d'arrivée.
- Inclure les adresses MAC source et destination dans chaque trame envoyée.
- Gérer l'accès au support physique lorsqu'il est partagé.

La couche MAC 802.11 présente des similarités avec la couche MAC 802.3 en ce qui concerne l'implémentation de la politique d'accès. Cependant, elle est propre à l'IEEE 802.11 puisqu'elle propose un plus grand nombre de fonctionnalités comparativement à une couche MAC standard (attribution du support, adressage, structuration des trames). Ces fonctionnalités additionnelles fournies sont habituellement gérées par des protocoles de niveau supérieur, tels que les sommes de contrôle CRC, la fragmentation et le réassemblage (particulièrement utile étant donné le taux élevé d'erreurs du support radio), ainsi que les retransmissions de paquets et les accusés de réception. Cela renforce la solidité de la couche MAC 802.11 [5].

L'une des spécificités de la norme 802.11 est qu'elle établit deux modes d'accès aux supports : un mode centralisé (ou PCF pour Point Coordination Function) qui requiert l'usage de stations de base pour gérer les accès, et un mode distribué (ou DCF pour Distributed Coordination Function) où chaque terminal décide indépendamment d'accéder au canal ou de différer sa transmission.

1. **La fonction de coordination distribuée (DCF) :** Le DCF est une méthode clé de contrôle MAC la norme IEEE 802.11, qui utilise CSMA/CA pour contrôler les transmissions de données asynchrones. L'espacement inter-trames (IFS), également connu sous le nom de polarisation spatiale entre les trames, est utilisé pour contrôler l'accès au support. Ils désignent l'intervalle de temps séparant deux envois de trames. Il s'agit en réalité de périodes d'inactivité sur le médium de transmission qui permettent de réguler l'accès au médium pour les stations et d'établir un système de priorités lors d'une transmission. La couche physique est responsable du calcul des valeurs pour les divers IFS. Ces IFS incluent [2] :
 - **Short IFS (SIFS) :** est le plus court des IFS. Il est utilisé pour distinguer les différentes trames envoyées dans un même échange, par exemple entre des données et leurs Acquittements, ou entre divers segments d'une même trame, ou encore pour toute autre communication liée à un même échange (question-réponse).
 - **DCF IFS (DIFS) :** est la durée d'attente imposée aux stations avant de diffuser un paquet en mode DCF. Le calcul du DIFS se fait comme suit :

$$DIFS = SIFS + 2Slotime \quad (I.1)$$

- **PCF IFS (PIFS) :** Le point d'accès utilise cette durée pour accéder en priorité au support. On le calcule de la manière suivante :

$$PIFS = SIFS + Slotime \quad (I.2)$$

- **Extended Inter-Frame Spacing (EIFS) :** est employé par les stations fonctionnant en mode DCF. Il s'agit du IFS le plus étendu et il est mis en œuvre à la suite d'une erreur dans le FCS (Fame Check Sequence).

Dans le cadre du DCF, une station doit d'abord écouter le canal avant de commencer l'envoi d'un paquet. Si le canal est dégagé pendant une période DIFS, la station a la possibilité d'envoyer son paquet. Les stations surveillant le programme détectent une diffusion et déclencheront, pour une période déterminée, leur signal NAV, utilisant cette donnée pour repousser toute émission programmée.

Si le canal est détecté comme inactif pendant une période DIFS, les stations souhaitant transmettre sélectionnent, au sein d'une fenêtre nommée Contention Window (CW), un backoff aléatoire mesuré en unités de timeslots de 20 μ s. L'intervalle de temps aléatoire (Temps De Backoff) est déterminé de la manière suivante :

$$TempsdeBackoff = Random(0, CW)Slotime \quad (I.3)$$

où $Random(a, b)$ représente la fonction qui génère de manière aléatoire un entier dans l'intervalle $[a, b]$, CW est la valeur actuelle de la fenêtre de contention. Après que le tirage ait été effectué, tant que la voie reste dégagée, les stations réduisent leur délai de backoff. La première station qui termine la décrémentation s'engage à diffuser ses données. Lorsque les autres stations identifient une reprise d'activité sur le canal, elles cessent de diminuer leur backoff et débutent une phase de différé. Quand le canal redevient libre pour une durée excédant le DIFS, les stations qui avaient été incapables de transmettre peuvent reprendre la réduction de leur backoff à l'endroit où elles l'avaient interrompu [5][2].

Une collision est possible si plusieurs stations tentent de transmettre simultanément ; dans le cas contraire, un accusé de réception est transmis à l'émetteur pour confirmer la réception. Après avoir reçu correctement les données, le récepteur patiente pendant une période SIFS avant d'émettre son accusé de réception (ACK). Pour diminuer le risque de collisions, après chaque tentative de transmission infructueuse, la fenêtre de contention est multipliée par deux (4) jusqu'à atteindre une valeur maximale prédéterminée appelée CWmax.

$$CW = (CWmin2)^{\wedge} 1 \quad (I.4)$$

Après chaque transmission réussie ou lorsqu'un paquet est rejeté à cause du dépassement du nombre de retransmissions autorisé, la fenêtre de contention est réinitialisée à une valeur minimale fixe CW_{min} (voir la figure I.11) [31].

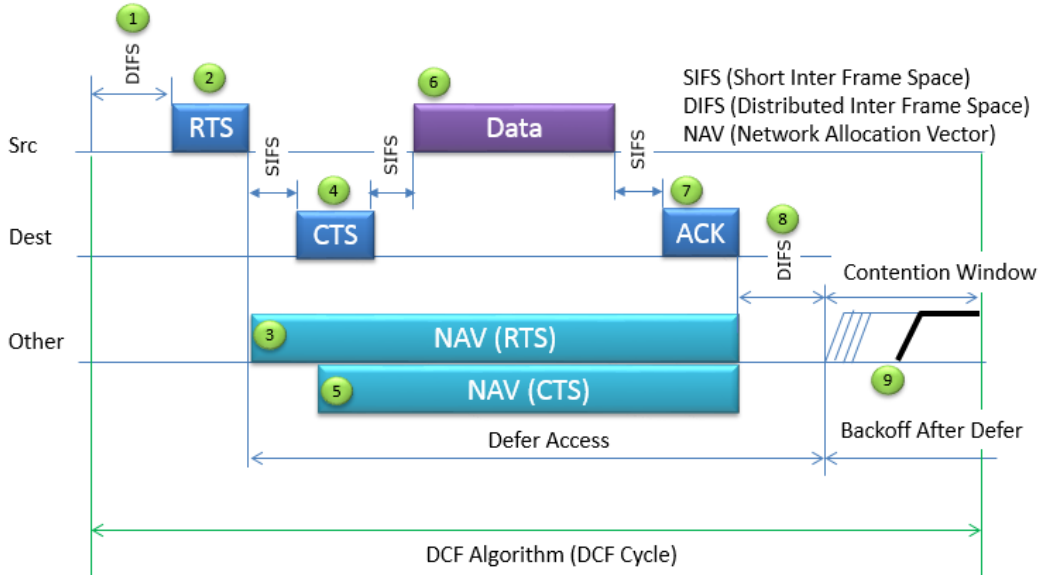


FIGURE I.11 – Le mécanisme DCF .

Cette méthode vise à minimiser les collisions en attribuant à chaque station une probabilité d'accès identique au support. Toutefois, si deux stations reçoivent leur backoff à zéro simultanément et qu'elles décident d'émettre en même temps, une collision pourrait se produire et la station qui émet n'aurait malheureusement pas la capacité de la détecter. Un accusé de réception (ACK) est utilisé pour signaler à la station émettrice que la trame a été reçue avec succès.

Il est nécessaire de noter que l'intervalle de temps entre l'envoi d'un paquet de données et son accusé de réception est un SIFS. Sa durée est inférieure à celle de DIFS. Le canal ne pourra être libéré de son backoff que si la station en période différée reprend la décrémentation pendant DIFS. La brièveté de SIFS évite que la décrémentation ne se produise de façon inopportune entre les données et leur accusé de réception.

Le mécanisme de backoff réduit la possibilité de collision, sans toutefois l'éliminer totalement. De même, si une collision se produit malgré tout (identifiée par l'absence d'accusé de réception), un nouveau délai aléatoire sera tiré. Cependant, après chaque collision successive, la taille de la fenêtre de contention sera multipliée par deux pour réduire les possibilités de répétition de ces collisions. La limite inférieure de la fenêtre de contention reste constamment à zéro, tandis que la limite supérieure fluctue entre CW_{min} et CW_{max} , comme défini par la norme [5][2].

2. **La fonction de coordination Centrale (PCF) :** Le PCF est un autre mécanisme essentiel de la norme réseau sans fil IEEE 802.11 qui fonctionne en conjonction avec la fonction de coordination distribuée (DCF)

pour assurer une transmission de données efficace et fluide en réduisant les collisions et les conflits de réseau. Ce qui caractérise le PCF est l'utilisation d'un dispositif de coordination appelé coordinateur de point (PC), qui se charge d'interroger les appareils au sein du réseau et de leur allouer des plages horaires pour la transmission des données. Cette méthode est optionnelle, à l'inverse de la méthode DCF, et ne fonctionne que dans un contexte d'infrastructure. Les stations ne peuvent plus communiquer entre elles, elles doivent toutes passer par le point d'accès. De ce fait, la moitié de la bande passante est gaspillée (voir la figure I.12) [32][2].

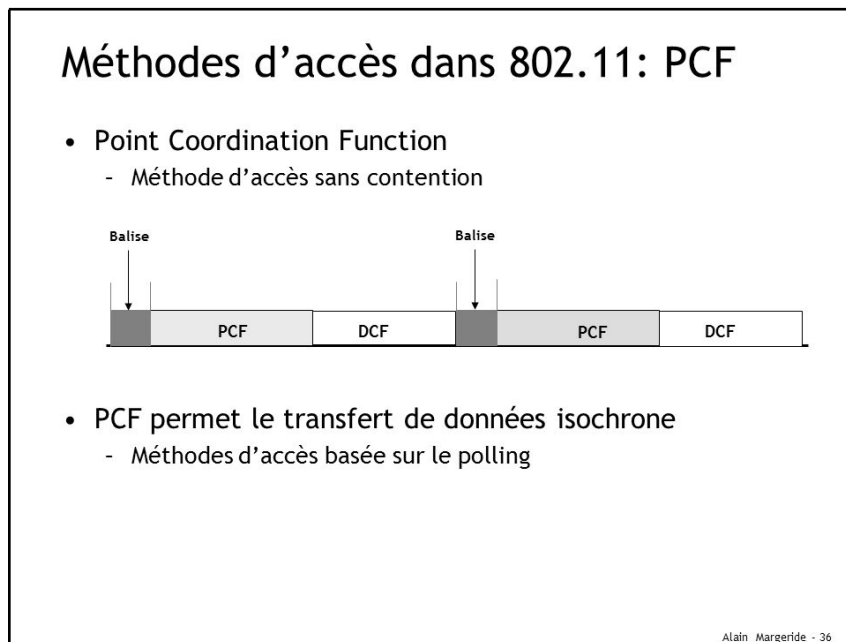


FIGURE I.12 – Le mécanisme PCF .

Cette méthode a été lancée par la norme afin de satisfaire les exigences des utilisateurs qui utilisent un trafic en temps réel. Elle repose sur la définition d'une période sans contention CFP qui s'alternera avec la période avec contention CP gérée par le mode DCF. Dans un même BSS, le temps d'accès au canal sera alors divisé en intervalles (CFP + CP) appelés Beacon Interval ou balise. Les stations ont la possibilité d'utiliser les algorithmes PCF et DCF simultanément. Le point d'accès détermine la durée maximale, CFP-MaxDuration. Les périodes CFP commencent dès qu'une balise est émise par le point d'accès. Durant la période CFP-MaxDuration, c'est l'approche PCF qui est utilisée, en dehors de cette durée, l'approche DCF est employée [32][5].

Pour passer du PCF au DCF, on utilise une super-trame qui permet de signaler la période de répétition du mode sans contention (PCF). Cette super-trame commence avec une trame balise. On se sert de l'inter-trame PIF pour émettre cette balise. Le démarrage du mode PCF peut être différé, soit en attendant l'achèvement d'un paquet non terminé, soit en attendant sa confirmation si elle arrive avant le PIFS. L'acquittement est prioritaire car le SIFS présente une durée inférieure au PIFS [5].

3. **Le mécanisme de CSMA/CA :** Dans les réseaux sans fil réseaux, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) est une technique d'évitement de collision technique d'évitement basé sur la gestion des fenêtres temporelles dans la transmission et l'accusé de réception.

La CSMA/CA repose sur le principe de « Listen before talking », ce qui signifie qu'il faut d'abord écouter le support de transmission avant d'émettre. Si le canal est libre, la station initie un temporisateur de backoff aléatoire pour éviter les transmissions simultanées. Si le canal est occupé, elle attend qu'il se libère puis relance le backoff (voir la figure I.13) [33][2].

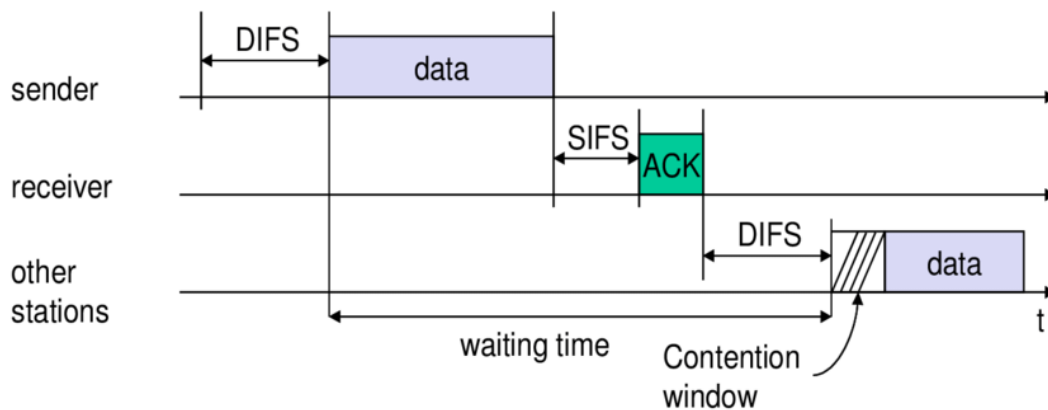


FIGURE I.13 – Le mécanisme CSMA/CA.

Le mécanisme RTS / CTS : Il s'agit d'une version améliorée du CSMA qui intègre un protocole d'évitement de collision (CSMA/CA), issu du CSMA avec détection de collision (CSMA/CD). Suivant le principe CSMA, la station envoie un paquet puis attend un ACK pour confirmer qu'il a été livré correctement et sans aucun problème. Dans ce contexte, la norme IEEE 802.11 mode DCF (Distributed Coordination Function) s'appuie sur des procédures supplémentaires, telles que l'utilisation de paquets RTS/CTS (Request To Send/-Clear To Send). Avant d'envoyer beaucoup de données, une station radio écoute le canal pendant une durée prédéterminée appelée DIFS (espace inter-trame distribué), suivie d'une phase de recul aléatoire.

Pas de nouveauté pour le moment. Toutefois, plutôt que de transmettre directement un lot de données, la station envoie un petit lot comprenant une requête d'envoi (RTS), en d'autres termes, elle sollicite l'autorisation d'envoyer un ensemble de données. Ce paquet fournit une estimation du temps nécessaire pour émettre le paquet de données. Par la suite, la station destinataire transmet un paquet (CTS) à la station source afin de lui octroyer l'autorisation. En réponse, une explication succincte du « délai d'appel » et de l'Espace Inter Frame Court (SIFS) est fournie. Naturellement, une fois que le DIFS a été contacté, aucune autre station n'enverra de paquet entre RTS et CTS avec un identifiant erroné. C'est à ce stade que le mécanisme RTS/CTS entre en jeu pour résoudre le problème des collisions cachées (nœuds dissimulés) (voir la figure I.14) [34].

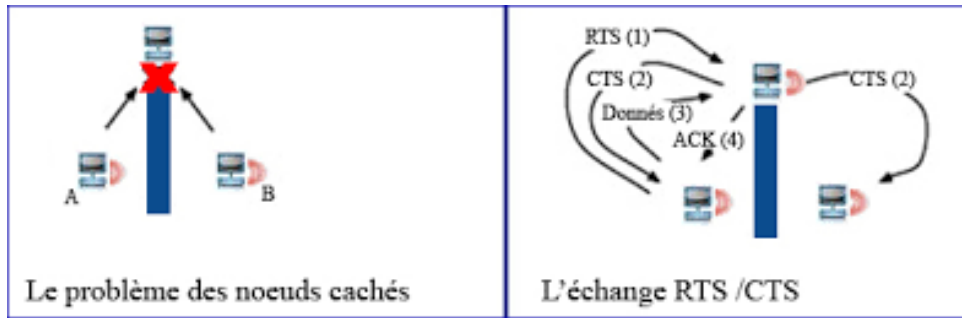


FIGURE I.14 – Problème des nœuds cachés.

Le paquet CTS précise également la durée pendant laquelle le canal sera occupé. Des stations voisines reçoivent le RTS ou le CTS, elles établissent par la suite une variable interne dénommée NAV (Network Allocation Vector) qui indique la période pendant laquelle elles doivent demeurer silencieuses. Le CTS a été reçu et la station émettrice attend un autre SIFS avant de transmettre les données. Une fois le colis arrivé, la station destinataire envoie un ACK et un SIFS pour confirmer une réception réussie et sans collision (voir la figure I.15) [35].

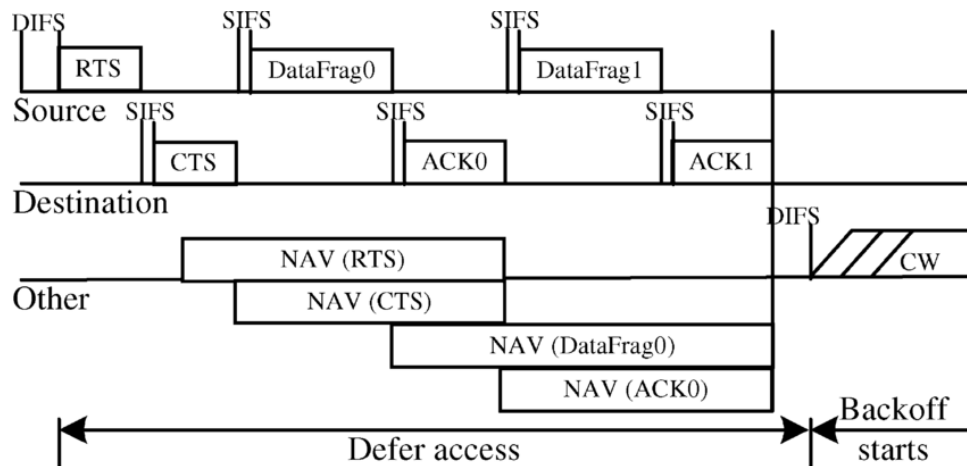


FIGURE I.15 – Le mécanisme CSMA/CA avec RTS/CTS.

Ce processus RTS/CTS est utilisé uniquement pour les transmissions unicast. Les paquets en mode broadcast ou multicast sont envoyés sans passer par les phases RTS, CTS et ACK. Quand une station se connecte à un point d'accès et transmet un message en diffusion ou multicast, elle l'adresse en fait en unicast à l'AP, qui est ensuite responsable de le partager avec tous les destinataires.

L'objectif du système RTS/CTS est d'éviter les collisions avant qu'elles n'arrivent, plutôt que de les identifier au moment où elles se produisent. Cette méthode entraîne une surcharge de gestion (RTS, CTS, ACK), ce qui réduit le taux de transfert effectif par rapport à la capacité théorique du canal principal. Une des explications du fait que le débit réel constaté dans le Wi-fi 802.11 est considérablement plus bas que le débit théorique déclaré [35].

I.5.5.2 Couche Physique

Le couche physique du wi-fi définit les caractéristiques radio et de modulation requises pour la transmission de données tout en fournissant à la couche MAC les informations dont il a besoin pour gérer efficacement l'accès aux canaux partagés . Elle propose une variété de techniques de codage d'informations, telles que DSSS et FHSS, qui fonctionnent dans la même gamme de fréquences , à savoir 2,4 GHz (jusqu'à 2,4835 GHz), ainsi que IR et OFDM. Toutes ces technologies mentionnées permettent l' acquisition de différents types de débits entre 1 et 2 Mbps [36].

1. DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) :

Chipping :

La modulation DSSS est une technique d'équilibrage du spectre utilisée dans la norme 802.11 pour réduire les interférences et rendre les communications plus résistantes au bruit. Selon un code spécial appelé code Barker , elle consiste à remplacer chaque bit du signal d' origine par une séquence de 11 bits beaucoup plus rapprochés, appelés « phase - chipping ». Dans la même fréquence gamme de 2,4 GHz que le FHSS, le 802.11 définit 14 grands canaux de 22 MHz.2,4 GHz . L'émetteur et le récepteur doivent s'accorder sur un canal fixe à utiliser pour communiquer [36][37].

La modulation CCK(Complementary Code Keying) :

La modulation complementary code keying (CCK) est une technique utilisée par le standard 802.11b pour améliorer la modulation DSSS avec le DSSS à haute vitesse (HR-DSSS). Son principe est le même que son prédécesseur, par contre il utilise 64 codes complémentaires de 8 bits, transportant 6 bits d'information par code au lieu du code Barker, ce qui permet d'atteindre des débits de 5,5 Mbps et 11 Mbps. Le HR-DSSS est mieux adapté en intérieur et à courtes distances, mais il reste sensible aux interférences d'autres réseaux sans fil [36][37].

2. FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) :

La technique de modulation FHSS a été développée en 1942 par Hedy Lamarr et George Antheil. Le concept est plutôt simple : une vaste bande de fréquences est segmentée en plusieurs canaux et les transmissions se déroulent en passant tour à tour d'un canal à l'autre, suivant un ordre et une cadence préétablis entre l'émetteur et le destinataire. Cela complique la tâche d'intercepter les communications, sauf pour la norme 802.11, car les séquences de canaux employées ne sont pas tenues confidentielles [36][37].

3. IR (Infrared) :

La technologie d'infrarouge facilite l'établissement de connexions sans fil sur de courtes distances, avec des vitesses allant jusqu'à 16 Mbps pour certaines normes de performances plus élevées . Bien que cette solution est utilisée pour la domotique (télécommandes), elle reste sensible aux perturbations lumineuses . La technique utilisée est appelée PPM (Pulse Position Modulation), qui repose sur l'envoi d'impulsions d'amplitude fixe et le codage d'informations en fonction de la position de ces impulsions. [5].

4. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) :

La modulation OFDM est une méthode basée sur le concept du multiplexage, qui permet d'effectuer plusieurs transmissions en même temps sur une seule bande de fréquences. Elle est segmentée en canaux de manière identique à DSSS. L'OFDM transmettra les informations à différentes fréquences en même temps (fréquence incluse dans le canal disponible), ce qui permet d'obtenir un taux de transfert supérieur à celui prévu. On utilise des transformations de Fourier normales pour émettre et recueillir les signaux. Cette méthode va aider à éviter les dangers associés aux interférences [37] [5].

I.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a approfondi notre compréhension de la norme IEEE 802.11 en se concentrant sur ses couches MAC et physiques. Nous avons observé comment ces couches assurent le bon fonctionnement en contrôlant l'accès aux canaux et la transmission des données. L'évolution nous permet de répondre aux demandes croissantes de mobilité et de connectivité dans notre société moderne.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART ET TRAVAUX CONNEXES

II.1 Introduction

Dans le contexte de l'évolution du standard IEEE 802.11bn, de nombreux travaux ont été menés pour répondre aux exigences croissantes en matière de fiabilité, de latence et d'efficacité spectrale. Dans ce chapitre, nous avons présenté des recherches récentes sur diverses techniques améliorant la performance de Wi-fi 8. Par la suite, nous avons fait une comparaison entre les articles qui semblent plus intéressants de notre étude afin de trouver notre approche proposée.

II.2 Travaux connexes

II.2.1 Fiabilité Ultra Élevée et Optimisation de l'Accès au canal dans le Wi-fi 8

- **Article 1 : What will Wi-Fi 8 Be? A primer on IEEE 802.11bn Ultra High Reliability [23].**

Dans l'article [23], publié en 2023, les auteurs Lorenzo Galati-Giordano, Giovanni Geraci, Marc Carrascosa et Boris Bellalta ont abordé la problématique de la fiabilité du Wi-fi dans un contexte d'applications émergentes critiques. Ces dernières incluent la chirurgie assistée à distance, les communications holographiques et même la robotique industrielle. Le Wi-fi actuel, qui est destiné à une utilisation générale sur des bandes sans licence, vise à fournir des performances déterminées avec une faible latence et une fiabilité considérable.

L'objectif de l'article est de présenter les évolutions prévues dans la norme IEEE 802.11bn (Wi-fi 8), visant à atteindre une ultra-haute fiabilité (UHR) grâce à des fonctionnalités innovantes comme la coordination multi-AP, le fonctionnement multi-liaison (MLO) assurant une connectivité continue, la transmission conjointe (JT) transformant les interférences en coopération utile, le beamforming coordonné (CBF) pour orienter précisément les signaux, et l'utilisation des canaux secondaires (SCA) afin d'exploiter pleinement la bande passante disponible. À cela s'ajoutent la réutilisation spatiale coordonnée (C-SR), qui ajuste dynamiquement la puissance d'émission entre AP pour permettre des transmissions simultanées, ainsi que des approches TDMA/OFDMA distribuées, facilitant le partage équitable des ressources en temps et en fréquence.

Afin d'évaluer l'impact concret de ces techniques, les auteurs réalisent une étude de cas par simulation combinant MLO et CBF dans un réseau composé de deux AP et de deux stations, chacun transmettant un flux holographique à 2 Gbit/s sur deux canaux de 160 MHz. Le CBF utilise des prédictions directionnelles pour éliminer les interférences entre les voisins BSS. Des prédictions directionnelles pour éliminer les interférences entre les voisins BSS. L'étude examine un certain nombre de facteurs, notamment la latence mesurée à différents percentiles, le temps d'acquisition

des informations du canal (0 à 2 ms) et la précision de l'annulation (10 à 30 dB).

Les résultats montrent qu'en l'absence de coordination, les délais critiques dépassent 100 ms, ce qui est inacceptable pour les applications sensibles. En revanche, l'association MLO + CBF, avec une bonne précision d'annulation, permet de maintenir un haut débit (jusqu'à 4096-QAM) et une latence très faible, même dans des scénarios fortement concurrencés. Malgré les avancées, certaines limitations subsistent, comme celles liées à la surcharge introduite par la transmission conjointe, qui nécessite une synchronisation AP précise et un partage rapide des données.

Afin de limiter la latence de coordination, les auteurs proposent de mettre en œuvre un système de partage de paquets anticipé et de mettre en place une liaison de retour à haut débit (type Ethernet 10 Gbit/s) entre les coopérateurs AP. Avec une planification intelligente, ou pilotée par IA, cette approche permettrait au Wi-fi 8 de répondre efficacement aux exigences des futures applications industrielles et ultra-fiables.

- **Article 2 : Optimized Non-Primary Channel Access Design in IEEE 802.11bn [38].**

Dans l'article [38] publié en 2024, les chercheurs Dongyu Wei, Liu Cao, Lyutianyang Zhang, Xiangyu Gao et Hao Yin ont abordé le problème d'inefficacité d'utilisation spectrale dans les réseaux Wi-fi. Ils ont souligné que lorsque le canal principal est utilisé, les canaux secondaires sont souvent laissés inutilisés, ce qui entraîne un gaspillage de ressources radio.

L'objectif principal de l'article est d'analyser et d'optimiser le mécanisme d'accès aux canaux non primaires (NPCA) proposé par le groupe IEEE 802.11 UHR, qui permet aux appareils de basculer vers des canaux secondaires dans le but d'améliorer l'efficacité spectrale. Pour ce faire, les auteurs créent un modèle analytique qui évalue la méthode de débit obtenue avec le NPCA et constatent que les coûts associés à la commutation des canaux (synchronisation, signalisation, etc.) peuvent parfois rendre le NPCA moins efficace que les mécanismes traditionnels. Cependant, l'article suggère une stratégie d'accès dynamique hybride qui peut déterminer instantanément la méthode d'accès primaire ou secondaire optimale en fonction de l'occupation du canal, améliorant ainsi la flexibilité et les performances globales.

Les résultats montrent que cette approche surpasse les modèles existants dans divers scénarios, y compris l'endettement. Une limite importante réside dans la complexité des calculs et la réactivité nécessaires à la prise de ces décisions dynamiques, ce qui pourrait poser problème avec des équipements plus faibles.

- **Article 3 : A Primer on AP Power Save in Wi-Fi 8 : Overview, Analysis, and open Challenges [39].**

Dans l'article [39] publié en novembre 2024, les auteurs Roger Sanchez-Vital, Andrey Belogaev, Carles Gomez, Jeroen Famaey et Eduard Garcia-

Villegas ont abordé la problématique de la consommation énergétique des points d'accès Wi-fi (AP) fonctionnant en permanence à pleine capacité. Cela entraîne des coûts énergétiques élevés, un impact environnemental important et une durée de vie réduite pour les PA alimentés par batterie.

L'objectif de l'article est de présenter et d'analyser les travaux du groupe IEEE 802.11bn (Wi-fi 8), qui vise à introduire un cadre d'économie d'énergie AP (PS) pour augmenter l'efficacité énergétique des réseaux Wi-fi. Les auteurs décrivent un certain nombre de mécanismes suggérés, notamment l'économie d'énergie des liaisons croisées, l'économie d'énergie semi-dynamique (SDPS), l'économie d'énergie dynamique (DPS), l'économie d'énergie programmée (SPS), l'intégration des radios de réveil (WuR) et le déchargement du traitement vers les stations (déchargement STA). Sur la base de données réelles provenant de 470 AP installés sur un campus universitaire, une analyse révèle que la consommation énergétique des AP pourrait être diminuée d'au moins 28%. Cependant, il existe des défis à relever pour parvenir à une intégration optimale de ces mécanismes, notamment l'allocation des ressources, la compatibilité avec les appareils existants et la surcharge de signalisation.

II.2.2 Coordination Multipoint d'Accès et Réutilisation Spatiale

- **Article 1 : Throughput Analysis of IEEE 802.11bn Coordinated Spatial Reuse [40].**

Dans l'article [40], publié en 2023, les auteurs Gianluca Fontanesi, Francesc Wilhelmi, Lorenzo Galati-Giordano, Giovanni Geraci, Boris Bellalta et David Nunez ont proposé une étude analytique approfondie de la réutilisation spatiale coordonnée (C-SR), une fonctionnalité clé du futur standard Wi-fi 8 (IEEE 802.11bn) introduite dans le cadre de la coordination multipoints d'accès (MAPC).

La problématique abordée est la nécessité d'augmenter l'efficacité du spectre et du débit dans les environnements Wi-fi denses tout en permettant des transmissions contrôlées simultanées entre les points d'accès appartenant à différents BSS (Basic Service Sets). L'objectif de l'étude est de modéliser et d'analyser les performances du C-SR en le comparant aux mécanismes hérités, tels que le 802.11ax SR (OBSS/PD) et la coordination distribuée (DCF) du 802.11. Les auteurs créent un modèle analytique basé sur les chaînes continues dans le temps de Markov (CTMC), qui prend en compte la dynamique de l'accès au canal, la puissance de transmission, les interférences et la qualité du signal (SINR). Le modèle est utilisé avec deux BSS dans une variété de topologies et de scénarios (cabines séparées ou partagées, stations proches ou éloignées).

Les résultats montrent que le C-SR surpasse les mécanismes DCF et SR actuels dans les scénarios étudiés. Il permet un meilleur équilibre temporel de l'antenne et une efficacité spatiale accrue, tout en réalisant des gains

de débit moyen allant jusqu'à 59% par rapport au DCF et 42% par rapport au 802.11ax SR. L'étude a démontré que le C-SR s'adapte bien aux environnements hautement compétitifs en tirant parti des opportunités de transmission simultanée et en alternant ou en parallélisant dynamiquement les transmissions basées sur le SINR. Cependant, les gains sont plus limités dans les scénarios extrêmement denses ou fortement aléatoires en raison des fortes interférences qui provoquent l'activation des transmissions simultanées.

La principale limitation du modèle est le non-respect explicite des paramètres de recherche de coordination et de signalisation, qui sont supposés négligeables mais peuvent affecter les performances réelles. Un moyen de pallier le manque de prise en compte des défaillances de coordination dans le modèle analytique serait d'incorporer un facteur de défaillance de signalisation directement dans le modèle CTMC sous la forme de délais (surcharge) et de probabilités de défaillance de coordination.

- **Article 2 : Spatial Reuse in IEEE 802.11bn Coordinated Multi-AP WLANs : A Throughput Analysis [41].**

Dans l'article [41], publié en juin 2024, les auteurs Francesc Wilhelmi, Lorenzo Galati-Giordano, Giovanni Geraci, Boris Bellalta et David Nunez ont abordé la problématique de l'optimisation de l'efficacité du spectre dans les réseaux Wi-fi 8 (IEEE 802.11bn), en particulier dans les zones encombrées où les performances sont limitées par les interférences entre les points d'accès.

L'objectif principal de l'étude est d'examiner le potentiel du mécanisme de réutilisation spatiale coordonnée (C-SR) dans les déploiements multi-AP. Pour ce faire, il est nécessaire d'étendre le modèle de débit Bianchi pour prendre en compte les transmissions simultanées entre plusieurs AP via C-SR, en utilisant la fonction distribuée de coordination (DCF) pour l'accès au canal et la communication inter-AP.

Les résultats numériques dans un réseau WLAN à quatre points d'accès montrent que, selon la distance entre les AP et l'emplacement des stations dans la zone, le CSR permet des gains de débit allant de 54% à 280%. Le principal inconvénient du C-SR est que, en raison de sa forte dépendance à la topologie du réseau et à la compatibilité spatiale entre les groupes AP, son efficacité peut être limitée dans des situations spécifiques. Afin de surmonter ce défi, il serait essentiel de créer des algorithmes dynamiques de formation de groupes AP capables de s'adapter instantanément aux conditions du réseau et aux emplacements des stations afin de maximiser la réutilisation spatiale et d'améliorer les performances globales.

- **Article 3 : IEEE 802.11bn Multi-AP Coordinated Spatial Reuse with Hierarchical Multi Armed Bandits [42].**

Dans l'article [42], publié en janvier 2025 dans IEEE Communications Letters, Les auteurs Maksymilian Wonjar, Wojciech Ciezobka, Katarzyna Kosek-Szott, Krzysztof Rusek, Szymon Szott, Boris Bellalta et David

Nunez, ont traité la problématique de la sélection efficace de groupes d'AP-station pour des transmissions simultanées dans les réseaux Wi-fi 8 (IEEE 802.11bn), où la coordination entre plusieurs points d'accès (AP) est essentielle pour gérer la contention dans des environnements denses.

L'objectif principal est de proposer une méthode d'apprentissage par renforcement pour optimiser la sélection des groupes dans le mécanisme de Réutilisation Spatiale Coordonnées (C-SR). Pour ce faire, les auteurs développent un cadre hiérarchique basé sur les bandits manchots multi-bras (MAB), permettant de sélectionner efficacement les AP pour des transmissions simultanées à travers diverses topologies de réseau. Les algorithmes MAB étudiés, l'algorithme Upper Confidence Bound (UCB) s'est avéré particulièrement efficace, offrant une convergence rapide, une flexibilité dans la réponse aux changements et des performances prises en charge.

Le principal inconvénient de cette étude est que les simulations sont basées sur des modèles idéalisés et ne tiennent pas compte des surcharges de coordination ou des conditions de trafic non saturées. Pour y parvenir, l'étude devrait être étendue à des scénarios plus réalistes, tels que diverses variations de puissance de transmission, des sélections de débit de données et une validation expérimentale pour confirmer les résultats de la simulation.

- **Article 4 : Techniques to Facilitate Multi-access Point Coordination (MAPC) in a Wireless Local Area Network (WLAN) Environment [43].**

Dans l'article [43], publié le 11 mars 2024, les auteurs Malcolm Smith et Brian Hart ont traité la problématique de la coordination efficace de plusieurs points d'accès (AP) dans les réseaux WLAN, notamment à la lumière des normes IEEE 802.11 et 802.11bn.

L'objectif de cette étude est de proposer des méthodes permettant la coordination multi-AP (MAPC) en introduisant des mécanismes tels que le partage des opportunités de transmission (TXOP), qui sont contrôlés par un leader AP. Les auteurs proposent d'utiliser un échange d'informations entre le leader et les suiveurs AP, suivi d'un déclenchement multi-AP pour démarrer le TXOP partagé. Cependant, les propositions actuelles ne contiennent pas le contenu des trames de déclenchement pour l'ensemble des mécanismes MAPC, tels que la réutilisation spatiale, l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) ou l'accès multiple par répartition orthogonale en fréquence (OFDMA).

Pour surmonter cette limitation, les auteurs présentent des méthodes visant à combler ces lacunes afin de fournir une base opérationnelle pour les opérations MAPC qui peuvent être utilisées dans les environnements WLAN d'entreprise sur plusieurs générations Wi-Fi. Le contenu des déclencheurs pour les différents mécanismes MAPC est une solution suggérée qui permet la mise en œuvre cohérente et efficace de la coordination multi-AP dans divers scénarios de réseau.

II.2.3 Opérations Multi-Liaison et Technologies Émergentes

- **Article 1 : Wi-Fi 8 : Embracing the Millimeter-Wave Era [44].**

Dans l'article [44] publié en juillet 2024, les auteurs Xiaoqian Liu, Tingwei Chen, Yuhan Dong, Zhi Mao, Ming Gan, Xun Yang et Jianmin Lu ont abordé la problématique de l'intégration des réseaux à ondes millimétriques (mmWave) dans les réseaux Wi-fi (IEEE 802.11bn) afin de répondre aux demandes croissantes d'appareils à latence élevée et faible, y compris pour des applications telles que la réalité virtuelle et augmentée.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer la viabilité technique de l'utilisation des bandes mmWave dans les environnements Wi-fi tout en garantissant la compatibilité avec les protocoles sub-7 GHz existants. Pour y parvenir, les auteurs créent des simulations basées sur l'upclocking du PPDU 802.11ac à 60 GHz tout en tenant compte des contraintes matérielles telles que la perte de port de fréquence (CFO), le bruit de phase (PN) et les non-linéarités dans les amplificateurs de puissance (PA).

Malgré l'existence de défauts matériels, tels qu'une augmentation de l'espacement des sous-porteuses, les résultats montrent que la communication mmWave est réalisable avec des performances satisfaisantes. Cependant, l'étude n'aborde pas la correction active de la dégradation du matériau et ignore des aspects critiques tels que les coûts de mise en œuvre élevés ou la formation de faisceaux. Pour surmonter ces défis, des techniques avancées de correction d'erreurs et d'optimisation de la gestion de l'énergie doivent être développées afin de garantir une utilisation efficace et rentable de la bande mmWave en Wi-fi 8.

- **Article 2 : Multi-link Operation and Wireless Digital Twin to Support Enhanced Roaming in Next-Gen Wi-Fi [45].**

Dans l'article [45] publié en novembre 2024, les auteurs Stefano Scanzio, Matteo Rosani, Gabriele Formis, Dave Cavalcanti, Valerio Frascolla, Guido Marchetto et Gianluca Cena ont traité la problématique de l'amélioration de l'itinérance ininterrompue dans les réseaux Wi-fi de nouvelle génération, en particulier dans les environnements industriels exigeants. L'objectif de l'article est de fournir une solution qui assure une communication fiable et continue pour les stations mobiles (STA), en partie en utilisant la fonctionnalité multi-liaisons (MLO) ajoutée au Wi-fi 7 et renforcée pour le Wi-fi 8.

Pour cela, les auteurs développent une architecture centralisée appelée WiTwin, qui repose sur l'utilisation de jumeaux numériques de l'environnement radio. Cette architecture permet aux stations de préparer leur ré-association de manière proactive, en utilisant un modèle prédictif de qualité de canal (WiTwinModel) construit à partir des mesures du réseau.

L'approche repose sur l'optimisation du moment de ré-association et sur la migration progressive des liaisons d'une station MLD (Multi-Link Device) vers un nouveau point d'accès, garantissant ainsi qu'au moins une liaison reste active à tout moment.

Les résultats montrent que cette approche augmente considérablement la continuité du service et réduit les interruptions critiques tout en maintenant une faible latence pour les applications sensibles au temps comme les communications entre les véhicules industriels (AMR, AGV) et l'automatisation programmable. L'inconvénient de cette stratégie est que l'architecture proposée ne gère pas les changements dynamiques dans la configuration du point d'accès (comme le changement de canal pendant son fonctionnement), ce qui peut limiter la flexibilité du système dans des environnements radio en forte évolution.

Afin de surmonter cette limite, une solution serait d'étendre l'architecture WiTwin avec un mécanisme de reconfiguration dynamique assistée, où certains points d'accès pourraient ajuster leurs canaux ou leurs ressources radio de manière coordonnée (par exemple, en périodes planifiées ou sur déclenchement contrôlé), sans interrompre la connectivité des appareils associés. Cela offrirait au réseau une meilleure résilience aux variations de charge et aux interférences, tout en respectant les exigences de continuité des communications industrielles.

II.3 Tableau comparatif

(Le tableau II.1 illustre une comparaison entre les articles étudiés de l'axe 2 selon la méthode utilisée).

Article	Modélisation analytique	Étude de co-existence de MAPC	Simulation	Gains Débit/Latence
[40]	✓	✓	✓	Débit +54(%) à +280(%), latence faible évoquée
[41]	✓	✓	✓	Débit +59(%) vs DCF, +42(%) vs OBSS/PD
[42]		✓	✓	Débit +80(%), latence non précisée
[43]		✓		

TABLE II.1 – Tableau comparatif des travaux de l'axe 2.

II.4 Conclusion

La coordination multi-AP et la réutilisation spatiale se présentent comme une approche prometteuse pour améliorer le débit, la fiabilité et la performance des réseaux Wi-Fi8. L'étude des travaux existants montre que des approches analytiques et adaptatives apportent des gains significatifs, tandis que les propositions autour du MAPC posent les bases conceptuelles de la coordination. Dans le chapitre suivant, nous présenterons notre propre méthodologie, qui vise à compléter ces efforts par une modélisation réaliste des coûts de coordination et le développement d'un prototype multi-AP dans un environnement Internet des objets.

CHAPITRE III

ÉVALUATION DE PERFORMANCE DU STANDARD 802.11BN

III.1 Introduction

l'évaluation permet à de nombreuses études d'examiner et d'analyser le comportement d'un système dans des environnements réels sous des contraintes potentielles. Aujourd'hui, elle est vraiment en phase avec les problèmes des réseaux sans fil. Elle joue un rôle important dans le processus de création de ce type des réseaux afin d'assurer leur déploiement et leur utilisation efficace dans l'environnement. L'objectif de ce chapitre est d'exposer les définitions et les principes fondamentaux nécessaires pour comprendre pourquoi et comment nous procédons à l'évaluation des performances tout en introduisant un modèle analytique de notre étude résolu avec MATLAB afin de pouvoir évaluer les performances du mécanisme C-SR.

III.2 Introduction à l'évaluation de performance

III.2.1 Rôle de l'évaluation de performance

L'évaluation des performance des réseaux sans fil est devenue une technique très utilisée dans notre quotidien. Il est nécessaire d'étudier comment un système se comporte au fil du temps avant qu'il sera déployé dans le but de comprendre, de régler les conflits potentiels qui affectent le système et de trouver les valeurs de paramètres qui améliorent les performances du système (on parle du dimensionnement d'un système) [46].

La méthode d'évaluation va au-delà de l'analyse théorique d'un nouveau système. Il est essentiel d'analyser le fonctionnement réel d'un système existant en déterminant dans quelle mesure il répond aux objectifs initiaux. Cette procédure permet d'identifier les inefficacités potentielles, de suggérer des améliorations pertinentes et d'anticiper les ajustements nécessaires pour s'adapter à l'évolution des besoins ou à une augmentation de la capacité du réseau. L'évaluation analytique ou expérimentale permet également de comparer différents mécanismes ou configurations.

Il s'agit donc d'une analyse comparative où de nombreux mécanismes sont soumis aux mêmes conditions expérimentales ou analytiques pour évaluer leurs comportements respectifs en fonction de critères de performances prédéterminés tels que le débit, la latence... [47].

III.2.2 Principe d'évaluation de performance

L'analyse des performances d'un système se fait en tenant compte des points suivants :

- **Identifier votre système :**

il s'agit de l'entité dont les performances sont évaluées. Dans notre étude nous nous concentrons sur le mécanisme MAPC basé sur la C-SR, intégrant la transmission dans un canal bruité. Un système est généralement

défini comme un ensemble de ressources partagées par plusieurs tâches ou entités concurrentes.

- **Identifier les facteurs** : quels sont les paramètres qui agissent sur le système (paramètres d'entrée) ?
- **Définir vos métriques** : quels sont les paramètres de performances que nous voulons analysé? temps moyen d'attente? débit? probabilité d'échec? probabilité de succès de transmission ?
- **Définir la charge du système** : notée ρ , représente la probabilité d'occupation du mécanisme de transmission. elle correspond au rapport entre le taux d'arrivée λ (paquets/seconde) et le taux de service μ (paquets/seconde). Le taux du trafic en entrée est généralement décrit par des lois probabilistes (Poisson, Exponentiel, ...), tandis que le taux de service est déduit grâce à la modélisation de comportement du serveur à étudier. Ainsi, Si $\rho = 1$, cela veut dire que le serveur est toujours occupé(actif) et par conséquent, la file de transmission n'est jamais vide.
- **Bien connaître le système étudié** : l'objectif est pour utiliser l'outil d'évaluation approprié et que nous maîtrisons bien.

III.2.3 Techniques d'évaluation de performance

Il existe trois techniques d'évaluation de performances de systèmes de communication : les modèles analytiques, les simulations et les mesures. Ces techniques peuvent être divisées en deux approches (voir la figure III.1) [48] : les techniques basées sur la mesure et les techniques basées sur la modélisation.

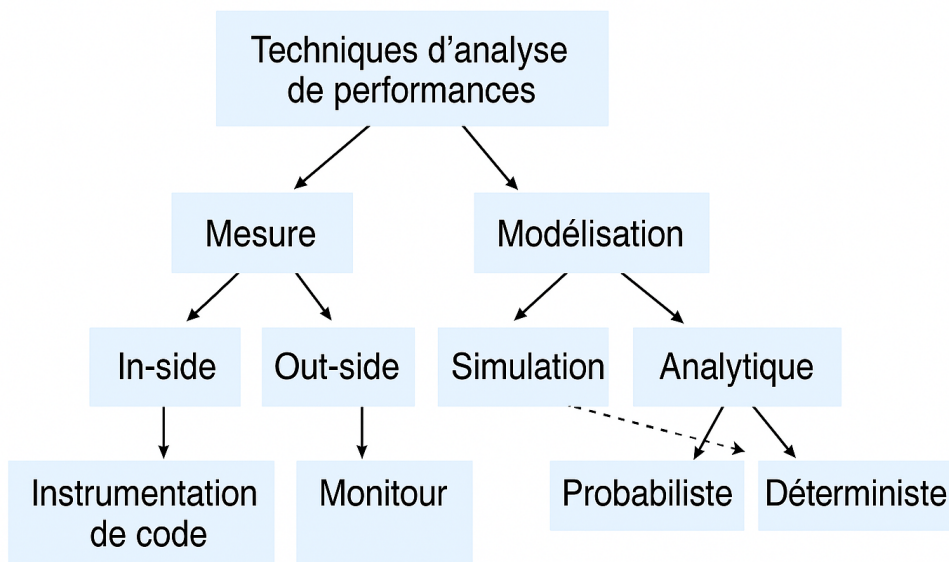


FIGURE III.1 – Classification des techniques d'analyse des systèmes

La première approche offre la possibilité de mesurer directement les critères

de performance sur un système concret afin de les quantifier. La deuxième approche, qui utilise des techniques de modélisation, permet de détailler le système pour l'évaluer afin de prédire ses performances. Les modèles issus de cette approche seront employés pour réaliser des simulations ou une étude analytique du système. Les différences entre ces deux méthodes résident dans le fait que les simulations utilisent des modèles conceptuels du système testé (une représentation conceptuelle du système), ce qui exige leur élaboration au sein d'un outil de simulation. Par contre, la seconde méthode (l'analyse analytique) utilise des modèles quantifiables (comme les chaînes de Markov, les fichiers d'attente, les réseaux de Pétri. . .) sous forme d'équations mathématiques [49].

III.2.3.1 Technique basée sur la mesure

L'approche de collecte directe de données vise à recueillir des informations liées aux performances en utilisant des réseaux existants ou des prototypes en cours. Sur l'instrumentation du système, ce qui peut être réalisé soit en incorporant des instructions de mesure directement dans le code source, soit en s'appuyant sur des ressources externes pour la collecte et la supervision des données. Cette approche est très précieuse, car elle offre une illustration fidèle et authentique du comportement du système dans des circonstances réelles, en considérant toutes ses caractéristiques distinctives.

Cependant, cette méthode comporte plusieurs désavantages notables. D'un côté, les configurations imprévisibles et variables du système restreignent la possibilité de généraliser les résultats obtenus à un moment précis en se basant sur différentes circonstances. En outre, les outils d'instrumentation ont tendance à perturber le système testé et à engendrer un coût supplémentaire sur ses performances effectives. Ce coût est attribué aux instructions supplémentaires que doit exécuter le code source lorsqu'on utilise la première méthode (instrumentation à l'intérieur du système), ou aux ressources qu'un moniteur externe consomme dans le cas de la seconde méthode [49].

III.2.3.2 Technique basée sur la modélisation

Il existe des outils appropriés pour effectuer l'évaluation de performance d'un système de communication, que ce soit à travers la simulation ou la modélisation analytique.

1. La simulation :

Il s'agit d'utiliser une simulation appropriée pour implémenter un modèle système simplifié. Elle présente l'avantage de traduire le comportement du système dans un environnement réel. C'est une technique largement utilisée pour évaluer la fonctionnalité des systèmes informatiques et des réseaux de communication.

Pour un non-expert, la simulation est plus reproductible que les modèles analytiques parce qu'elle ne nécessite pas de solides compétences en modélisation pour maintenir la capacité à gérer le système de manière analytique ou une connaissance approfondie du système pour l'évaluer [50].

Or, la souplesse offerte par la simulation est payante, car ces simulations sont fréquemment développées en utilisant des ressources passives (comme la mémoire vive) et du temps de développement pour proposer un modèle pour un simulateur plutôt qu'un modèle analytique. Contrairement aux techniques analytiques, les observations de la simulation sont toujours entourées d'incertitude. Les observations de simulation sont toujours entourées d'incertitude [51].

Cette incertitude provient du fait que les résultats de la simulation ne sont simplement qu'un échantillon d'un nombre infini d'observations possibles [50]. Il peut être difficile d'identifier les facteurs clés influençant les performances, les résultats de simulation peuvent ne pas fournir le même niveau de raisonnement intuitif sur les performances que la modélisation analytique [52].

Ainsi, la simulation ne doit être considérée qu'en dernier recours pour valider les résultats de la modélisation analytique.

2. La modélisation analytique :

Elle consiste à représenter le système par un modèle mathématique (système d'équations) et à l'analyser numériquement.

L'avantage de la modélisation analytique est qu'elle nécessite moins de développement informatique et offre un temps de calcul plus court. Toutefois, certaines des hypothèses sont toujours appliquées à ce modèle. Ceci explique pourquoi les résultats sont des approximations, ce qui pourrait entraîner des incertitudes importantes si les hypothèses n'ont pas été correctement validées. Malgré cela, nous pouvons avoir une idée générale sur le comportement du système que nous allons déployer [51].

Le principal avantage de cette méthode de modélisation est qu'elle est plus efficace, surtout dans le cas d'existence d'une solution analytique. Elle permet de découvrir et bien connaître un modèle que l'on contrôle parfaitement. Les auteurs estiment que l'existence de modèles de performance mathématiques pour ces réseaux est un facteur contribuant de manière significative à l'énorme succès obtenu par les réseaux de commutation de paquets [53]. Cette technique nécessite une bonne connaissance du système à étudier et de fortes compétences en modélisation afin de maintenir la capacité à traiter les modèles analytiquement.

Il existe de nombreux outils mathématiques permettant l'évaluation de performances : Les réseaux de Pétri, Réseaux de files d'attente, les chaînes de Markov, les automates.... etc.

De nombreux outils mathématiques permettent de réaliser de telles évaluations. En résumé, voici les approches les plus importantes :

- Approches probabilistes (chaîne de Markov, listes d'attente, etc.).
- Les réseaux de Pétri.

Maintenant, nous nous concentrons sur les approches probabilistes :

3. Chaînes de Markov :

Les chaînes de Markov constituent un cadre mathématique simplifié pour

évaluer un phénomène stochastique. Une chaîne de Markov est constituée d'un groupe d'états et d'un groupe de transitions qui se produisent entre ces états. Ces transitions sont marquées soit avec des probabilités, soit avec des matrices de transition (pour les chaînes de Markov à temps discret), soit avec des taux de transition (dans le contexte des chaînes de Markov à temps continu) [54].

les chaînes de Markov sont des outils dont les nombreux résultats théoriques permettent une analyse fine du comportement du système. Dans le domaine de la modélisation, elles sont l'un des outils les plus intéressants pour l'analyse des processus stochastiques.

III.3 Problématique et Proposition

Selon les études et les travaux récents, la technique de la C-SR est devenue un sujet très attractif afin de pouvoir atteindre l'ultra haute fiabilité qui est le but de cette nouvelle norme. C'est pour ce-là, nous avons focalisé sur Coordination Multipoint d'Accès et Réutilisation Spatiale.

III.3.1 Problématique

Les études récentes d'évaluation de performance du mécanisme de réutilisation spatiale coordonnée C-SR dans IEEE 802.11bn reposent sur des modèles simplifiés qui ne reflètent pas réellement le comportement de la C-SR. D'une part, l'absence de considérée explicite des frais de coordination (overhead), et d'autre part, la considération d'un canal idéal (sans erreur, sans bruit). Précisément, ils ont ignoré le taux de perte par paquet «PER» qui est influencé par le taux d'erreurs par bit et la taille de paquet de données.

III.3.2 Solution proposée

La solution proposée vise à analyser quantitativement la variation des performances de la norme IEEE 802.11bn, en utilisant le mécanisme du C-SR, sous l'impact des paramètres tels que le PER, le BER et la taille du paquet, tout en prenant en compte les coûts supplémentaires liés à la coordination (overhead). Pour réaliser notre but, nous optons une modélisation analytique simple et réaliste.

Ce modèle intègre ces coûts de coordination ainsi que les impacts du canal défectueux pour pouvoir évaluer le débit et le taux d'occupation.

III.3.3 Réutilisation spatiale coordonnée C-SR

III.3.3.1 Définition

La réutilisation spatiale coordonnée (C-SR) est une nouvelle technique avancée développée dans le cadre du Multi-AP Coordination (MAPC), introduite dans la norme IEEE 802.11bn. Elle vise à permettre à plusieurs points d'accès (AP) de transmettre simultanément sur la même ressource temporelle et fréquentielle, afin d'atteindre une ultra-haute fiabilité (débit, efficacité spectrale latence) et de minimiser les interférences mutuelles [40].

III.3.3.2 Procédure C-SR

Le mécanisme du C-SR suit cinq étapes enchaînées comme suit :

- **Accès au canal et acquisition du TXOP :** Les points d'accès candidats tentent d'accéder au canal en utilisant une méthode d'écoute préalable à la transmission (LBT). chaque point d'accès effectue une attente aléatoire (backoff). L'AP dont le backoff expire en premier obtient la TXOP et devient l'AP de partage. Sa tâche est de coordonner les diffusions simultanées durant cette période.

- **Collecte d'informations des APs partagés :**

Une fois désigné, l'AP de partage collecte les données des points d'accès voisins, y compris leurs capacités, leurs besoins en ressources et l'efficacité de leurs connexions avec les stations associées. Un groupe de points d'accès peut émettre simultanément sans altérer la qualité du signal des utilisateurs de l'AP de partage. Durant cette phase, il est crucial de trouver un équilibre entre réutilisation de l'espace et contrôle des interférences. Par conséquent, il détermine un groupe d'AP avec qui il peut émettre en même temps sans diminuer la qualité du signal de ses utilisateurs.

- **Définition du TXOP partagé :**

La configuration TXOP partagée est définie par l'AP de partage ainsi que les limites de puissance d'émission pour les points d'accès partagés et sélectionne ceux qui sont autorisés à participer à la transmission simultanée. Ces restrictions visent à garantir le succès des transmissions simultanées en maintenant le rapport signal sur interférence plus bruit (RSIN) des stations partageant au-dessus d'un seuil minimum, qui est souvent basé sur l'effet de capture (CE).

- **Déclenchement de la coordination :**

Le point d'accès de partage envoie une trame de déclenchement (trigger frame) aux points d'accès partagés choisis afin de synchroniser les transmissions. Cette trame contient les règles spécifiques de la transmission coordonnée, telles que la durée TXOP, les ressources fréquemment accordées (comme les blocs OFDMA), la puissance maximale autorisée pour chaque AP partagé et ses stations, et la liste des stations qui en bénéficieront. Cette signalisation est essentielle pour garantir la coordination et éviter les collisions.

- **Transmission coordonnée :**

Enfin, les données sont transmises simultanément entre le point d'accès de partage et les points d'accès partagés tout en respectant les contraintes établies. Chaque point utilise sa puissance maximale pour garantir la robustesse de la liaison principale, tandis que les points d'accès partagés ajustent leur puissance pour éviter que le signal principal ne soit perturbé au-delà du seuil spécifié. Chaque point d'accès partagé sélectionne les stations les plus performantes (STA) et ajuste le schéma de codage de modulation (MCS) afin d'optimiser le débit tout en garantissant la fiabilité de la transmission [40].

III.3.4 Notre Modèle Analytique

Dans ce qui suit, nous introduisons notre propre modèle modélisé avec les chaînes de Markov.

III.3.4.1 Hypothèses de modélisation

Notre modèle mathématique est basé sur les hypothèses suivantes :

- Deux BSS (APs et leurs stations) coopérant avec C-SR.
- Stations en saturation (Full buffer).
- L'effet de BER est considéré. En effet, la perte d'un paquet peut être due à une collision ou à une erreur sur le paquet.
- Le succès d'une transmission coordonnée dépend du SINR.

III.3.4.2 Notre chaîne de Markov

Nous introduisons un modèle d'analyse basé sur une chaîne semi-Markovienne à 5 états, où chaque état identifie une phase spécifique du processus de fonctionnement du mécanisme C-SR (Coordinated Spatial Reuse) défini par la norme IEEE 802.11bn. Contrairement aux chaînes de Markov traditionnelles à temps exponentiel, les durées de séjour dans chaque état sont ici déterministes, fixées, basées sur les temps réels des phases MAC (coordination, transmission, etc.). Ce modèle est régénérable, passant par un cycle complet qui démarre et se termine à l'état d'inactivité (état 0). Cela permet d'appliquer la théorie du renouvellement à la mesure d'indicateurs de performance tels que le débit et le taux d'occupation des canaux. (voir la figure III.2)

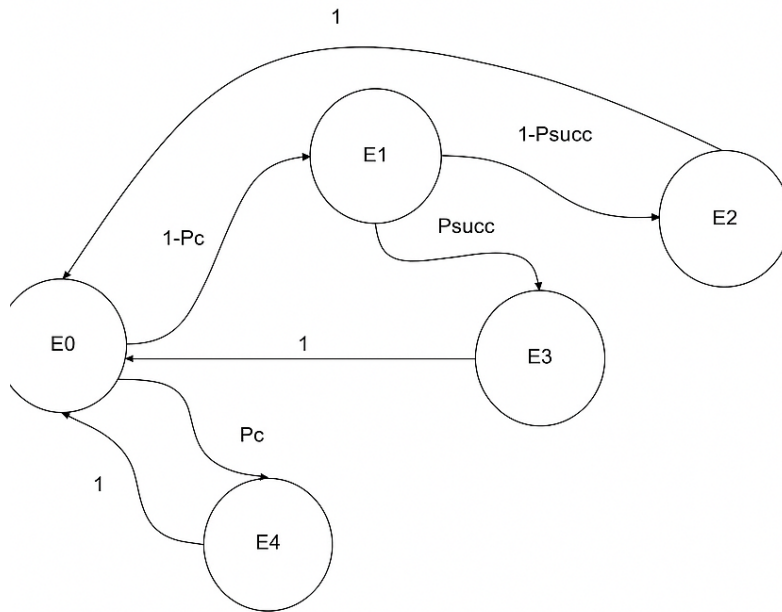


FIGURE III.2 – Notre chaîne de Markov.

- **Les états du modèle :**

- État **E0 (Idle)** : canal libre.
- État **E1 (Coordination)** : échange des trames de contrôle entre les APs.
- État **E2 (Unilatéral)** : une seule transmission est effectuée.
- État **E3 (Simultané)** : transmission simultanée (coordonnée) réussie.
- État **E4 (Échec)** : coordination échouée (collision ou bruit).

Le graphe d'état correspondant montre trois cycles possibles :

- idle → coordination → transmission simultanée → idle
- idle → coordination → transmission unilatérale → idle
- idle → échec de coordination → idle

- **Matrice de transition probabiliste P :**

La matrice donnée ci-dessous représente toutes les transitions de notre modèle

introduit :

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 - P_c & 0 & 0 & P_c \\ 0 & 0 & 1 - P_{succ} & P_{succ} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sum_{j=0}^4 P_{ij} = 1 \quad \text{pour tout } i \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$$

• **Probabilités du modèle :**

Les probabilités indispensables à la réalisation de de notre modèle sont :

- τ : probabilité qu'un AP, à saturation (full buffer) tente d'envoyer une trame dans un slot donné.

- P_c : probabilité d'échec d'entrée dans la coordination.

- P_{succ} : probabilité de succès d'une transmission coordonnée.

- $PE_{payload}$: probabilité qu'un paquet soit erroné.

- PE_{coord} : probabilité d'erreur lors de la coordination.

• **Formules de probabilités du modèle :**

Probabilité d'échec d'entrée dans la coordination

$$P_c = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \cdot (1 - PE_{coord}) \quad (III.2)$$

où n représente le nombre de stations (ou Ap).

probabilité de succès d'une transmission coordonnée.

$$P_{succ} = (1 - PE_{payload})^2$$

probabilité qu'un paquet soit erroné.

$$PE_{\text{payload}} = 1 - (1 - \text{BER})^L$$

BER est le taux d'erreur par bit qui se calcule comme suit :

$$\text{BER} = Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad \text{où} \quad Q(x) = \frac{1}{2} \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$$

- $Q(x)$: fonction Q, qui représente la probabilité que la variable aléatoire normale standard dépasse x .
- E_b : énergie par bit (en joules).
- N_0 : densité spectrale de bruit (en watts par hertz).

probabilité d'erreur lors de la coordination.

$$PE_{\text{coord}} = 1 - (1 - \text{BER})^{L_{\text{coord}}}$$

probabilité qu'un AP, à saturation (full buffer) tente d'envoyer une trame dans un slot donné.

$$\tau = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(\text{CW}_{\min} + 1) + p \cdot \text{CW}_{\min} \cdot (1 - (2p)^m)}$$

- **Définition des durées de séjour dans les états :**

- Tidl** : temps d'attente moyen (backoff).
- Tcoord** : durée de phase de coordination.
- Tuni** : durée d'une transmission unilatérale.
- Tsim** : durée d'une transmission simultanée réussie.
- Tfail** : temps perdu dus à l'échec de coordination.

- **probabilités stationnaires temporelles**

Dans notre chaîne, un cycle commence toujours à l'état idle (E0) et se termine lorsqu'on revient. Pour calculer la durée moyenne du cycle on applique la théorie du renouvellement (renewal theory) souvent utilisée dans les chaînes de Markov à temps continu à états déterministes.

Elle est calculé de cette manière :

$$\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}] = \sum_k P_k \cdot T_k$$

tel que :

- P_k : probabilité d'un chemin ou d'un événement k durant un cycle.
- T_k : durée moyenne associée à ce chemin.

Nous obtenons :

$$\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}] = P_c \cdot (T_{\text{idle}} + T_{\text{fail}}) + (1 - P_c) \cdot (1 - P_{\text{succ}}) \cdot (T_{\text{idle}} + T_{\text{coord}} + T_{\text{uni}}) + (1 - P_c) \cdot P_{\text{succ}} \cdot (T_{\text{idle}} + T_{\text{coord}} + T_{\text{sim}}) \quad (\text{III.8})$$

maintenant, après avoir calculé la durée du cycle moyenne, nous allons calculer les probabilités stationnaires temporelles basées sur le théorème du temps passé.

$$\pi_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n(i)}{n} = \frac{\text{Durée moyenne passée dans l'état } i}{\text{Durée moyenne totale du cycle}}$$

Où $S_n(i)$ est le temps cumulé passé dans l'état i après n transitions.

Application :

$$\pi_0 = \frac{T_{\text{idle}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]}$$

$$\pi_1 = \frac{(1 - P_c) \cdot T_{\text{coord}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]}$$

$$\pi_2 = \frac{(1 - P_c)(1 - P_{\text{succ}}) \cdot T_{\text{uni}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]}$$

$$\pi_3 = \frac{(1 - P_c)P_{\text{succ}} \cdot T_{\text{sim}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]}$$

$$\pi_4 = \frac{P_c \cdot T_{\text{fail}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]}$$

• **Calcul de métriques de performance :**

Calcul du débit effectif (throughput) : Le débit est calculé par la formule suivante :

$$\Gamma = \frac{R_{\text{cycle}}}{E[T_{\text{cycle}}]} \quad (\text{III.15})$$

- Γ : est le débit effectif (throughput)
- R_{cycle} : est la quantité moyenne de bits utiles transmis durant un cycle
- T_{cycle} : est la durée moyenne d'un cycle de transmission

Pour pouvoir calculer le débit, il faut tout d'abord calculer la quantité moyenne de bits utiles transmis durant un cycle donné. Il est calculé comme suit :

$$R_{\text{cycle}} = (1 - P_c)(1 - P_{\text{succ}}) \cdot L + (1 - P_c)P_{\text{succ}} \cdot 2L \quad (\text{III.16})$$

D'où L est la taille d'un paquet.

Calcul de l'Airtime utile :

$$\text{Airtimeutile} = \pi_2 + \pi_3 = \frac{(1 - P_c)(1 - P_{\text{succ}}) \cdot T_{\text{uni}} + (1 - P_c)P_{\text{succ}} \cdot T_{\text{sim}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]} \quad (\text{III.17})$$

où :

π_2 est le temps passé dans l'état unilatéral (activité utile).

π_3 est le temps passé dans l'état d'une transmission coordonné (activité utile).

Calcul de l'Airtime perdu :

$$\text{Airtimeperdu} = \pi_4 = \frac{P_c \cdot T_{\text{fail}}}{\mathbb{E}[T_{\text{cycle}}]} \quad (\text{III.18})$$

où :

π_4 est le temps gaspillé dans l'échec d'entrer dans la coordination (occupation du canal inutile).

III.4 Résolution numérique

Afin de valider notre modèle mathématique, nous avons choisi MATLAB comme un outil idéal pour le calcul.

III.4.1 Résolution du modèle avec Matlab

MATLAB est un langage de script scientifique conçu pour l'analyse et la modélisation des données. Il permet aux ingénieurs et aux chercheurs de résoudre des problèmes mathématiques tels que manipuler des matrices, effectuer des calculs numériques rapides, afficher des courbes et mettre en œuvre des algorithmes grâce à son interface conviviale et à ses nombreuses bibliothèques spécialisées.

III.4.2 Paramètres utilisés

Afin de calculer les métriques trouvées, nous avons considéré les paramètres suivants (voir le tableau III.1) :

paramètres	valeurs
AP	2
n_per_BSS	4
n	8
B	20e6 HZ
L	1000 bits
L_coord	160 bits
T_idle	10 μ s
T_coord	120 μ s
T_uni	200 μ s
T_sim	350 μ s
T_fail	200 μ s
p_signal	10 arbitraire
p_interf	1 arbitraire
T	290 K(kelvin)
K	1.38×10^{23} J/K
Nf	10 dB
CWmin	16 slots

TABLE III.1 – Paramètres utilisés.

III.4.2.1 Résultats et discussion

- **Objectif de la résolution numérique**

Cette résolution a pour objectif d'analyser le comportement du mécanisme C-SR dans un environnement presque réel (dense) en considération explicite du bruit, coordination et collisions, calculer les métriques de performances afin de pouvoir effectuer une comparaison entre le C-SR sous un canal imparfait et le DCF classique afin d'explorer l'impact du bruit sur la performance de la coordination entre plusieurs BSS pour valider le modèle proposé.

- **Résultats sur le débit effectif (Throughput)**

Les résultats montrent que le débit effectif du DCF classique dans un canal idéal est supérieur à celui de la 802.11bn C-SR dans un canal imparfait qui augmente à son tour, progressivement (voir la Figure III.3).

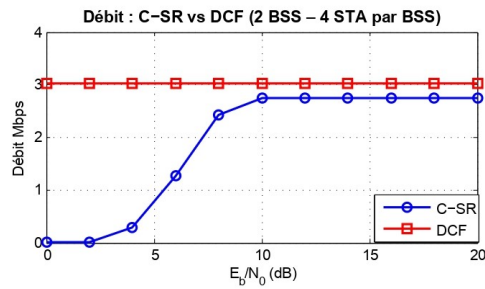


FIGURE III.3 – Le débit du DCF classique et du 802.11bn avec C-SR sous l'effet du bruit.

- **Résultats sur le temps utile d'occupation du canal (Airtime utile)**

Le temps d'occupation du canal pour une transmission utile appelé "Airtime utile" pour le mécanisme DCF est supérieur à celui avec la méthode de C-SR dans un canal à effet du bruit (voir la figure III.4).

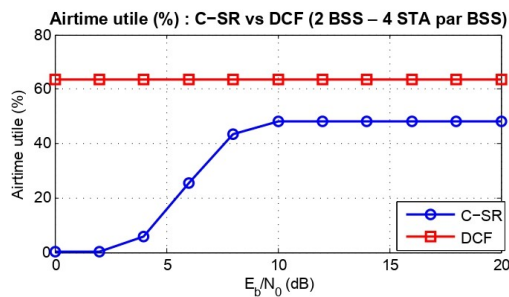


FIGURE III.4 – Airtime utile du DCF classique et du 802.11bn avec C-SR sous l'effet du bruit.

- **Résultats sur le temps inutile d'occupation du canal (Airtime perdu)**

Le temps d'occupation du canal pour une transmission inutile appelé "Airtime perdu" pour le mécanisme DCF est inférieur à celui avec la méthode de C-SR dans un canal non idéal (voir la figure III.5).

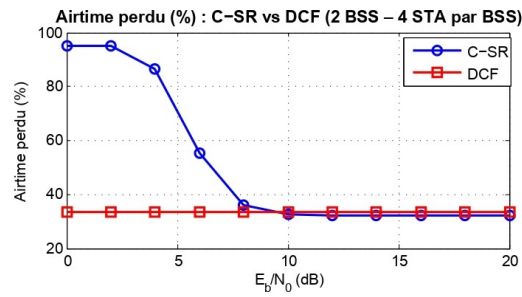


FIGURE III.5 – Airtime perdu du DCF classique et du 802.11bn avec C-SR sous l'effet du bruit.

III.5 Conclusion

Ce chapitre a examiné l'utilisation d'un programme de résolution numérique (MATLAB) pour évaluer les performances analytiques d'un modèle avec le mécanisme C-SR appliqué au Wi-Fi 8 sous l'hypothèse d'un canal bruité. L'objectif était de vérifier l'efficacité du modèle proposé en observant comment le système se comporte dans des scénarios complexes ou difficiles à modéliser.

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'études, nous avons étudié les performances de la norme IEEE 802.11bn dans un environnement dense et nous avons concentrés particulièrement sur l'impact du mécanisme de réutilisation spatiale coordonnée C-SR dans un contexte multi-BSS sous l'hypothèse d'un canal imparfait. Nous avons évalué quantitativement l'influence des paramètres liés au bruit (taux d'erreurs par bit BER, taux d'erreurs par paquet PER ainsi que la taille des paquets de données) sur la détérioration des performances (débit effectif, taux d'occupation utile et taux d'occupation inutile) avec l'intégration des surcoûts de coordination afin de déterminer le niveau d'amélioration, l'efficacité et la robustesse apportés par ce mécanisme pour atténuer cet effet de détérioration sur les performances.

Pour mener à bien notre étude, nous avons proposé notre propre modèle analytique basé sur les chaînes de Markov qui modélise et reflète le vrai comportement du mécanisme C-SR appliqué sur le wifi 8 sensible au bruit sur un canal de transmission influençant les performances de la norme étudiée.

Afin de valider ce modèle mathématique, nous avons porté notre choix sur l'outil de résolution numérique MATLAB pour pouvoir effectuer une comparaison approximative entre le mode DCF classique dans un canal idéal et la nouvelle technique de coordination C-SR dans un canal à effet bruit selon des hypothèses prédéfinies pour mesurer le débit ainsi que le taux d'occupation du canal. Cela, nous a permis d'observer et de confirmer le fonctionnement réel de ce protocole.

Les résultats obtenus ont montré une dégradation légère de performances pour la C-SR par rapport au mode classique, ce qui exprime le vrai impact du bruit sur l'efficacité et le fonctionnement du protocole considéré lorsque le BER et la taille du paquet de données augmentent.

En conclusion, ce mémoire a résumé une étude réaliste d'une méthode récemment existante dans le cadre de mise en lumière l'impact de l'environnement réel sur un protocole de communication, qui reste un sujet primordial à fixer dans les prochains travaux de recherches.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. BENMAMMAR, « Les interfaces intelligentes et les communications mobiles, » in sept. 2008.
- [2] *Wi-Fi : réseaux sans fil 802.11.*
- [4] A. GONDRAN, « Modélisation et optimisation de la planification des réseaux locaux sans fil, » thèse de doct., Université de Technologie de Belfort-Montbéliard ; Université de Franche-Comté, 2008.
- [5] A. GÉRON, *WiFi Professionnel-3e édition- : La norme 802.11, le déploiement, la sécurité.* Dunod, 2009.
- [9] X. LIU, T. CHEN, Y. DONG et al., *Wi-Fi8 : Embracing the Millimeter-Wave Era*, 2023.
- [10] M. MOKTEFI, L. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE, M. YAZID et S. TOULOUM, « The Fair OFDMA-FD MAC for 802.11 be and 802.11 ax, » in *African Conference on Research in Computer Science and Applied Mathematics*, Springer, 2024, p. 306-315.
- [11] M. MOKTEFI, L. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE et M. YAZID, « Proposition d'un nouveau protocole MAC full-duplex pour la norme 802.11ax, » *Séminaire Mathématique de Béjaïa*, t. 16, n° 1, p. 105-105, 2018.
- [12] M. ALABI, « The Evolution of Wi-Fi Standards : From Wi-Fi 6 to Wi-Fi 7, » déc. 2023.
- [13] S. TRIVEDI, *Wi-Fi 6 OFDMA : Resource Unit (RU) allocations and mappings*, Cisco Blogs : Networking, mai 2020.
- [14] U. SURENDRANATHAN, « Wi-Fi 6 : performance analysis of IEEE 802.11 AX, » 2019.
- [15] CISCO SYSTEMS, INC., « Wi-Fi 6 : The Next Generation of Wireless, » Cisco Meraki, rapp. tech., 2019, Livre blanc explorant les bénéfices et capacités du Wi-Fi 6 basé sur la norme IEEE 802.11ax.
- [16] V. JEVREMOVIC, « Évolution du réseau dans les bâtiments : de la connectivité aux services intelligents, » *Revue des Infrastructures Numériques*, t. 15, n° 3, p. 45-52, 2021.

- [17] A. KANNEMEYER, « WiFi6 enhancements explained : TWT and 1024-QAM, » *ITWeb*, mai 2020.
- [18] V. BAUER, J. ANDRÉ et L. SEIDLITZ, « Un aperçu de la norme 802.11ax, » *Revue des technologies sans fil*, t. 10, n° 2, p. 123-130, 2020.
- [20] E. KHOROV, I. LEVITSKY et I. F. AKYILDIZ, « Current status and directions of IEEE 802.11 be, the future Wi-Fi 7, » *IEEE access*, t. 8, p. 88 664-88 688, 2020.
- [21] H. OTANI, K. NAGANO, H. ABEYSEKERA, A. KISHIDA, Y. ASAI et Y. TAKATORI, « Experimental evaluation of transmission link selection in IEEE 802.11 be multi-link operation, » *IEICE Communications Express*, t. 12, n° 9, p. 528-532, 2023.
- [22] T. JIN, J. GUO, L. LIN, Y. WANG et Y. CHEN, « Analyse des performances du protocole MAC multilien synchrone avec demande de répétition automatique, » *Mobile Information Systems*, t. 2022, n° 1, p. 4 049 008, 2022.
- [23] L. GALATI-GIORDANO, G. GERACI, M. CARRASCOSA et B. BELLALTA, « What will Wi-Fi 8 be? A primer on IEEE 802.11 bn ultra high reliability, » *IEEE Communications Magazine*, t. 62, n° 8, p. 126-132, 2024.
- [25] INFOTECHPLUS, *Topo_W-Introduction et explications*, Cours en ligne.
- [26] E. GUÉRIN, « Économie d'énergie sur la couche MAC pour les appareils Wi-Fi, » thèse de doct., Université Claude Bernard-Lyon I, 2024.
- [27] LAFAYE, P. G. LE FÀYE, *Les modes de fonctionnement du Wi-Fi (802.11)*, Page web, School of Mathematics and Statistics, UNSW.
- [29] A. KOUT, « Contributions à la résolution du problème de routage dans les réseaux mobiles Ad-hoc par les méthodes bio-inspirées, » thèse de doct., 2017.
- [31] J. LEE, Y. YI, S. CHONG, B. NARDELLI, E. W. KNIGHTLY et M. CHIANG, « Making 802.11 DCF Optimal : Design, Implementation, and Evaluation, » 2012.
- [34] N. HOCINE, *Chapitre 8 : Réseaux sans fil IEEE 802.11*, Support de cours, Université Batna 2.
- [35] B. MAWLAWI, J.-B. DOR, N. LEBEDEV et J.-M. GORCE, « Modélisation Analytique du protocole Multi-Bande CSMA/CA, »
- [37] M. TERRÉ, « Wi-Fi Le Standard 802.11, » URL : <http://easytp.cnam.fr/terre/images/WiFi.pdf> (visité le 16/05/2016),
- [38] D. WEI, L. CAO, L. ZHANG, X. GAO et H. YIN, « Optimized non-primary channel access design in ieee 802.11 bn, » *arXiv preprint arXiv :2405.00227*, 2024.
- [39] R. SANCHEZ-VITAL, A. BELOGAEV, C. GOMEZ, J. FAMAHEY et E. GARCIA-VILLEGAS, « A primer on AP power save in Wi-Fi 8 : overview, analysis, and open challenges, » *IEEE Wireless Communications*, 2025.

- [40] F. WILHELMI, L. GALATI-GIORDANO, G. GERACI, B. BELLALTA, G. FONTANESI et D. NUÑEZ, « Throughput analysis of IEEE 802.11 bn coordinated spatial reuse, » in *2023 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, IEEE, 2023, p. 401-407.
- [41] D. NUNEZ, F. WILHELMI, L. GALATI-GIORDANO, G. GERACI et B. BELLALTA, « Spatial Reuse in IEEE 802.11 bn Coordinated Multi-AP WLANs : A Throughput Analysis, » in *2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, IEEE, 2024, p. 265-270.
- [42] M. WOJNAR, W. CIEZOBKA, K. KOSEK-SZOTT et al., « IEEE 802.11 bn Multi-AP Coordinated Spatial Reuse with Hierarchical Multi-Armed Bandits, » *IEEE Communications Letters*, 2024.
- [43] M. SMITH et B. HART, « TECHNIQUES TO FACILITATE MULTI-ACCESS POINT COORDINATION (MAPC) IN A WIRELESS LOCAL AREA NETWORK (WLAN) ENVIRONMENT, » 2024.
- [44] X. LIU, T. CHEN, Y. DONG et al., « Wi-Fi 8 : Embracing the Millimeter-Wave Era, » *IEEE Communications Magazine*, 2024.
- [45] S. SCANZIO, M. ROSANI, G. FORMIS et al., « Multi-Link Operation and Wireless Digital Twin to Support Enhanced Roaming in Next-Gen Wi-Fi, » in *2024 IEEE 20th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, IEEE, 2024, p. 1-4.
- [46] M. S. OBAIDAT et N. A. BOUDRIGA, *Fundamentals of performance evaluation of computer and telecommunication systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [47] A. KOUBAA, « Introduction à l'évaluation de performance des systèmes informatiques et de communication, » *Rapport de recherche, University of Minnesota, www.amazon.com/Performance Evaluation of Computer and Communication Systems/3540*, 2004.
- [48] L. BOUALLOUCHE, *Formalismes Mathématiques des Systèmes*, Support de cours, Master 1, option RN-RS, Département Informatique, Université de Béjaïa.
- [49] A. LAHMADI, L. ANDREY et O. FESTOR, « Évaluation de performance des architectures de gestion de réseaux : état de l'art et perspectives, » thèse de doct., INRIA, 2005.
- [50] J. I. DIÉGUEZ, « Contributions à la modélisation et à la simulation accélérée de réseaux de communication, » thèse de doct., Rennes 1, 2001.
- [51] UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA, *Support de cours INFO 2021–2022*, https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/38268/mod_resource/content/1/coursINF02122.PDF, 2022.
- [52] M. GUIZANI, A. RAYES, B. KHAN et A. AL-FUQAHA, *Network modeling and simulation : a practical perspective*. John Wiley & Sons, 2010.
- [53] M. CROVELLA, C. LINDEMANN et M. REISER, « Internet performance modeling : the state of the art at the turn of the century, » *Performance Evaluation*, t. 42, n° 2-3, p. 91-108, 2000.

- [54] G. BOLCH, S. GREINER, H. de MEER et K. S. TRIVEDI, *Queueing Networks and Markov Chains : Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*, 2^e éd. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2006, ISBN : 978-0-471-20814-9.

WEBOGRAPHIE

- [3] WIKIPÉDIA. « Wireless Personal Area Network — Wikipédia. » (2024), adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Wireless_Personal_Area_Network.
- [6] J.-Y. LAFAYE. « Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN). » (2020), adresse : <https://web.maths.unsw.edu.au/~lafaye/CCM/wireless/wman.htm> (visité le 22/06/2025).
- [7] EBDS. « Tout savoir sur la technologie WiFi (fréquences 24/5GHz). » (2025), adresse : <https://www.ebds.eu/ressources/contenus-techniques/explication-technologie-wifi-frequences-2-4ghz-5ghz>.
- [8] J.-Y. LAFAYE. « Introduction to Wireless Local Area Networks (WLAN / Wi-Fi). » (2020), adresse : <https://web.maths.unsw.edu.au/~lafaye/CCM/wifi/wifiintro.htm>.
- [19] DIGI INTERNATIONAL. « Qu'est-ce que le Wi-Fi7 (802.11be) ? » (2025), adresse : <https://fr.digi.com/resources/definitions/wi-fi-7>.
- [24] C. GOLBERG. « Le Wi-Fi8 arrive : débits, latence, nouveautés, tout ce qu'on sait sur le successeur du Wi-Fi7. » (2024), adresse : <https://www.clubic.com/dossier-532506-wi-fi-8-debits-latence-nouveautes-tout-ce-qu-on-sait-sur-le-successeur-du-wi-fi-7.html>.
- [28] BROTHER. « FAQ – Parameters d'impression via Wi-Fi – Modèle NC-7100W. » (2025), adresse : https://support.brother.com/g/b/faqend.aspx?prod=nc7100w_all&c=ca&lang=fr&faqid=faq00000447_000 (visité le 22/06/2025).
- [30] TECHNO-SCIENCE.NET. « Définition de «Wi-Fi8». » (2025), adresse : <https://www.techno-science.net/definition/11403.html>.
- [32] WRAY CASTLE. « Point Coordination Function. » (2025), adresse : <https://wraycastle.com/fr/blogs/glossaire-des-termes-de-la-technologie-des-telecommunications/point-coordination-function>.

- [33] IONOS DIGITAL GUIDE. « CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance. » (2022), adresse : <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/know-how/csmaca-carrier-sense-multiple-access-with-collision-avoidance/#c136098>.
- [36] S. DROUIN. « 802.11 – Aperçu du standard Wi-Fi. » (2001), adresse : <http://vision.gel.ulaval.ca/~sdrouin/gpss/s80211.html> (visité le 22/06/2025).

Résumé

DEPUIS l'apparition du standard IEEE 802.11, le Wi-fi a connu une évolution progressive au fil des années. Aujourd'hui, la norme 802.11be (wi-fi 7) est fréquemment utilisée grâce au débit allant jusqu'à 40 Gbps. Le groupe fondateur de l'IEEE 802.11 a introduit récemment une nouvelle norme appelée 802.11bn (wi-fi 8) qui sera prochainement déployée dans l'IOT visant à atteindre une ultra-haute fiabilité (UHR). Il est crucial d'évaluer les performances de ce wi-fi avant qu'il soit mis en œuvre. Parmi les nouvelles méthodes apportées par cette norme, nous citons la coordination multipoints d'accès (MAPC), qui permet à plusieurs points d'accès de collaborer en utilisant une technique nommée réutilisation spatiale coordonnée (C-SR) permettant d'orchestrer les transmissions simultanées. La plupart des travaux existants sur le Wi-fi 8 supposent des canaux parfaits, contrairement aux environnements denses, car ils subissent de nombreux phénomènes comme le bruit. Dans ce mémoire, nous évaluons la dégradation des performances du protocole 802.11bn utilisant le mécanisme C-SR, en tenant compte du bruit et des frais de coordination. Pour cela, nous optons pour un modèle analytique qui décrit toutes les phases de la coordination à l'aide d'une chaîne de Markov. De plus, nous analysons les performances (débit, temps d'occupation du canal) à l'aide de l'outil de calcul idéal Matlab afin de pouvoir visualiser les résultats.

Mots clés : 802.11bn, C-SR, MAPC, chaîne de Markov, MATLAB, IOT.

Abstract

SINCE the introduction of the IEEE 802.11 standard, Wi-Fi has undergone a gradual evolution over the years. Today, the 802.11be standard (Wi-Fi 7) is frequently used thanks to its speed of up to 40 Gbps. The founding group of IEEE 802.11 has recently introduced a new standard called 802.11bn (Wi-Fi 8) which will soon be deployed in IoT aiming to achieve ultra-high reliability (UHR). It is crucial to evaluate the performance of this Wi-Fi before it is implemented. Among the new methods introduced by this standard, we mention multipoint access coordination (MAPC), which allows multiple access points to collaborate using a technique called coordinated spatial reuse (C-SR) to orchestrate simultaneous transmissions. Most existing work on Wi-Fi 8 assumes perfect channels, unlike dense environments, as they are subject to numerous phenomena such as noise. In this thesis, we evaluate the performance degradation of the 802.11bn protocol using the C-SR mechanism, taking into account noise and coordination overhead. For this, we opt for an analytical model that describes all phases of coordination using a Markov chain. Moreover, we analyze the performance (throughput, channel occupancy time) using an ideal computational tool "MATLAB" in order to visualize the results.

Keywords : 802.11bn, C-SR, MAPC, Markov chain, MATLAB, IOT.