



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Informatique
Spécialité : Administration et sécurité des réseaux Informatique

Présenté par : M^{lle} FENNOUCH Kahina

Thème

**Adaptation des communications OFDMA
pour les applications temps réel**

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2024 , devant le jury composé de :

M. MOKTEFI Mohand	MCB	U. A/MIRA Bejaia	Président
M. YAZID Mohand	Professeur	U. A/MIRA Bejaia	Encadrant
M ^{lle} . BRAHMI Saloua	Docteur	U. A/MIRA Bejaia	Co- Encadrante
M ^{lle} . MAMMERI Souhila	MCB	U. A/MIRA Bejaia	Examinatrice

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je consacre ce travail en témoignage de mon respect, ma gratitude et mes sincères remerciements à :

Mes parents

Mes deux frères Amer et A/Latif.

Mon ami Fares.

Remerciements

Au nom du Dieu le clément et le miséricordieux, Gloire à Dieu Tout- Puissant.

Je suis reconnaissante envers Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la santé et la détermination nécessaires pour entreprendre et achever ce mémoire.

Mes remerciements vont en particulier à mes chers parents pour leur soutien, leur encouragement et leur patience.

J'adresse également ma gratitude à mes deux frères qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers M. Mohand YAZID et M^{lle}. Saloua BRAHMI pour leur précieuse aide et leur encadrement attentif qui ont grandement contribué à la richesse et à la réalisation de ce travail. Leurs judicieux conseils ont nourri ma réflexion et leur rigueur ainsi que leur disponibilité ont été d'une grande valeur tout au long de la préparation de ce mémoire. Je les remercie chaleureusement pour leur engagement et leur soutien constant.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à M. MOKTEFI Mohand pour avoir présidé le jury de soutenance. Je lui suis profondément reconnaissante pour le temps qu'il a dédié à la lecture et à la révision de ce travail.

Je suis pleinement conscient de l'honneur que me fait M^{lle} MAMMERY Souhila en acceptant de faire partie du jury. Je la remercie sincèrement pour le temps qu'elle a consacré à lecture et à la correction de ce travail.

Résumé

Dans ce mémoire de fin d'étude consacré à la norme IEEE 802.11be et à son application de Multi-Link Operation (MLO) pour les réseaux locaux sans fil (WLAN), l'accent a été mis sur l'amélioration des performances en termes de débit et de latence, cruciaux pour les applications comme la réalité augmentée (AR). Les simulations ont démontré que MLO permet une gestion plus efficace des ressources radio en distribuant intelligemment les flux de données sur plusieurs liaisons, comparé aux configurations traditionnelles en mode Single Link (SL). Cette optimisation réduit considérablement les retards, essentiels pour maintenir une expérience utilisateur fluide et fiable. En conclusion, l'intégration de MLO dans la future norme promet de transformer les capacités des réseaux WLAN, offrant ainsi des performances accrues et une meilleure adaptabilité aux applications temps réel dans des environnements réseau de plus en plus.

Mots clés : WLAN, IoT, RTA, IEEE 802.11be, EHT, MLO, Politiques d'allocation de trafic, Analyse de performances.

Abstract

In this thesis focused on the IEEE 802.11be standard and its application of Multi-Link Operation (MLO) for Wireless Local Area Networks (WLANs), emphasis has been placed on improving performance in terms of throughput and latency, crucial for applications such as Augmented Reality (AR). Simulations have demonstrated that MLO enables more efficient management of radio resources by intelligently distributing data streams across multiple links, compared to traditional Single Link (SL) configurations. This optimization significantly reduces delays, essential for maintaining a smooth and reliable user experience. In conclusion, integrating MLO into future standards promises to transform WLAN capabilities, offering enhanced performance and better adaptability to real-time applications in increasingly complex network environments.

Key words : WLAN, IoT, RTA, IEEE 802.11be, EHT, MLO, Traffic allocation policies, Performance analysis.

Table des matières

Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	v
Introduction générale	1
1 Evolution des réseaux WLAN IEEE 802.11	3
1.1 Introduction	3
1.2 Classification des réseaux sans fil	3
1.3 Les réseaux WLANs	4
1.3.1 Présentation du standard IEEE 802.11	4
1.3.2 La couche Physique	6
1.3.3 La couche MAC	9
1.4 IoT et applications temps réel	13
1.4.1 Définition de l'IoT	13
1.4.2 Evolution de l'IoT	14
1.5 Architecture de l'IoT	15
1.5.1 L'architecture à trois couches	15
1.5.2 L'architecture à cinq couches	15
1.5.3 Composants clés	16
1.6 Applications temps réel dans l'IoT	18
1.6.1 Définition	18
1.7 conclusion	20
2 La norme IEEE 802.11be	21
2.1 Introduction	21
2.2 Présentation du standard IEEE 802.11ax	21
2.3 OFDMA	22
2.4 Présentation du standard IEEE 802.11be	23
2.4.1 Caractéristiques candidates IEEE 802.11be	24
2.4.2 Différence entre la norme IEEE 802.11ax et la norme IEEE 802.11be	27

2.5	Fonctionnement Multi-Liens	28
2.5.1	Architecture	28
2.5.2	Fonctionnement Multi-Liens pour RTA	29
2.5.3	Accès aux canaux Multi-Liens	30
2.6	Synthèse sur les travaux MLO	32
2.7	Problèmes rencontrés en MLO	34
2.8	Conclusion	35
3	Simulation et Interprétation des résultats	36
3.1	Introduction	36
3.2	Opération Multi-Liens	36
3.3	Politiques d'allocation du trafic aux liens	37
3.4	Simulation	38
3.5	Résultats et analyses	41
3.5.1	Logiciel utilisé	41
3.5.2	Paramètres PHY et MAC utilisés	41
3.5.3	Résultats et discussion	42
3.6	Conclusion	45
	Conclusion et perspectives	48

Table des figures

1.1	Classification des réseaux sans fil.	4
1.2	Architecture en couche du standard IEEE 802.11.	5
1.3	Mode Ad hoc et mode infrastructure.	6
1.4	Canaux utilisés dans 5 GHz.	7
1.5	Canaux utilisés dans 5 GHz.	7
1.6	Topologie présentant deux terminaux mutuellement cachés.	10
1.7	Mécanisme d'échange de messages RTS/ CTS.	11
1.8	Paramètres d'espacement de trames dans IEEE 802.11.	12
1.9	Exemple de procédure de tirage de Backoff.	13
1.10	Internet des objets.	14
1.11	statistiques du nombre d'appareils connectés à l'IoT.	14
1.12	L'architecture à trois couches.	15
1.13	L'architecture à cinq couches.	16
1.14	Composants clés d'un système IoT.	18
1.15	IoT et applications temps réel.	20
2.1	Principales caractéristiques du WiFi6-802.11ax	22
2.2	Attributions de sous-porteuses avec OFDM et OFDMA	23
2.3	Principales caractéristiques du WiFi7-802.11be	24
2.4	Différence 1024/ 4096 QAM par symbole	25
2.5	Canal de transmission de 320MHz	26
2.6	Architecture multi-lien.	29
2.7	Le mode duplication et le mode joint.	30
2.8	Les opérations SLO, MLO-STR et MLO-NSTR.	31
2.9	Opération multi-lien asynchrone vs. synchrone.	32
2.10	Le fonctionnement du Wi-Fi 7 MLO et du ConMLO proposé. []	34
3.1	Le déploiement de l'AP et des STAs dans le scénario à cellule unique.	39
3.2	Tracé CCDF du retard du flux vidéo DL lors d'une simulation avec 6 STAT, avec SL et politiques MLO.	40
3.3	Tracés CCDF des valeurs de retard pour chaque flux de données lors d'une simulation avec 6 STAs, avec SL et politiques MLO [20].	40
3.4	Pires valeurs de retard au 99e percentile pour chaque flux de données avec différentes politiques tracées en fonction du nombre de STAs [20].	43
3.5	Les pires valeurs de retard au 99e percentile pour le flux DL lors de la simulation avec 6 STAs, utilisant SL et différentes politiques MLO [20].	43

3.6 Le nombre maximum de STAs pouvant être pris en charge par chaque politique et configuration de lien [20]. 44

Liste des tableaux

2.1	Comparaison entre les normes IEEE 802.11ax et IEEE 802.11be	27
3.1	Paramètres du système [20].	39
3.2	Paramètres du flux vidéo DL/UL [20].	41
3.3	Paramètres de flux de pose/contrôle UL [20].	42

Liste des abréviations

Acronyme	Signification
ACK	Acknowledgement.
AMPDU	Aggregated MAC Protocol Data Unit.
AP	Access Point.
AR	Augmented Reality.
BA	Block ACK.
BEB	Binary Exponential Backoff.
BPSK	Binary Phase Shift Keying.
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function.
Con-MLO	Continuous-MLO.
CRC	Cyclic Redundancy Check.
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.
CW	Contention Window.
DBPSK	Differential PSK
DCF	Distributed Coordination Function.
DIFS	Distributed Inter-Frame Space.
DL	Downlink.
DPSK	Differential Phase Shift Keying.
DQPSK	Differential QPSK
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum.
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access.
EHT	Extremely High Throughput.
EIFS	Extended Inter-Frame Space.
EMLMR	Enhanced Multi-Link Single Radio.
EMLSR	Enhanced Multi-Link Single Radio.
EHT	Extremely High Throughput.
FCS	Frame Check Sequence.
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum.
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying.
GPS	Global Positioning System.
HE	High-Efficiency.
IBSG	Internet Business Solutions Group.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IFS	Inter-Frame Spacing.

IoT	Internet of Things.
IR	Infra-Red.
ISM	Industrial, Scientific, and Medical.
KPI	Key Performance Indicator.
LAN	Local Area Network.
LLC	Logical Link Control.
LMAC	Lower Medium Access Control.
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network.
LPWAN	.
LTE	Long-Term Evolution.
MAC	Medium Access Control.
MAN	Metropolitan Area Network.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
ML	Multi-Link.
MLD	ML Device.
MLMR	Multi-Link Multi-radio.
MLO	ML Operation.
MLSR	Multi-Link Single Radio.
MPDU	MAC Protocol Data Unit.
MSDU	.
MU-MIMO	Multi-User MIMO.
MU-OFDMA	Multi-User OFDMA.
NAV	Network Allocation Vector.
NB-IoT	Narrowband IoT.
NFC	Near Field Communication.
NSTR	Non-STR.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access .
OSI	Open Systems Interconnection.
PAN	Wireless Personal Area Networks
PCF	Point Coordination Function.
PHY	Physique.
PIFS	PCF Inter-Frame Space.
PSK	Phase Shift Keying.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation.
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying.
RF	Radio Frequency.
RFID	Radio-Frequency Identification.
RTA	Real-Time Application.
RTS/CTS	Request-to-Send/ Clear-to-Send.
RU	Resource Unit.
SAP	Simultaneous Access Policies.
SE	Spectral Efficiency.
SIFS	Short Interframe Space.
SLD	Single-Link Device.
SLO	Single-Link Operation.
SS	Spatial Streams.
STA	Station.

STR	Simultaneous Transmit and Receive.
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol.
TF	Trigger Frame.
TGbe	Task Group be.
TIG	Topic Interest Group.
TWT	Target Wake Time.
TXOP	Transmission Opportunity.
UL	Uplink.
UMAC	Upper MAC.
Wi-Fi	Wireless-Fidelity.
WAN	Wide Area Network;

Introduction générale

L'avènement des applications interactives en haute définition et des dispositifs technologiquement avancés promet une croissance exponentielle de l'utilisation d'Internet dans un avenir proche. Cette tendance est accompagnée d'une augmentation significative du nombre d'appareils connectés aux réseaux sans fil. Pour répondre efficacement aux besoins des utilisateurs dans des environnements densément peuplés, une gestion réseau optimale est cruciale pour garantir des débits élevés et une performance fiable. Face à ces défis, le standard IEEE 802.11be, connu également sous le nom de Wi-Fi 7, se profile comme la prochaine avancée majeure. Introduite en 2024, pour améliorer les capacités des réseaux WLAN, cette norme est spécifiquement conçue pour supporter des applications exigeantes telles que la réalité augmentée (AR), en offrant des performances optimisées et une efficacité accrue dans les environnements à haute densité d'utilisateurs.

Depuis son introduction, le WiFi a évolué à travers six générations de standards 802.11 : 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac et 802.11ax. Chaque génération a apporté des améliorations significatives en termes de débit par rapport à la précédente.

Atteignant la norme 802.11ax, qui permet une utilisation efficace des technologies existantes sur les bandes de transmission 2,4 GHz, 5 GHz et 6GHz. Elle offre des vitesses accrues et des fonctionnalités améliorées adaptées aux applications émergentes et de nouvelle génération. Un des objectifs clés de cette norme est l'implémentation de l'OFDMA, qui permet un accès simultané au canal de transmission par différents utilisateurs sur différentes unités de ressources. Ce WiFi peut atteindre des débits dépassant les 9,6 Gbit/s.

La norme IEEE 802.11be, en cours de normalisation (2024). Quant à cette norme, elle permet de répondre aux exigences croissantes des applications modernes telles que les applications temps réel, elle vise à améliorer l'efficacité du réseau, le débit et la fiabilité. Cette modification intègre des fonctionnalités avancées conçues pour optimiser l'efficacité spectrale et réduire la latence, améliorant ainsi l'expérience globale de l'utilisateur. En exploitant des innovations comme l'Opération Multi-Lien (MLO), IEEE 802.11be permet aux appareils de transmettre simultanément des données sur plusieurs interfaces radio, augmentant efficacement la capacité du réseau et prenant en charge une gamme diversifiée d'applications haute performance.

En fait, la problématique du MLO dans ce contexte réside dans l'optimisation de l'allocation des ressources radio pour répondre aux exigences élevées des applications comme la réalité augmentée (RA). Comment équilibrer efficacement la répartition du trafic entre les différents liens disponibles tout en minimisant la latence et en maximisant la capacité du réseau.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre abordera le standard IEEE 802.11, en examinant ses différentes couches ainsi que son évolution en termes de débit.
- Le deuxième chapitre se concentrera sur les principales technologies intégrées dans la nouvelle norme IEEE 802.11be, avec une revue des travaux de recherches fondés sur la technologie MLO. Il posera également une problématique concernant l'utilisation des sous-porteuses du canal radio dans OFDMA.
- Une méthode de calcul des retards CCDF pour les flux vidéo DL lors d'une simulation, comparé avec SL et différentes politiques MLO est implémentée dans le dernier chapitre pour améliorer le débit tout en réduisant la latence, suivi par une partie simulation de la proposition et analyse de résultats.

Ce mémoire se conclura par une conclusion et des perspectives de recherche résultant de notre travail.

ÉVOLUTION DES RÉSEAUX WLAN IEEE 802.11

1.1 Introduction

Les réseaux locaux informatiques subissent une transformation majeure, caractérisée par la généralisation de l'accès à Internet et la prolifération des appareils mobiles. Cette progression, stimulée par la demande croissante de mobilité et de flexibilité, a engendré l'émergence des réseaux locaux sans fil (WLAN) et des réseaux Wireless Fidelity (WIFI), offrant une alternative sans encombre de câblage pour l'accès à Internet et aux ressources réseau.

Ce chapitre vise à offrir une bonne perspective technique du standard IEEE 802.11 en examinant son origine, ses principes de fonctionnement dans ses différentes couches et ses évolutions au fil du temps. Bien sûr qu'une compréhension approfondie de ce standard est cruciale pour appréhender les subtilités de la connectivité sans fil et pour déployer des réseaux performants et fiables.

De présenter ensuite, les applications en temps réel et l'internet des objets. Et enfin, une conclusion.

1.2 Classification des réseaux sans fil

Les avancées récentes dans les technologies sans fil fréquemment utilisées comme « la 4G », « la 5G », « WIFI », « Bluetooth », et d'autres ont été remarquables ces dernières années, avec des développements axés sur les exigences spécifiques du marché offrant des caractéristiques distinctes pour divers cas d'utilisation, notamment les communications cellulaires la connectivité des appareils intelligents, les applications de détection sans fil, etc.

Ces avancées technologiques ont donné naissance aux réseaux sans fil, surpassant le standard IEEE 802.11 grâce à leurs fonctionnalités, en exploitant les ondes électromagnétiques pour se libérer des câbles. Bien que ces derniers sont classés selon leurs étendue mais leurs objectifs ne sont pas les mêmes, on distingue les réseaux suivants :

- Les réseaux personnels **PAN** (**Wireless Personal Area Networks**) : à courte portée, généralement de quelques dizaines de mètres, utilisé pour relier ou connecter des périphériques très peu distants sans fil.

- Les réseaux locaux LAN (Local Area Networks) : à une distance bien supérieure à celle des réseaux personnels, s'étendant sur plusieurs centaines de mètres. La zone servie peut être une entreprise, un bâtiment ou un campus.
- Les réseaux métropolitains MAN (Metropolitan Area Networks) : À plusieurs kilomètres, leur objectif est de couvrir une vaste zone telle qu'une ville entière.
- Les réseaux étendus WAN (Wide Area Networks) : Ils se distinguent par leur étendue, visant à couvrir des territoires immenses tels qu'un pays, un continent ou même une planète entière.

La Figure 1.1 illustre la portée de chaque catégorie de réseau sans fil mentionnée dans le paragraphe précédent.

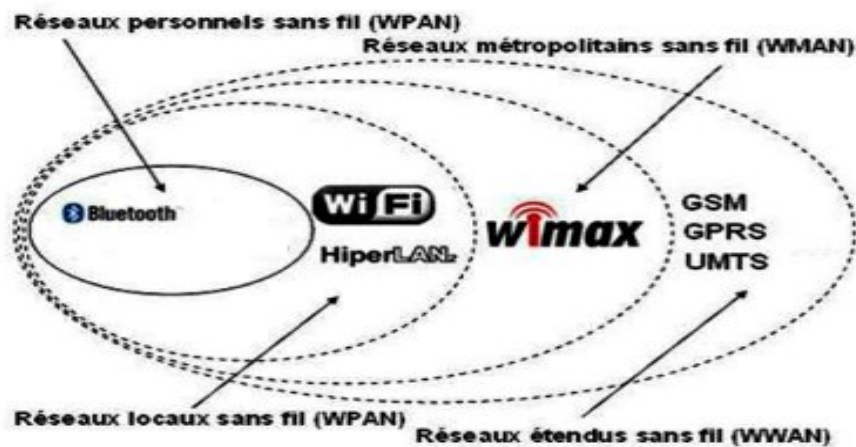


FIGURE 1.1 – Classification des réseaux sans fil.

1.3 Les réseaux WLANs

La mise en place efficace d'un réseau WLAN, nécessite une compréhension approfondie du standard IEEE 802.11. Cette norme est examinée en détail dans cette partie, afin de mieux comprendre ses mécanismes et spécifications pour créer des réseaux LAN sans fil fonctionnels.

1.3.1 Présentation du standard IEEE 802.11

En 1997, l'IEEE a marqué un tournant en introduisant une technologie révolutionnaire appelée WLAN, plus communément connue sous le nom de Wifi. La norme 802.11a permis des transmissions de données à des vitesses initialement faibles, mais jetait les bases du Wifi moderne. Depuis lors, de nombreuses normes ont été développées et adoptées pour améliorer les performances et les fonctionnalités du Wifi au fil des années.

Cette technologie embrasse la couche "Accès au réseau" du modèle TCP/IP, ainsi que les couches "Physique" et "Liaison de données" du modèle OSI. Elle définit les caractéristiques de la couche physique, telles que la bande de fréquence, la modulation

et l'encodage, pour fournir des capacités de transmission. De plus, la sous-couche Medium Access Control (MAC) fonctionne au sein de la couche liaison de données en établissant les protocoles d'accès au support (medium).

La Figure 1.2 présente l'architecture du modèle établi par le groupe de travail 802.11, en comparaison avec celle du modèle OSI[1].

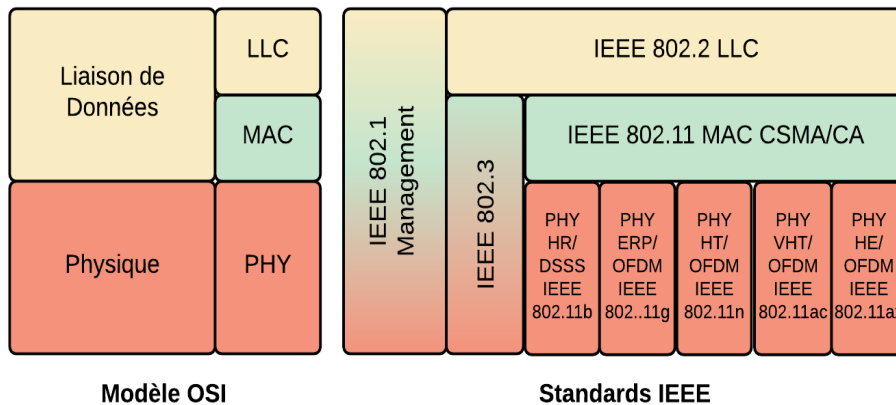


FIGURE 1.2 – Architecture en couche du standard IEEE 802.11.

La norme 802.11 vise principalement deux catégories de réseaux :

- **Réseaux ad hoc** : Les stations se connectent directement sans infrastructure centrale, chaque station agit à la fois comme clients et points d'accès pour permettre une communication directe entre les appareils proches (Figure 1.3).

Ce type de réseau est souvent utilisé dans des scénarios où une infrastructure fixe n'est pas disponible ou pratique, comme dans les réseaux de capteurs sans fil ou dans des situations d'urgence où une connectivité rapide est nécessaire.

- **Réseaux infrastructure** : Les stations se connectent via un point d'accès central relié à Internet pour permettre aux appareils sans fil de se connecter à différents réseaux filaires ou sans fil (Figure 1.3).

Ce type de réseau est plus courant dans les environnements domestiques, professionnels et publics, où une connectivité à large bande est nécessaire et où une infrastructure fixe est disponible.

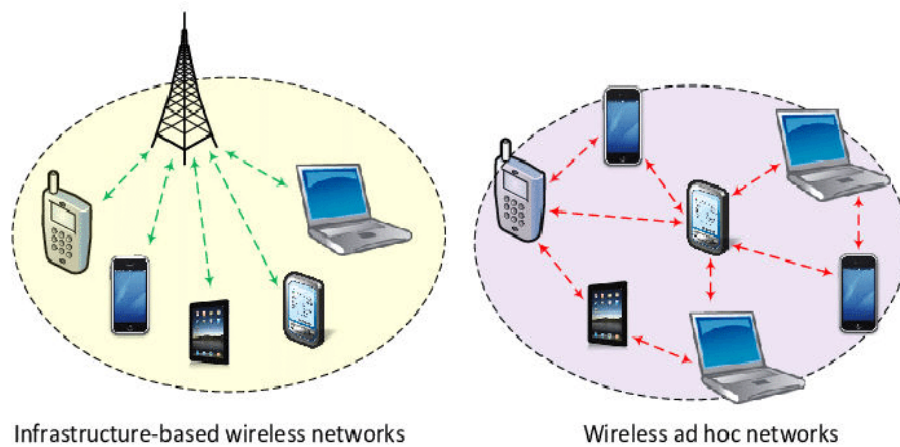


FIGURE 1.3 – Mode Ad hoc et mode infrastructure.

1.3.2 La couche Physique

Les versions les plus courantes du standard opèrent dans les bandes de fréquences de 2,4 GHz ou 5 GHz, voir dans les deux. Cependant, la technologie est limitée aux communications en Half-duplex, ce qui signifie que le support doit être partagé entre les utilisateurs, entraînant une concurrence pour l'utilisation des fréquences. Cette approche diffère des réseaux Ethernet câblés et commutés, où chaque appareil a son propre chemin dédié pour la communication. Ainsi qu'on trouve plusieurs techniques de modulation dans cette norme.

Bandes de fréquences IEEE 802.11

Les bandes ISM utilisées par le standard IEEE 802.11 et ses variantes sont les bandes en 2,4 GHz et en 5 GHz :

5 GHz :

Le standard 802.11ac est compatible exclusivement avec la fréquence de 5 GHz. Il permet l'utilisation de canaux de différentes largeurs : 20, 40, 80 ou 160 MHz, et il prend en charge jusqu'à huit flux simultanés grâce à la technologie MU-MIMO.

Dans la bande de fréquences de 5 GHz, les centres des canaux consécutifs sont espacés de 5 MHz, chaque canal ayant une largeur de 20 MHz. La numérotation des canaux commence à partir de 5000 MHz, comme indiqué dans la Figure 1.4. L'utilisation de cette bande permet d'atteindre des débits plus élevés avec moins d'interférences que dans la bande 2,4 GHz. Cependant, sa portée est généralement inférieure à celle de la bande 2,4 GHz.

Pour éviter tout chevauchement, un espacement d'au moins 4 canaux est utilisé. Ainsi, en Europe, il est possible d'utiliser 19 canaux à 5 GHz.

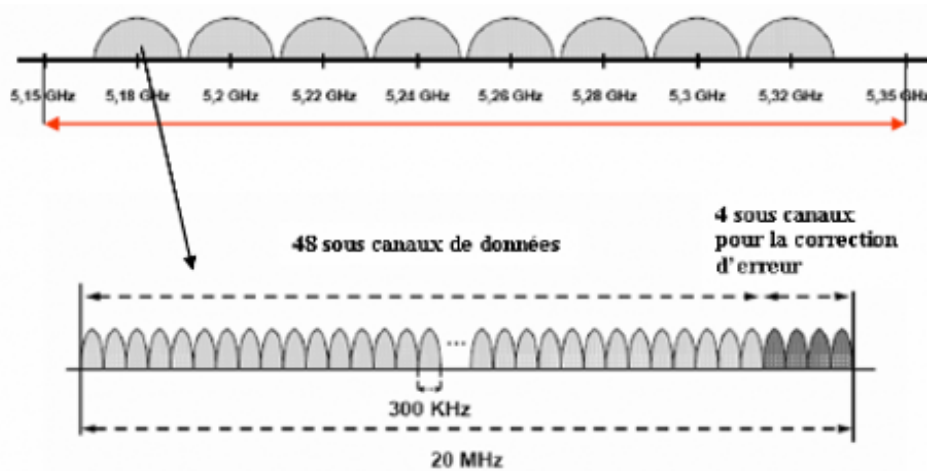


FIGURE 1.4 – Canaux utilisés dans 5 GHz.

2,4 GHz :

Cette bande s'étend de 2,4 MHz à 2,4835 MHz, avec une largeur de 83,5 MHz. Pour le 802.11 DSSS, il propose 14 canaux de 22 MHz chacun, débutant à 2400 MHz et espacés de 5 MHz, de sorte qu'ils se superposent en partie.

Les périphériques IEEE 802.11b, IEEE 802.11g et IEEE 802.11n opèrent exclusivement dans la bande de fréquence surchargée de 2,4 GHz. Parmi eux, le 802.11n se distingue en pouvant gérer jusqu'à 3 flux simultanés (et potentiellement 4 théoriquement) grâce à la technologie MIMO (Multiple Input Multiple Output), et en supportant des canaux de 40 MHz, doublant ainsi la capacité de transmission. Cette norme offre une fiabilité accrue par rapport à ses prédécesseurs.

De plus, en option, elle permet l'utilisation de la bande de fréquences 5 GHz, offrant ainsi une alternative pour réduire les interférences. Dans la bande de fréquences 2,4 GHz, seuls les canaux 1, 6 et 11 sont non chevauchants, (voir la figure 2-3) alors que les autres canaux se superposent ou partagent des limites avec d'autres canaux, entraînant des interférences potentielles.

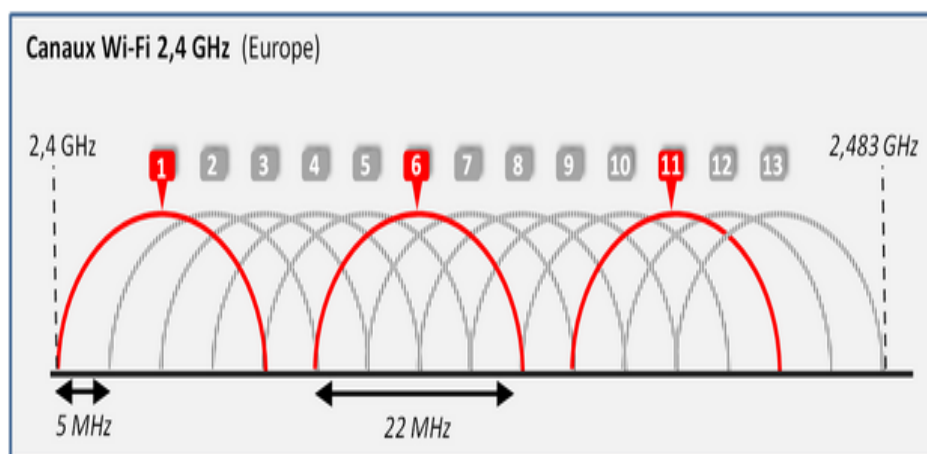


FIGURE 1.5 – Canaux utilisés dans 5 GHz.

Techniques de modulation

Initialement, la norme IEEE 802.11 a été conçue pour utiliser trois couches physiques distinctes, chacune se caractérisant par des techniques de codage et de modulation spécifiques : Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS), Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS), et Infra-Red (IR). Voici un aperçu détaillé de ces couches :

- **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)** : utilise une modulation par déplacement de phase Différentiel DPSK (Differential Phase Shift Keying) avec un étalement de spectre direct dans la bande 2,4 GHz. Il offre un débit physique de 1 Mbit/s (avec DPSK binaire DBPSK) ou 2 Mbit/s (avec DPSK quadratique DQPSK)[2].
- **FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)** : utilise une modulation par déplacement de phase gaussienne Gaussian GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) avec un étalement de spectre par saut de fréquences dans la bande 2,4 GHz. Le principe est de diviser la bande de fréquences en plusieurs canaux, et la communication se fait en sautant d'un canal à un autre selon une séquence et un rythme convenus à l'avance entre l'émetteur et le récepteur. Grâce à cette technique de modulation, le débit physique peut atteindre 1 ou 2 Mbit/s selon la modulation utilisée, 2GFSK ou 4GFSK respectivement[2].
- **IR (Infra-Red)** : la spécification IR de la couche physique n'a pas rencontré le succès escompté. Elle repose sur une diffusion infrarouge avec des longueurs d'ondes entre 850 et 950 nm. Cette méthode utilise une modulation d'impulsions par positions, offrant des débits physiques de 1 Mbit/s ou 2 Mbit/s en fonction du type d'encodage[2].

D'autres couches physiques ont été ajoutées à la norme IEEE 802.11 au fil du temps, ce qui a permis d'obtenir des débits radio plus élevés. Comme :

- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** : considéré comme la technique de modulation la plus puissante parmi celles précédemment utilisées. Elle a permis d'atteindre des débits plus élevés en permettant la transmission simultanée de plusieurs communications sur une même bande de fréquence, ce qui correspond au principe du multiplexage. Cette technologie offre une meilleure résistance au phénomène de multipath et une capacité élevée de partage du spectre. Une illustration détaillée de la modulation OFDM est présentée dans la figure suivante.

Chaque norme IEEE 802.11 peut utiliser différentes combinaisons de ces techniques de modulation en fonction de ses exigences de performances, de portée et de compatibilité avec les versions antérieures. En comprenant ces techniques de modulation et les bandes de fréquences associées, il est possible de concevoir et de déployer des réseaux Wi-Fi efficaces et performants.

1.3.3 La couche MAC

La couche MAC du standard IEEE 802.11 vise principalement à assurer la fiabilité des services de données pour les protocoles des couches supérieures. Pour cela, le standard a défini un protocole d'échange de trames. La séquence minimale d'échange comprend deux trames : une trame de données envoyée de la source vers la destination, suivie d'une trame d'acquiescement (ACKnowledgment ou ACK) envoyée de la destination vers la source une fois la trame de données reçue avec succès. Chaque trame reçue au niveau de la couche MAC est soumise à une vérification de la Séquence de Contrôle de Trame (FCS : CRC de 32 bits). Si la source ne reçoit pas l'ACK attendu parce que la vérification de la FCS a échoué au niveau du récepteur, la trame est renvoyée. Ce processus permet de surmonter les problèmes d'erreurs causées par les interférences sur le canal radio, assurant ainsi l'intégrité des données au niveau de la couche liaison des données[3].

Dans le cadre du standard 802.11, l'accès au canal peut être réalisé en utilisant l'une des fonctions suivantes :

Le mode PCF (Point Coordination Function) : représente un accès au canal sans contestation où les stations de base sont responsables de la gestion de l'accès au canal dans leur zone de couverture pour les appareils mobiles qui leur sont associés. Dans ce mode, une station n'est autorisée à émettre que si elle obtient une autorisation explicite, et elle ne peut recevoir des données que si elle est sélectionnée. Ce mode est particulièrement adapté aux applications temps réel telles que la vidéo et la voix, où la gestion précise du délai lors des transmissions de données est essentielle.

Le mode DCF (Distributed Coordination Function) : DCF est un mécanisme d'accès qui permet à chaque nœud du réseau de prendre la parole en utilisant une approche d'accès distribué similaire aux techniques d'accès par compétition que l'on retrouve dans les réseaux câblés (Ethernet 802.3). DCF fonctionne selon deux modes principaux : l'accès en mode station de base (CSMA/CA) et le mode RTS/CTS. Le mode RTS/CTS a été développé pour résoudre le problème des nœuds cachés, qui se produit principalement dans les réseaux ad-hoc.

Le mécanisme DCF est constitué des composants suivants :

- Le protocole CSMA/CA,
- Les durées inter-trames IFS (Inter Frame Spacing),
- Le tirage aléatoire de Backoff.

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)

Dans un réseau local Ethernet traditionnel, les machines utilisent la méthode d'accès CSMA/CD, où chaque machine est libre de communiquer à tout moment. Chaque machine vérifie si une autre machine a émis un message simultanément; si tel est le cas, les deux machines attendent un laps de temps aléatoire avant de réessayer d'émettre.

Dans un environnement sans fil, les machines utilisent la méthode d'accès CSMA/CA. Ce protocole utilise une stratégie d'évitement de collision basée sur l'écoute du canal avant la transmission, afin de déterminer s'il est libre ou non. Il repose également sur l'utilisation d'accusés de réception (ACK) entre l'émetteur et le récepteur pour détecter les collisions. Si l'émetteur ne reçoit pas l'ACK en retour, il réémet le fragment jusqu'à ce qu'il le reçoive ou qu'il atteigne un nombre maximal de tentatives de transmission[4].

Mécanisme CSMA/CA avec échange de messages RTS/CTS

Dans les réseaux locaux sans fil, un problème connu sous le nom de "station cachée" (Hidden station) peut survenir. Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple de trois stations : A, B et C. Dans cette configuration, A est capable de communiquer avec B et C individuellement, mais B et C ne peuvent pas communiquer directement entre elles. Cette limitation peut être due à une distance trop importante entre B et C ou à la présence d'un obstacle physique les séparant. La figure 1.6 montre un réseau avec trois stations A, B et C, parmi lesquelles deux (B et C) sont invisibles l'une pour l'autre en raison d'un obstacle.

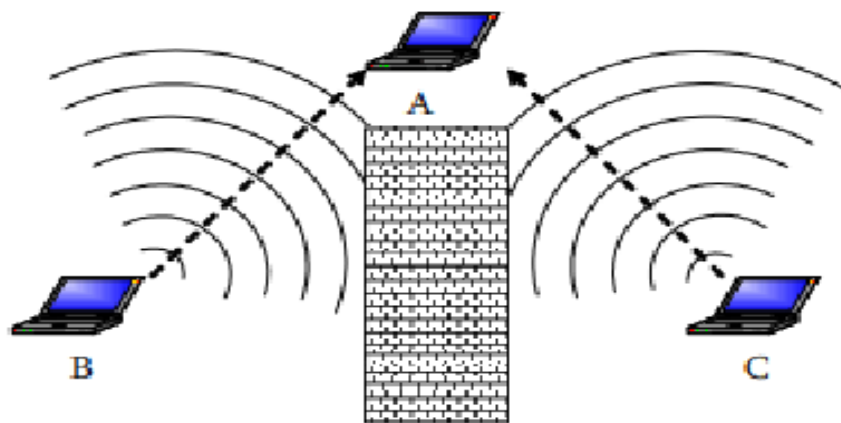


FIGURE 1.6 – Topologie présentant deux terminaux mutuellement cachés.

Pour remédier à ce problème courant dans les réseaux sans fil, une stratégie consiste à intégrer le mécanisme RTS/CTS à la technique CSMA/CA. Ce mécanisme fonctionne de la manière suivante : avant de transmettre ses données, une station doit d'abord envoyer une trame RTS (Request To Send) incluant l'adresse de la station destinataire et une durée approximative de l'émission (NAV, Network Allocation Vector) jusqu'à l'acquittement ACK. La station destinataire répond alors avec un CTS (Clear To Send), diffusant également la durée d'émission annoncée dans le RTS. De cette manière, toutes les stations situées dans la zone de couverture de la source et de la destination reçoivent l'information qu'elles ne doivent pas utiliser le canal de transmission pendant la période spécifiée dans les trames RTS et CTS[4].

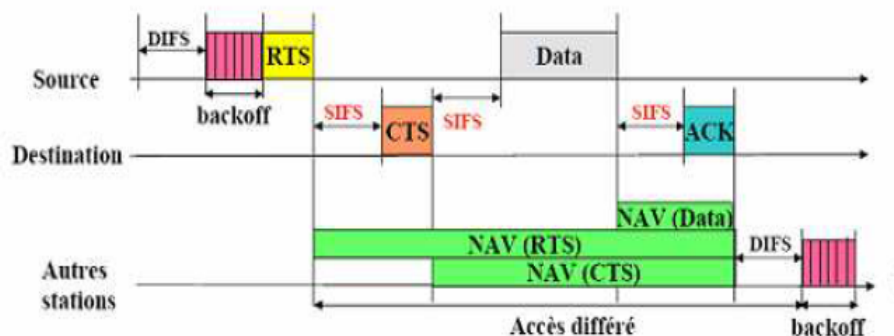


FIGURE 1.7 – Mécanisme d'échange de messages RTS/ CTS.

Les durées inter-frames IFS

Le standard définit des intervalles entre trames (IFS) pour organiser les accès en fonction de leur priorité, ces délais étant utilisés par DCF ainsi que d'autres mécanismes d'accès. Un IFS correspond à la période pendant laquelle une station doit patienter avant d'émettre sur le canal. Pour catégoriser les IFS, la norme a introduit le concept de TimeSlot, qui indique à une station si une autre a utilisé le canal au début du slot précédent. La valeur d'un TimeSlot varie selon la couche physique. À partir du TimeSlot, la norme a ensuite défini quatre types d'IFS comme suit :

SIFS (Short Inter-Frame Spacing) : Il est utilisé pour séparer les différentes étapes de transmission, comme entre les trames RTS et CTS, entre les trames CTS et les données, et entre les données et l'accusé de réception. Son but est de donner la priorité aux échanges sur le canal de communication, assurant ainsi un accès plus rapide au médium pour les trames utilisant le SIFS par rapport à celles utilisant d'autres temps inter-frames. C'est le plus petit écart entre deux trames dans un échange de données.

PIFS (PCF Interframe Space) : Le délai imposé aux autres stations avant de pouvoir émettre un paquet en mode PCF. Il est utilisé par le Point d'accès (AP : Access Point) pour obtenir l'accès au médium avant n'importe quelle autre station.

$$\text{PIFS} = \text{SIFS} + \text{SlotTime};$$

DIFS (DCF Interframe Space) : Le délai d'attente imposé aux autres stations avant de pouvoir émettre un paquet en mode DCF.

$$\text{DIFS} = \text{SIFS} + 2 * \text{SlotTime};$$

EIFS (Extended Inter-Frame Spacing) : le plus long des espaces inter-frames. Quand une station reçoit une trame erronée, elle doit patienter pendant un EIFS pour recevoir l'acquittement de cette trame. Cet intervalle est utilisé comme un inhibiteur pour prévenir les collisions en série.

$$\text{EIFS} = \text{SIFS} + \text{ACKtime} + \text{DIFS};$$

(ACKtime représente le temps de transmission de l'accusé de réception ACK).

La figure suivante illustre les relations entre les différents espacements (SIFS < PIFS < DIFS < EIFS). Les valeurs sont configurables selon les spécificités de chaque réseau.

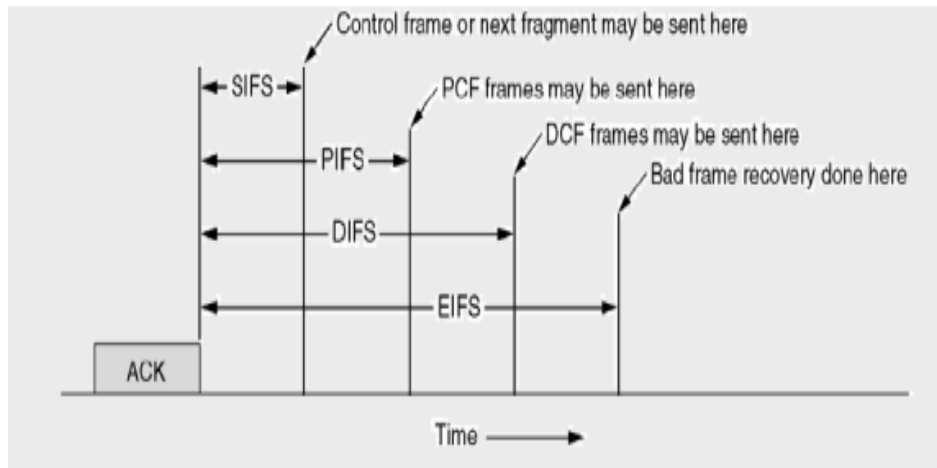


FIGURE 1.8 – Paramètres d'espacement de trames dans IEEE 802.11.

BEB - Binary Exponential Backoff

Une méthode de Backoff est instaurée après que la fonction d'accès DCF a repéré un état de canal libre pendant une durée supérieure à DIFS. Cela aide les stations à diminuer le risque de collisions. Le Backoff consiste à attendre un laps de temps aléatoire avant de transmettre. Ce temps aléatoire (TempsDeBackoff) est sélectionné selon la méthode suivante :

$$\text{TempsDeBackoff} = \text{Uniforme}(0, \text{CW}) \times \text{aSlotTime}$$

Avec :

- Uniforme (a, b) : la fonction de tirage aléatoire uniforme d'un entier dans l'intervalle [a, b];
- CW : la valeur en cours de la fenêtre de contention ;
- aSlotTime : la durée d'un slot durant laquelle toute station dans le réseau détecte l'accès au médium par une autre station.

La valeur de CW évolue dans l'intervalle [CWmin, CWmax] selon les normes. Elle est initialisée à CWmin après l'envoi réussi d'un paquet ou le rejet d'un paquet pour dépassement de limites de retransmission. En cas de collision, la valeur de CW augmente exponentiellement jusqu'à atteindre la borne maximale CWmax pour

diminuer le taux de collisions.

$$CW = \min (CW \times 2 - 1, CW_{\max})$$

Une fois que le temps de Backoff est tiré, il est décrémenté de 1 à chaque slot libre repéré par la fonction d'accès. Lorsque le temps de Backoff atteint 0 et que le canal est toujours libre, la fonction d'accès essaie d'envoyer les données sur le canal. Si pendant la décrémentatation du temps de Backoff le canal devient occupé, la valeur actuelle du temps de Backoff est mémorisée, et la décrémentatation reprend là où elle s'était arrêtée lorsque le canal redevient libre après un intervalle DIFS[5].

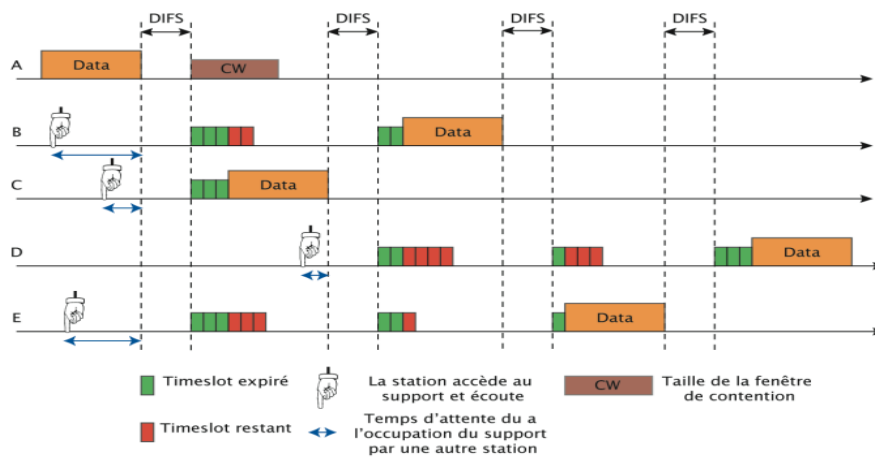


FIGURE 1.9 – Exemple de procédure de tirage de Backoff.

1.4 IoT et applications temps réel

1.4.1 Définition de l'IoT

Il n'existe pas de définition unique pour l'Internet des objets. Son utilisation initiale ait été attribuée à Kevin Ashton, un expert en innovation numérique. Ce que toutes les définitions ont en commun, c'est l'idée que la première version de l'Internet concernait les données créées par les personnes, tandis que la version suivante concerne les données créées par les objets. La meilleure définition pour l'Internet des objets serait :

"Un réseau ouvert et complet d'objets intelligents ayant la capacité de s'auto-organiser, de partager des informations, des données et des ressources, de réagir et d'agir face aux situations et aux changements dans l'environnement[6].

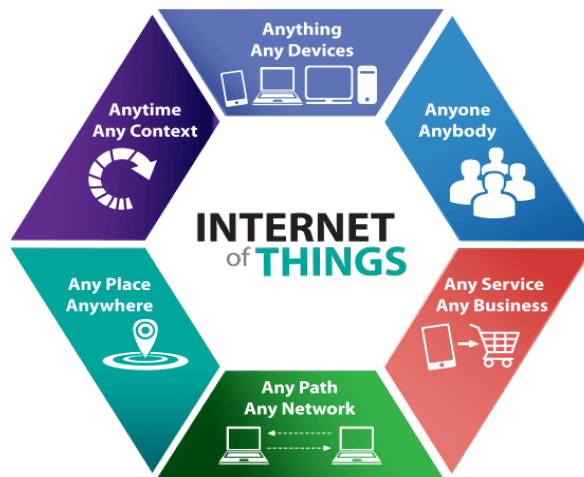


FIGURE 1.10 – Internet des objets.

1.4.2 Evolution de l'IoT

Dans les années 1990, les premiers objets connectés ont émergé, tels que les grille-pain, les machines à café et d'autres appareils du quotidien. En 2000, LG a lancé des appareils électroménagers connectés à Internet, marquant le début sérieux de cette tendance. À cette époque, les premières expérimentations d'appareils connectés cherchant automatiquement des informations ont également eu lieu. En 2003, malgré la présence de 500 millions d'appareils connectés à Internet dans le monde, le nombre par habitant était encore relativement faible, selon la définition de l'Internet des objets par Cisco IBSG. Cependant, avec l'essor des smartphones et des tablettes, le nombre d'appareils connectés a considérablement augmenté, dépassant le nombre de personnes sur Terre en 2010 et continuant à croître pour atteindre une prévision de 50 milliards d'objets connectés dans un avenir proche, selon Cisco.

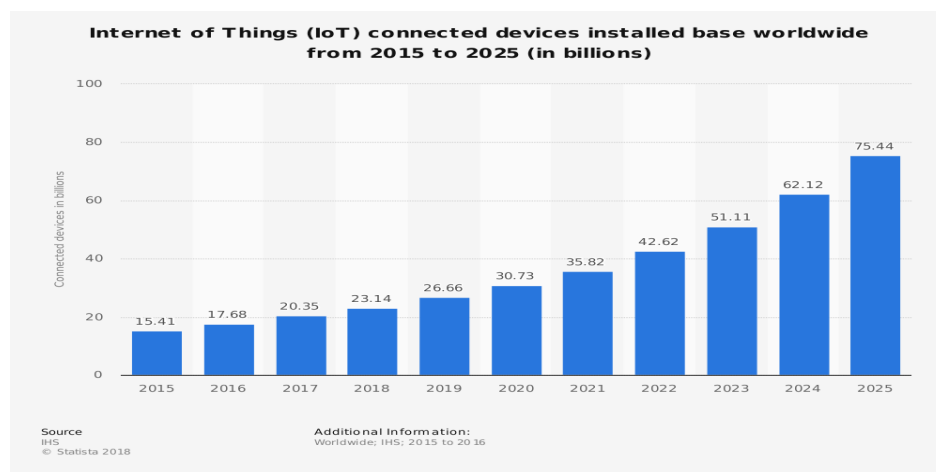


FIGURE 1.11 – statistiques du nombre d'appareils connectés à l'IoT.

1.5 Architecture de l'IoT

Le principal défi de l'Internet des objets réside dans sa nature extrêmement vaste et illimitée, ce qui signifie que la réalisation de son concept repose essentiellement sur son architecture. Au début de la recherche, une architecture en trois couches a été proposée ainsi que en cinq couches [7].

1.5.1 L'architecture à trois couches

Cette architecture se compose de trois couches distinctes : la couche de perception, la couche réseau et la couche application. La première couche, la couche de perception, est la partie physique équipée de capteurs qui recueillent des données environnementales et détectent divers paramètres physiques ou objets intelligents. La deuxième couche, la couche réseau, assure la connectivité entre les objets intelligents, les périphériques réseau et les serveurs, tout en traitant et transmettant les données collectées par les capteurs. Enfin, la troisième couche, la couche application, fournit des services spécifiques aux utilisateurs, couvrant divers domaines tels que les maisons intelligentes, les villes intelligentes et les services de santé intelligents[19]. La représentation de cette architecture est illustrée dans la figure 1.12.

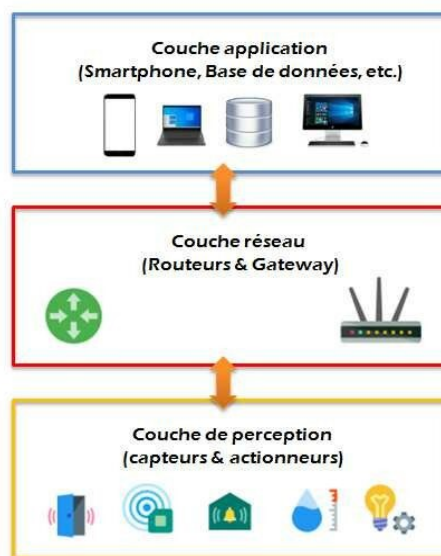


FIGURE 1.12 – L'architecture à trois couches.

1.5.2 L'architecture à cinq couches

L'architecture à cinq couches, comme illustré dans la figure 1.11, a été développée pour offrir une vision complète du fonctionnement et du développement des appareils IoT. Cette nouvelle structure comprend cinq couches, dont les couches de perception et d'application qui restent inchangées par rapport à l'architecture précédente. La couche de traitement est chargée de traiter les données provenant de la couche réseau et de prendre des décisions grâce à l'informatique omniprésente. La couche de transport assure le transfert des données entre la couche de perception

et la couche de traitement, utilisant divers réseaux tels que sans fil, LAN, 3G, LTE, et Bluetooth. Enfin, la couche métier utilise les informations et les statistiques de la couche application pour planifier les objectifs et les stratégies futures [8].

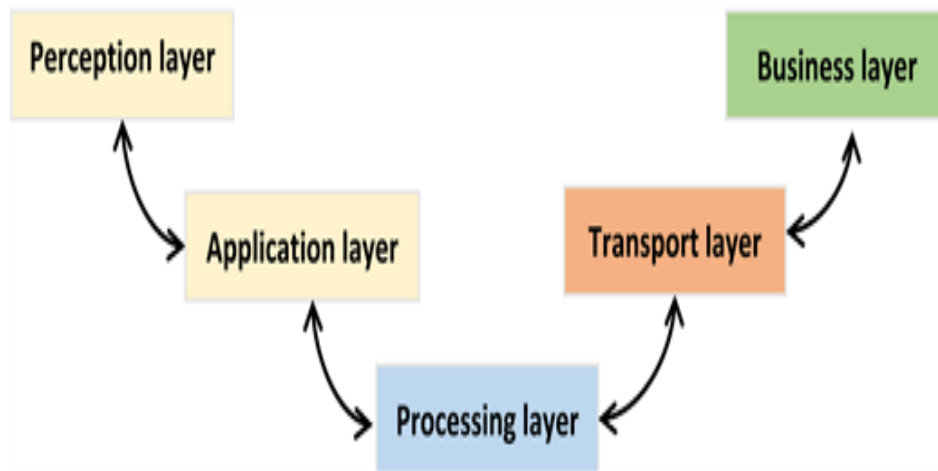


FIGURE 1.13 – L'architecture à cinq couches.

1.5.3 Composants clés

Capteurs et actionneurs

Les capteurs et les actionneurs sont des composants essentiels de l'Internet des Objets (IoT). Dans de nombreuses applications IoT, il est nécessaire d'utiliser un ou plusieurs capteurs pour recueillir des données et des informations sur le système. Ces données peuvent être traitées, puis des instructions peuvent être envoyées aux actionneurs qui font également partie du système. Les capteurs recueillent les informations qui sont ensuite transmises via le réseau, tandis que les actionneurs permettent d'exécuter des actions concrètes, comme :

- Les capteurs d'humidité qui fournissent des données pour contrôler les systèmes d'irrigation.
- Les capteurs de trafic qui informent le système pour ajuster les feux de circulation.
- Les capteurs de présence qui détectent des mouvements pour réguler les conditions environnementales des bâtiments.

Les capteurs et les actionneurs offrent ainsi des solutions IoT dans de nombreux domaines, des villes intelligentes à l'agriculture intelligente, en passant par la santé personnelle et les transports intelligents. De plus, il existe une grande variété de types de capteurs disponibles pour les systèmes IoT. Des experts comme Albrecht Schmidt et Kristof Van Laerhoven ont contribué à établir des normes pour la conception de ces dispositifs intelligents[9].

Connectivité

La connectivité, souvent désignée comme la couche réseau, régit le transfert et le traitement des données pour garantir une communication fluide entre les dispositifs connectés, les capteurs, le cloud et les actionneurs. Pour assurer cette efficacité, ces composants doivent être interconnectés pour interpréter les données et déclencher des actions adéquates. C'est là que les protocoles et les passerelles IoT jouent un rôle crucial : les protocoles IoT assurent le transport des données collectées par les capteurs, lesquelles sont ensuite acheminées par une passerelle IoT qui les recueille et les traduit en utilisant les protocoles adéquats.

Les sources d'énergie

Il existe quatre types de sources d'énergie pour les objets connectés : l'alimentation par câble pour ceux qui ont accès à une prise électrique, les piles ou batteries pour ceux sans accès ou nécessitant une recharge occasionnelle, les capteurs d'énergie ou "energy harvesting" (tels que le photovoltaïque, le piezoélectrique, le thermoélectrique, le cinétique) pour prolonger la durée de vie des objets à très faible consommation, et enfin, les objets passifs sans piles qui sont alimentés par les ondes électromagnétiques des lecteurs (comme le RFID, le NFC...).

L'énergie représente l'un des grands défis des objets connectés, tant pour garantir la plus longue durée de vie possible sans maintenance que pour préserver l'environnement face à la multiplication des objets connectés énergivores qui prolifèrent dans nos environnements personnels et professionnels.

Les réseaux de communication IoT

- **Les réseaux sans fil de courte distance** : Comme le Wi-Fi, le Bluetooth ou le Zigbee sont faciles à mettre en place, abordables, et peuvent gérer des volumes de données élevés, mais ils ont une portée limitée et peuvent consommer beaucoup d'énergie pour les appareils.
- **Les réseaux cellulaires** : Comme la 4G ou la 5G, offrent une couverture étendue et peuvent gérer de grandes quantités de données, mais ils consomment davantage d'énergie et nécessitent des abonnements payants auprès des fournisseurs de services de télécommunication.
- **Les réseaux LPWAN (Low-Power Wide Area Network)** : Comme le Sigfox, le LoRaWAN ou le NB-IoT ont été spécifiquement développés pour les objets connectés nécessitant des transmissions sur de longues distances tout en préservant la durée de vie de leur batterie. Ces réseaux supportent uniquement des données de petite taille, pouvant être envoyées de manière régulière ou en réponse à des événements spécifiques. L'abonnement à ces réseaux est nécessaire, bien que moins coûteux que celui des réseaux cellulaires.

- **Les réseaux cellulaires ou LPWAN privés** : Utilisant des gateways supplémentaires, fournissent une connectivité locale lorsque la couverture des réseaux publics sur site est insuffisante.
- **Les réseaux filaires** : Comme l'Ethernet ou la fibre optique sont souvent trop puissants pour les besoins de l'IoT, que ce soit en termes de débit de données ou de coût.

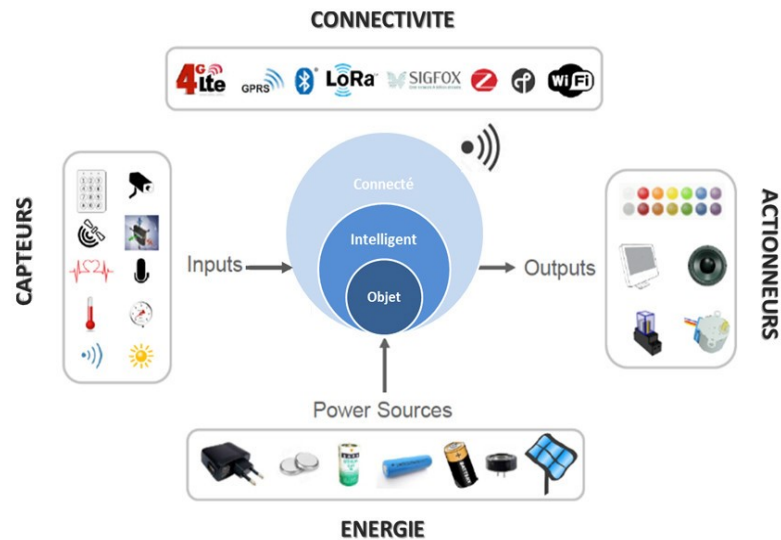


FIGURE 1.14 – Composants clés d'un système IoT.

1.6 Applications temps réel dans l'IoT

1.6.1 Définition

Une application en temps réel, ou RTA, sont des applications Web qui permettent une communication instantanée et la mise à jour des données entre les utilisateurs et le serveur, se distinguant ainsi des applications classiques qui nécessitent une actualisation manuelle ou une synchronisation périodique des données.

Ces applications fonctionnent dans un laps de temps que l'utilisateur perçoit comme immédiat ou actuel. La latence doit être inférieure à une valeur définie, généralement mesurée en secondes. L'informatique temps réel intègre l'utilisation de ces applications.

Déterminer si une application spécifique est en temps réel dépend de son temps d'exécution le plus défavorable. Ces applications sont souvent utilisées pour le traitement des données en flux continu. Les logiciels temps réel doivent pouvoir détecter, analyser et agir aux données en temps réel sans les stocker dans une base de données principale [10].

- **Les systèmes embarqués** : les systèmes embarqués en temps réel sont conçus pour accomplir des tâches spécifiques dans des délais impartis. Ils sont utilisés dans applications comme la navigation GPS, les dispositifs de suivi de fitness, les systèmes de chauffage central, et les systèmes de contrôle mobiles.
- **Agriculture de précision** : l'IoT est utilisé dans le secteur agricole afin de collecter des données en temps réel sur les conditions climatiques, les niveaux d'eau et les niveaux d'engrais, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources et de favoriser des rendements améliorés.
- **Logistique et gestion de flotte** : l'IoT est intégré à la gestion de flotte pour assurer le suivi de l'emplacement des véhicules en temps réel, surveiller le comportement des conducteurs, optimiser les itinéraires, améliorer la maintenance des véhicules, et de prévoir les pannes.
- **Surveillance des maladies et santé mentale** : L'IoT est utilisé dans le domaine de la santé pour surveiller les patients souffrant de maladies chroniques telles que le diabète, la gestion des troubles mentaux. Il permet de suivre les indicateurs de santé mentale en temps réel, de détecter les signes de détresse et de prévenir les crises, les maladies cardiaques, ce qui permet une amélioration dans leur suivi et leur traitement.
- **Sécurité et surveillance** : L'IoT est utilisé dans la surveillance et la sécurité de bâtiments, zones industrielles, et infrastructures vitales, détectant ainsi les intrusions, surveillant les mouvements en temps réel, et anticipant les risques.
- **Sport et fitness** : Les applications IoT en temps réel dans le secteur du sport et du fitness ouvrent de vastes horizons pour rehausser les performances sportives, la motivation et la sécurité des athlètes. Il est possible de surveiller les mouvements des sportifs, d'évaluer leur fréquence cardiaque et leur activité physique, et de mettre à disposition des données instantanées pour optimiser les séances d'entraînement et les résultats.



FIGURE 1.15 – IoT et applications temps réel.

1.7 conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré une préface sur les deux domaines essentiels dans le contexte des technologies émergentes : les réseaux WLAN et l'IoT, ainsi que les applications en temps réel. Nous avons présenté l'origine de l'amendement IEEE 802.11, les diverses fonctions et techniques nécessaires à sa mise en œuvre, ainsi que les différentes couches qui le composent.

En fait, l'IoT a un impact significatif de sur de nombreux secteurs d'activité dans notre société connectée. Ces sujets constituent des fondements solides pour la suite de notre étude, nous permettant d'approfondir notre compréhension des technologies numériques en constante évolution et de leurs implications.

En revanche, les applications en temps réel, quant à elles, offrent une réactivité immédiate aux besoins des utilisateurs, que ce soit dans le domaine de la santé, de la logistique, de l'industrie ou d'autres secteurs. (Indiquer de quoi va parler le deuxième chapitre).

CHAPITRE 2

LA NORME IEEE 802.11BE

2.1 Introduction

L'évolution du Wi-Fi a connu des avancées notables, passant de la norme IEEE 802.11ax, ou Wi-Fi 6, à la norme IEEE 802.11be, désignée Wi-Fi 7. Cette progression a apporté des améliorations significatives en termes de performance, de capacité et de gestion du spectre.

Ce chapitre présente le standard IEEE 802.11ax et sa technique la plus innovante qui est l'OFDMA. Ensuite, nous explorons le standard IEEE 802.11be, qui représente la prochaine génération de technologies Wi-Fi.

Nous examinerons le fonctionnement du multi-liens (MLO) dans le cadre du IEEE 802.11be, mettant en lumière sa capacité à améliorer la robustesse et la flexibilité des communications sur plusieurs liens simultanés. Cela inclut une analyse de l'architecture des systèmes MLO et des modes d'accès aux canaux, essentiels pour minimiser les interférences et optimiser les performances réseau.

2.2 Présentation du standard IEEE 802.11ax

En 2014, le groupe de travail IEEE 802.11ax a commencé à développer la génération de WLAN destinée aux réseaux denses et aux communications en temps réel connu sous le nom de Wi-Fi 6. La norme Wi-Fi 6 a été officiellement publiée en mai 2021. Le groupe de travail s'est concentré à fournir un débit quatre fois supérieur par station tout en conservant la même consommation d'énergie par rapport à l'IEEE 802.11ac ou en l'améliorant. Cette norme, axée sur une meilleure efficacité spectrale, est donc connue sous le nom de norme à haute efficacité (HE : High-Efficiency).

L'IEEE 802.11ax modifie les couches PHY et MAC et introduit diverses fonctionnalités pour améliorer la satisfaction des utilisateurs de Wi-Fi. Elle répond aux attentes des utilisateurs grâce à des canaux plus larges, au MU OFDMA pour l'accès au canal, au MU MIMO en uplink (UL) pour augmenter la capacité, au SR pour l'efficacité spectrale, au Target Wake Time (TWT) pour gérer la consommation d'énergie, à la modulation d'amplitude en quadrature 1024 (QAM) pour augmenter le débit, ainsi qu'à d'autres améliorations [11]. Le Wi-Fi 6 fonctionne sur les bandes

de fréquences de 2,4, 5 et 6 GHz, permettant des débits de données élevés pouvant atteindre 9,6 Gb/s.

Le successeur de la norme Wi-Fi 6, l'IEEE 802.11be (Wi-Fi 7), est actuellement en développement et vise des réseaux à ultra-haut débit. Cependant, il en est encore à ses débuts et ne devrait pas être lancé avant la fin de 2024. Cette étude sert de base aux futures améliorations du Wi-Fi 7, constituant ainsi un outil de recherche précieux [12].

Wi-Fi CERTIFIED 6™ key features

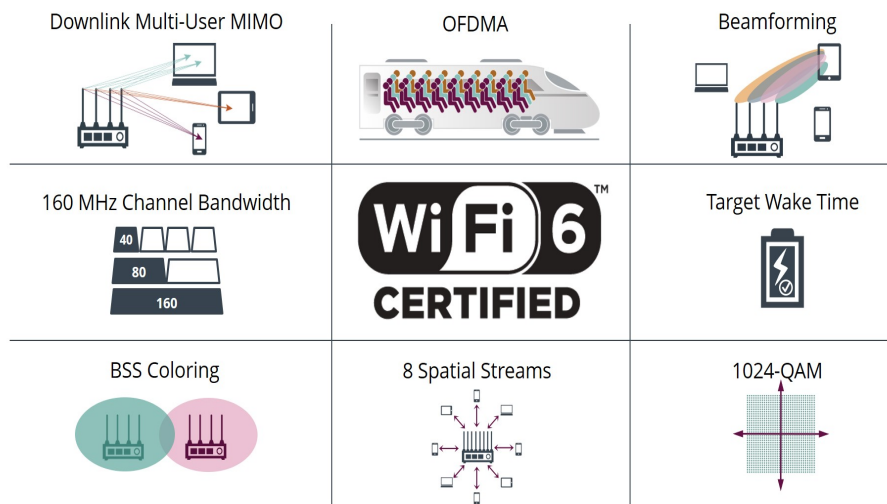


FIGURE 2.1 – Principales caractéristiques du WiFi6-802.11ax

2.3 OFDMA

L'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence (OFDMA) est une version multi-utilisateur de la technologie de modulation OFDM. Avec l'OFDM, les transmissions sont réparties sur plusieurs sous-porteuses, ce qui nécessite l'utilisation de tout le spectre. Dans les réseaux denses, de nombreuses stations se disputent l'accès au médium, augmentant ainsi la probabilité de collisions, ce qui réduit le débit. Pour remédier à ce problème, le Wi-Fi 6 utilise l'OFDMA. Grâce à l'OFDMA, une transmission ne nécessite que des parties du spectre, ce qui permet plusieurs transmissions en parallèle. Cela réduit la latence et améliore le débit dans les réseaux denses [12]

L'OFDMA divise un canal en allocations de fréquence plus petites, appelées unités de ressources (RU). Cette subdivision permet des transmissions parallèles de petites trames à plusieurs utilisateurs simultanément. Pensez à l'OFDMA comme une technologie qui divise un canal en sous-canaux plus petits pour permettre des transmissions simultanées entre plusieurs utilisateurs. Par exemple, un canal de 20 MHz peut être divisé en neuf sous-canaux plus petits permettant à un point d'accès

802.11ax de transmettre simultanément de petites trames à neuf clients 802.11ax. [Ref1] La Figure 2.2 montre comment l'AP alloue les RUs. Avec l'OFDM, l'intégralité du canal est allouée à un seul utilisateur, tandis qu'avec l'OFDMA, plusieurs utilisateurs peuvent transmettre simultanément.

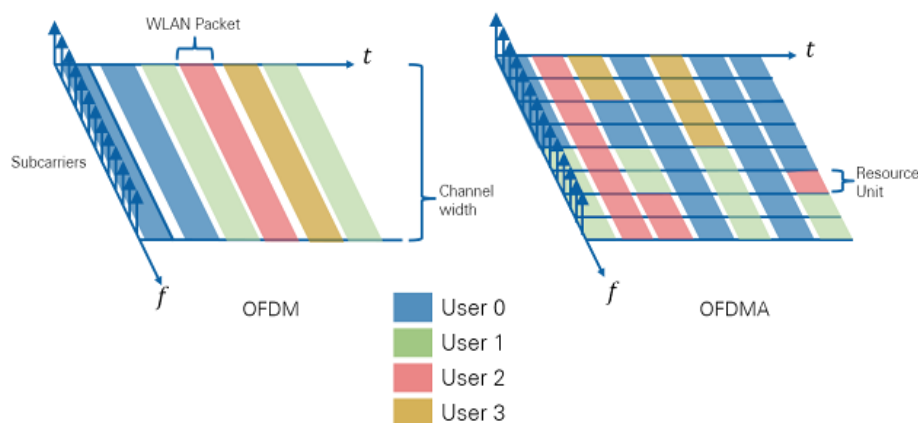


FIGURE 2.2 – Attributions de sous-porteuses avec OFDM et OFDMA

Bien que l'OFDMA est également utilisée dans les communications cellulaires LTE (Long Term Evolution) pour les transmissions multi-utilisateur en liaison descendante, le Wi-Fi 6 prend en charge les transmissions en mode multi-utilisateur à la fois en liaison montante et descendante. De plus, le matériel Wi-Fi 6 prend en charge l'OFDM pour garantir la compatibilité avec les normes 802.11a/g/n/ac.

Pourquoi utiliser l'OFDMA ?

L'intégration de l'OFDMA peut apporter les avantages suivants :

- Une utilisation plus efficace des fréquences.
- Réduction des interférences entre les cellules.
- Amélioration de la couverture dans les réseaux.

2.4 Présentation du standard IEEE 802.11be

La norme IEEE 802.11be, aussi connue sous le nom de "Wi-Fi 7", représente une avancée significative dans le domaine des réseaux sans fil avec l'objectif principal de « débit extrêmement élevé » (EHT) Extremely High Throughput. Elle promet des débits de données beaucoup plus élevés, une latence réduite, et une meilleure gestion des interférences, répondant ainsi aux exigences croissantes des utilisateurs modernes [13].

Il fonctionne sur les trois bandes de fréquences (2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz) pour maximiser l'utilisation du spectre disponible. Alors que le WiFi 6 a été conçu pour

faire face au nombre croissant d'appareils connectés, le WiFi 7 vise à offrir des vitesses exceptionnelles pour chaque appareil tout en améliorant l'efficacité.

Il propose une bande passante ultra-large de 320 MHz, le fonctionnement 4096-QAM, Multi-RU et Multi-Link pour offrir des vitesses 4,8 fois plus rapides que le WiFi 6 et 13 fois plus rapides que le WiFi 5. Cela vous permet de profiter de plus de fonctionnalités que jamais auparavant.

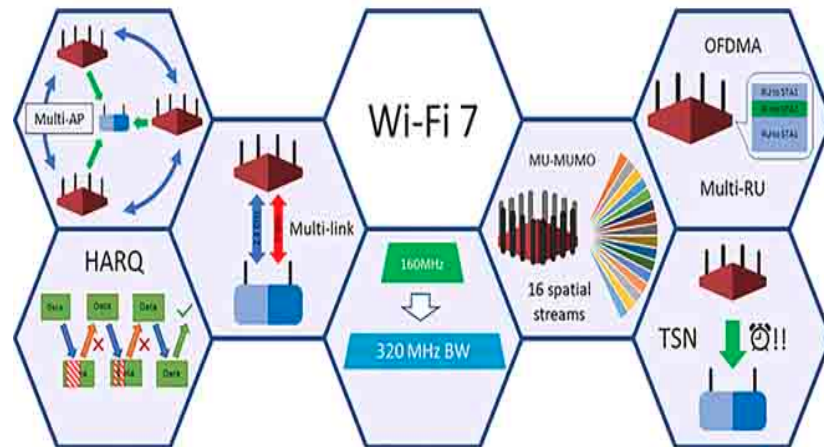


FIGURE 2.3 – Principales caractéristiques du WiFi7-802.11be

2.4.1 Caractéristiques candidates IEEE 802.11be

La norme 11be améliore le PHY de la norme 11ax en augmentant les débits nominaux grâce à une modulation jusqu'à 4K-QAM, une bande passante de 320 MHz, et jusqu'à 16 flux spatiaux en MU-MIMO. Une innovation clé est la compatibilité ascendante des formats de trame, facilitant l'intégration de nouveaux PHY et supportant divers formats dans un même réseau.

— 4K-QAM

Le 4K-QAM, ou 4096-QAM, est un schéma de modulation numérique utilisé dans les communications sans fil. Le "4K" signifie 4096 niveaux de modulation, ce qui permet de coder 12 bits par symbole (puisque $2^{12} = 4096$). Pour améliorer encore les débits de pointe, le WiFi 7 adopte ce schéma de modulation d'ordre supérieur. Cela permet à chaque symbole de transporter 12 bits au lieu de 10 bits, ce qui signifie des taux de transmission théoriques 20% plus élevés que le 1024-QAM du WiFi 6. Un taux de transmission plus élevé permet aux utilisateurs d'obtenir une efficacité de transmission plus élevée améliorant l'efficacité de la transmission, permettant de regarder des vidéos 4K/8K sans interruption, jouer à des jeux en ligne massifs sans décalage ou diffuser en direct depuis votre ordinateur personnel. Avec le 4096-QAM, le streaming s'est encore plus performant.

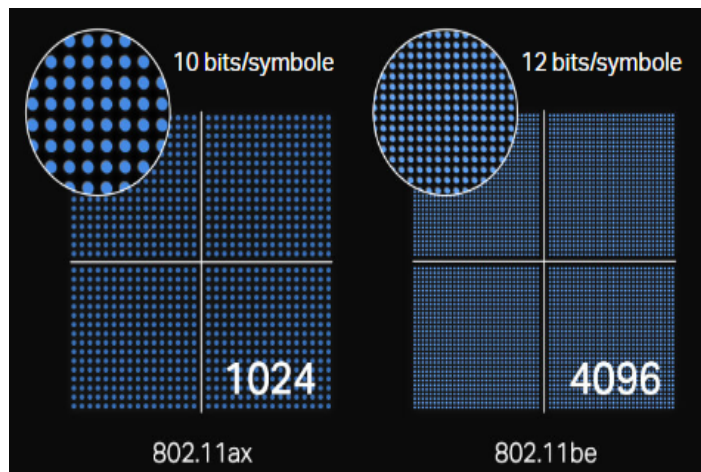


FIGURE 2.4 – Différence 1024/ 4096 QAM par symbole

— 320 MHz

En doublant la bande passante, des gains significatifs sont possibles. La bande 6 GHz, récemment disponible pour l'ISM, fournit des centaines de MHz supplémentaires pour le Wi-Fi. TGbe utilise ces fréquences avec des canaux allant jusqu'à 320 MHz, doublant ainsi le débit nominal maximal par rapport à la norme 11ax.

La norme 11be prend en charge des canaux de 160 + 160 MHz en plus des canaux de 320 MHz. Ces canaux, composés de deux canaux de 160 MHz non adjacents, facilitent la coexistence des réseaux voisins et assurent une bande passante élevée en l'absence de spectre contigu. En outre, la technologie permettra des canaux de 240/160 + 80 MHz [14].

TGbe envisage l'agrégation de bandes pour pallier les limitations des canaux larges dans des environnements denses avec des problèmes de fades sélectifs en fréquence et des contraintes de puissance des appareils. Cette méthode consiste à utiliser simultanément plusieurs liaisons établies à différentes fréquences, permettant une largeur de canal totale dépassant les 320 MHz et des débits très élevés. Les détails de cette approche sont présentés dans la section suivante.

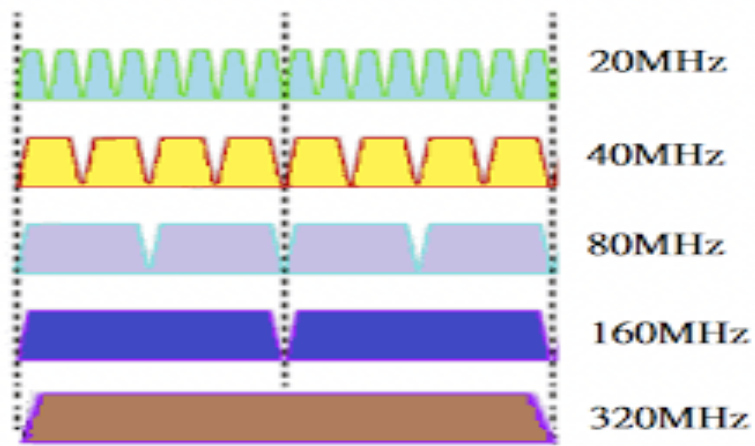


FIGURE 2.5 – Canal de transmission de 320MHz

— MU-MIMO

Le multiplexage spatial a été un facteur technologique majeur pour la norme 802.11 dans les récents cycles de standardisation, améliorant considérablement l'efficacité spectrale. La norme 802.11be continuera dans cette direction en supportant le MU-MIMO avec un total de 16 flux spatiaux (SS) répartis entre toutes les stations (STAs) planifiées, en répartissant efficacement les antennes et en envoyant une combinaison de formes d'onde, MU-MIMO peut considérablement augmenter le débit et réduire la congestion et les latences dans les réseaux saturés. Cela assure des performances rapides et stables pour l'ensemble du réseau, même en présence d'appareils plus anciens et moins rapides.

L'opération multi-lien (MLO) est une fonctionnalité innovante proposée pour l'amendement IEEE 802.11be. Cette fonctionnalité marque une transition importante vers les communications multi-lien, autorisant les nœuds à transmettre et recevoir des données simultanément sur plusieurs interfaces radio. Pour rendre cela possible, le groupe de travail 802.11be a suggéré diverses modifications de l'architecture des nœuds, des opérations de transmission et des fonctionnalités de gestion [15]. Les détails sur les différentes propositions les plus pertinentes qui sont susceptibles d'être incluses dans l'amendement IEEE 802.11be concernant la fonctionnalité MLO sont abordées dans la section suivante.

2.4.2 Différence entre la norme IEEE 802.11ax et la norme IEEE 802.11be

Technologie	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
Standard	IEEE 802.11ax	IEEE 802.11be
Débit de données théorique maximum	9,6 Gbit/s	46,1 Gbit/s
Bande de fréquence	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (Wi-Fi 6E)	2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz
Bande passante du canal	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz	Jusqu'à 320 MHz
Ordre de modulation le plus élevé	1024-QAM, OFDMA	4096-QAM, OFDMA
Nombre maximum de flux spatiaux	8x8 UL/DL, MU-MIMO	16x16 UL/DL, MU-MIMO
Points forts	<ul style="list-style-type: none"> – Capacité 4x supérieure – Amélioration de la vitesse 1,25x – Symbole OFDM 4x plus long – Largeur de canal 160 MHz – OFDMA, 8x8 MU-MIMO 	<ul style="list-style-type: none"> – 4096-QAM nouvellement introduit – Bande passante de canal plus large de 320 MHz – 16 flux spatiaux – Fonctionnement multi-liens

TABLE 2.1 – Comparaison entre les normes IEEE 802.11ax et IEEE 802.11be

2.5 Fonctionnement Multi-Liens

2.5.1 Architecture

Les dispositifs multi-liens (MLDs) remplacent les points d'accès et stations traditionnels, supportant à la fois l'opération multi-lien (MLO) et à lien unique (SLO), tandis que les anciens SLDs ne supportent que la SLO. Les MLDs offrent une instance MAC unique aux couches supérieures, avec des paramètres indépendants pour chaque interface. TGbe propose une architecture MAC à deux sous-couches comme illustré dans la figure 2.6. Les AP MLDs gèrent les AP et STA non-AP, tandis que les MLDs non-AP se connectent à plusieurs STA non-AP. Les MLDs utilisent des canaux de différentes fréquences (2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz) et possèdent des composants PHY, LMAC et UMAC, facilitant le réassemblage et le basculement via des numéros de séquence dérivés des adresses MAC [16]

Le U-MAC, partie commune de la sous-couche MAC, gère des opérations indépendantes du lien telles que l'assignation de numéros de séquence et l'agrégation/désagrégation des MSDU. Cela permet de réordonner les paquets côté récepteur pour des fragments envoyés sur différents liens. Il assure aussi des fonctions communes comme la configuration et l'authentification.

Le L-MAC, sous le U-MAC, gère chaque interface indépendamment en contrôlant l'accès au canal et en gérant les files d'accès EDCA pour organiser le trafic avant transmission. Il assure également la création et la vérification des en-têtes MAC lors des transmissions et réceptions.

Cette architecture à deux niveaux permet aux dispositifs MLO de gérer le trafic entre différents liens sans perturber les couches supérieures, mais nécessite de nouvelles méthodes d'allocation du trafic et la révision de la gestion des canaux et des transmissions multi-liens [15].

L'IEEE 802.11be propose deux modes de basculement des liens : restreint et dynamique. Le mode restreint limite les données à des liens uniques qui négocient indépendamment, tandis que le mode dynamique permet la transmission simultanée à travers plusieurs liens, améliorant ainsi l'efficacité.

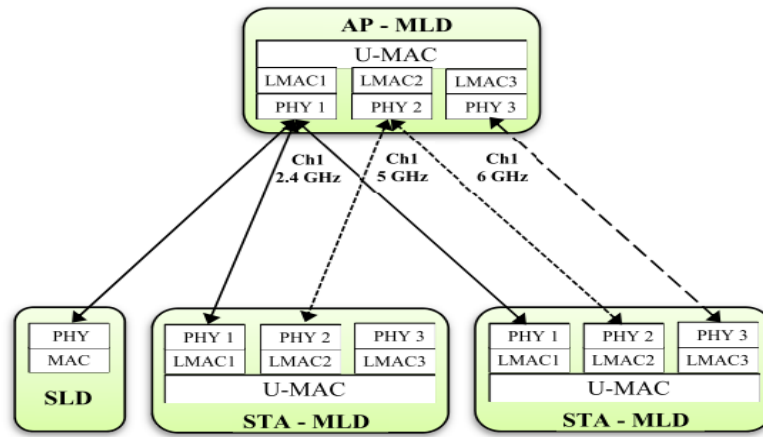


FIGURE 2.6 – Architecture multi-lien.

2.5.2 Fonctionnement Multi-Liens pour RTA

Le fonctionnement multi-liaison dans TGbe est une méthode prometteuse pour améliorer la fiabilité et réduire la latence en utilisant divers canaux. Selon le rapport RTA TIG, deux modes sont évalués : le Mode Duplication et le Mode Joint. Dans le Mode Duplication, des copies de chaque trame sont envoyées par l'émetteur sur plusieurs liens, puis supprimées une fois que le récepteur a reçu la trame, ce qui renforce la robustesse de la transmission. En revanche, dans le Mode Joint, l'émetteur distribue les trames sur les liens disponibles sans créer de copie, ce qui diminue la latence de transmission.

Les auteurs de [17] proposent un mode de duplication de paquets conditionnel où un mécanisme de liaison descendante (MLD) essaie d'abord de transmettre une trame sur un seul lien. Si cela échoue dans un délai défini, le paquet est dupliqué et une tentative est faite avec d'autres liens prioritaires. L'intervalle de temps est basé sur le budget de retard des paquets, par exemple, 60 % de ce budget comme indiqué dans [17]. Une fois que le paquet est transmis avec succès sur un lien, ses copies sont supprimées.

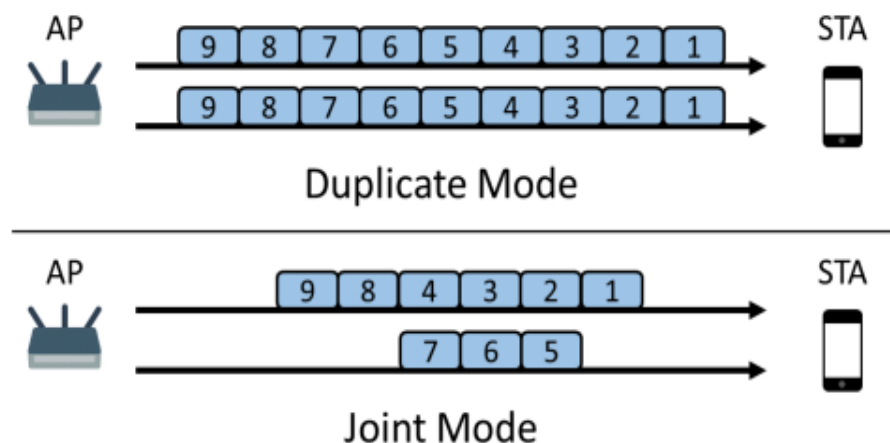


FIGURE 2.7 – Le mode duplication et le mode joint.

2.5.3 Accès aux canaux Multi-Liens

MLO permet la transmission asynchrone sur plusieurs liaisons avec des fréquences différentes, mais les antennes partagées entre dispositifs MLO posent des défis d'interférences malgré l'utilisation de canaux distincts. La proximité des canaux augmente la fuite de puissance, compliquant la transmission et la réception des données. Des solutions comme l'exploitation asynchrone et synchrone sont explorées pour réduire les interférences, bien que cette dernière diminue le débit à cause d'un accès moins fréquent au canal. Une alternative consiste à éviter les transmissions lorsque le récepteur prévu est en train de transmettre, minimisant ainsi les interférences [16].

Emission et réception simultanées (STR) et NON-STR

IEEE 802.11be introduit deux modes MLO : MLO-STR et MLO-NSTR. Comparé à SLO comme illustré dans la figure 2.8, qui suit les opérations par défaut du Wi-Fi avec une transmission séquentielle des paquets, un point d'accès à double interface radio présente des différences significatives. Dans le scénario MLO-STR, les paquets entrants sont immédiatement dirigés vers la première interface disponible, réduisant ainsi considérablement le délai pour les paquets #1, #2 et #4. En revanche, avec MLO-NSTR, des interférences parfois présentes entre les deux canaux peuvent compromettre l'efficacité des deux interfaces radio. Par conséquent, contrairement à MLO-STR, les paquets #1 et #4 ne peuvent pas bénéficier d'une minimisation du délai par rapport à SLO. IEEE 802.11be prend également en compte les variations entre les dispositifs (SLO) et MLO dans le contexte du Wi-Fi 7 :

1. Le Multi-Link Single Radio (MLSR) assure la communication séquentielle avec un seul lien, et il est compatible avec les modes MLO;

2. Les appareils Enhanced Multi-Link Single Radio (EMLSR) surveillent plusieurs liens et effectuent des transmissions/réceptions simultanées sur un seul lien à la fois. Cette fonctionnalité améliorée, intégrée au cadre MLO, permet un changement dynamique de bande, favorisant l'économie de coûts et une utilisation optimale de la puissance;
3. Les dispositifs NSTR-MLMR (Non-simultaneous Transmit-Receive Multi-Link Multi-radio) peuvent envoyer des données sur plusieurs liens de manière synchrone ou les recevoir (en mode synchrone ou asynchrone), mais ils ne peuvent pas effectuer de transmission et de réception simultanément;
4. Le Multi-Link Multi-Radio Simultané en Transmission et Réception (STR-MLMR) assure une communication simultanée sur plusieurs connexions;
5. L'Enhanced Multi-link Multi-Radio (EMLMR) adapte le multiplexage spatial en modifiant les configurations des chaînes de fréquences radio (RF) pour différentes fréquences;

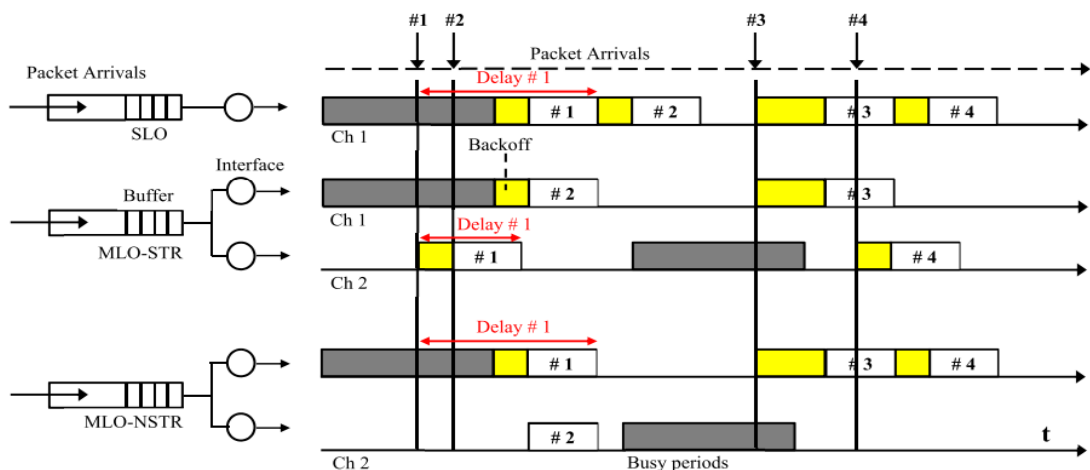


FIGURE 2.8 – Les opérations SLO, MLO-STR et MLO-NSTR.

MLO-STR comprend deux schémas : la transmission asynchrone et synchrone, comme représenté dans la Figure 2.9. Dans la transmission asynchrone, chaque STA dans un MLD accède à son lien de façon indépendante, ce qui permet des trames montantes et descendantes simultanées à travers les réseaux. Ce schéma est adapté aux MLD Synchrones Transmit-Receive (STR) mais il entrave les MLD non-STR en raison des interférences.

L' MLO synchrone permet d'éviter la perte de puissance d'un dispositif émetteur vers les autres, même si cela entraîne une baisse du débit due à un accès moins fréquent au canal. Bien qu'initialement conçue pour les configurations MLD non-STR, cette approche peut être adaptée aussi bien aux configurations STR qu'aux configurations non-STR, réduisant ainsi la perte de puissance RF entre les liens. Cependant,

en tenant compte des besoins en canaux inutilisés, la transmission asynchrone pourrait s'avérer plus efficace pour une utilisation multi-canal.

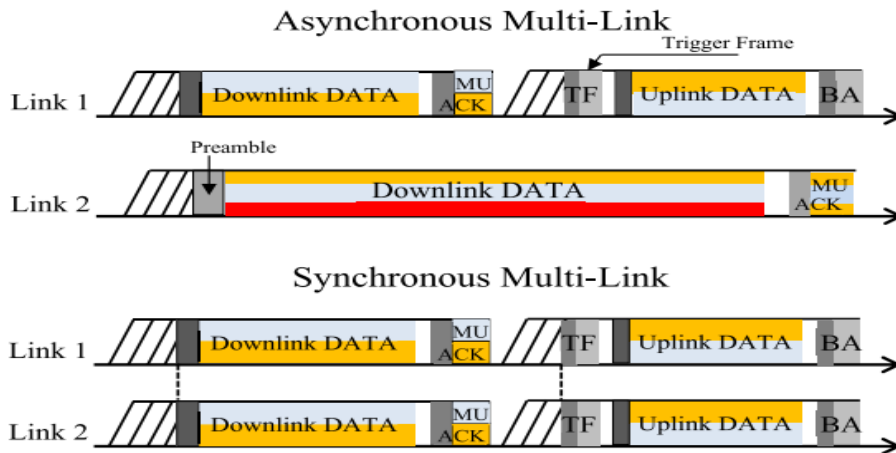


FIGURE 2.9 – Opération multi-lien asynchrone vs. synchrone.

2.6 Synthèse sur les travaux MLO

Dans cette section, nous présentons une synthèse de plusieurs travaux de recherche sur la future norme IEEE 802.11be, qui repose sur la technologie Multi-Link.

ALSADG A. et al [16] : Il s'agit d'un Survey explorant en profondeur l'opération multi-lien (MLO) introduite dans la norme IEEE 802.11be. Le document présente un examen détaillé des concepts de MLO, y compris la multi-connectivité, l'accès aux canaux multi-liens, MLO et économie d'énergie, etc. Les auteurs discutent également des défis techniques associés à MLO, tels que la gestion des interférences et la consommation d'énergie accrue, et proposent des solutions potentielles pour les surmonter. En outre, l'article analyse des études antérieures et des résultats empiriques pour évaluer l'efficacité de MLO dans divers scénarios d'utilisation, mettant en évidence ses bénéfices et limitations.

En comparaison avec d'autres articles dans le domaine, cette enquête se distingue par sa couverture exhaustive et systématique de l'opération multi-lien dans les réseaux Wi-Fi. Tandis que de nombreuses recherches se concentrent sur des aspects spécifiques de MLO, **ALSADG A. et al. [16]** Offrent une vue d'ensemble intégrée qui englobe à la fois les fondements théoriques et les implications pratiques de cette technologie. L'article propose également des perspectives sur les futurs travaux de recherche nécessaires pour optimiser l'utilisation de MLO, en particulier dans des environnements à haute densité et pour des applications exigeantes en bande passante. Ainsi, ce travail contribue de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine des réseaux sans fil en mettant en lumière les potentialités et les défis de l'opération multi-lien, et en fournissant une ressource précieuse pour les chercheurs et les professionnels du secteur.

Taewon Song and Taeyoon Kim [18] : Cet article constitue une contribution majeure en fournissant une analyse comparative détaillée des protocoles MAC multi-liens multi-radio synchrones pour les réseaux WLAN à très haut débit IEEE 802.11be. En utilisant une approche de modélisation par chaîne de Markov, les auteurs évaluent les performances des différents protocoles, mettant en évidence leurs avantages et inconvénients. Cette analyse approfondie permet non seulement de comprendre les performances des protocoles MAC dans des environnements multi-liens, mais également de guider les ingénieurs dans l'optimisation des déploiements de réseaux Wi-Fi 7 en termes de fiabilité, efficacité spectrale et gestion des interférences (Song & Kim, 2023).

Le modèle de chaîne de Markov a permis de capturer les dynamiques des protocoles dans divers états de réseau et de simuler des scénarios réalistes pour mesurer le débit, la latence, le taux de collision et l'efficacité spectrale. En comparant plusieurs protocoles, ils ont pu identifier les avantages et les limitations de chacun, offrant des informations précieuses pour l'optimisation des réseaux IEEE 802.11be. Les résultats montrent comment les protocoles MAC peuvent être adaptés pour maximiser les performances dans différentes conditions de réseau, soulignant les compromis entre débit et latence, ainsi que l'utilisation de la bande passante (Song & Kim, 2023).

Gianluca Fontanesi [19] : Cet article introduit un nouveau mécanisme pour gérer l'accès aux canaux dans le spectre non licencié de manière non concurrentielle. ConMLO, diffère de la méthode traditionnelle basée sur la contention où les dispositifs concurrents peuvent causer des collisions et des inefficacités. Pour mettre en œuvre ConMLO, les auteurs utilisent l'opération multi-liaison (MLO) de Wi-Fi 7, permettant à chaque liaison d'accéder indépendamment aux canaux disponibles. Ainsi, un canal est toujours prêt pour la transmission, ce qui maintient une séquence continue de canaux disponibles et optimise l'utilisation du spectre sans fil.

L'objectif principal est de vérifier l'applicabilité de ConMLO, sa capacité à conserver les ressources spectrales. Pour cela, des mesures de trafic de données ont été réalisées dans un stade de football bondé pour simuler une forte occupation du spectre. Les résultats de l'étude montrent que ConMLO garantit efficacement l'acquisition continue des canaux, même en cas de forte occupation du spectre, tout en restant équitable par rapport aux méthodes existantes. En résumé, ConMLO offre un accès efficace aux canaux dans le spectre non licencié, évitant les problèmes de contention et améliorant les performances globales du réseau sans fil.

Pour remédier aux retards imprévisibles et au manque de fiabilité dus à la contention d'accès au canal, nous proposons ConMLO, un mécanisme visant à fournir un accès continu et ininterrompu au canal en effectuant un saut de fréquence opportuniste à travers différents liens/canaux du spectre disponible. ConMLO est basé sur la fonctionnalité existante MLO de Wi-Fi 7, mais, contrairement aux méthodes MLO existantes, il coordonne la contention d'accès au canal à travers les différents

liens pour garantir la continuité de l'acquisition du canal. La figure 2.10 illustre le fonctionnement à la fois de Wi-Fi 7 MLO (en haut) et de ConMLO (en bas) pour un dispositif multi-lien (MLD) fonctionnant sur deux liens différents.

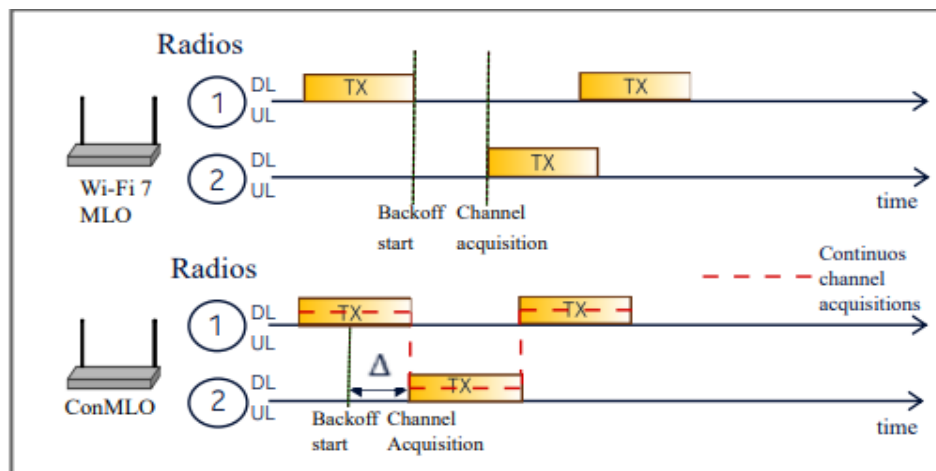


FIGURE 2.10 – Le fonctionnement du Wi-Fi 7 MLO et du ConMLO proposé. []

Le " Δ " (Delta) dans ce contexte représente un intervalle de temps ou une marge de temps spécifique. ConMLO anticipe l'accès au canal en commençant à accéder au canal sur un autre lien avant que l'accès actuel ne se termine, grâce à ce Delta. Cela signifie que ConMLO prévoit et prépare l'utilisation d'un nouveau canal juste avant la fin de la transmission en cours, assurant ainsi une transition fluide et continue sans attendre de redémarrer l'accès au canal, comme le fait Wi-Fi 7 MLO.

2.7 Problèmes rencontrés en MLO

L'opération multi-lien (MLO) représente une avancée significative pour améliorer la performance, la latence et la stabilité des réseaux Wi-Fi. Toutefois, une coordination efficace des multiples connexions reste un défi majeur à surmonter. Cette section explore les défis liés à l'implémentation de MLO et les complexités associées.

Les mécanismes d'apprentissage multi-liens (ML) sont essentiels pour permettre aux appareils de prendre des décisions de connexion basées sur la qualité anticipée. Pour optimiser les bénéfices de ML, il est crucial de simplifier l'analyse des canaux et l'association des appareils tout en minimisant les coûts.

La recherche actuelle sur l'intégration de ML avec MLO se concentre principalement sur l'allocation des ressources et la sélection des canaux. Cependant, des aspects critiques tels que la gestion de l'énergie, l'analyse en temps réel (RTA) et la coexistence avec les appareils hérités nécessitent encore des études approfondies.

Les stratégies conservatrices d'évitement des interférences peuvent sous-utiliser le spectre disponible. Des mécanismes de recul opportunistes pourraient améliorer

rer l'efficacité spectrale, tandis que l'agrégation d'opportunités de transmission (TXOP) par MLO nécessite une gestion équitable des canaux pour tous les types de connexions.

Les techniques d'équilibrage de charge pour MLO dans les réseaux WLAN doivent être évaluées de manière exhaustive pour optimiser le trafic montant et descendant. L'anticipation des dynamiques et des schémas de trafic à l'aide de ML pourrait considérablement améliorer les performances des réseaux Wi-Fi.

Malgré ses promesses, l'adoption généralisée de MLO dans les réseaux Wi-Fi nécessite encore des recherches approfondies pour surmonter les défis mentionnés et maximiser son potentiel. Le tableau ci-dessous synthétise les principaux problèmes identifiés ainsi que les solutions potentielles.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu de la norme IEEE 802.11ax, ainsi que l'une des principales technologies conçues pour sa mise en œuvre qui est l'OFDMA, en premier lieu. En outre, l'évolution vers Wi-Fi 7 apporte des avancées significatives grâce à des innovations telles que le 4K-QAM, une largeur de bande de 320 MHz, le MU-MIMO et, en particulier, l'opération multi-lien (MLO). De plus, une synthèse sur quelques travaux de recherche basés sur la fonctionnalité MLO dans la norme IEEE 802.11be est présentée. Enfin, une conclusion résumant ce chapitre.

Dans le chapitre suivant, le dernier, nous présentons une évaluation des performances avec des politiques d'allocation de trafic qui tiennent compte de la congestion des liens et adaptent la répartition du trafic en temps réel. L'objectif est de réduire la latence, d'augmenter le débit global et d'améliorer la fiabilité du réseau pour les applications exigeantes.

SIMULATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

3.1 Introduction

La méthode MLO est considérée comme l'une des clés permettant l'amélioration des performances des réseaux Wi-Fi grâce à l'utilisation simultanée de multiples liaisons radio.

Cette méthode permet une utilisation plus efficace des ressources de fréquence disponibles, en évitant la congestion et supportant un grand nombre d'utilisateurs et d'applications exigeantes, comme la réalité augmentée.

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter la méthode MLO afin d'améliorer les performances des réseaux Wi-Fi, par conséquent, d'augmenter le débit de transmission. Une explication détaillée de la méthode MLO est présentée en premier, suivie des politiques d'allocation de trafic [20]. Une implémentation d'une comparaison des méthodes d'allocation du trafic est faite. Une explication de simulation et évaluation de performances de la fonctionnalité expliquée sera décrite en second.

3.2 Opération Multi-Liens

L'idée de l'agrégation de liaisons multiples (MLO), introduite dans l'amendement 802.11be, repose sur l'utilisation de plusieurs interfaces radio pour transmettre et recevoir des données en même temps. Ces interfaces peuvent fonctionner simultanément sur les bandes de fréquences de 2,4, 5 et 6 GHz [17], [21]. Etant donné que l'MLO utilise plusieurs connexions distinctes pour la transmission et la réception, des ajustements ont été proposés pour contrôler les mécanismes d'accès aux canaux de ces connexions. Divers modes de transmission ont été suggérés par le groupe de travail TGbe.

Le mode de transmission asynchrone est privilégié pour l'agrégation de liaisons multiples (MLO) en raison de ses performances optimales. Il permet aux nœuds de transmettre et de recevoir des paquets via plusieurs interfaces en même temps.

Le concept de périphérique à liaisons multiples (MLD) est également introduit dans l'amendement 11be. Un MLD est un dispositif doté de plusieurs interfaces physiques (PHY) qui partagent la même interface avec la couche de contrôle de liaison

logique (LLC). En d'autres termes, un MLD est un périphérique qui met en œuvre l'agrégation de liaisons multiples (MLO).

Pour implémenter l'agrégation de liaisons multiples (MLO), l'amendement 11be divise la couche de contrôle d'accès au support (MAC) en deux sous-couches [22] : la sous-couche Lower MAC, spécifique à chaque interface et gérant les opérations liées à la liaison, et la sous-couche Upper MAC, partagée entre les interfaces et s'occupant des opérations d'agrégation, de numérotation, et de fragmentation des données. La distribution des données entre les liaisons dans l'Upper MAC dépend de la politique d'allocation de trafic, propre à chaque implémentation, qui est détaillée dans la section suivante.

3.3 Politiques d'allocation du trafic aux liens

Le mappage du trafic vers les liaisons s'effectue dans la couche Upper MAC selon une politique d'allocation du trafic. Lorsque des données à transmettre arrivent dans un tampon MAC, elles sont encapsulées dans des MPDU, et les émetteurs MLD sont informés pour commencer leurs processus d'accès au canal indépendamment. En fonction de la politique en place, la couche Upper MAC attribue un certain nombre de MPDU du tampon à chaque liaison pour transmission.

Les politiques abordées dans ce chapitre se divisent en deux catégories : les politiques informées et non informées. Les politiques non informées, telles que les politiques Avidé (Greedy) et Charge Uniforme (Uniform-Load), sont simples et ne tiennent pas compte de l'état du système en temps réel. En revanche, les politiques informées sont dynamiques et utilisent des informations système pour répartir le trafic entre les liaisons. Les politiques informées discutées dans ce chapitre incluent les politiques Sensible à la Congestion (Congestion-Aware) et Sensible aux Conditions (Condition-Aware). Voici les définitions des politiques implémentées :

1. **Politique Avidé** : Cette politique alloue le nombre maximal autorisé de MPDU depuis le tampon MAC vers le premier lien qui réussit à accéder au médium.
2. **Politique Charge Uniforme (Uniform-Load Policy)** : Cette approche distribue de manière équitable les MPDU stockés dans le tampon MAC entre les différentes liaisons radio. Si l'MLO utilise i liaisons et que n MPDU sont en attente dans le tampon MAC, alors chaque lien reçoit un AMPDU composé de $\lceil n/i \rceil$ MPDUs agrégés et alloués à chaque lien.
3. **Politique Sensible à la Congestion (Congestion-Aware Policy)** : Cette politique vise à équilibrer la charge du trafic en utilisant des estimations de congestion pour chaque lien. La congestion d'un lien est mesurée par le temps d'occupation du canal, qui représente la fraction de temps pendant laquelle le canal est occupé au cours d'une période spécifique appelée Période de Mise à Jour [23].

La politique distribue un ratio de paquets du tampon vers un lien selon l'équation suivante :

$$\text{Ratio de paquets} = \text{Temps libre du lien} / \text{Temps libre total};$$

Le temps libre total est la somme des valeurs de temps libre de tous les liens. Le temps libre sur chaque lien est calculé comme indiqué ci-dessous :

$$\text{Temps libre du lien} = \text{Période de mise à jour} - \text{Temps d'occupation du lien};$$

- 4. Politique Sensible aux Conditions (Condition-Aware Policy) :** Certains liens peuvent être fortement congestionnés tout en ayant la capacité de transmettre à des débits élevés. Une approche prenant en compte le débit de transmission, similaire à la politique Sensible à la Congestion, envisage également l'impact futur du débit pour chaque lien.

Le paramètre "Bits d'information par période" est utilisé pour calculer le ratio de paquets par lien, représentant le nombre estimé de bits d'information qu'un lien peut transmettre pendant une période de mise à jour de congestion (par exemple, 0,5 s, conforme à la politique Sensible à la Congestion). Les bits d'information par période pour chaque lien sont calculés comme suit :

$$\text{Bits d'information par période} = \text{Temps libre du lien} \cdot \text{Débit de données};$$

Le ratio de paquets alloués pour chaque lien est alors calculé comme suit :

$$\text{Ratio de paquets} = \text{Bits d'information par période} / \text{Total des bits d'information par période};$$

3.4 Simulation

Méthodologie

Nous avons étudié un scénario à cellule unique avec un seul point d'accès (AP) central et plusieurs stations (STAs) positionnées de manière aléatoire dans un rayon maximal de 10 m par rapport à l'AP, comme illustré dans la Figure 3.1.

Dans nos simulations, toutes les STAs sont activées dès la première seconde et restent actives pendant toute la durée de simulation de 50 secondes. Chaque configuration a été simulée avec différentes graines aléatoires pour garantir la validité statistique. Les paramètres système spécifiques utilisés sont répertoriés dans le Tableau 3.3. D'autres paramètres sont utilisés et qui sont mentionnés dans les tableaux .

Paramètre	Valeur
Max. Longueur de l'AMPDU	5.484 ms
Max. nombre de MPDU dans un AMDU	64 MPDUs
Algorithme de sélection MCS	Minstrel
Puissance de transmission	20 dBm
Taille de la charge utile MPDU	1500 B
Modèle de canal sans fil	TGn model D [13]
Fréquences porteuses	
SL	5.5 GHz
MLO	5.2, 5.5, 6.1, and 6.5 GHz
Bande(s) passante(s) de liaison	
SL	80 and 160 MHz
MLO	2×40, 4×20, and 2×80 MHz

TABLE 3.1 – Paramètres du système [20].

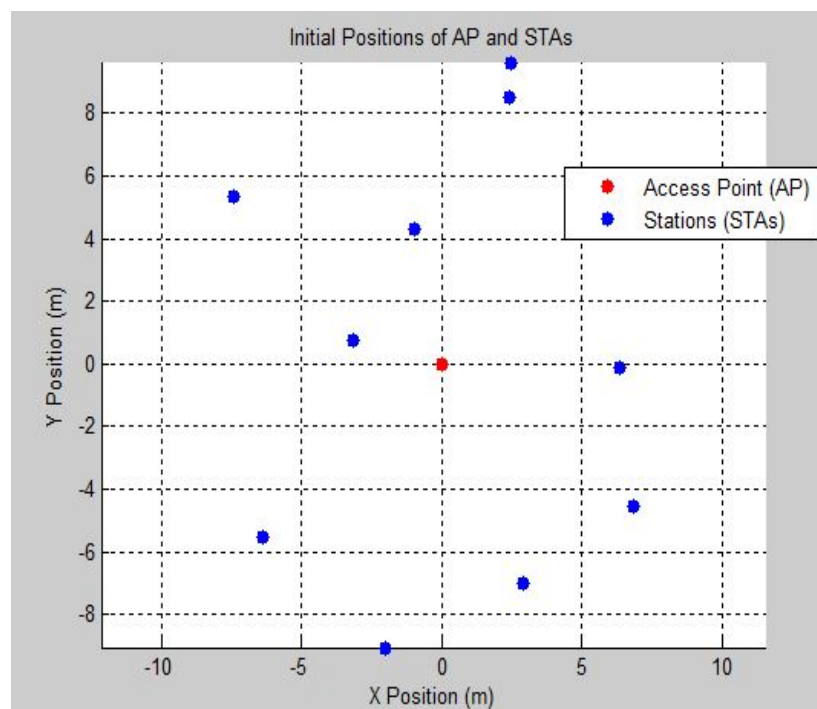


FIGURE 3.1 – Le déploiement de l'AP et des STAs dans le scénario à cellule unique.

Le principal indicateur de performance (KPI) que [20] ont souhaité d'évaluer est le nombre maximum de STAs que le Wi-Fi peut supporter, en tenant compte des exigences de trafic en réalité augmentée (AR). Par conséquent, enregistrer les valeurs de retard pour chaque STA et chaque flux de données dans chaque simulation.

Après collecte des données pour chaque flux de données et STA, [20] ont évalué la conformité aux exigences de l'application. En calculant les retards au 99e centile pour chaque STA dans une configuration avec m STAs, et vérifier si le pire retard respecte les limites fixées. Cela détermine si le système peut efficacement supporter

au moins m STAs dans la simulation.

Dans notre implémentation, et à travers plusieurs simulations, nous avons pu calculer comme le montre la Figure 3.2, les CCDF du retard du flux vidéo DL lors d'une simulation avec 6 STA. Les retards devraient être inférieurs à 0,01 au 99e percentile pour respecter les limites fixées. Cette analyse suggère que le système Wi-Fi peut supporter 6 STAs avec SL ou d'autres politiques MLO. Le CCDF du retard des deux autres flux UL de pose/contrôle et de CCDF du retard du flux vidéo UL sont aussi présentés par [20] lors d'une simulation avec 6 STAs comme le montre la Figure 3.3. En conséquence, les retards les plus critiques sont observés dans le flux DL, ce qui permet de baser l'évaluation du KPI sur ce flux uniquement dans nos simulations.

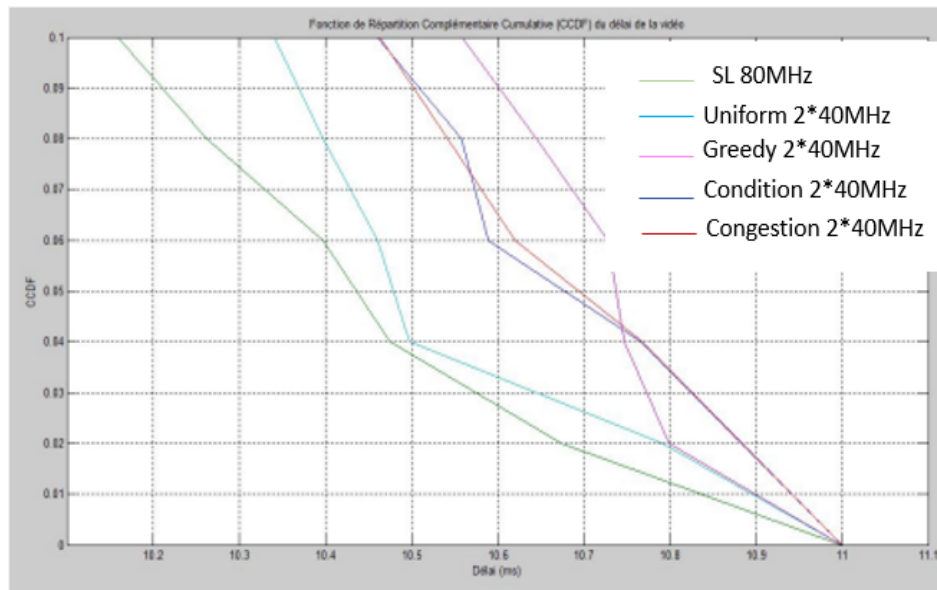


FIGURE 3.2 – Tracé CCDF du retard du flux vidéo DL lors d'une simulation avec 6 STAs, avec SL et politiques MLO.

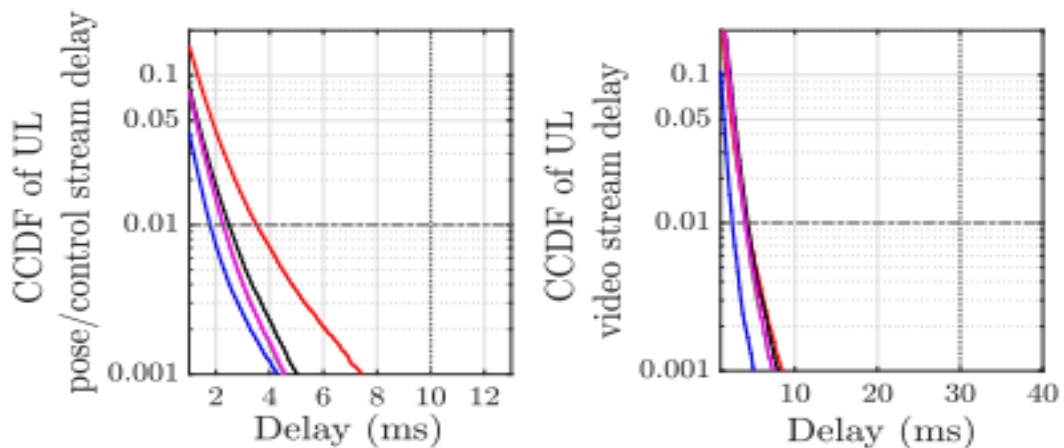


FIGURE 3.3 – Tracés CCDF des valeurs de retard pour chaque flux de données lors d'une simulation avec 6 STAs, avec SL et politiques MLO [20].

3.5 Résultats et analyses

Les détails sur le logiciel utilisé, les paramètres PHY et MAC, ainsi que les résultats de la simulation, sont présentés dans cette section.

3.5.1 Logiciel utilisé

Le logiciel que nous avons utilisé pour implémenter notre méthode de calcul des cdf du retard du flux vidéo DL lors d'une simulation avec 6 STAs. Notre implémentation est écrite en langage MATLAB (Matrix Laboratory) sous le système Windows. Le choix de ce langage est dû à sa facilité, sa visualisation et sa simplicité. Le langage MATLAB est un langage qui inclut des instructions et des structures de haut niveau, tout en produisant un code très efficace en termes de performance. Il est aussi largement utilisé pour les simulations et l'analyse de données. En effet, en raison de sa popularité, de ses fonctionnalités étendues, de sa qualité graphique, de son support technique robuste, MATLAB est un choix approprié pour les simulations.

3.5.2 Paramètres PHY et MAC utilisés

Nous avons défini un ensemble de paramètres PHY et MAC nécessaires pour calculer nos métriques d'évaluation de performance, comme indiqué dans le Tableau 3.3. Nos simulations ont été réalisées en utilisant une bande de largeur totale de 80 MHz, c'est-à-dire 80 MHz pour SL, et 2x40 pour MLO.

Paramètre	Valeur
Frame rate	60 f/s
Data rate	DL :10 Mb/s UL :3.3 Mb/s
Periodicité	16.667 ms
PDB	20 DL :10 ms UL :30 ms
Taux de réussite des paquets	99 %
Modèle de taille de paquet	
Mean	DL :21 KB UL :7 KB [13]
STD	10.5% of Mean
Max.	150% of Mean
Min.	50% of Mean
Modèle de gigue (DL uniquement)	
Mean	0 ms
STD	2 ms
Max.	4 ms
Min.	-4 ms

TABLE 3.2 – Paramètres du flux vidéo DL/UL [20].

Paramètre	Valeur
Taille du paquet	100 B
Périodicité	4 ms
PDB	10 ms
Taux de réussite des paquets	99 %

TABLE 3.3 – Paramètres de flux de pose/contrôle UL [20].

3.5.3 Résultats et discussion

Résultats

Dans la Figure 3.4, [20] ont présenté les résultats de la simulation pour différents nombres de STAs, ainsi que les pires valeurs de retard au 99^e percentile pour chaque flux de données. La largeur de bande totale est de 80 MHz, soit 80 MHz pour SL et 2x40 MHz pour MLO.

Dans [20] et dans le graphique du retard vidéo DL, on observe que toutes les politiques peuvent supporter jusqu'à 6 STAs, sauf la politique Avide qui en supporte 7. Les valeurs de retard sont plus élevées pour le flux vidéo DL par rapport aux flux UL avec le même nombre de STAs, ce qui en fait le facteur déterminant. Ainsi, même si les flux UL peuvent supporter 7 STAs (le flux vidéo UL avec la politique Avide pouvant même en supporter 8), le système n'est pas considéré comme réussi car le flux DL dépasse la limite de retard.

Dans [20] En testant d'autres configurations de liaison, notamment 4x20 MHz et 2x80 MHz, un comportement similaire est observé où le flux DL ne respecte pas les exigences de trafic AR et constitue le facteur limitant du nombre maximum de STAs supportés. Par conséquent, ces figures ne sont pas montrées afin d'éviter la redondance.

La Figure 3.5 présente un aperçu des pires valeurs de retard au 99^e percentile appartenant au flux vidéo DL, lors du soutien de 6 STAs avec différentes configurations de liaison et politiques. Cette figure montre qu'avec une configuration de liaison de 2x40 MHz, les politiques Uniforme, Congestion et Condition ont des valeurs de retard plus élevées que SL, la politique Avide ayant la valeur de retard la plus faible. Augmenter le nombre de liaisons utilisant la même largeur de bande, c'est-à-dire utiliser 4 liaisons avec 20 MHz chacune, donne en général des valeurs de retard plus faibles pour MLO. Un effet similaire peut être observé en augmentant la largeur de bande à 160 MHz.

On peut déduire de cette figure que la politique Avide atteint les valeurs de retard les plus basses par rapport aux autres politiques, et avec différentes configurations de liaison.

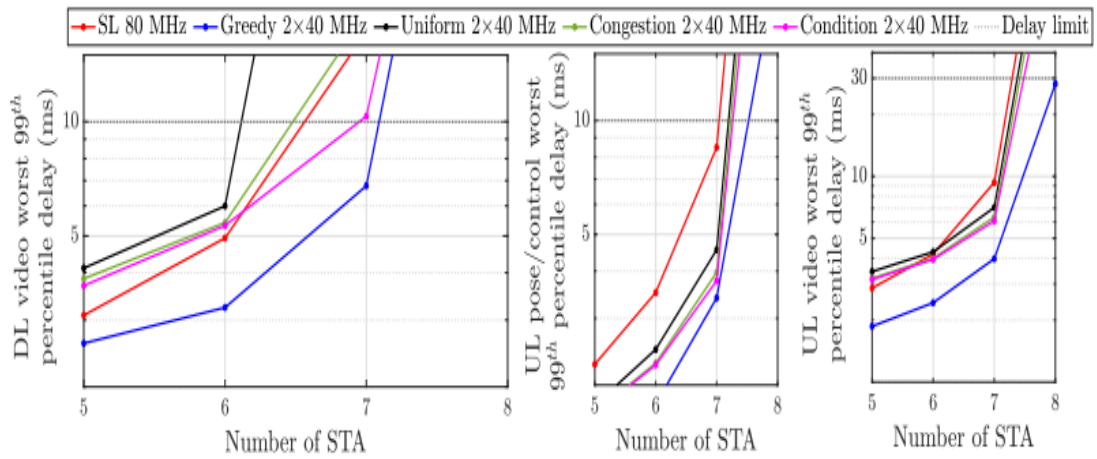


FIGURE 3.4 – Pires valeurs de retard au 99e percentile pour chaque flux de données avec différentes politiques tracées en fonction du nombre de STAs [20].

Sachant que la largeur de bande de liaison est de 80 MHz pour SL et de 2x40 MHz pour MLO.

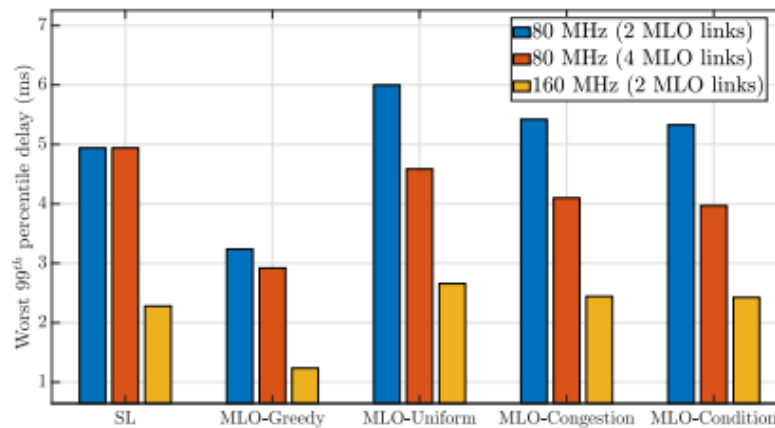


FIGURE 3.5 – Les pires valeurs de retard au 99e percentile pour le flux DL lors de la simulation avec 6 STAs, utilisant SL et différentes politiques MLO [20].

La Figure 3.6 compare les performances de SL et MLO selon différents paramètres. Avec une configuration de lien de 2x40 MHz, la politique Avide (Greedy) de MLO supporte jusqu'à 7 STAs, tandis que SL et les autres politiques MLO n'en supportent que 6. En augmentant le nombre de liaisons à quatre, MLO obtient un gain d'environ 17% par rapport à SL. Pour une bande passante totale de 160 MHz, les politiques Avide et Condition de MLO peuvent prendre en charge jusqu'à 10 STAs, tandis que SL ne supporte que 8 STAs.

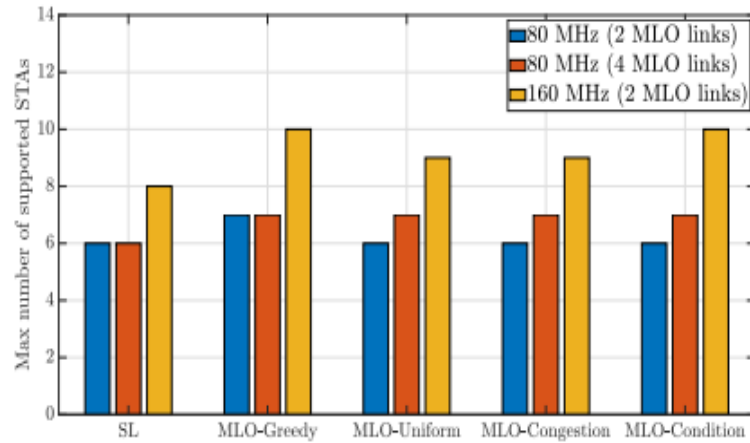


FIGURE 3.6 – Le nombre maximum de STAs pouvant être pris en charge par chaque politique et configuration de lien [20].

Discussion des résultats

Nous avons observé que, dans certains cas, il peut arriver qu'un des liens n'obtienne pas l'accès au support dans un délai raisonnable. Ainsi, les paquets qui étaient censés être transmis sur ce lien resteront en attente dans le tampon.

Lorsque des confirmations de bloc sont reçues sur d'autres liens, la politique recommence et les paquets restants sont redistribués entre les liens. Ce processus peut se répéter avec une certaine probabilité jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un ou deux paquets dans le tampon, pouvant être transmis dans le même AMPDU. Ce comportement peut conduire à des valeurs de retard acceptables. Cependant, lorsque l'environnement devient plus congestionné, par exemple avec l'ajout de STA, la probabilité de collisions et de blocage de canal augmente.

En conséquence, les paquets subissent des retards dépassant les limites requises à cause de délais d'attente plus élevés, ce qui entraîne une dégradation des performances. Avec la politique Greedy, un seul accès au canal est nécessaire pour transmettre la trame d'application via un AMPDU, réduisant ainsi la sensibilité à un accès au canal peu fiable.

De l'analyse des SAP (politiques d'accès simultané), nous concluons que ces politiques peuvent rendre les transmissions plus vulnérables au blocage du canal. Cependant, MLO utilisant une politique judicieusement choisie peut desservir plus de STA AR que SL, comme le montre la Figure 6. MLO peut obtenir des valeurs de retard plus faibles et est moins affecté par l'augmentation du nombre de STA grâce à l'accès et à la transmission parallèles.

3.6 Conclusion

L'utilisation efficace du MLO dans la norme IEEE 802.11be permet d'améliorer la performance et la fiabilité du réseau et de réduire la latence. L'objectif de cette étude est de réduire la latence avec MLO qu'avec SL.

Nous avons détaillé au cours de ce chapitre, le fonctionnement de la méthode MLO, tout en soulignant les différentes politiques d'allocation de trafic, et une partie simulation est également expliquée afin d'évaluer la performance du MLO avec différentes configurations de liens et politiques. Evidemment, les résultats donnés par la simulation [20] des deux méthodes MLO et SL affirment que la méthode étudiée MLO est plus performante et efficace que SL en augmentant le débit et en réduisant la latence.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce mémoire de Master, nous avons présenté les différentes évolutions des normes visant à améliorer le débit physique et théorique, développées par le groupe de recherche IEEE 802.11. Nous avons particulièrement porté notre attention sur la dernière norme en cours de normalisation, l'IEEE 802.11be, dédiée aux réseaux locaux sans fil (WLAN) à débit Extrêmement Élevé.

Comme présenté dans le chapitre 2, la norme EHT introduit diverses clés pour atteindre ses objectifs. Cela a conduit à l'émergence de différentes problématiques, chacune traitant un de ces objectifs. Pour notre part, nous nous sommes concentrés sur l'un des objectifs fondamentaux de la norme IEEE 802.11be qui est l'MLO.

D'après l'étude de différents problèmes traités en MLO, des politiques d'allocation de trafic dans [20] ont été proposées pour éviter la congestion et permettant l'accès à plusieurs utilisateurs simultanément sur les différentes interfaces radio qui peuvent être réparties sur différentes bandes de fréquences notamment 2.4 GHz, 5GHz et 6GHz, et nous avons pu établir une implémentation de la méthode calculant le CCDF du retard du flux vidéo DL lors d'une simulation avec 6 STAT, avec SL et politiques MLO.

Les dispositifs Wi-Fi exploitant l'MLO sont attendus pour offrir des débits maximaux plus élevés, une latence réduite et une fiabilité accrue. En allant de ce principe, et lors de l'utilisation de l'MLO, les flux de trafic émis sont dirigés vers divers liens selon une politique préétablie d'allocation du trafic, ce qui est crucial pour optimiser les performances de l'MLO. Ainsi, il est recommandé d'évaluer les performances de l'MLO. Pour ce faire, des différentes stratégies d'allocation de trafic sont implémentées dans [20] afin d'évaluer les performances de MLO comparées à SL dans le contexte des applications de réalité augmentée (AR).

En résumé, afin de tirer profit des performances de la norme de future IEEE 802.11be, l'exploitation de la principale fonctionnalité MLO qui baptise l'agrégation des liens s'avère cruciale pour offrir un débit utilisateur meilleur précisément dans les zones denses et l'adaptation des applications temps réel.

Dans la continuité de nos travaux de mémoire de Master, nous envisageons les perspectives suivantes :

- L'équilibrage de charge dans les réseaux WLAN : MLO nécessite encore des recherches approfondies pour déterminer la meilleure stratégie. Il est crucial d'explorer comment MLO peut être adapté au trafic montant, qui diffère significativement du trafic descendant. Les stratégies d'équilibrage de charge peuvent tirer parti de l'apprentissage automatique pour anticiper le trafic à venir et les évolutions du réseau, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour optimiser les performances et l'efficacité énergétique.

- Fourniture garantie de la QoS basée sur l'apprentissage automatique.

- Gestion de l'alimentation : Les appareils mobiles fonctionnant sur batterie ont une durée de vie limitée. En plus de perfectionner la conception des batteries, il est essentiel d'améliorer les mécanismes d'économie d'énergie. Les nouvelles caractéristiques de l'EHT, comme les opérations multi-liens et la collaboration multi-AP, pourraient significativement augmenter la consommation d'énergie des appareils EHT.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Yang Xiao and Jon Rosdahl. Performance analysis and enhancement for the current and future ieee 802.11 mac protocols. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 7(2) :6–19, 2003.
- [2] Dominique Dhoutaut. *Etude du standard IEEE 802. 11 dans le cadre des réseaux ad hoc*. PhD thesis, Lyon, INSA, 2003.
- [3] Nada Chendeb Taher. *Modélisation analytique et contrôle d’admission dans les réseaux 802.11 e pour une maîtrise de la Qualité de Service*. PhD thesis, Université d’Evry-Val d’Essonne, 2009.
- [4] Guy Pujolle. *Les réseaux*. Editions Eyrolles, 2014.
- [5] Mohamad El Masri. Contribution à la qualité de service dans les réseaux d’accès sans-fil. 2009.
- [6] Vipin Kumar and Navneet Malik. Dynamic group key management technique in context of modern iot applications. In *2021 International Conference on Computing Sciences (ICCS)*, pages 19–24. IEEE, 2021.
- [7] Miao Wu, Ting-Jie Lu, Fei-Yang Ling, Jing Sun, and Hui-Ying Du. Research on the architecture of internet of things. In *2010 3rd international conference on advanced computer theory and engineering (ICACTE)*, volume 5, pages V5–484. IEEE, 2010.
- [8] Handong Zhang and Lin Zhu. Internet of things : Key technology, architecture and challenging problems. In *2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, volume 4, pages 507–512. IEEE, 2011.
- [9] Albrecht Schmidt and Kristof Van Laerhoven. How to build smart appliances? *IEEE personal communications*, 8(4) :66–71, 2001.
- [10] Maryline Chetto and Audrey Queudet. *Systèmes temps réel autonomes en énergie*, volume 2. ISTE Group, 2017.
- [11] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee et al. Ieee standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements part 11 : Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11^*, 2007.
- [12] Erfan Mozaffariahrar, Fabrice Theoleyre, and Michael Menth. A survey of wi-fi 6 : Technologies, advances, and challenges. *Future Internet*, 14(10) :293, 2022.
- [13] Alain Mourad, Per Hjalmar Lehne, Ole Grøndalen, Antonio De La Oliva, and La Oliva. Deliverable d2. 1 trends, status and plans for advanced.

- [14] S Park, E Park, J Kim, J Choi, and K Ryu. Multi-ap transmission procedure, document ieee 802.11-19/0804r0, 2019.
- [15] Alvaro López-Raventós and Boris Bellalta. Multi-link operation in ieee 802.11 be wlans. *IEEE Wireless Communications*, 29(4) :94–100, 2022.
- [16] Alsadg A Abdalhafid, Shamala K Subramaniam, Zuriati A Zukarnain, and Fah-rul H Ayob. Multi-link operation in ieee802. 11be extremely high throughput : A survey. *IEEE Access*, 2024.
- [17] Evgeny Khorov, Ilya Levitsky, and Ian F Akyildiz. Current status and directions of ieee 802.11 be, the future wi-fi 7. *IEEE access*, 8 :88664–88688, 2020.
- [18] Taewon Song and Taeyoon Kim. Performance analysis of synchronous multi-radio multi-link mac protocols in ieee 802.11 be extremely high throughput wlans. *Applied Sciences*, 11(1) :317, 2020.
- [19] Gianluca Fontanesi, Francesc Wilhelmi, and Lorenzo Galati-Giordano. Continuous multi-link operation : A contention-free mechanism for the unlicensed spectrum. *arXiv preprint arXiv :2405.09390*, 2024.
- [20] Molham Alsakati, Charlie Pettersson, Sebastian Max, Vishnu Narayanan Moothedath, and James Gross. Performance of 802.11 be wi-fi 7 with multi-link operation on ar applications. In *2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE, 2023.
- [21] Cailian Deng, Xuming Fang, Xiao Han, Xianbin Wang, Li Yan, Rong He, Yan Long, and Yuchen Guo. Ieee 802.11 be wi-fi 7 : New challenges and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4) :2136–2166, 2020.
- [22] Yonggang Fang, B Sun, H Zhiqiang, and N Li. Multi-link architecture and requirement discussion. *Sep*, 15 :19, 2019.
- [23] Amit P Jardosh, Krishna N Ramachandran, Kevin C Almeroth, and Elizabeth M Belding-Royer. Understanding congestion in ieee 802.11 b wireless networks. In *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement*, pages 25–25, 2005.