

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département d'Informatique

Mémoire de Fin de Cycle

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

Option : Administration et Sécurité des Réseaux

Thème :

Optimisation du WiFi pour les Systèmes de l'Assistance à l'Autonomie à Domicile

Réalisé par:

M^{lle} CHALALI Lynda

M^{lle} DJEFFANE Ikram

Encadré par :

M^{me} MAMMERY Souhila

Université de Béjaïa.

Soutenu le 01/07/2025 devant le jury composé de :

M^r FARAH Zoubeyr

Président

Université de Béjaïa.

M^{me} BACHIRI Lina

Examinatrice

Université de Béjaïa.

M^{me} SABRI Salima

Examinatrice

Université de Béjaïa.

M^r YAZID Mohand

Examinateur

Université de Béjaïa.

Promotion 2024 – 2025

Remerciements

Je rends tout d'abord grâce à DIEU, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la force, la patience et la volonté nécessaires à la réalisation de ce mémoire et à l'aboutissement de mon parcours universitaire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon amour à mes chers parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants et leurs innombrables sacrifices. Leur présence à mes côtés a été une source inestimable de motivation et de courage.

Je remercie également mon encadrant, Mlle MAMMERI Souhila, pour son accompagnement attentif, ses conseils pertinents, sa disponibilité et sa bienveillance tout au long de ce travail. Son encadrement a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

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

Enfin, je remercie chaleureusement mes amis et camarades, pour leur soutien moral, leurs encouragements et les moments de partage et de complicité qui ont marqué ces années d'étude. Leur présence a rendu cette aventure plus enrichissante et plus humaine.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma chère maman, dont l'amour inconditionnel, le soutien sans faille et les encouragements constants ont été la source de ma force durant toutes ces années.

Qu'elle trouve ici l'expression de ma plus profonde gratitude.

À mon père, mon repère et mon soutien de toujours, pour sa sagesse, ses conseils avisés et sa présence rassurante qui m'a guidée dans chaque étape de mon parcours.

À mes frères , ainsi qu'à mes sœurs, pour leur affection sincère, leur patience et leur présence à mes côtés. Leur amour fraternel, leur écoute et leur réconfort dans les moments difficiles ont été pour moi un véritable pilier.

Enfin, à toute ma famille, mes proches, et à tous ceux qui m'ont offert leur amour, leur soutien et leur énergie, je vous dédie ce travail avec toute ma reconnaissance. Vous avez été une source constante de motivation et d'inspiration.

Table des Matières

Table des Matières	i
Liste des Tableaux	iv
Liste des Figures	v
Liste des Abréviations	vii
Introduction Générale	1
1 Systèmes AAL et Réseaux WiFi	3
1.1 Introduction	3
1.2 Systèmes AAL	3
1.2.1 Qu'est-ce qu'un système AAL ?	3
1.2.2 Objectifs et Défis	4
1.2.3 Services et applications	5
1.2.4 Technologies de communication	7
1.2.5 Métriques de performances	9
1.3 Pourquoi le choix du Wi-Fi pour les systèmes AAL?	9
1.4 Évolution des réseaux WiFi	10
1.4.1 Techniques de la couche PHY	11
1.4.2 Techniques de la couche MAC	12
1.4.2.1 Procédure BEB	13
1.4.2.2 Fonction DCF	14
1.4.2.3 Fonction EDCA	15
1.5 Technologie Wi-Fi 7	16
1.5.1 Techniques de la couche PHY	16
1.5.1.1 Regroupement de canaux 320 MHz	16
1.5.1.2 Technique Uplink/ Downlink MU-MIMO	17
1.5.1.3 Technologie multi-antennes et distribuée D-MIMO	18
1.5.1.4 Schéma de modulation et de codage 4096 QAM	18
1.5.1.5 Techniques OFDMA et Multi User-OFDMA	19
1.5.1.6 Technique d'accès Multiple RU	21
1.5.2 Techniques de la couche MAC	21

1.5.2.1	Technique d'accès multi-liens MLO	21
1.5.2.2	Techniques de réutilisation spatiale CSR	23
1.6	Conclusion	24
2	État de l'art sur la technique MLO dans les réseaux WiFi 7	25
2.1	Introduction	25
2.2	Fonctionnement du MLO	25
2.2.1	Multi-connectivité	25
2.2.2	Architecture multi-liens et dispositif MLD	26
2.2.3	Gestion de liens multiples	27
2.2.3.1	Élément multi-liens	27
2.2.3.2	Découverte et configuration de multiples liens	28
2.2.4	Types de dispositifs MLO	28
2.2.5	Transmission et réception multi-liens	29
2.2.5.1	Mappage TID-to-Link one to one	30
2.2.5.2	Mappage TID-to-Link one to Many	30
2.2.6	Politiques d'allocation de trafic aux liens	30
2.2.7	Schémas de transmissions multi-liens	31
2.2.7.1	Transmissions asynchrone et synchrone	31
2.2.7.2	Capacité STR et non-STR	32
2.2.7.3	Modes de transmission pour les applications en temps réel	33
2.2.8	Mécanismes d'économie d'énergie	34
2.2.8.1	Mécanisme TIM	34
2.2.8.2	Mécanisme TWT	35
2.3	Synthèse des travaux de recherche de la littérature	36
2.3.1	Continuous Multi-Link Operation: A Contention-Free Mechanism for the Unlicensed Spectrum (2024)	37
2.3.2	Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-link Wi-Fi 7 Devices (2024)	38
2.3.3	Contention-Less Multi-Link Synchronous Transmission for Throughput Enhancement and Heterogeneous Fairness in Wi-Fi7 (2024)	39
2.3.4	A Low-Duty-Cycle and Congestion-Robust Design of Adaptive Wi-Fi 7 Multi-Link Operation Control Over User Side (2025)	40
2.3.5	Bandit-Based Multiple Access Approach for Multi-link Operation in Het- erogeneous Dynamic Networks (2024)	41
2.3.6	WiFi 7 with Different Multi-Link Channel Access Schemes: Modeling, Fairness and Optimization (2024)	42
2.3.7	IEEE 802.11be Network Throughput Optimization with Multi-Link Op- eration and AP Controller (2024)	43
2.3.8	Comparaison entre les travaux de recherche étudiés	44
2.4	Conclusion	44

3	Proposition et Évaluation de performances d'un nouveau mode de transmission MLO	46
3.1	Introduction	46
3.2	Problématique et motivations	46
3.3	Proposition d'un mode de transmission MLO pour les applications de AAL . . .	49
3.4	Organigrammes des modes MLO Redundancy, Joint et Proposed	50
3.5	Implémentation, Simulation et Évaluation de performances	54
3.5.1	Simulateur OMNeT++	54
3.5.2	Framework INET	56
3.5.3	Simulateur WiFi MLO	57
3.5.4	Métriques de Performances et Paramètres de Simulation	61
3.5.4.1	Paramètres de Simulation	61
3.5.4.2	Métriques de Performances	62
3.5.5	Analyse des Résultats de Simulation	63
3.5.5.1	Nombres de trames reçues Vs Temps de simulation	64
3.5.5.2	Débit effectif Vs Temps de simulation	65
3.5.5.3	Latence moyenne Vs Temps de simulation	66
3.5.5.4	Nombres de trames reçues et débit effectif Vs Nombre de stations	68
3.5.5.5	Latence moyenne Vs Nombre de stations	69
3.6	Conclusion	70
	Conclusion Générale et Perspectives	71
	Bibliographie	73

Liste des Tableaux

1.1	Paramètres de la fonction EDCA [16].	16
2.1	Tableau récapitulatif des travaux de recherche antérieurs	45
3.1	Variables utilisées dans les organigrammes des modes de transmission MLO . . .	50
3.2	Paramètres de simulation	62

Liste des Figures

1.1	Exemple d'environnement AAL [40].	4
1.2	Exemple de relation entrs Services AAL et Technologies de communication [39].	8
1.3	Aperçu sur l'évolution des normes du WiFi [24].	11
1.4	Exemple de fonctionnement de la procédure de Backoff[16].	13
1.5	Organigramme de 802.11 DCF [45].	15
1.6	Plan de canaux en Chine [17].	17
1.7	Comparaison des flux spatiaux 802.11ax et 802.11be [20].	17
1.8	Distributed MU DL-MIMO 16×16 [21].	18
1.9	Comparaison entre le schéma 1024 QAM et 4096 QAM [17].	19
1.10	Exemple de fonctionnement de OFDMA et de Multi User-OFDMA [18].	20
1.11	Transmissions multi-utilisateurs et simulatnées dans UL OFDMA [44].	20
1.12	Multi RU of Wi-Fi 7 [17].	21
1.13	Exemple de fonctionnement MLO [48].	22
1.14	Exemple de dispositifs AP SLO et AP MLO [26].	22
1.15	Exemples de fonctionnement de Coordination Multi-AP [20].	23
1.16	Phases envisagées pour Co-OFDMA [43].	24
2.1	Séparation et combinaison de chemins MC au niveau des couches OSI [28].	26
2.2	Architecture de système multi-liens [41].	27
2.3	Élément multi-liens et trames de gestion [28].	29
2.4	Représentation des politiques MLSA, SLCI et MCCA [47].	31
2.5	Exemple de transmission multi-liens asynchrone [37].	32
2.6	Exemple de transmission multi-liens synchrone [37].	32
2.7	Exemple de communication entre MLD avec capacité STR [37].	33
2.8	Exemple de communication entre un AP STR et une STA non-STR [37].	33
2.9	Exemples de fonctionnement du mode Redundancy et Joint [19].	34
2.10	Mécanisme TIM multi-liens [28].	35
2.11	Mécanisme TWT multi-liens [28].	35
2.12	Sujets liés au fonctionnement de MLO [28].	36
2.13	Exemple de fonctionnement du MLO WiFi 7 et ConMLO proposé [31].	37
2.14	Exemple de fonctionnement mécanisme CLST proposé [34].	39
2.15	Organigramme du mécanisme CLST proposé [34].	40
2.16	Procédure de transmission des MLD et SLD dans un réseau hétérogène [35].	42
2.17	Mécanisme d'accès du modèle MP-CUCB proposé [35].	42

2.18	Long Backoff et Short Backoff dans un réseau Wi-Fi 7 à deux liens [36].	43
2.19	Architecture proposée MAPC avec exemple de scenario réseau WiFi 7 [38].	44
3.1	Exemple de fonctionnement du mode Redundancy	47
3.2	Exemple de fonctionnement du mode Joint	48
3.3	Exemple de fonctionnement du mode ProposedMLO	50
3.4	Organigramme du mode JointMLO	51
3.5	Organigramme du mode RedundancyMLO	52
3.6	Organigramme du mode ProposedMLO	53
3.7	Simulateur réseau OMNeT++6.0.	54
3.8	Composants et fonctionnement de la simulation OMNeT++ [49].	55
3.9	Contenu de Framework INET4.5.2 [50].	57
3.10	Structure et organisation du Projet WiFi MLO [51].	58
3.11	Structure de la station MLO [51].	58
3.12	Structure du projet WiFiMLO après modifications	59
3.13	Démarrage de la simulation avec l'émission du signal Wi-Fi.	60
3.14	Connexion via les bandes 2.4 GHz et 5GHz dans un BSS à deux STA	60
3.15	Connexion via les bandes 2.4 GHz et 5GHz dans un BSS à dix STA	61
3.16	Échange de trame ACK entre AP et les STA de son BSS	61
3.17	Nombre de trames reçues (total uniques et par interface) Vs temps de simulation	64
3.18	Débit (effectif total et par interface) Versus temps de simulation	66
3.19	Latence moyenne (totale et par interface) Vs temps de simulation	67
3.20	Nombre total de trames uniques reçues Vs Nombre de stations	68
3.21	Debit effectif total Vs Nombre de stations	68
3.22	Latence moyenne totale Vs Nombre de stations	69

Liste des abréviations

64-QAM	64 -ary Q uadrature A mplitude M odulation
256-QAM	256 -ary Q uadrature A mplitude M odulation
1024-QAM	1024 -ary Q uadrature A mplitude M odulation
4096-QAM	4096 -ary Q uadrature A mplitude M odulation
AAL	A mbient A ssisted L iving
AC	A ccess C ategory
ACK	A CKnowledgment
non- ACK	non - A CKnowledgment
AIFS	A rbitration I nter F rame S pace
A-MPDU	A ggregated M edium A ccess C ontrol P rotocol D ata U nit
AP	A ccess P oint
ARQ	A utomatic R epeat r e Q uest
APC	A ccess P oint C ontroller
BAW	B lock A ck W indow
BEB	B inary E xponential B ackoff
BER	B it E rror R ate
BE	B est E ffort
BK	B ackground
BSS	B asic S ervice S et
BSR	B uffer S tatus R eport
BW	B and W idth
CCA	C lear C hannel A ssessment
CCK	C omplementary C ode K eyig
CSR	C oordinated S patial R euse
CRC	C yclic R edundancy C ode
CLST	C ontention- L ess S ynchronous T ransmission
CMAB	C ombinatorial M ulti- A rmed B andit
CSMA/CA	C arrier S ense M ultiple A ccess with C ollision A voidance
Co-OFDMA	C oordinated - O rthogonal F requency D ivision M ultiple A ccess
CW	C ontention W indow
CQI	C hannel Q uality I ndicator

DAMLA	D ynamic A ccess M ethod for L atency- A ware communications
D-MIMO	D istributed M ultiple I nput M ultiple O utput
DCF	D istributed C oordination F unction
DIFS	D istributed C oordination F unction I nter F rame S pacing
DL	D own L ink
DSSS	D irect S equence S pread S pectrum
ECT	E xtra C ompensation T ransmission
EDCA	E nhanced D istributed C hannel A ccess
EDCAF	E nhanced D istributed C hannel A ccess F unction
EHT	E xremely H igh T hroughput
EMLSR	E nhanced M ulti- L ink S ingle R adio
EMLMR	E nhanced M ulti- L ink M ulti- R adio
FHSS	F requency H opping S pread S pectrum
HARQ	H ybrid A utomatic R epeat R equest
HCF	H ybrid C oordination F unction
HCL	H eterogeneous C oexistence L inks
HCCA	H ybrid C oordination F unction C ontrolled C hannel A ccess
HEW	H igh E fficiency W LAN
HR-DSSS	H igh R ate D irect S equence S pread S pectrum
HT	H igh T hroughput W LAN
HOL	H ead O f L ine
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers
IoT	I nternet o f T hings
LBT	L isten- B efore- T alk
LB	L ongest B ackoff
LLR	L og- L ikelihood R atio
LLC	L ogical L ink C ontrol
L-MAC	L ogical M edium A ccess C ontrol
LoRaWAN	L ong R ange W ide A rea N etwork
LPWAN	L ow P ower W ide A rea N etwork
LTE	L ong T erm E volution
MAC	couche M edium A ccess C ontrol
MAR	M AC-layer A vailable R esource

MCS	M odulation and C oding S cheme
MC	M ulti- C onnectivity
MCAA	M ulti-link C ongestion- A ware Load Balancer at Flow A rrivals
MDL	M LD D ominant L inks
MIMO	M ultiple I nput/ M ultiple- O utput
MLD	M ulti L ink D evice
MLO	M ulti L ink O peration
MLE	M ulti- L ink E lement
MLSA	M ulti L ink S ame Load to A ll Interfaces
MLSR	M ulti L ink S ingle R adio
MU-MIMO	M ulti U ser - M ultiple I nput M ultiple O utput
MSDU	M edium Access Control S ervice D ata U nit
MRU	M ultiple R esource U nit
MP-CUCB	M ulti- P layer- C ombinatorial U pper C onfidence B ound
MP-MAB	M ulti- P layer- M ulti- A rmed B andit
MAPC	M ulti- A P C oordination
OFDM	O rthogonal F requency D ivision M ultiplexing
OFDMA	O rthogonal F requency D ivision M ultiple A ccess
OMNeT++	O bjective M odular N etwork T estbed in C++
OSI	O pen S ystems I nterconnection
PCF	P oint C oordination F unction
PHY	couche P H Y sique
PIFS	P oint coordination I nter- F rame S pacing
PPDU	P hysical Layer Convergence P rotocol D ata U nit
PF	P roportional F airness
PER	P acket E rror R ate
QoS	Q uality o f S ervice
RF	R adio F requency
RNR	R educed N eighbor R eport
RTA	R eal T ime A pplications
RU	R esource U nit
RX	R eceive
RR	R ound- R obin
SIFS	S hort I nter- F rame S pacing

SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise R atio
SLO	Single L ink O peration
SLD	Single-Link D evice
SLCI	Single L ink Less C ongested I nterface
STR	Send and R eceive S imultaneously
STR-MLMR	Send and R eceive S imultaneously- M ulti- L ink M ulti- R adio
NSTR-MLMR	Send and R eceive S imultaneously- M ulti- L ink M ulti- R adio
non- STR	non -Send and R eceive S imultaneously
SNR	Signal-to-Noise R atio
STT	Synchronous T ransmission T okens
STA	ST Aion
SB	Shortest B ackoff
TC	Traffic C ategories
TF	Trigger F rame
TIC	Time D ivision M ultiplexing
TID	Traffic I Dentifier
TIM	Traffic I ndication M ap
TS	Traffic S tream
TSN	Time- S ensitive N etworking
TWT	Target W ake T ime
TXOP	Transmission O pportunity
TX	Transmit
U-MAC	Upper M edium A ccess C ontrol
UL	Up L ink
VANET	Vehicular A dhoc N ETwork
VHT	Very H igh T hroughput W LAN
VDS	Video and D ata S eparation
VI	Video
VO	Voice
WBAN	Wireless B ody A rea N etwork
WiFi	Wireless F idelity
WLAN	Wireless L ocal A rea N etwork
WSN	Wireless S ensor N etwork

Introduction Générale

Face au besoin croissant de prise en charge et de lutte contre la perte d'autonomie, l'innovation technologique apporte une solution complémentaire à l'assistance humaine, il s'agit bien des systèmes AAL (Assisted Ambient Living). Les technologies au service des personnes âgées et/ou en perte d'autonomie ne visent pas à remplacer les interactions humaines par l'informatique et la machine. Mais la technologie vient apporter des solutions, en plus de l'aide apportée par les proches et les professionnels de l'aide, dans au moins quatre domaines : la sécurité des personnes et du domicile, la santé, le bien-être et les liens sociaux.

Les technologies AAL offrent un large éventail d'applications souvent en temps réel, parmi celles-ci : vidéosurveillance, systèmes de détection, systèmes d'alerte, objets connectés de santé, automatisation du domicile, etc[40]. Ces systèmes AAL intègrent souvent des capteurs, des actionneurs, de l'intelligence artificielle et des technologies de communication. Parmi les technologies sans fil disponibles, le Wi-Fi (Wireless Fidelity) s'est imposé comme une solution privilégiée dans les environnements domestiques, grâce à sa couverture suffisante, sa compatibilité avec de nombreux objets connectés et son faible coût d'installation[9]. Les dernières évolutions de cette technologie, et plus particulièrement la norme Wi-Fi 7 ou IEEE 802.11be, apportent des améliorations significatives en matière de débit, de latence, de fiabilité et voire même d'efficacité énergétique. L'une des innovations majeures de cette norme est la Multi-Link Operation (MLO), qui permet d'exploiter simultanément plusieurs bandes de fréquences pour une communication plus robuste et rapide. Cette capacité s'avère particulièrement bénéfique pour les systèmes AAL qui exigent une qualité de service élevée.

Cependant, malgré les promesses du MLO, son mode de fonctionnement présente certaines limitations. Deux modes de transmission pour les application temps réel ont été conçus, le mode redundancy et le mode joint. Le mode redundancy, bien qu'il améliore la fiabilité en dupliquant les trames sur plusieurs liens, souffre de plusieurs inconvénients : une latence accrue, car la transmission n'est possible qu'après synchronisation complète des liens, un gaspillage dû à la redondance systématique, et un retard de l'accusé de réception jusqu'à la fin des transmissions sur tous les liens. Quant au mode Joint, il répartit les trames entre les liens disponibles, permettant une utilisation optimale de la bande passante et une réduction potentielle de la latence. Toutefois, il présente une faible tolérance aux pertes, puisqu'une trame perdue sur un lien doit être retransmise. Il impose aussi une gestion complexe des trames réparties et peut entraîner des problèmes de réassemblage si les liens sont déséquilibrés ou désynchronisés. Ce qui peut dégrader la performance dans les applications temps réel[19].

Face aux limites observées dans les modes classiques, ce travail propose un nouveau mode de transmission MLO hybride, conçu pour tirer parti des avantages des modes Duplicate et Joint. La phase de contention est optimisée grâce à l'intégration d'un mécanisme de Short Backoff, permettant de déclencher rapidement la transmission dès qu'un des liens atteint un backoff nul. Concernant la phase de transmission, le système commence par utiliser le mode Redundancy, en envoyant la même trame sur deux liens simultanément afin d'accélérer la transmission. Dès qu'un ACK est reçu sur l'un des liens, la transmission redondante en cours sur l'autre lien est immédiatement interrompue pour éviter tout gaspillage de ressources. Le système bascule ensuite dynamiquement vers le mode Joint, en réutilisant directement le lien resté libre pour envoyer une nouvelle trame, sans repasser par une phase de contention. Cette transition fluide permet d'améliorer significativement la fiabilité, le débit et la latence.

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale avec perspectives. Les chapitres sont structurés comme suit :

- Le chapitre 1 est intitulé **Systèmes AAL et Réseaux Wi-Fi** : Dans ce chapitre, nous allons présenter les systèmes AAL, leurs objectifs, les services proposés, les technologies de communication utilisées, ainsi que les principales métriques de performance, nous aborderons également l'évolution des réseaux Wi-Fi en mettant en évidence les améliorations apportées par la norme Wi-Fi 7.
- Le chapitre 2 est intitulé **État de l'art sur la technique MLO dans les réseaux Wi-Fi 7** : Dans ce chapitre, nous allons décrire le fonctionnement du mécanisme Multi-Link Operation (MLO), ses composants clés comme U-MAC et L-MAC, les types de transmissions et dispositifs MLO, ainsi que les travaux de recherche récents liés à cette technologie.
- Le chapitre 3 est intitulé **Proposition et évaluation de performances d'un nouveau mode de transmission MLO** : Dans ce chapitre, nous allons présenter notre proposition d'un mode de transmission combinant les avantages des modes Duplicate et Joint, décrire son implémentation dans l'environnement OMNeT++, et analyser les performances à travers des simulations menées dans différents scénarios.

Chapitre 1

Systemes AAL et Réseaux WiFi

1.1 Introduction

Avec l'augmentation remarquable du nombre de personnes en situation de dépendance comme par exemple les personnes infirmes, invalides, ou toute autre personne qui a besoin de l'aide temporairement, les nouvelles technologies émergentes jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la qualité de vie en faveur de ces personnes. Les systèmes de l'assistance à l'autonomie ou AAL (Ambient Assisted Living) s'inscrivent dans cette dynamique tout en restant à domicile. Évidemment, un système AAL ne peut pas remplacer l'aide humaine, mais il peut fournir une aide supplémentaire tout en garantissant l'autonomie et la sécurité physique et morale de ces personnes.

Dans ce chapitre, nous allons fournir, dans un premier temps, un aperçu des systèmes AAL à savoir leurs objectifs et défis qu'ils cherchent à relever, les services et applications qu'ils visent à offrir, les technologies de communication qui les sous-tendent et les métriques de performances qui leur conviennent et qui permettent d'assurer leur efficacité. Puis, nous allons présenter la technologie Wi-Fi, en mettant en lumière la norme Wi-Fi 7 avec ses aspects techniques.

1.2 Systemes AAL

Dans cette section, nous allons décrire les systèmes AAL.

1.2.1 Qu'est-ce qu'un système AAL ?

L'assistance à l'autonomie à domicile ou AAL définit un ensemble de technologies, de services et de méthodes visant à améliorer la qualité de vie, l'autonomie et la sécurité des personnes âgées, en situation de handicap ou tout simplement des personnes infirmes. Ce concept repose sur l'intégration discrète de solutions technologiques intelligentes et connectées dans l'environnement quotidien de personnes. Ces solutions peuvent inclure des systèmes domotiques, des dispositifs de surveillance à distance, et des outils d'aide à la communication dotés de capteurs et/ou d'actionneurs[1]. La Figure 1.1 illustre un exemple d'environnement AAL avec des services divers offerts aux personnes.

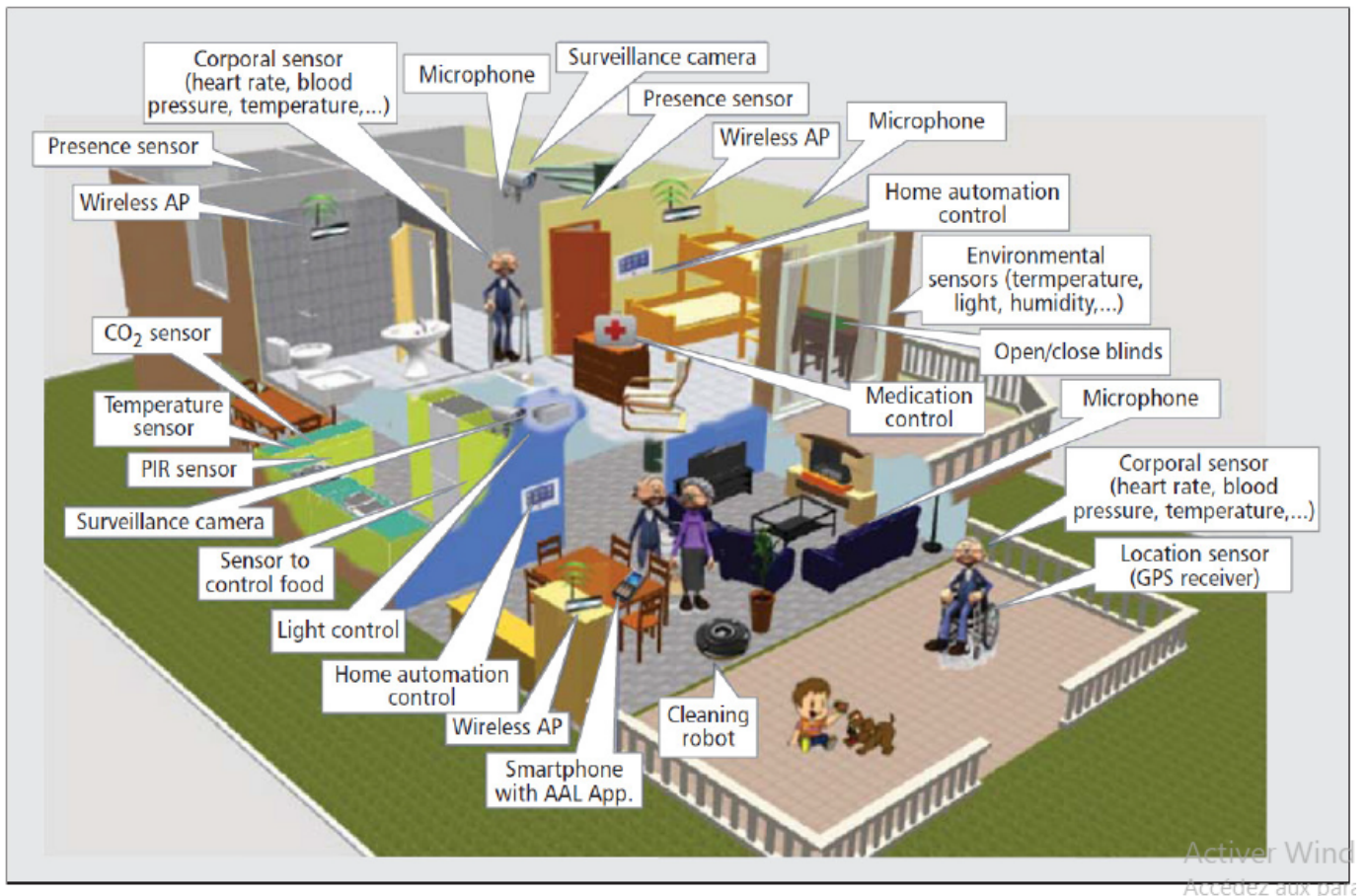


Figure 1.1: Exemple d'environnement AAL [40].

1.2.2 Objectifs et Défis

Les systèmes AAL visent à atteindre plusieurs objectifs [1, 2], parmi ceux-ci :

- Améliorer la qualité de vie des personnes infirmes en favorisant l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) pour proposer des solutions innovantes.
- Maintenir la santé et préserver les capacités fonctionnelles des personnes.
- Renforcer la sécurité et prévenir l'isolement social en favorisant des interactions et un accompagnement personnalisé.
- Apporter un soutien aux familles et aux professionnels de santé pour faciliter la prise en charge des bénéficiaires.
- Offrir une autonomie accrue aux personnes grâce à l'intégration de solutions technologiques spécifiques et adaptées à leur environnement.
- Surveiller et améliorer la qualité de vie au quotidien, que ce soit à domicile ou sur le lieu de travail.

Parmi les défis des systèmes AAL, nous citons les suivants [3] :

- **Améliorer la fiabilité et réduire les délai d'attente :** Pour garantir le fonctionnement optimal des appareils des systèmes AAL, en particulier dans les situations critiques, il est essentiel de transmettre les données de manière rapide et fiable. Les interruptions ou les délais dans les communications peuvent nuire à l'efficacité du système et mettre une personne en péril.
- **Garantir l'interopérabilité entre appareils :** Les solutions de AAL comprennent une variété d'appareils, d'objets et de plateformes issus de divers fabricants. Il est crucial de garantir leur standardisation et leur compatibilité pour assurer une opération fluide tout en évitant les soucis d'intégration.
- **Économiser la consommation d'énergie :** Beaucoup d'appareils AAL fonctionnent en permanence, ce qui conduit à une importante consommation énergétique. Il est donc primordial de concevoir des solutions optimisées afin d'allonger la durée de vie des appareils et de minimiser leur empreinte énergétique.
- **Garantir la sécurité et la confidentialité des données :** La collecte et la transmission d'informations sensibles sur la santé et les habitudes de vie des utilisateurs posent des défis en matière de protection des données personnelles et de cybersécurité. Les données de santé doivent être protégées contre les accès non autorisés, les violations de données et les utilisations abusives.

1.2.3 Services et applications

Les services les plus demandés dans les systèmes AAL sont entre autres :

- **Surveillance de la santé :** La surveillance continue de l'état de santé des personnes peut être réalisée en collectant et en analysant divers paramètres physiologiques [4]. Parmi les applications proposées :
 - ◇ **Télésurveillance des paramètres vitaux :**
 - * Mesure en temps réel de la tension artérielle, du rythme cardiaque, du taux d'oxygène dans le sang et d'autres données physiologiques essentielles.
 - * Intégration de dispositifs portables comme les montres connectées et les bracelets de suivi de santé (ex. Apple Watch, Fitbit, Withings ScanWatch).
 - * Transmission automatique des données aux médecins ou aux aidants pour un suivi médical à distance.
 - ◇ **Prévention des chutes :**
 - * Utilisation de capteurs de mouvement et d'accéléromètres pour détecter les chutes en temps réel.
 - * Déclenchement d'une alerte automatique en cas de chute détectée

- * Exemples de dispositifs : bracelets d'alerte (Philips Lifeline), capteurs au sol (Smart Floor) ou caméras intelligentes dotées d'intelligence artificielle.
- **Assistance au quotidien** : L'objectif des systèmes AAL est d'optimiser l'environnement domestique afin d'améliorer l'autonomie des utilisateurs[4]. Parmi ses applications :
- ◇ **Automatisation domestique** :
 - * Commande vocale ou automatique des éclairages, volets, et appareils électroménagers via des plateformes comme Google Home, Amazon Alexa ou Apple HomeKit.
 - * Systèmes d'adaptation intelligents pour ajuster la température, l'éclairage et l'ouverture des portes en fonction des habitudes de l'utilisateur.
 - ◇ **Rappels personnalisés** :
 - * Notifications sonores et visuelles pour la prise de médicaments, les rendez-vous médicaux et autres tâches essentielles.
 - * Applications mobiles et assistants vocaux (ex. Medisafe, Pill Reminder) pour aider les personnes âgées ou atteintes de troubles cognitifs.
- **Interaction sociale** : Les systèmes AAL favorisent le lien social en réduisant l'isolement des personnes âgées et en leur offrant un accès facilité aux services numériques[4]. Parmi ses applications :
- ◇ **Communication augmentée** :
 - * Solutions de vidéoconférence et de messagerie adaptées aux seniors.
 - * Interfaces simplifiées pour faciliter l'accès aux appels et aux messages.
 - ◇ **Services de loisirs** :
 - * Accès à des contenus multimédias (films, musique, livres audio) et plateformes interactives (Netflix, YouTube, Spotify).
 - * Jeux cognitifs et activités stimulantes pour prévenir la perte de mémoire et entretenir les capacités cognitives (ex. Lumosity, MyBrainTrainer).
- **Sécurité physique** : Les systèmes AAL intègrent des solutions de surveillance intelligentes pour garantir la sécurité des utilisateurs à domicile[4]. Parmi les applications proposées :
- ◇ **Détection des intrusions** :
 - * Systèmes d'alarme connectés, caméras de surveillance intelligentes et interphones vidéo pour protéger le domicile. Par exemples : Nest Cam, Arlo Pro, Ring Doorbell.
 - ◇ **Alerte en cas d'urgence** :
 - * Boutons d'urgence portables ou fixes permettant d'appeler instantanément un proche ou un service médical.

- * Dispositifs intégrés aux montres connectées ou aux pendentifs médicaux (ex. LifeAlert, AngelSense).

1.2.4 Technologies de communication

Les systèmes AAL utilisent différentes technologies de communication (La Figure 1.2) pour garantir une transmission des données à la fois fiable et performante, en tenant compte des exigences et des restrictions propres aux applications. Parmi ces technologies :

- **Wi-Fi** : WiFi (Wireless Fidelity) une technologie sans fil à moyenne portée, il est couramment employé dans les dispositifs domestiques intelligents comme les caméras et les haut-parleurs intelligents, puisqu'il offre la possibilité de gérer ces équipements à distance dans une maison par exemple et peut servir à la diffusion de contenus médiatiques. Nous pouvons aussi recourir au Wi-Fi pour mettre en place un réseau maillé, ce qui pourrait optimiser la couverture dans l'ensemble de la maison [5].
- **Bluetooth** : Dent bleue une technologie sans fil à faible portée couramment employée pour établir une connexion entre des dispositifs placés à quelques mètres l'un de l'autre. Le Bluetooth est fréquemment utilisé dans les dispositifs intelligents à domicile comme les verrous intelligents, les sonnettes et les capteurs, du fait de sa faible consommation d'énergie comparée au WiFi et de sa capacité à fonctionner sur pile pendant des durées prolongées. Bluetooth est aussi simple à mettre en place et peut fonctionner sans connexion Internet, on peut citer les technologies **ZigBee** et **Z-Wave** [5].
- **Technologies cellulaires** : : sont des technologies sans fil de télécommunication à grande échelle qui fournissent une connectivité Internet rapide et étendue pour les appareils, on peut citer plusieurs technologies telles que la **3G**, la **4G** (LTE), et la **5G**. Elles sont beaucoup plus recommandées pour les applications nécessitant une couverture très large et une connectivité permanente, mais elle peuvent être utilisées dans les villes intelligentes pour connecter des équipements à distance et des dispositifs industriels [6].
- **LPWAN** : LPWAN (Low Power Wide Area Networks) sont des technologies conçues pour connecter des appareils consommant très peu d'énergie sur de longues distances. Les réseaux utilisant cette technologie sont largement utilisés pour les capteurs environnementaux ou agricoles grâce à leur capacité à fonctionner pendant plusieurs années sur batterie. Un réseau LPWAN peut être utilisé pour relier des capteurs placés dans une maison pour détecter une chute, une porte restée ouverte, ou des changements dans les habitudes de vie [6].
- **LoRaWAN** : LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) est une technologie de communication sans fil conçue pour les réseaux étendus à faible consommation (LPWAN). Elle permet de connecter des dispositifs sur de longues distances, jusqu'à 10 km en zone rurale, tout en consommant très peu d'énergie. Cette caractéristique en fait une solution idéale

pour les applications IoT (Internet of Things) nécessitant une transmission de données sporadique et sur de vastes zones, comme la surveillance environnementale ou agricole. Dans le contexte des systèmes AAL (Ambient Assisted Living), LoRaWAN est utilisé pour connecter des capteurs de mouvement, des détecteurs de chute ou des moniteurs de santé, permettant une surveillance continue sans nécessiter de recharge fréquente des batteries. Sa sécurité renforcée et sa capacité à fonctionner dans des environnements difficiles en font un choix robuste pour les applications de santé et de sécurité domestique[7].

- **WSN** : WSN (Wireless Sensor Network) est un ensemble de capteurs autonomes qui communiquent entre eux via des signaux radio pour collecter et transmettre des données. Ces réseaux sont flexibles, scalables et peuvent couvrir des zones étendues grâce à une communication multi-sauts, où chaque capteur relaie les données vers un point central. Dans les systèmes AAL, les WSN sont utilisés pour surveiller l'activité quotidienne, détecter des chutes ou gérer l'énergie dans un habitat intelligent. Par exemple, des capteurs de mouvement placés dans différentes pièces peuvent analyser les habitudes de vie et alerter en cas d'anomalie, comme une absence prolongée d'activité. Les WSN sont également adaptés à des applications de sécurité, comme la détection d'intrusions ou de fuites, offrant une solution polyvalente pour améliorer la qualité de vie et la sécurité des personnes âgées ou dépendantes [7].



Figure 1.2: Exemple de relation entre Services AAL et Technologies de communication [39].

1.2.5 Métriques de performances

Les systèmes AAL reposent sur plusieurs métriques essentielles pour évaluer leur performance et leur efficacité. Voici un aperçu détaillé des métriques clés à prendre en compte :

- **Débit** : mesure la quantité de données qui peut être transmise par le réseau dans un certain laps de temps, généralement exprimée en nombre de bits transmis par seconde. Un débit élevé est crucial pour le bon fonctionnement des applications AAL, notamment celles qui nécessitent des transmissions en temps réel, comme la télémédecine ou la vidéo surveillance. Cela garantit que les données critiques, telles que les informations médicales ou les alertes d'urgence, sont transmises rapidement et efficacement. Un débit élevé permet aussi de gérer plusieurs connexions simultanées sans dégradation des performances. Par ailleurs, une capacité de bande passante suffisante permet d'obtenir des débits élevés [8].
- **Latence** : désigne le délai entre l'envoi d'une demande et la réception de la réponse, mesurée en millisecondes (ms). Une latence faible est essentielle pour les applications AAL qui nécessitent une interaction en temps réel. Par exemple, dans les systèmes de téléassistance, une latence inférieure à 20 ms est idéale pour assurer une communication fluide entre les utilisateurs et les professionnels de santé[8].
- **Équité** : fait référence à l'accès équitable aux technologies et services offerts, indépendamment des facteurs socio-économiques, géographiques ou technologiques. Assurer l'équité permet de garantir que tous les utilisateurs, y compris ceux issus de milieux défavorisés ou vivant dans des zones rurales, peuvent bénéficier des solutions AAL. Cela inclut également la formation et le soutien pour aider tous les utilisateurs à naviguer efficacement dans ces technologies [8].
- **Taux Perte de données** : se produit lorsque des paquets de données envoyés sur un réseau ne parviennent pas à atteindre leur destination. Elle est généralement exprimée en pourcentage du nombre total de paquets envoyés. Un taux élevé de perte de paquets peut gravement affecter la qualité des services AAL, entraînant des interruptions dans les communications et une dégradation des performances des applications critiques. Un seuil acceptable pour les systèmes sensibles est généralement inférieur à 1%. Des pertes fréquentes peuvent également indiquer des problèmes sous-jacents dans l'infrastructure réseau qui nécessitent une attention immédiate[8].

1.3 Pourquoi le choix du Wi-Fi pour les systèmes AAL?

Le choix du Wi-Fi pour les systèmes AAL est motivé par plusieurs avantages clés qui en font une technologie convenable aux environnements de soins et de vie à domicile assistée.

- **Accessibilité et Couverture Suffisante** : Le Wi-Fi est largement disponible dans les foyers et les établissements de santé. Les résidents peuvent accéder à Internet depuis n'importe

quel endroit (chambres, espaces communs, jardins), favorisant l'utilisation quotidienne des technologies numériques et le maintien des liens sociaux[9] depuis le domicile.

- **Débit et Latence** : Les normes récentes du WiFi adoptent des techniques qui peuvent offrir des vitesses élevées et une latence réduite directement ou après des adaptations de fonctionnement ou améliorations pour les applications critiques comme la télésurveillance et les communications en temps réel. Cela permettra une gestion fluide des connexions simultanées et des interactions sans délai, améliorant l'efficacité des soins[9].
- **Accès Multi-utilisateurs et Simultanés** : Les nouvelles générations de WiFi proposent des techniques basées sur les transmissions parallèles et simultanées pouvant augmenter le débit, l'efficacité de transmission et surtout réduisant la latence et les délais d'attente avant l'accès au canal de transmission.
- **Compatibilité avec les Objets Connectés** : Le Wi-Fi facilite l'intégration des appareils IoT (capteurs de santé, caméras, assistants vocaux), permettant une gestion centralisée et une interopérabilité optimale. Par exemple, un capteur de chute peut envoyer des alertes instantanées, assurant une réponse rapide en cas d'urgence et renforçant l'autonomie des résidents[9].
- **Coût Abordable** : Comparé aux technologies cellulaires comme la 5G, le Wi-Fi est plus économique pour une utilisation domestique et dans les établissements AAL. Les coûts d'installation et de maintenance sont inférieurs, rendant cette solution accessible pour les établissements avec des budgets limités, tout en offrant des forfaits groupés avantageux[9].
- **Facilité d'Installation et de Maintenance** : Les équipements Wi-Fi (routeurs, répéteurs) sont faciles à configurer et à adapter aux besoins spécifiques. Cette simplicité permet un déploiement rapide sans expertise technique approfondie, et la maintenance est moins complexe que pour les systèmes câblés, permettant au personnel de se concentrer sur les soins[9].

1.4 Évolution des réseaux WiFi

En 1997, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineering), a créé le standard des réseaux locaux sans fil, ou WLAN (Wireless Local Area Networks) ou simplement les réseaux WiFi (Wireless Fidelity), édicté sous l'égide de son comité par IEEE 802.11. Le standard IEEE 802.11 définit les deux couches inférieures du modèle OSI (Open System Interconnexion) à savoir : la couche PHY (PHYsique) et la couche MAC (Medium Access Control) [24].

Le réseau WiFi ont incroyablement progressé depuis son apparition en passant depuis un réseau à faible débit IEEE 802.11/b/a/g, puis à un réseau de Qualité de Service QoS (Quality Of Service WLAN) IEEE 802.11e, ensuite réseau à haut débit HT (High Throughput WLAN) IEEE 802.11n, à un réseaux à très haut débit VHT (Very High Throughput WLAN) IEEE

802.11ac et actuellement à un résea à Très Haute Efficacité HEW (High Efficiency WLAN) IEEE 802.11ax. La Figure 1.3 illustre l'évolution du WiFi depuis 1997 jusqu'en 2021.

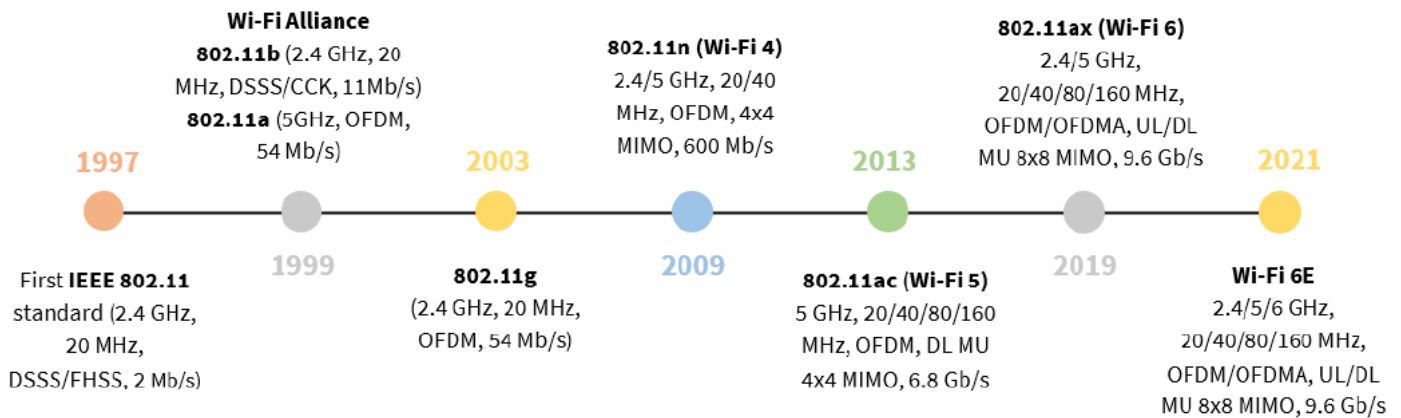


Figure 1.3: Aperçu sur l'évolution des normes du WiFi [24].

1.4.1 Techniques de la couche PHY

- Les premières normes IEEE 802.11/b/a/g définies depuis 1997 jusqu'à 2003, respectivement, permettaient des transmissions des données avec des débits maximum de 2, 11, 54, 54 Mbits/s respectivement. Ce débit est atteint en utilisant principalement quatre couches physiques radio : FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) basée sur des sauts de fréquence pour résister aux bruits et minimiser les interférences [10], DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) qui offrait une meilleure stabilité de transmission par étalement de spectre en multipliant artificiellement le débit [11], HR-DSSS (High Rate DSSSS) ou CCK (Complementary Code Keying) la version DSSS améliorée, et OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) divisant le canal en plusieurs sous-porteuses orthogonales, chacune des sous-porteuses est attribuée à un utilisateur différent pour transmissions simultanées et afin d'améliorer l'efficacité spectrale [12].
- Le norme IEEE 802.11n permettant aux équipements d'opérer sur l'une des bandes de fréquences de 2.4 GHz ou de 5GHz. Elle parvient à atteindre des débits de 600 MBits/s, en introduisant deux nouvelles techniques physiques. La technologie de transmissions multi-antennes MIMO (Multiple-Input Multiple Output) à travers quatre flux spatiaux à l'émission et à la réception pour la transmission de quatre flux de données simultanément [13], et la technique de regroupement de deux canaux adjacents de 20 MHz pour obtenir un canal de 40 MHz. Une bande passante de canal doublée permet de doubler le débit de transmission de données.
- La norme IEEE 802.11ac permettant d'opérer sur une bande de fréquences de 5 GHz. Elle offre un débit de transmission pouvant atteindre 7 Gbits/s. Ce débit est atteint grâce la technologie de transmission multi-utilisateurs opérant seulement dans la phase

DownLink (DL : depuis l'AP vers les stations) MU-MIMO (DL Multi-User Multiple-Input Multiple-Output), permettant à un point d'accès de communiquer simultanément avec plusieurs appareils, le nombre de flux spatiaux pour la MIMO augmenté à 8, et surtout le regroupement de canaux de 80 et de 160 MHz, où le canal de 80 MHz a été spécifié obligatoire, tant dis que le canal de 160 MHz optionnel.

- La norme IEEE 802.11ax offre des débits pouvant atteindre 9.6 Gbits/s, en introduisant la technique de modulation OFDM à accès multiple ou OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) permettant à un point d'accès (AP) de diviser un canal en plusieurs sous-canaux ou RU (Resource Units) et de les attribuer à plusieurs utilisateurs pour des transmissions simultanées à travers les RUs, les transmissions multi-utilisateurs MU-MIMO dans les deux phases DownLink et UpLink, et la communication bidirectionnelle entre un émetteur et un récepteur, la technique du BSS Coloring a été intégrée afin de réduire les interférences entre réseaux Wi-Fi voisins en attribuant des identifiants de couleur aux différentes transmissions, améliorant ainsi l'efficacité spectrale.

1.4.2 Techniques de la couche MAC

- Les premières normes IEEE 802.11/b/a/g définies depuis 1997 jusqu'à 2003, respectivement, repose sur une seule couche de contrôle d'accès au médium commune composée de deux modes d'accès dont le fonctionnement est complètement différent : le mode distribué DCF (Distributed Coordination Function) et le mode centralisé PCF (PCF Coordination Function).
- En 2005, la norme IEEE 802.11e avec QoS a été définie afin de répondre aux besoins en QoS pour les flux de données multimédias. Cette norme a apporté une modification de la couche MAC. La norme 802.11e définit une nouvelle fonction de coordination HCF (Hybrid Coordination Function) qui utilise deux méthodes d'accès: EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) et HCCA (HCF Controlled Channel Access) [15].
- En 2013, le canal de 80 MHz a été spécifié obligatoire au niveau de la couche physique des réseaux 802.11ac, ce qui a conduit à la modification de la couche MAC pour pouvoir contrôler l'accès multi-canaux. C'est pourquoi, deux méthodes d'accès multi-canaux ont été conçues, elles sont :
 - La méthode statique oblige les stations 802.11ac de transmettre sur toute la largeur du canal utilisé (80 ou 160 MHz),
 - La méthode dynamique permet de transmettre sur un canal étroit (20, 40 ou 80 MHz) lorsque il y a au moins un sous-canal, parmi les sous-canaux constituant le canal large, est détecté occupé durant la phase de l'écoute de la porteuse [16].

1.4.2.1 Procédure BEB

La procédure de Backoff ou BEB (Binary Exponential Backoff) est une méthode pour résoudre la concurrence d'accès au support pour différentes stations qui partagent le même canal. Avant de transmettre, une station tire un nombre aléatoire à partir d'un intervalle appelé fenêtre de contention CW (Contention Window), qui est égal à un nombre de slot de temps (unité de mesure). Avant d'émettre, la station décrémente ce nombre à chaque slot de temps d'un canal libre jusqu'à ce qu'il soit égal à zéro [14, 46].

Dans le cas d'une collision, cet intervalle est doublé. Donc elle tire un nombre aléatoire à partir du nouvel intervalle. CW est la taille de la fenêtre de contention, CW qui appartient à l'intervalle $[CW_{min}, CW_{max}]$, initialement $CW = CW_{min}$ lorsqu'une trame vient d'être envoyée avec succès ou lorsqu'une trame est rejetée suite au dépassement de la limite de re-transmissions et à la fois suivante (en cas de collision) CW est doublée de façon exponentielle jusqu'à ce qu'elle atteigne la borne maximale CW_{max} afin de réduire le taux de collisions.

Une fois la valeur du temps de Backoff est tirée, elle est décrémentée de 1 à chaque slot libre observé par la fonction d'accès. Lorsque le Temps de Backoff atteint 0, et si le médium est toujours libre, la fonction d'accès tente l'envoi sur le médium. Si en cours de décrémentation du temps de Backoff le médium devient occupé, la valeur en cours du temps de Backoff est mémorisée, la décrémentation reprendra au point où elle a été mémorisée, lorsque la fonction observera à nouveau un intervalle DCF Inter-Frame Spacing (DIFS) d'inoccupation du médium [16].

Un exemple de fonctionnement de la procédure de Backoff est donné dans la Figure 1.4.

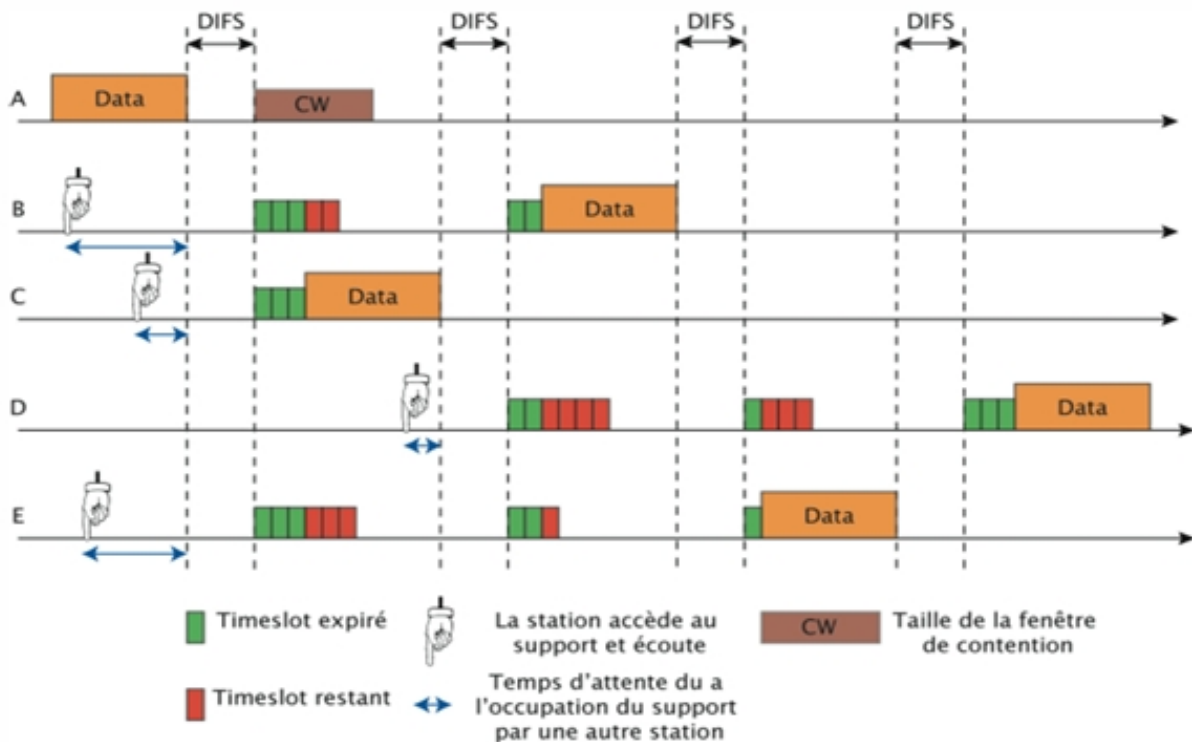


Figure 1.4: Exemple de fonctionnement de la procédure de Backoff[16].

1.4.2.2 Fonction DCF

DCF (Distributed Coordination Function) est la fonction de contrôle d'accès fondamentale de l'IEEE 802.11 basée sur le CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), qui permet à plusieurs stations de partager le même canal de communication tout en évitant les collisions. À l'inverse, PCF (Point Coordination Function) repose sur un point d'accès (AP) pour coordonner les transmissions des stations suivant le principe de scrutation, offrant une gestion centralisée du médium [14]. Les stations peuvent accéder au canal de manière aléatoire. Cependant, avant toute transmission, une station doit d'abord écouter le canal pour vérifier qu'il est libre.

- La station doit écouter le canal pour une durée DIFS.
- Si le canal est détecté occupé durant DIFS, la station doit répéter l'attente pour DIFS jusqu'à ce que le canal devient libre,
- Si le canal est libre pour une durée de DIFS, la station peut tirer un compteur de Backoff à partir de la valeur de sa fenêtre de contention CW (Contention Window), la valeur de CW étant initialisée à sa valeur minimale CWmin. Le backoff est une période de temps exprimée souvent comme intervalles de temps discrets appelés slots de temps ou ST (Slot Time). La station doit écouter le canal pour chaque slot du temps de Backoff,
- Si le canal est libre durant un slot, la station ne peut émettre que lorsque ce timer sera arrivé à zéro, elle doit donc décrémenter ce timer. Si au cours de cette écoute la station détecte l'occupation du canal, la décrémention du timer est interrompue, la valeur de Backoff est gelée, la station doit refaire le processus de contention après détection d'inoccupation du canal pour DIFS, puis reprend l'écoute à partir de la valeur de Backoff déjà enregistrée. Une fois le Backoff atteint la valeur de 0 et le canal est libre, la station peut transmettre sa trame de données sur le canal.
- Après un SIFS (Short Inter-Frame Space), si le récepteur reçoit avec succès la trame de données, il répond par une trame ACK (ACKnowledgement),
- Si après un espace SIFS, la station ne reçoit d'ACK pour sa trame, la transmission de la trame est donc échouée, la station émettrice doit, dans ce cas, procéder à la retransmission de la trame si le nombre autorisé de retransmissions (souvent noté m , i étant le nombre de retransmissions) n'est pas atteint.
- Avant toute retransmission, la station doit tout d'abord doubler la valeur de CW si la valeur de CWmax n'est pas atteinte afin de tirer un nouveau compteur de Backoff à partir de la nouvelle fenêtre de CW et éviter ainsi les collisions.
- Si le nombre maximum de retransmissions pour une trame de données est atteint, et la station n'arrive toujours pas à recevoir un ACK, la trame est détruite [45, 46].

Les détails du fonctionnement de DCF sont donnés dans l'organigramme de la Figure 1.5.

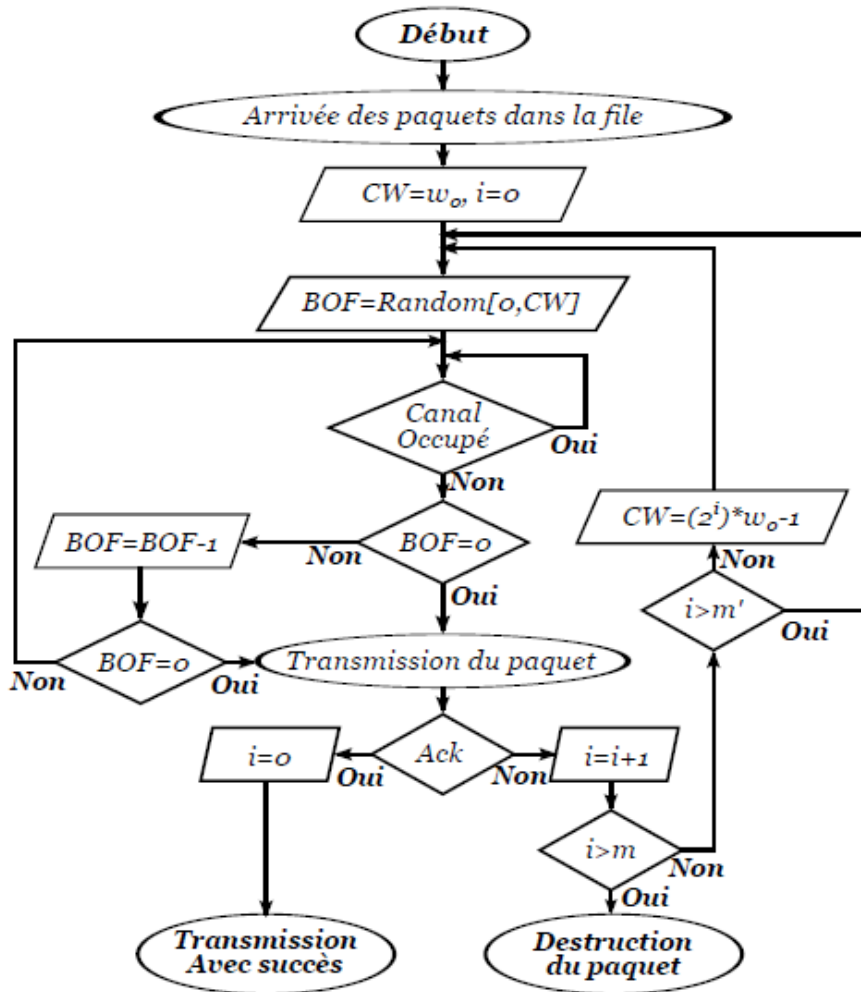


Figure 1.5: Organigramme de 802.11 DCF [45].

1.4.2.3 Fonction EDCA

La fonction DCF a été améliorée et remplacée par la fonction EDCA afin de garantir la différenciation à l'accès par le principe de priorités entre quatre catégories d'accès ou AC (Access Category), elles sont : voix VO, vidéo VI, best effort BE, et background BK, la table 1.1 résume toutes les catégories de cette méthode avec leurs paramètres. Chaque AC a sa propre priorité d'accès au canal suivant ses propres paramètres EDCA ou comme souvent appelés paramètres de QoS. Ces paramètres sont soit fixés par défaut ou déterminés par le point d'accès. Les paramètres de QoS sont :

- Le temps AIFS (Arbitration Inter-Frame Space) ; équivalent de DIFS dans DCF, sa valeur est variable d'une AC à une autre AC. l'Ac prioritaire est l'AC qui possède la plus petite valeur de AIFS.
- La fenêtre de contention minimale CW_{min} et maximale CW_{max} : valeur de la fenêtre de contention minimale et maximale. L'AC prioritaire est l'AC qui possède la valeur minimale de CW_{min} . Une valeur minimale de CW_{min} permet d'obtenir de petits intervalles pour le tirage du temps BackOff.

- Le paramètre TXOPLimit (TX Opportunity Limit) : période de temps durant laquelle une station prioritaire possède le droit de transmettre une rafale de trames de données séparées par des espaces SIFS sans interruption c'est à dire sans refaire passer par le processus contention pour chaque trame de données à transmettre. L'AC prioritaire est l'AC qui possède la plus grande valeur de TXOPLimit.

Catégorie d'accès	AIFS	CWmin	CWmax
AC-VO	$SIFS+2 \times aSlotTime$	$((aCWmin+1)/4)-1 ; 3$	$((aCWmin+1)/4)-1 ; 7$
AC-VI	$SIFS+2 \times aSlotTime$	$((aCWmin+1)/2)-1 ; 7$	$aCWmin ; 15$
AC-BE	$SIFS+3 \times aSlotTime$	$aCWmin ; 15$	$aCWmax ; 1023$
AC-BK	$SIFS+7 \times aSlotTime$	$aCWmin ; 15$	$aCWmax ; 1023$

Table 1.1: Paramètres de la fonction EDCA [16].

1.5 Technologie Wi-Fi 7

Dans cette section, nous allons présenter la norme Wi-Fi 7, connue également sous l'appellation WiFi EHT (Extremely High Throughput), édictée sous l'égide de son comité IEEE 802.11be, la dernière évolution de la norme Wi-Fi, conçue pour offrir une vitesse de transmissions ultra-rapide avec une latence minimale dans les réseaux locaux sans fil.

1.5.1 Techniques de la couche PHY

Au niveau physique, nous citons les techniques permettant la transmission multicanaux à travers des largeurs de canaux doublées de 160 MHz dans WiFi 6 à 320 MHz, la technique d'accès multiple OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) dans les deux phases de transmission Uplink et Downlink en permettant des communications multi-utilisateurs et simultanées, la transmission multi-antennes et distribuée ou D-MIMO (Distributed MIMO), la transmission sur de multiples unités de ressources ou MRU (Multiple RU), avec un schéma de modulation et de codage d'ordre extrêmement supérieur de 4065 QAM.

1.5.1.1 Regroupement de canaux 320 MHz

La bande de fréquences 6 GHz ouverte à l'utilisation ISM (industrial, scientific and medical) apporte des centaines de MHz disponibles au WiFi 7. Un gain beaucoup plus élevé en débit est alors possible en doublant la bande passante. Wi-Fi 7 prend en charge un regroupement de canaux maximal de 320 MHz sur la bande de fréquence 6 GHz, ainsi que des regroupements de canaux de 20/40/80/160 MHz sur les bandes de fréquence 5 GHz et 6 GHz, et 20/40 MHz sur la bande de fréquence 2,4 GHz, comme illustré la Figure 1.6 [17, 18].

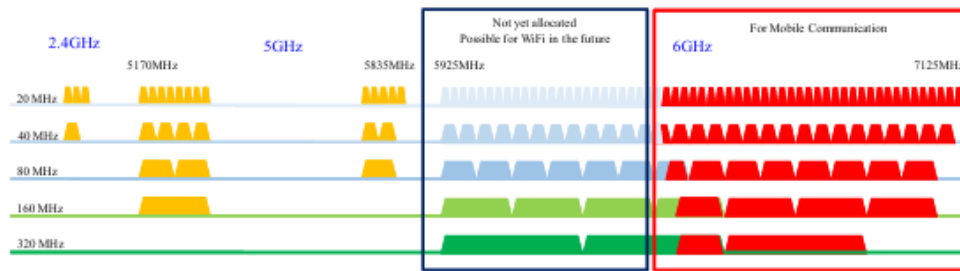


Figure 1.6: Plan de canaux en Chine [17].

1.5.1.2 Technique Uplink/ Downlink MU-MIMO

La technique MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) répond aux exigences croissantes de multiplexage spatial générées par la densité d'appareils connectés. La Wi-Fi 7 améliore cette technologie en augmentant le nombre de flux spatiaux simultanés de 8 à 16, doublant ainsi le débit physique théorique par rapport au Wi-Fi 6. La technique permet des transmissions en DownLink (depuis le point d'accès vers les stations) comme ça été le cas dans les réseaux WiFi antérieurs mais aussi en UpLink (depuis les stations vers le point d'accès), C'est là où intervient la technologie Wi-Fi 7 pour promettre des vitesses de transmission et un nombre d'utilisateurs simultanés assez grands. Avec 16 flux, un point d'accès peut communiquer avec davantage d'appareils en parallèle, en attribuant à chaque flux spatial une bande passante dédiée pour les transmissions en liaison montante (UL) ou descendante (DL). De plus, chaque appareil bénéficie d'une capacité réseau optimisée, éliminant les congestions et garantissant des performances stables pour les applications gourmandes en données [19].

La Figure 1.7 montre l'amélioration introduite par la norme 802.11be Wi-Fi 7 sur le nombre de flux spatiaux. Bien que la norme 802.11ax Wi-Fi 6 offre huit flux spatiaux, le besoin accru de couverture sans fil pour différentes applications en exige davantage. Cela signifie qu'un seul point d'accès peut répondre a ce besoin [18, 20].

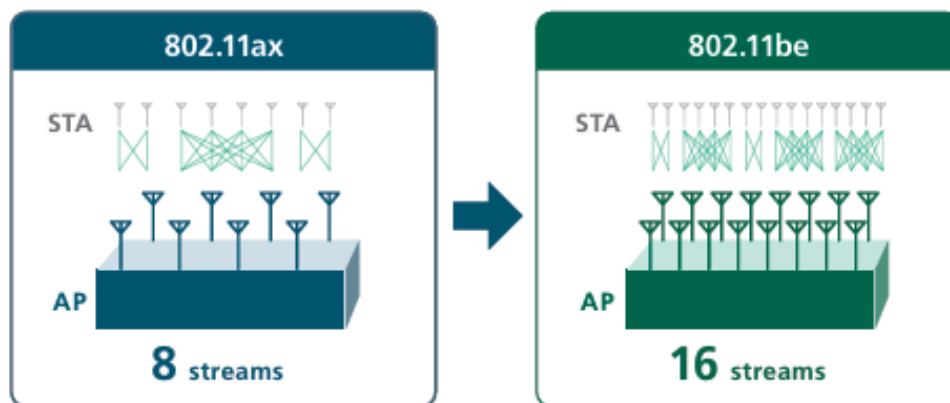


Figure 1.7: Comparaison des flux spatiaux 802.11ax et 802.11be [20].

1.5.1.3 Technologie multi-antennes et distribuée D-MIMO

D-MIMO (Distributed Multiple-Input Multiple-Output) est une technique de communication sans fil où les antennes sont réparties géographiquement sur plusieurs points d'accès ou stations de base, plutôt que d'être concentrées en un seul endroit. Cette distribution permet d'exploiter la diversité spatiale pour améliorer la couverture, la capacité et la fiabilité du réseau. En séparant les antennes, le D-MIMO réduit les effets néfastes du fading et de l'ombrage, tout en minimisant les interférences.

Les signaux reçus par les différentes antennes distantes sont combinés de manière intelligente, souvent à l'aide d'informations de fiabilité basées sur des rapports de vraisemblance logarithmiques (LLR), pour optimiser la détection des données.

Cette approche est particulièrement adaptée aux environnements complexes, comme les zones urbaines ou les bâtiments, et joue un rôle clé dans les réseaux 5G, où les exigences en termes de débit et de qualité de service sont élevées [21]. La Figure 1.8 montre un exemple de D-MIMO pour le Wi-Fi 7.

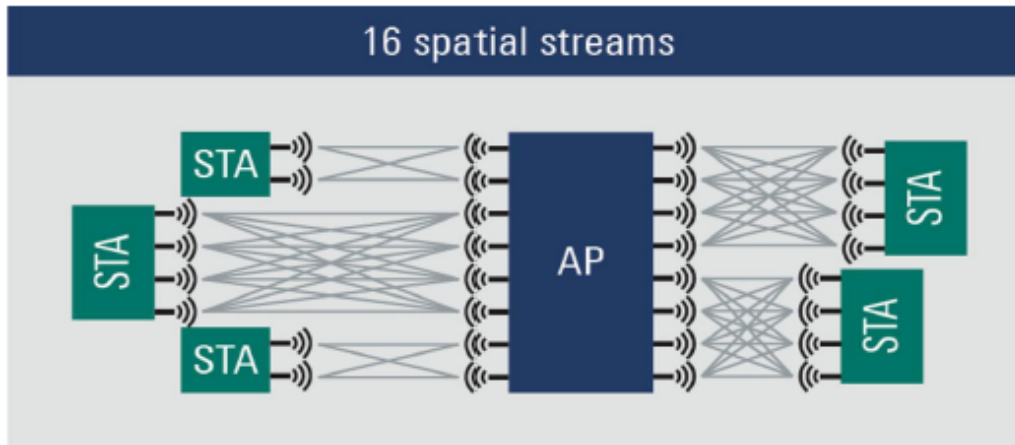


Figure 1.8: Distributed MU DL-MIMO 16×16 [21].

1.5.1.4 Schéma de modulation et de codage 4096 QAM

La modulation QAM (Quadrature Amplitude Modulation) est une technique couramment utilisée dans les réseaux Wi-Fi qui combine des variations d'amplitude et de phase dans l'onde porteuse. Le Wi-Fi 6 prend en charge jusqu'à 1024 QAM, où chaque point de constellation, comme illustré à gauche de la Figure 1.9, représente 10 bits de données. Le Wi-Fi 7, quant à lui, supporte jusqu'à 4096 QAM, chaque point de constellation à droite représentant 12 bits de données. Cela signifie que chaque point modulé en QAM dans le Wi-Fi 7 peut transporter 2 bits supplémentaires par rapport au Wi-Fi 6, ce qui se traduit par une augmentation de 20% de la vitesse de transmission [17, 18].

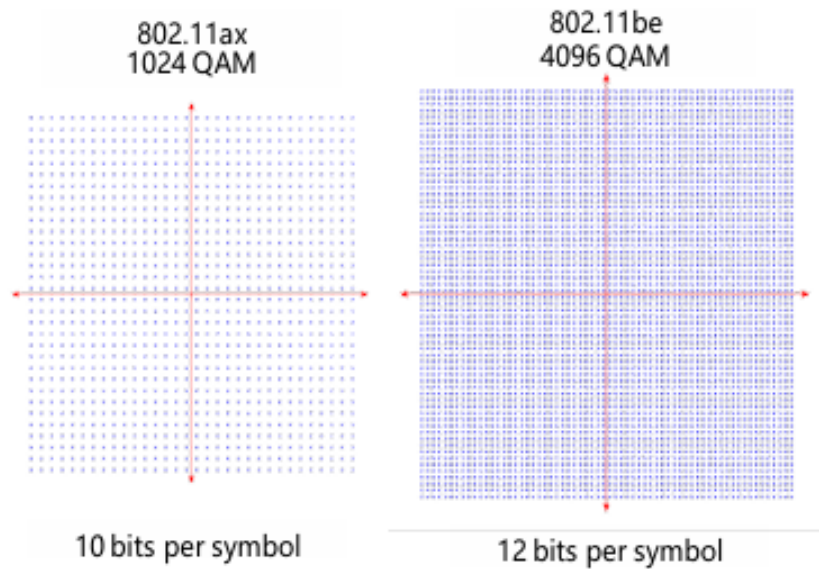


Figure 1.9: Comparaison entre le schéma 1024 QAM et 4096 QAM [17].

1.5.1.5 Techniques OFDMA et Multi User-OFDMA

L'une des techniques utilisées pour répondre à la nécessité de desservir plusieurs utilisateurs simultanément est l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Le fonctionnement de l'OFDMA repose sur la division du canal de 20 MHz composé de 256 sous-porteuses (incluant les sous-porteuses de données et de contrôle) en plusieurs sous-canaux de transmission indépendants appelés Resource Unit (RU), ce qui réduit encore la taille du canal. Une RU est donc un groupe de fréquences qui peut être attribué à différents utilisateurs [18, 22, 23], comme illustrée dans la Figure 1.10. OFDMA permet des communications multi-utilisateurs et simultanées, d'une part, et opère dans les deux modes Up-Link (UL) et Down-Link (DL), d'autre part. Cette dualité DL/UL améliore l'efficacité spectrale et augmente la capacité du réseau, en particulier dans des environnements denses [13, 22]. OFDMA supporte les transmissions multi-utilisateurs et simultanées dans les deux phases UL et DL à travers les unités de ressources. OFDMA offre deux modes d'accès en UL : planifié (Scheduled Access) et aléatoire (Random Access), Le point d'accès sélectionne des RUs pour la communication à accès planifié (SA-RU) et d'autres pour la communication à accès aléatoire (RA-RU). La couche MAC est responsable de la répartition des RU entre les utilisateurs.

Dans la phase DL, l'AP connaît au préalable le contenu de sa file d'attente de paquets pour chaque STA de son réseau, qui peut être utilisée pour programmer les transmissions multi-utilisateurs. Cependant, dans la phase UL, l'état des files d'attente doit être collecté auprès des STA via des trames de contrôle. La trame BSRP (Buffer Status Report Poll) est transmise par le point d'accès pour interroger les stations sur leur besoin de transmettre, puis les stations répondent par une trame BSR (Buffer Status Report) pour confirmer leur besoin de transmission. L'AP envoie régulièrement la trame TF (Trigger Frame) avant chaque communication UL à toutes les stations de son BSS (Basic Service Set), voir la figure 1.11.

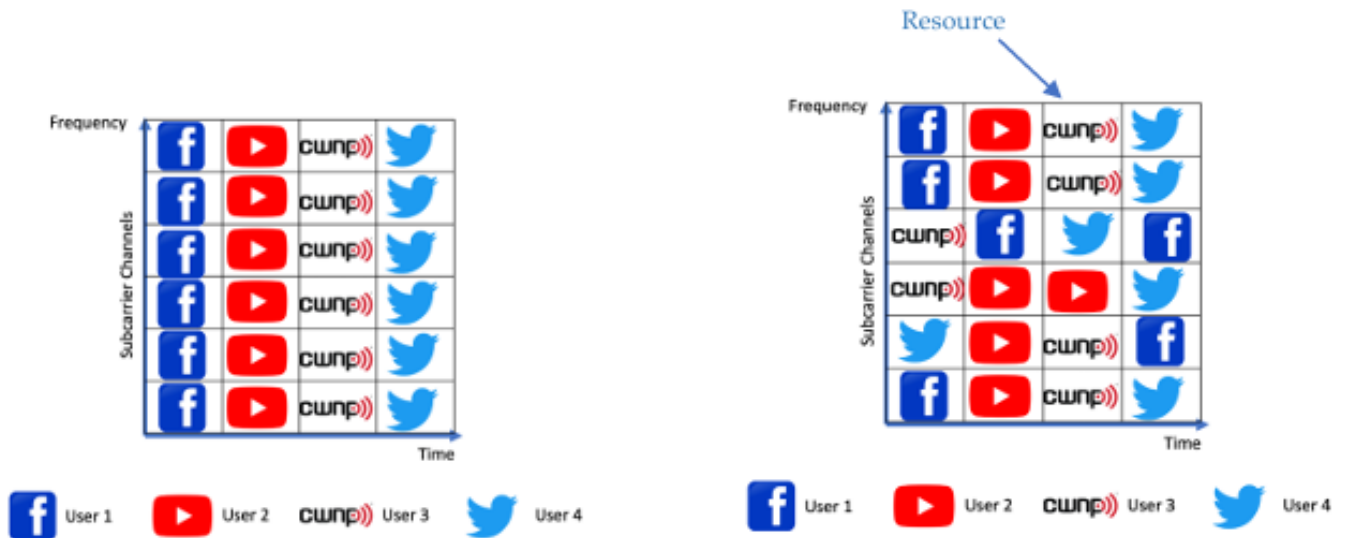


Figure 1.10: Exemple de fonctionnement de OFDMA et de Multi User-OFDMA [18].

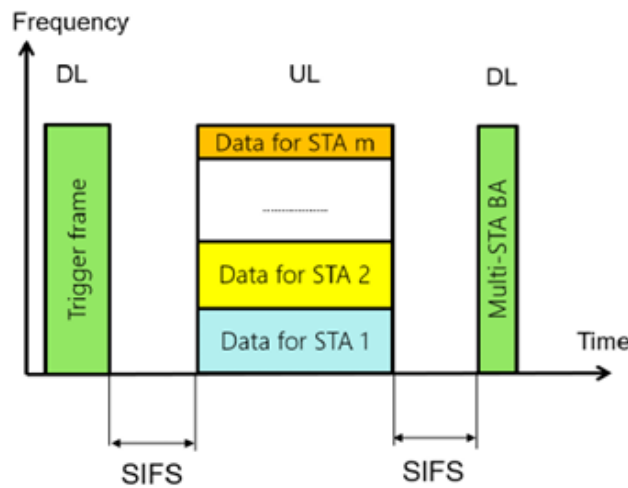


Figure 1.11: Transmissions multi-utilisateurs et simulatnées dans UL OFDMA [44].

La trame TF contient plusieurs champs d'informations, tels que les RU à accès aléatoire éligibles (RARU) réservés à l'accès aléatoire UpLink, les identifiants d'association correspondants AID (Associated ID) et d'autres champs.

Dans l'accès UL planifié, l'AP alloue des RUs de manière centralisée suivant un scheduler en fonction des besoins des STAs. Ce mode est adapté aux STA ayant des besoins sporadiques, offrant ainsi une flexibilité accrue pour les transmissions occasionnelles.

Dans l'accès UL aléatoire, les STA doit tirer une valeur de Backoff à partir de la valeur de sa fenêtre de contention courantes, puis attendent d'abord de recevoir une trame TF depuis le point d'accès. Chaque STA ayant reçu une trame TF doit soustraire le nombre de RU à accès aléatoire de la valeur de son BackOff. Toutes les stations avec une valeur de Backoff négative ou nulle, doivent choisir une RU aléatoirement parmi les RU à accès aléatoire, les STAs peuvent transmettre simultanément leur trames de données sur les différentes RUs qui lui sont attribuées, comme illustré par la Figure 1.11. Après des transmissions UL réussies,

l'AP envoie, après un temps SIFS, une trame MSBA (Multi-STA Bloc ACK) sur l'ensemble du canal, à toutes les stations réussies, ce mode est idéal pour les transmissions sensibles à la latence [13, 44].

1.5.1.6 Technique d'accès Multiple RU

Wi-Fi 7 s'appuie sur cette base avec une nouvelle fonction MRU (Multiple RU) prise en charge dans le PHY EHT. Une MRU se compose de combinaisons de RU à 26, 52, 106, 242, 484, 996, 2×996 ou 4×996 tons. Les EF inférieures à 242 tons sont définies comme des EF de petite taille, tandis que celles qui sont supérieures à 242 tons sont définies comme des EF de grande taille, et elles ne peuvent être combinées qu'avec d'autres EF de grande taille pour former des MRU de grande taille.

Les tonalités RU peuvent varier en fonction du nombre d'utilisateurs. Le Wi-Fi 7 peut accueillir jusqu'à 74 utilisateurs sur une largeur de bande de 160 MHz, mais avec moins d'utilisateurs, il peut avoir de meilleures tonalités RU. La Figure 1.12 montre les tonalités RU en fonction de la largeur de bande et du nombre d'utilisateurs [18, 22].

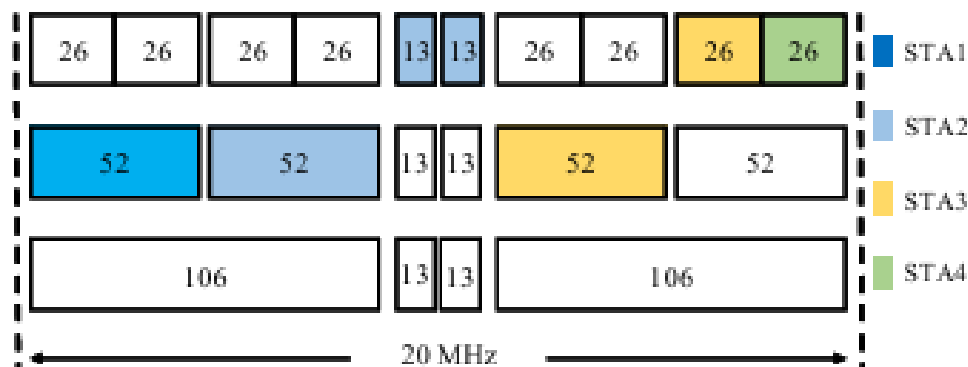


Figure 1.12: Multi RU of Wi-Fi 7 [17].

1.5.2 Techniques de la couche MAC

Plusieurs techniques ont été proposées pour s'adapter aux modifications approuvées au niveau PHY, d'autres techniques proposées pour la première.

1.5.2.1 Technique d'accès multi-liens MLO

Wi-Fi 7 introduit pour la première fois une nouvelle façon d'utiliser les trois bandes de fréquences de 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz simultanément dans l'objectif d'augmenter le débit de données de l'utilisateur, augmenter le nombre d'utilisateurs simultanés, réduire la latence et les délais d'attente avant l'accès au canal. Cette technique de la couche MAC est appelée la technique d'accès multi-bandes et multi-liens ou MLO (Multi-Link Operation). Elle permet l'agrégation de canaux ou comme souvent nommés liens sur les différentes bandes. Elle crée un regroupement ou une liaison de plusieurs liaisons radios pour fonctionner comme une liaison

virtuelle entre les pairs connectées. Chaque liaison radio peut fonctionner indépendamment et simultanément avec d'autres liaisons et se coordonner entre elles pour optimiser les vitesses agrégées, la latence, la portée (couverture) et encore l'économie d'énergie [18, 48].

MLO repose sur Multi-Link Device (MLD), qui désigne un dispositif capable d'exploiter simultanément plusieurs liaisons radio. Souvent, un lien correspond à une liaison RF (Radio-Frequency). Un MLD peut être un point d'accès (AP MLD) ou une station (STA MLD), permettant ainsi la transmission et la réception simultanées de données sur plusieurs liens. La figure 1.13 illustre le fonctionnement général de la technique MLO.

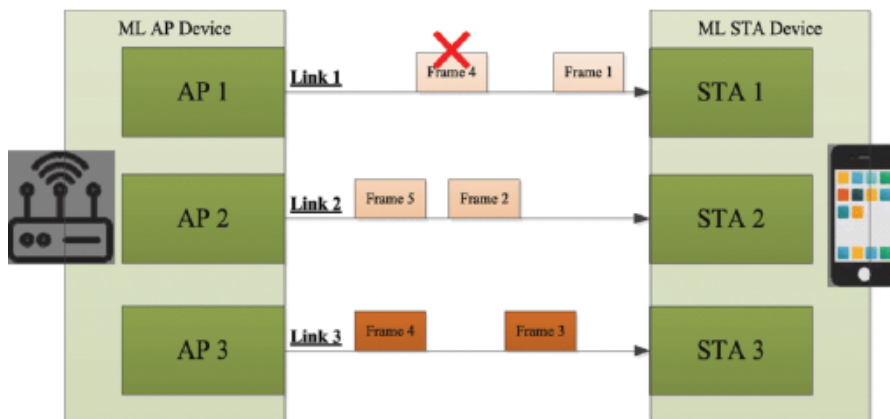


Figure 1.13: Exemple de fonctionnement MLO [48].

Contrairement aux générations antérieures du WiFi où les appareils ne pouvaient se connecter qu'à une seule bande à la fois et utiliser un seul lien suivant le fonctionnement SLO (Single Link Operation), le MLD permet une connectivité multi-bandes simultanée [19]. La Figure 1.14 illustre un exemple de dispositif AP dans le WiFi 6 SLO et WiFi 7 MLO.

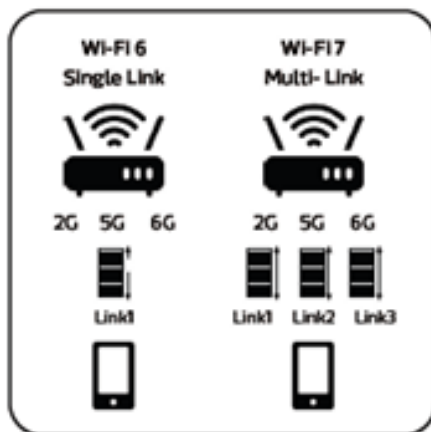


Figure 1.14: Exemple de dispositifs AP SLO et AP MLO [26].

Pour son fonctionnement, Wi-Fi 7 adopte deux types d'agrégation de ML flexibles et diversifiés nommés agrégation synchrone et asynchrone [17].

- **Agrégation synchrone** : signifie que les différents liens doivent soit recevoir soit envoyer des données simultanément. Ce type est plus adapté aux APs ou STAs qui ne peuvent

pas prendre en charge la transmission et la réception simultanées, des dispositifs ayant la capacité non STR (non Send and Receive Simultaneously) en raison du problème des interférences qui proviennent des canaux adjacents.

- **Agrégation asynchrone** : signifie que la détection du canal, l'écoute et la transmission de données sur les différentes liaisons est indépendante l'une de l'autre. c'est-à-dire que les différents liens peuvent transmettre et recevoir indépendamment et simultanément, des dispositifs ayant la capacité STR (Send and Receive Simultaneously).

1.5.2.2 Techniques de réutilisation spatiale CSR

La technique CSR (Coordinated Spatial Reuse) est une approche avancée en communication sans fil qui vise à optimiser l'utilisation du spectre et à améliorer les performances des réseaux Wi-Fi, en particulier dans des environnements denses où plusieurs points d'accès (AP, Access Points) et dispositifs coexistent. Cette technique combine deux concepts clés : Co-OFDMA (Coordinated Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) et Co-Multi AP (Multi-Access Point Coordination).

- **Technique Co-Multi AP**

Co-Multi AP (Cordination Multiple AP) technique qui n'a pas été incluse dans les normes 802.11, comme illustré dans la Figure 1.15. Grâce à cette technique, les points d'accès adjacents sur le réseau coopèrent et se coordonnent afin d'optimiser la communication et améliorer à la fois la fiabilité et la vitesse de communication en contrôlant la puissance de transmission et la formation de faisceaux (beamforming) permettant de tracer physiquement les chemins pour les transmissions simultanées [20, 24].

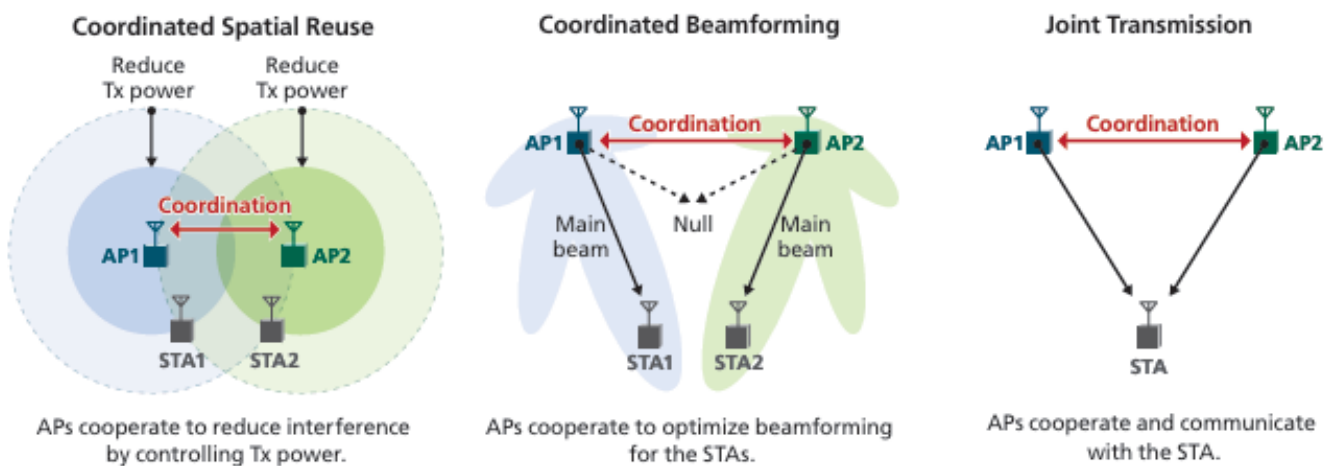


Figure 1.15: Exemples de fonctionnement de Coordination Multi-AP [20].

- **Technique Co-OFDMA**

Co-OFDMA (Coordinated OFDMA) une version améliorée de OFDMA visant à optimiser l'efficacité du canal à la fois en termes de temps et de fréquence. L'idée principale est que les points d'accès voisins peuvent coordonner entre eux à l'attribution de mêmes ressources

radio aux différentes stations de différents BSS si cela n'engendre pas d'interférences [25, 26]. Elle peut s'appuyer sur les phases suivantes :

- La phase de **préparation** : phase d'écoute du canal où des trames de gestion seront échangées entre les APs afin d'évaluer la faisabilité des transmissions simultanées.
- La phase d'**organisation** : phase où l'AP gagnant de l'accès sélectionne un AP qui sera candidat à prendre la responsabilité de coordination afin de pouvoir partager la ressource radio entre les APs voisins.
- La phase de **communication** : (voir la Figure 1.16) phase où l'AP coordonnateur envoie une trame de gestion indiquant l'ensemble des APs sélectionnées pour les transmissions simultanées. La trame de gestion peut comprendre des informations telles que la durée maximale de transmission, la puissance de transmission maximale autorisée, etc. Ensuite, les trames de données et les trames ACK peuvent être échangées entre des stations appartenant aux BSSs autorisés et leur AP suivant les modes DL-OFDMA et UL-OFDMA [43].

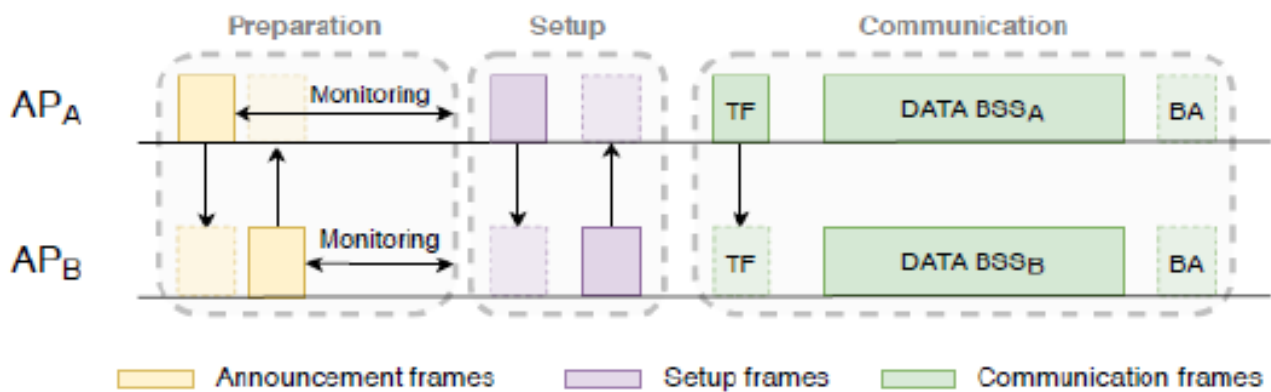


Figure 1.16: Phases envisagées pour Co-OFDMA [43].

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les systèmes AAL, nous sommes passés ensuite à fournir un aperçu général sur l'évolution du WiFi, puis la norme du WiFi de la septième génération ou Wi-Fi 7 en détail avec ses techniques proposées au niveau des couches physique et MAC.

Dans le chapitre suivant, nous allons approfondir cette exploration en étudiant exhaustivement une fonctionnalité inédite du Wi-Fi 7, la technique MLO, une technique qui n'a jamais été normalisée ni proposée dans les normes antérieures du WiFi.

Chapitre 2

État de l'art sur la technique MLO dans les réseaux WiFi 7

2.1 Introduction

Le réseau Wi-Fi 7 marque une avancée majeure avec la proposition de la technique Multi-Link Operation ou MLO. MLO fait référence à l'utilisation simultanée de plusieurs liens opérant sur différentes bandes de fréquences par un point d'accès, une station ou les deux. Les avantages de cette fonctionnalité sont nombreux, notamment l'amélioration du débit total et la réduction des délais pour les applications sensibles aux délais et temps réel.

Nous allons diviser ce chapitre en deux parties. Dans la première partie, nous allons décrire en détail le fonctionnement de la technique MLO. Dans la seconde partie, nous allons dresser une synthèse des travaux recherche de la littérature les plus récents visant à améliorer le fonctionnement de MLO où nous analyserons les thématiques existantes, les défis rencontrés et les solutions proposées.

2.2 Fonctionnement du MLO

Dans cette partie, nous allons décrire la technique MLO.

2.2.1 Multi-connectivité

Multi-connectivité ou MC (Multi-Connectivity) comme illustrée dans la Figure 2.1 est un concept essentiel pour permettre le fonctionnement MLO en utilisant différentes technologies d'accès radio RAT (Radio Access Technologies) avec la diversité spatiale pour optimiser la qualité du signal. MC repose sur la séparation des chemins de transmission à l'émetteur et leur recombinaison du côté du récepteur, tout en s'intégrant à différents niveaux du modèle OSI. Aux niveau des couches basses (PHY et MAC), la MC agit sur la qualité du signal en combinant les flux pour réduire le taux d'erreur binaire BER (Binary Error) et améliorer le rapport Signal/Bruit et d'interférence SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio). À des niveaux supérieurs (réseau, transport et application), elle optimise la gestion des paquets et la sélection des meilleures connexions pour assurer une transmission fluide et robuste [28].

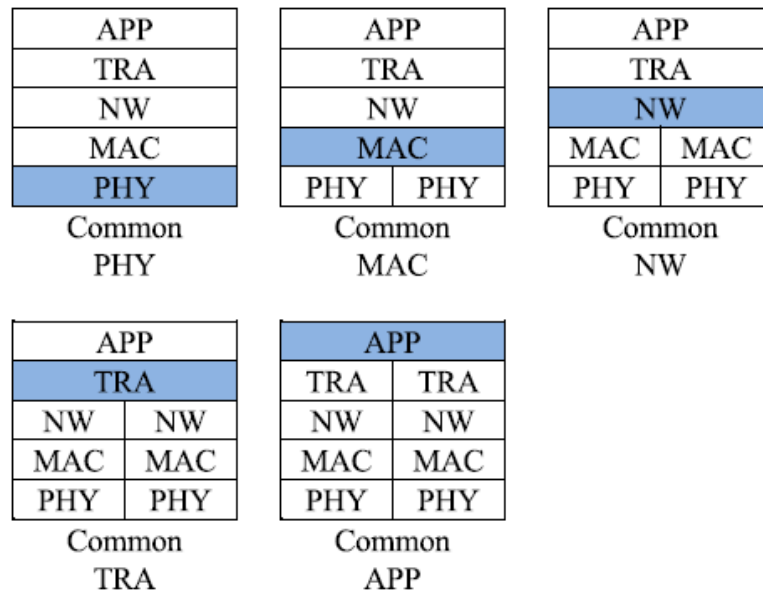


Figure 2.1: Séparation et combinaison de chemins MC au niveau des couches OSI [28].

2.2.2 Architecture multi-liens et dispositif MLD

L'architecture de système de MLO est illustrée dans la Figure 2.2. Un dispositif EHT capable de MLO s'appelle un dispositif multi-lien ou MLD (Multi-Link Device), tandis qu'un dispositif hérité prenant en charge uniquement un lien SLO s'appelle un dispositif mono-lien ou SLD (Single-Link Device).

Chaque lien d'un MLD est considérée comme une station à liaison unique, et un MLD est considéré comme un dispositif affilié à plus d'une station. Par contre, un SLD est affilié à une seule station.

Ainsi, nous utilisons les termes, dispositif legacy et STA legacy, de manière interchangeable. Les MLD peuvent être classés en deux types en fonction du type des stations affiliées: AP multi-link device (AP MLD) : chacune des STAs affiliées est un AP. Dispositif multi-lien non AP (non-AP MLD) : chacune des STAs affiliées est une STA non-AP (client).

La norme 802.11be divise à son tour la sous-couche MAC en deux parties :

- MAC supérieur ou U-MAC (Upper-MAC), qui est une partie commune de la sous-couche MAC pour toutes les interfaces. Le trafic attend au niveau de U-MAC avant d'être affecté à une interface spécifique pour la transmission.
- MAC inférieur ou L-MAC (Lower-MAC) en dessous du U-MAC. Ce niveau est indépendant et a ses paramètres pour chaque interface.

Cette structure permet de concevoir un gestionnaire de trafic au top du framework MLO pour appliquer différentes politiques de trafic et afin d'allouer de nouveaux paquets entrants à travers les interfaces, assurant une utilisation plus équilibrée des ressources réseau [42].

Chaque STA affiliée à un MLD est composé de sa propre couche (composant) PHY et LMAC. En plus de l'ensemble des STA affiliées, un MLD dispose d'un composant UMAC commun pour

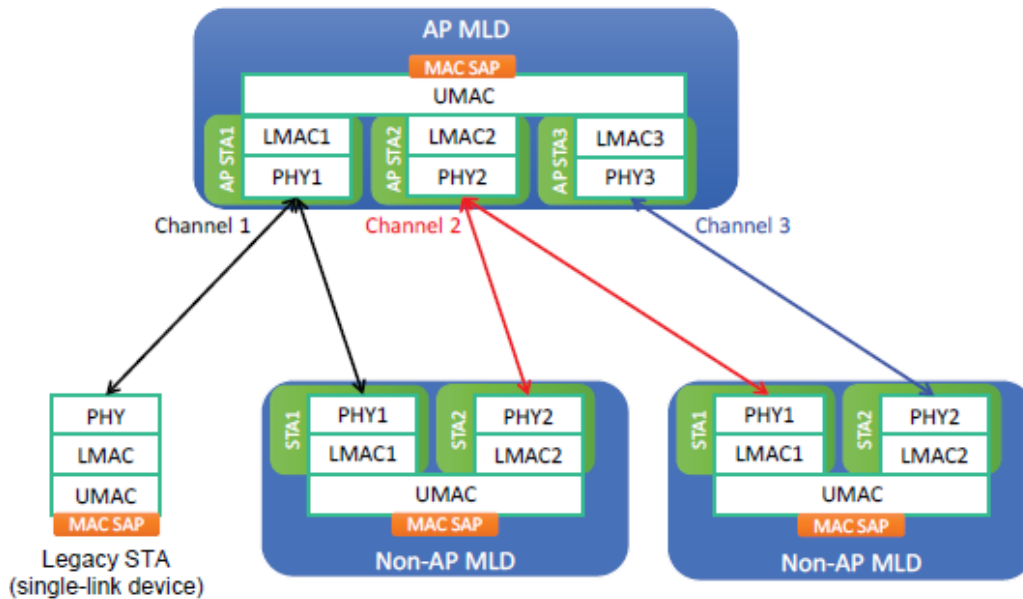


Figure 2.2: Architecture de système multi-liens [41].

agrèger son ensemble de STA affiliées et fournir à la couche LLC (Logical Link Control) un seul SAP (Service AP) MAC. Comme illustré dans Figure 2.1, un MLD AP peut gérer des MLD non-AP grâce à l'établissement de différents liens. Un MLD non AP peut être lié à plusieurs STA non AP en utilisant des canaux individuels, chacun d'eux étant associé à une STA AP du MLD AP [41].

2.2.3 Gestion de liens multiples

Cette sous-section abordera des topics importants dans MLO, ils sont l'élément multi-liens, la découverte et la configuration de liens.

2.2.3.1 Élément multi-liens

MLE (Multi-Link Element) est un composant crucial au sein de la norme 802.11be, servant à faciliter l'échange de capacités et de paramètres opérationnels entre les stations via diverses trames de gestion. Il représente un lien au sein d'un MLD et peut fonctionner sur différentes fréquences 2.4 GHz, 5 GHz ou 6 GHz, un MLD est composé de plusieurs MLE, qui collaborent pour assurer une communication efficace.

EHT Cap & Op, EHT Cap (EHT Capabilities) représente les capacités de l'élément EHT tandis que EHT OP (EHT Operation) définit les paramètres spécifique à l'élément. la norme 802.11be utilise l'élément RNR (Reduced Neighbor Report) pour diffuser des informations fondamentales sur différentes interfaces au sein du même AP MLD. IEs représente les Interfaces radios associées à un MLE.

MLE est ingénieusement conçu pour fonctionner comme un élément commun à travers différentes actions de gestion, telles que la découverte et l'installation, comme illustré dans la Fig 2.3. Il facilite la gestion et la configuration des connexions en optimisant la transmission

des informations. Il existe deux types de MLE :

- ◇ **Type de base:** utilisé pour les trames Beacon afin de transmettre des informations communes aux stations.
- ◇ **Type de demande/réponse:** utilisé lors de la configuration multi-lien afin d'échanger des informations détaillées [28].

2.2.3.2 Découverte et configuration de multiples liens

Le mécanisme de découverte 802.11be reprend les principes déjà établis dans le standard IEEE 802.11, les stations peuvent acquérir des informations sur les APs à proximité grâce à un processus de découverte utilisant un balayage passif ou actif. Cependant, l'intégration du concept MLD nécessite certains ajustements. Les trames Beacon et de sondage/test ne transmettent que des informations partielles au niveau multi-liens, spécifiquement des informations liées à la couche U-MAC. Par conséquent, cette implémentation peut augmenter le temps nécessaire aux stations pour effectuer le processus de découverte, car elles sont obligées de sonder toutes les interfaces du MLD avant d'initier la configuration multi-liens.

Pour accélérer le processus de découverte, la norme 802.11be propose de réutiliser l'élément RNR, comme illustré dans la figure 2.3, pour annoncer des informations de base sur les différentes interfaces du même AP MLD. Par conséquent, les stations peuvent directement sonder un AP MLD pour demander son ensemble complet de capacités, de paramètres et d'éléments opérationnels de d'autres interfaces, tout en utilisant le type MLE requête/réponse multi-liens. Notamment, ces informations concernent uniquement les interfaces qui ne transmettent pas de trames Beacon. Cette approche s'avère avantageuse en économisant l'énergie. De plus, ceci permet d'éviter de forcer les MLD non AP à activer plusieurs radios pour sonder d'autres bandes/canaux du MLD AP. Ainsi, elle minimise le temps nécessaire à l'échange des trames de gestion et réduit le temps nécessaires aux les stations pour passer du processus de découverte à la configuration multi-liens [28].

2.2.4 Types de dispositifs MLO

Les principaux types de dispositifs MLO sont les suivants :

- ◇ **MLSR** (Multi-Link Single Radio) : ce type de dispositif ne possède qu'une seule radio et ne peut communiquer que séquentiellement sur un seul lien à la fois. Il supporte bien le mode MLO, mais son fonctionnement reste limité puisqu'il ne peut pas exploiter plusieurs liens simultanément.
- ◇ **EMLSR** (Enhanced Multi-Link Single Radio) : ce type de dispositif est capable d'écouter plusieurs liens à la fois, bien qu'il ne puisse toujours transmettre ou recevoir que sur un seul lien à la fois. Son principal avantage réside dans sa capacité à basculer dynamiquement entre les différentes bandes de fréquences, améliorant ainsi la gestion des ressources.

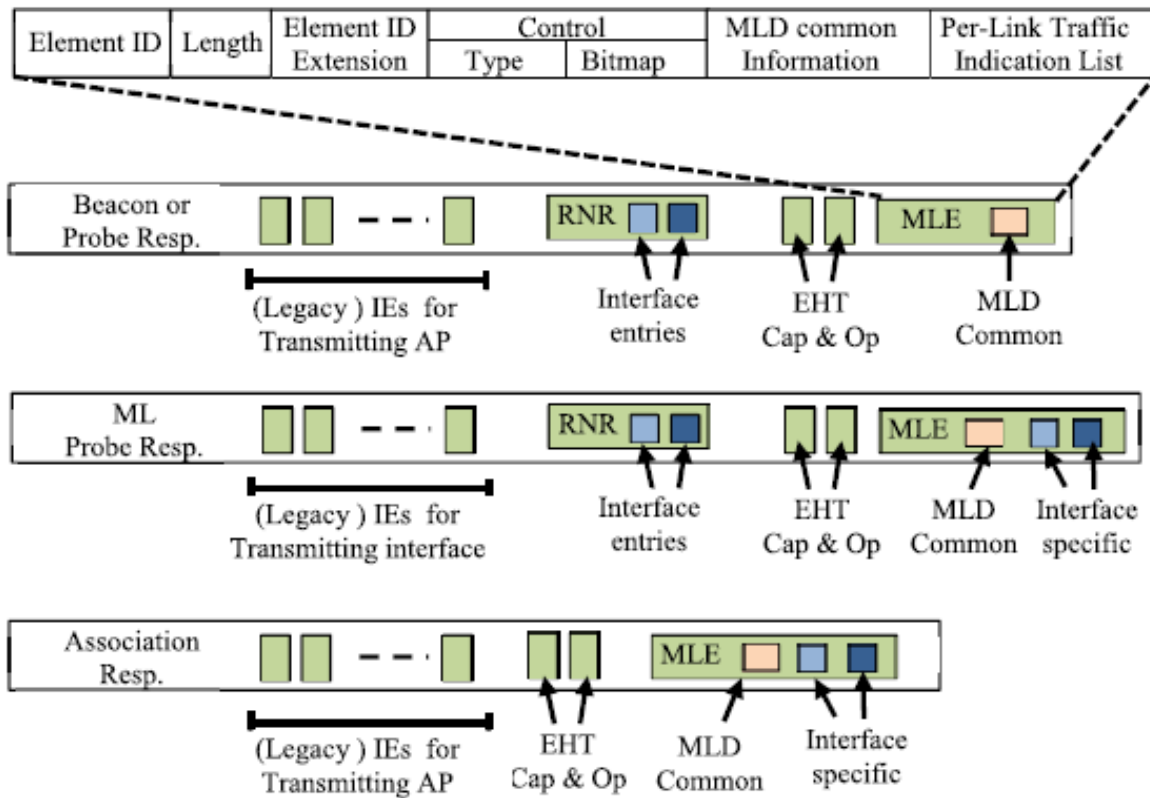


Figure 2.3: Élément multi-liens et trames de gestion [28].

- ◇ **NSTR-MLMR** (Non-Simultaneous Transmit-Receive Multi-Link Multi-Radio) : ce dispositif intègre plusieurs radios, leur permettant de transmettre ou de recevoir des données sur plusieurs liens en même temps. Toutefois, ils ne peuvent pas émettre et recevoir simultanément, ce qui peut limiter leur efficacité en cas de forte charge réseau.
- ◇ **STR-MLMR** (Simultaneous Transmit-Receive Multi-Link Multi-Radio) : ces dispositifs permettent d'effectuer des transmissions et réceptions simultanées sur plusieurs liens. des dispositifs qui conviennent aux applications des systèmes AAL avec des besoins en latence réduite et en débit élevé en utilisant plusieurs bandes de fréquences en parallèle (2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz).
- ◇ **EMLMR** (Enhanced Multi-Link Multi-Radio): ces dispositifs multi-radios optimise la gestion des ressources spectrales en ajustant le multiplexage spatial via des configurations de chaînes RF adaptées à chaque bande de fréquence. Cela permet d'améliorer la répartition des flux de données et d'optimiser l'utilisation du spectre disponible [28].

2.2.5 Transmission et réception multi-liens

IEEE 802.11 définit un identifiant de trafic TID (Traffic Identifier) pour classer un paquet avec différenciation de service. Le TID est représenté par un nombre de quatre bits (0-7) identifiant la qualité de service (QoS) souhaitée pour le trafic.

Dans MLO, le TID est utilisé pour déterminer quel(s) lien(s) à utiliser pour le trafic avec une QoS spécifique. Si un TID spécifique est mappé à un ensemble de liens, alors tout lien dans

cet ensemble peut être utilisé pour transmettre des trames de données depuis ce TID.

Par défaut, après configuration de liens multiples, tous les TID sont mappés à tous les liens établis. Cependant, le mappage TID-to-link peut spécifier soit les mêmes ensembles de liens, soit des ensembles de liens différents pour chaque TID. Après la configuration multi-lien, le mappage TID-à-lien peut être mis à jour par négociation [28, 41].

Il existe deux principales stratégies de mappage TID-to-Link, elles sont les suivantes :

- ◇ Mappage TID-to-Link one to one : agrégation au niveau du flux
- ◇ Mappage TID-to-Link one to Many : agrégation au niveau du paquet

2.2.5.1 Mappage TID-to-Link one to one

Avec ce mappage, chaque TID est mappé à un seul lien, ce qui signifie que le trafic avec un TID donné sera transmis en utilisant uniquement le lien dédié associé. Distribuer des flux de trafic individuels définis par différents TID à différentes liaisons de cette manière entraînera une augmentation du débit et une diminution de la latence. Cependant, étant donné que les mises à jour du mappage TID-to-link peuvent ne pas être fréquentes, l'effet de l'augmentation du débit obtenu avec cette stratégie est quelque peu limité ; même si la quantité de trafic associée à un TID particulier est importante et que la file d'attente de liens correspondante devient congestionnée, d'autres liens ne peuvent pas être utilisés pour ce TID. Pour la même raison, cependant, cette stratégie de mappage est bénéfique pour les TID à haute priorité car elle isole physiquement les ressources des liens associées depuis les autres TID à basse priorité.

2.2.5.2 Mappage TID-to-Link one to Many

Pour l'augmentation du débit et de diminution de la latence dans MLO, un TID peut être mappé à un ensemble de liens multiples, permettant au trafic avec ce TID d'être transmis en utilisant n'importe quel lien appartenant à cet ensemble. De cette manière, un taux de trafic plus élevé avec ce TID peut être géré, et une file d'attente congestionnée pour ce TID sera évacuée plus rapidement. Le UMAC du côté émetteur joue un rôle dans la distribution du trafic de chaque TID à ses liens mappées (LMACs) au niveau des paquets.

Cependant, UMAC du côté récepteur doit mettre en mémoire tampon le trafic reçu et passer les paquets en séquence à la couche LLC. Par conséquent, les paquets reçus peuvent attendre dans le tampon du récepteur jusqu'à ce qu'ils puissent être disposés en séquence. Pour y parvenir, plusieurs liens pour les mêmes paquets TID doivent utiliser un espace de numéro de séquence commun partagé entre plusieurs liens [28, 41].

2.2.6 Politiques d'allocation de trafic aux liens

Plusieurs politiques d'allocation ont été proposées, elles sont représentées dans la Figure 2.4 et décrites dans les points suivants :

- ◇ **MLSA (Multi Link Same Load to All Interfaces)** : elle répartit le trafic de manière égale sur toutes les interfaces sans tenir en compte de la surcharge des canaux.
- ◇ **SLCI (Single Link Less Congested Interface) et MCAA (Multi-link Congestion-Aware Load Balancer at Flow Arrivals)** : elles utilisent des mesures sur l'occupation des liens pour allouer le trafic à une ou plusieurs bandes. Elles prennent en compte l'occupation instantanée du canal et la charge de trafic, respectivement, mais leur implémentation non adaptative peut ne pas être efficace pour les flux de longue durée, car l'occupation des liens peut changer rapidement.
- ◇ **VDS (Video and Data Separation)** : cette nouvelle politique sépare le trafic vidéo et les données sur des liens différents. Les flux de données sont alloués à la bande 2,4 GHz ou 5 GHz, tandis que les flux vidéo sont alloués à la bande 6 GHz. Cette approche vise à minimiser les délais d'accès pour le trafic sensible au temps (comme la vidéo) en utilisant des liens sans contention dans les bandes 5 GHz et 6 GHz [29, 30, 47].

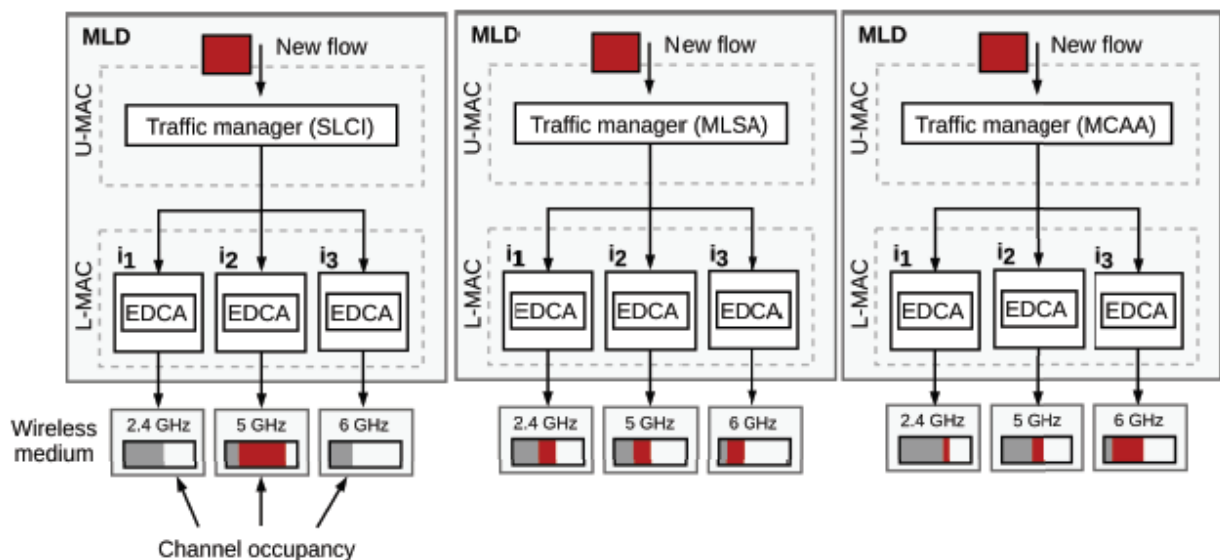


Figure 2.4: Représentation des politiques MLSA, SLCI et MCAA [47].

2.2.7 Schémas de transmissions multi-liens

Nous décrivons les schémas de transmission synchrone et asynchrone, les capacités STR et non-STR et enfin les modes de transmissions Redundancy et Joint.

2.2.7.1 Transmissions asynchrone et synchrone

- ◇ **Transmission asynchrone** : voir la Figure 2.5, un dispositif MLD peut transmettre et recevoir des trames sur plusieurs liens avec des temps de début et de fin de transmission non forcément alignés. Chaque lien possède son propre canal principal, chaque dispositif ou station se contentant l'accès à ce lien utilise ses paramètres de contention et l'accès au lien est totalement indépendant de l'accès des autres dispositifs aux autres liens [19].

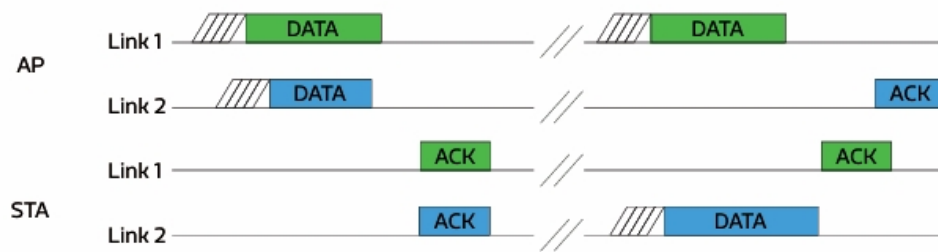


Figure 2.5: Exemple de transmission multi-liens asynchrone [37].

- ◇ **Transmission synchrone** : impose à un dispositif MLD de transmettre simultanément ou de recevoir simultanément sur de plusieurs liens, mais jamais transmettre et recevoir simultanément, comme illustré dans la figure 2.6. La transmission synchrone est organisée en une succession de phase de transmission sur de multiples liens et de réception depuis de multiples liens. Chaque lien dispose d'un accès au canal dépendant des autres liens utilisés par un même MLD, avec des temps de début et de fin de transmission bien alignés entre les liens utilisés pour l'accès multi-liens [19].

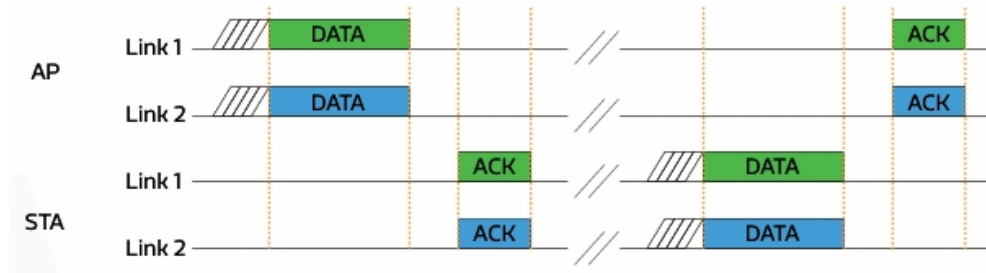


Figure 2.6: Exemple de transmission multi-liens synchrone [37].

2.2.7.2 Capacité STR et non-STR

- ◇ **Capacité STR** (Simultaneous Transmit and Receive) : elle permet à un dispositif MLD de transmettre et recevoir simultanément sur de multiples liens. Cette capacité améliore significativement le débit global du réseau et réduit la latence en supprimant les temps d'attente entre transmission et réception [28]. Comme illustré dans la Figure 3 Dans le cas de STR-MLMR, plusieurs radios indépendantes assurent des connexions simultanées sur différentes fréquences, telles que 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz. Cette approche optimise l'utilisation du spectre et assure une meilleure répartition des flux de données. Cependant, une gestion efficace des ressources radio est nécessaire pour éviter les interférences inter canaux [28].
- ◇ **Capacité non-STR** (Non-Simultaneous Transmit and Receive) : elle impose une alternance entre les phases de transmission et de réception. Cette contrainte peut entraîner une augmentation du délai de transmission, notamment lorsque plusieurs canaux sont actifs. Dans le cas de NSTR-MLMR, un dispositif peut transmettre ou recevoir sur

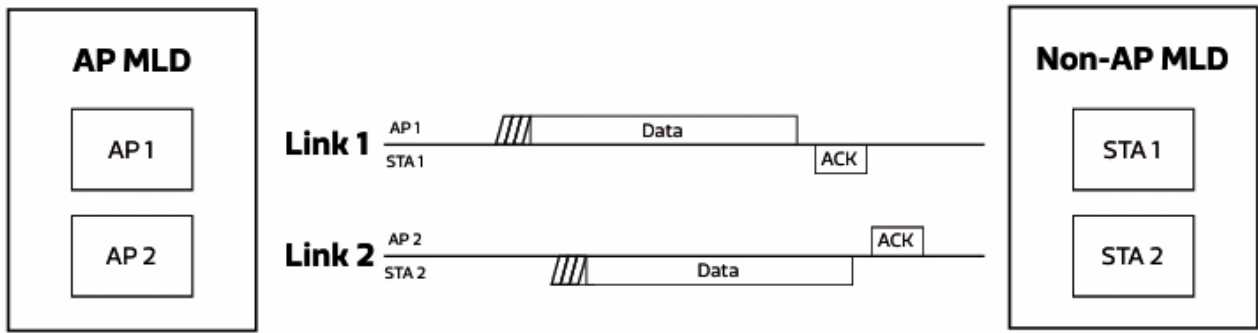


Figure 2.7: Exemple de communication entre MLD avec capacité STR [37].

plusieurs liens en parallèle, mais pas simultanément. Il est particulièrement adapté aux environnements nécessitant une gestion stricte des interférences [28].

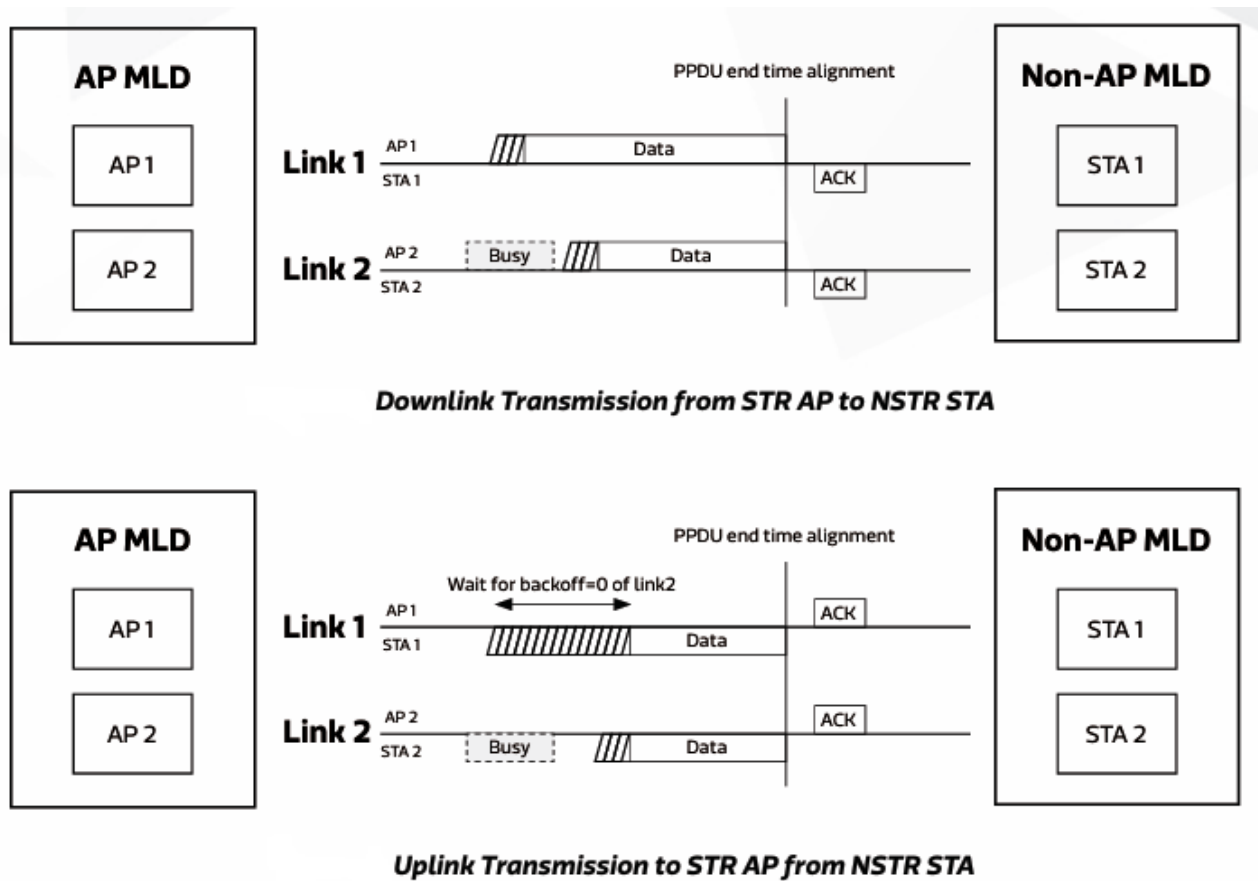


Figure 2.8: Exemple de communication entre un AP STR et une STA non-STR [37].

2.2.7.3 Modes de transmission pour les applications en temps réel

Il existe deux modes : Redundancy (Duplicate) et Joint (Random), tels qu'ils sont illustrés dans la figure 2.9 ci-dessous.

- ◇ **Mode Redundancy** : l'émetteur envoie des copies de chaque trame sur les multiples liens. Dès que le récepteur reçoit une trame, il supprime toutes les copies redondantes. Ce

mode augmente la probabilité de transmission réussie en garantissant que la trame arrive bien sur au moins l'un des liens au côté du récepteur. Il existe également un mode de duplication conditionnelle où l'émetteur tente d'abord de transmettre la trame via une seule liaison. Si cette tentative échoue, il duplique le paquet et tente de le transmettre via d'autres liaisons prioritaires [19].

- ◇ **Mode Joint** : l'émetteur ne produit pas de copies supplémentaires, mais répartit les trames sur les liaisons disponibles. Ce mode permet de réduire la latence de transmission en exploitant simultanément les différents liens pour transmettre les trames [19].

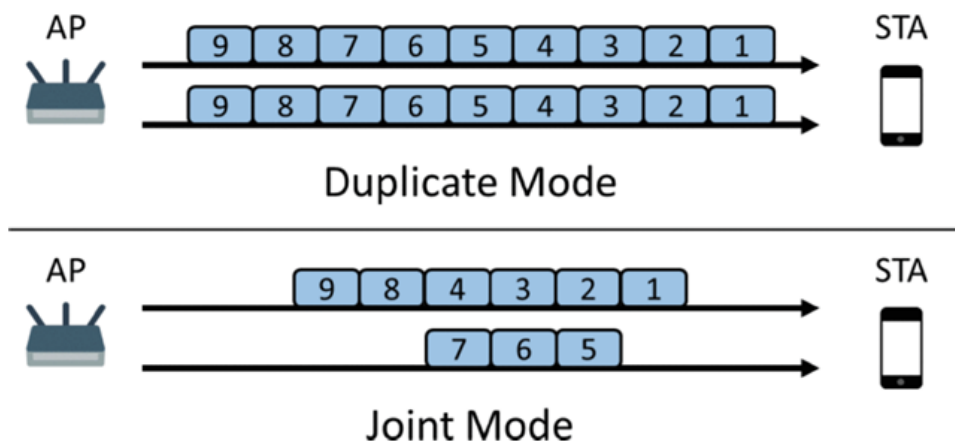


Figure 2.9: Exemples de fonctionnement du mode Redundancy et Joint [19].

2.2.8 Mécanismes d'économie d'énergie

Nous allons présenter les deux mécanismes : TIM (Traffic Indication Map) et TWT (Target Wake Time).

2.2.8.1 Mécanisme TIM

Dans un réseau utilisant le mécanisme TIM, un point d'accès inclut un élément TIM dans les trames de gestion Beacon, qui contiennent un champ bitmap de longueur de 2007 bits. Dont chaque bit correspond à l'état de la station associée : si le bit est à 1, la station doit passer en mode actif (awake state) pour récupérer les données, sinon, si le bit est à 0, elle reste en mode veille (doze state). Avec l'introduction de MLD, le mécanisme TIM a été étendu pour prendre en compte plusieurs liens. Un champ d'indication de lien est ajouté après l'élément TIM, contenant un bitmap de mapping de liaison. Ce bitmap indique sur quels liens les données sont disponibles. Ainsi, une station MLD vérifie d'abord le bitmap TIM pour savoir si elle a des données en attente, puis consulte le bitmap de mapping de liaison pour identifier les liens concernés [19, 30]. La figure 2.10 montre les champs TIM Bitmap et TIM Link dans le cas de multiples liens.

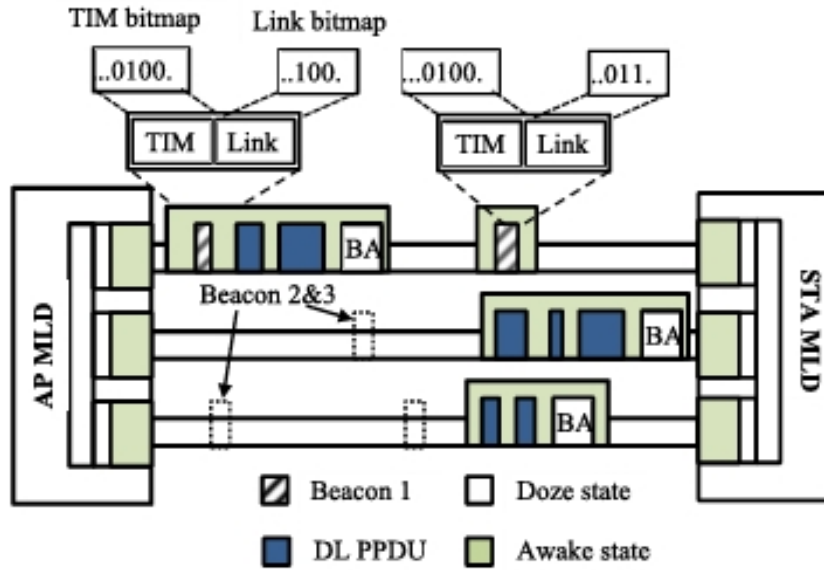


Figure 2.10: Mécanisme TIM multi-liens [28].

2.2.8.2 Mécanisme TWT

Le mécanisme TWT permet aux stations et aux APs de négocier des plages horaires spécifiques, appelées sessions TWT, pendant lesquelles les stations peuvent envoyer ou recevoir des données. Dans le cas du MLO, les stations MLD peuvent inclure plusieurs éléments TWT dans leur requête, chaque élément correspondant à un lien spécifique. Ces éléments contiennent des paramètres tels que l'heure de réveil, l'intervalle de réveil et la durée minimale de réveil. Si les paramètres sont identiques pour tous les liens, un seul élément TWT est nécessaire. Ce mécanisme, appelé TWT multi-liens, permettant aux stations de passer en mode veille entre les sessions TWT, réduisant ainsi leur consommation d'énergie. Les stations ne réveillent que les interfaces nécessaires pendant les périodes de réveil prévues, ce qui optimise l'utilisation de l'énergie[19, 30]. La figure 2.11 montre le mécanisme TWT dans le cas de multiples liens.

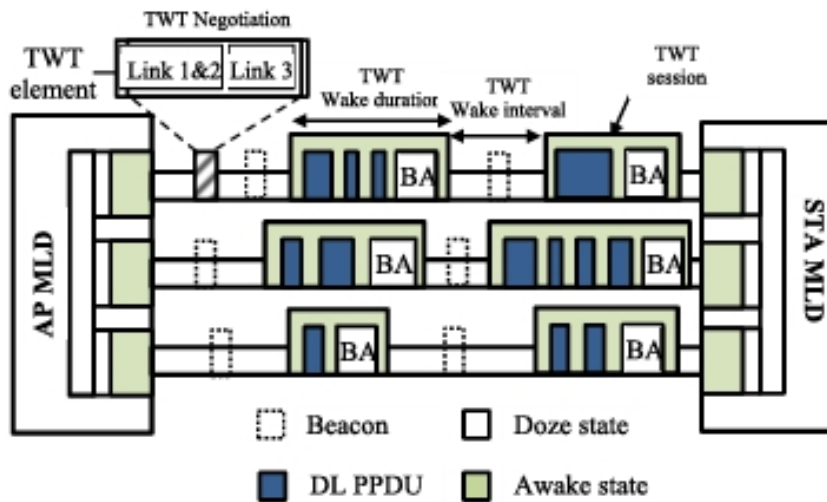


Figure 2.11: Mécanisme TWT multi-liens [28].

Enfin, le résumé des sujets liés au fonctionnement de MLO est donné dans la Figure 2.12.



Figure 2.12: Sujets liés au fonctionnement de MLO [28].

2.3 Synthèse des travaux de recherche de la littérature

Dans cette section, nous allons dresser une synthèse des travaux de recherche récents de la littérature sur le fonctionnement MLO.

2.3.1 Continuous Multi-Link Operation: A Contention-Free Mechanism for the Unlicensed Spectrum (2024)

La solution ConMLO (Continuous Multi-Link Operation) a été proposée par **Fontanesi et al** dans [31], pour améliorer la gestion des transmissions multi-liens dans les réseaux Wi-Fi 7, où la forte concurrence pour l'accès au canal constitue un défi.

Contrairement aux méthodes classiques basées sur la contention LBT (Listen-Before-Talk), ConMLO repose sur une approche proactive qui permet une transmission continue à travers plusieurs canaux. Son fonctionnement, comme illustré dans la Figure 2.13, est innovant et s'appuie sur un algorithme décisionnel qui maintient des compteurs de backoff indépendants pour chaque liaison $l \in L$ et déclenche des procédures de backoff sur les liens secondaires $\mathcal{L} \setminus l_w$ avant la fin du TXOP en cours sur la liaison active l_w , grâce à un décalage temporel soigneusement calculé.

Cette solution permet d'anticiper l'accès au canal suivant, assurant ainsi un enchaînement fluide des transmissions sans collision ni interruption, tout en respectant scrupuleusement les règles LBT. Pour évaluer cette approche, les auteurs ont utilisé des traces réelles du spectre 5 GHz issues du jeu de données WACA, notamment dans un stade de football (Camp Nou), un environnement à très forte densité d'utilisateurs. Cela leur a permis de tester ConMLO dans des conditions réalistes d'occupation du spectre. Les détails de CoMLO sont donnés dans l'algorithme 1 ci-après.

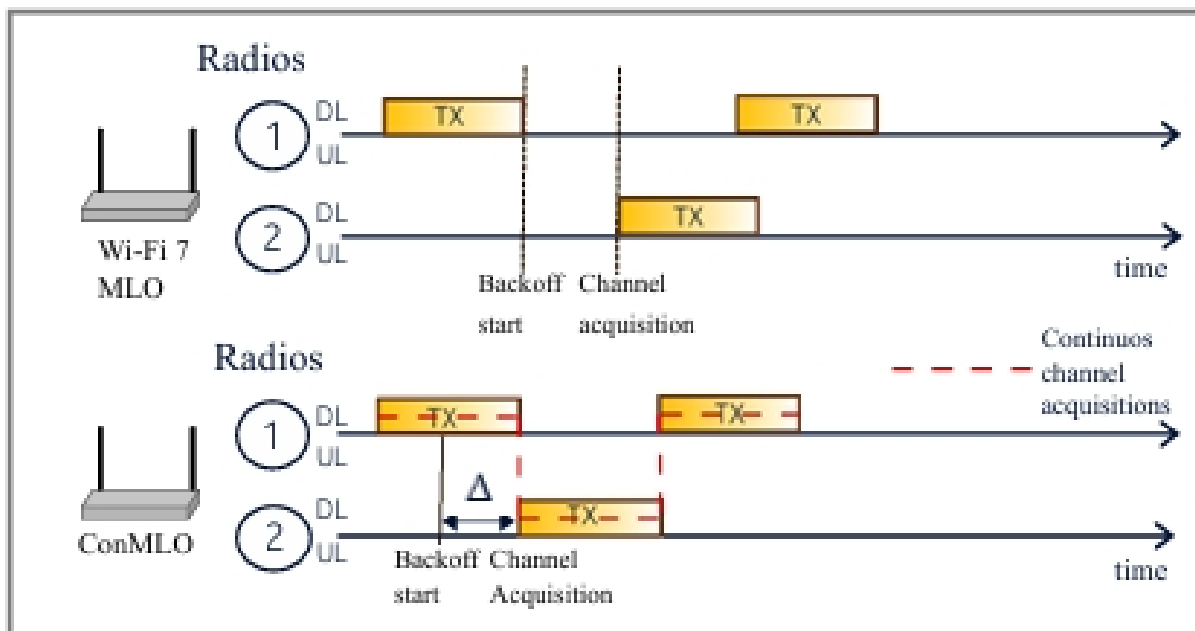


Figure 2.13: Exemple de fonctionnement du MLO WiFi 7 et ConMLO proposé [31].

Algorithm 1: ConMLO

```

1 Initialiser:  $N_{tx} = 0$ ,  $\mathcal{L}' = \mathcal{L}$ ,  $\mathcal{L}_w = \emptyset$ ,  $S_{\ell \in \mathcal{L}} = \text{SENSE}$ 
2 for  $t = 0, \dots, T$  do
3   for  $\ell \in \mathcal{L}'$  do
4     switch  $S_\ell$  do
5       case TRANSMIT do
6         if  $t == (t_0 + T_{tx} - \Delta)$  then
7            $\text{START-BO}(\mathcal{L}')$ ;
8         if  $t == (t_0 + T_{tx})$  then
9            $N_{tx} \leftarrow N_{tx} + 1$ ;  $\mathcal{L}' \cup \ell$ ;  $\text{START-BO}(\ell)$ ;
10        case SENSE do
11          Update  $P_{\text{int}}$ ;
12          if  $P_{\text{int}} < \emptyset$  then
13             $BO_\ell \leftarrow BO_\ell - 1$ ;
14          if  $BO_\ell == 0$  then
15             $\mathcal{L}_w \cup \ell$ ;
16        case WAIT do
17          Do nothing.
18  if  $\mathcal{L}_w \neq \emptyset$  then
19     $\ell_w \xleftarrow{R} \mathcal{L}_w$ ;  $\mathcal{L}' \leftarrow \mathcal{L} \setminus \ell_w$ ;  $S_{\ell_w} \leftarrow \text{TRANSMIT}$ ;  $S_{\ell \in \mathcal{L}'} \leftarrow \text{WAIT}$ ;  $\mathcal{L}_w \leftarrow \emptyset$ ;
20 procedure  $\text{START-BO}(\mathcal{L}')$ 
21   for  $\ell \in \mathcal{L}'$  do
22      $BO_\ell \sim \mathcal{U}(0, CW)$ ;  $S_\ell \leftarrow \text{SENSE}$ ;

```

2.3.2 Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-link Wi-Fi 7 Devices (2024)

Les auteurs **Paroshin et al** dans [32], ont proposé la méthode DAMLA (Dynamic Access Method for Latency-Aware communications), basée sur un algorithme conçu spécialement pour optimiser la gestion des transmissions dans les réseaux sans fil à double liaison MLD. Son fonctionnement repose sur une adaptation dynamique de la taille des trames A-MPDU et du temps de décalage entre les cycles de transmission, en tenant compte en temps réel des erreurs de transmission, des latences et de l'état de la fenêtre BAW (Block Ack Window).

À chaque instant de transmission, DAMLA évalue d'abord la taille effective de la BAW (w) après réception d'un accusé (BACK), puis calcule le décalage optimal (T^s) pour synchroniser les transmissions entre les deux liens. Enfin, il détermine la taille d'agrégation optimale en considérant le débit disponible et les temps de backoff moyens.

Cette approche permet à DAMLA de maximiser le débit tout en minimisant la latence, offrant des performances supérieures aux méthodes d'agrégation statiques, notamment dans des conditions réseau variables ou asymétriques.

2.3.3 Contention-Less Multi-Link Synchronous Transmission for Throughput Enhancement and Heterogeneous Fairness in Wi-Fi7 (2024)

Le mécanisme CLST (Contention-Less Synchronous Transmission) a été proposé par **Kwon et al** dans [34] pour optimiser les transmissions multi-liens dans les environnements hétérogènes où des dispositifs non compatibles avec la transmission/réception simultanées (NSTR-MLD) coexistent avec des équipements à liaison unique (SLD). Son fonctionnement se déroule en plusieurs étapes (voir la Figure 2.14). Tout d'abord, deux types de liens avec dénominations différentes ont été proposées, un lien nommé HCL (Heterogenous Coexistence Link) et un lien nommé MDL (MLD Domimant Link).

Chaque NSTR-MLD initialise un compteur de jetons STT (Synchronous Transmission Token) avec une valeur initiale de zéro, ainsi qu'un paramètre de répétition ECT (Extra Compensation Transmission) qui détermine le nombre maximum de transmissions consécutives sans contention. Ensuite, lorsqu'un NSTR-MLD termine sa procédure de backoff dans un lien HCL, il vérifie si le lien MDL est occupé pendant un délai PIFS. Si c'est le cas, aucune transmission n'est effectuée mais le NSTR-MLD reçoit un ou plusieurs jetons STT. Lorsque la contention est ensuite gagnée au niveau de MDL et que le HCL est détecté libre pendant PIFS, une transmission synchrone est autorisée, ce qui réduit le STT de 1. Après cette transmission, si le MDL reste libre, le NSTR-MLD peut enchaîner jusqu'à ECT transmissions supplémentaires sans nouvelle contention, en décrémentant à chaque fois le compteur STT.

Ce mécanisme permet de compenser les blocages dans les HCL tout en optimisant le débit et en maintenant l'équité entre les appareils du réseau. Les détails du fonctionnement de CLST sont donnés dans l'organigramme de la Figure 2.15 ci-dessous.

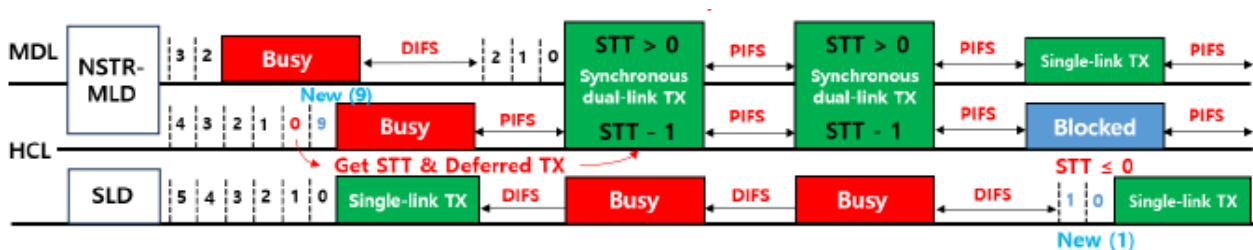


Figure 2.14: Exemple de fonctionnement mécanisme CLST proposé [34].

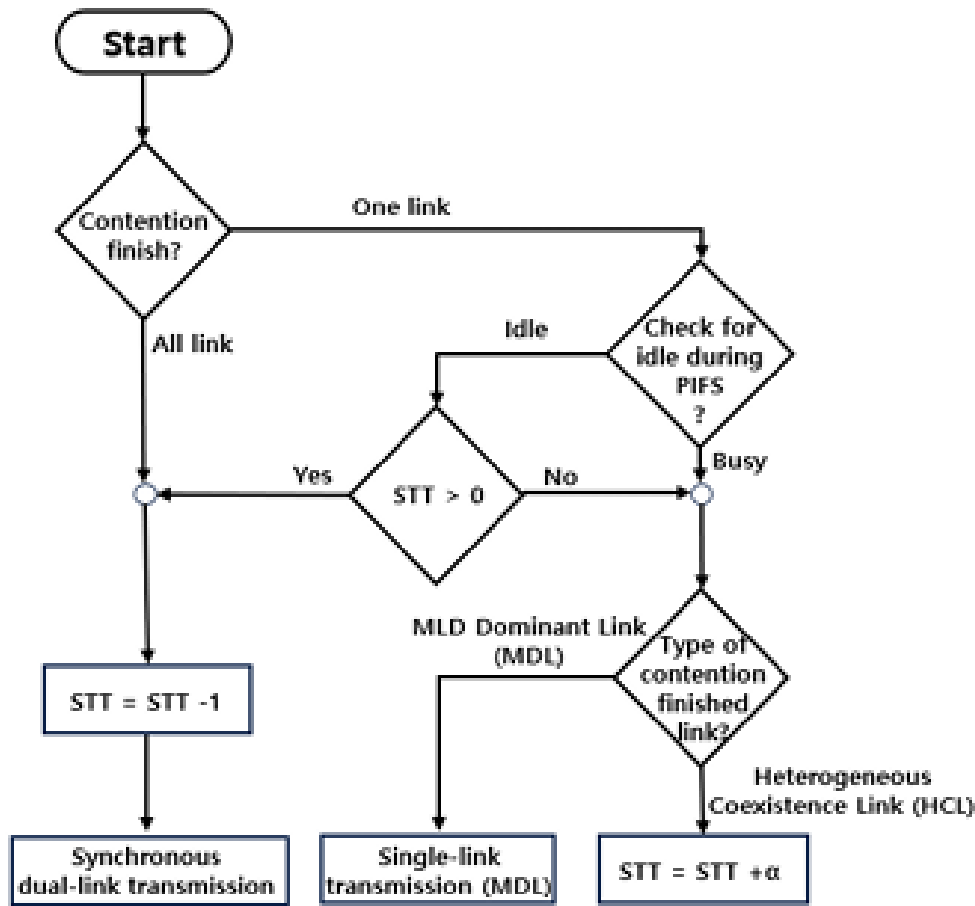


Figure 2.15: Organigramme du mécanisme CLST proposé [34].

2.3.4 A Low-Duty-Cycle and Congestion-Robust Design of Adaptive Wi-Fi 7 Multi-Link Operation Control Over User Side (2025)

Les auteurs **Cheng et al** dans [33], ont proposé une méthode de contrôle adaptatif pour la configuration MLO dans le but d'optimiser la consommation énergétique des dispositifs Wi-Fi 7. La méthode proposée repose sur une évaluation régulière de certaines métriques de la couche MAC, telles que le débit instantané et l'état de congestion des liens, afin de déterminer de manière dynamique combien de liens doivent rester actifs. Pour ce faire, les auteurs introduisent la notion de MAR (MAC-layer Available Resource), une mesure utilisée pour calculer le taux d'utilisation des ressources RU, comparée ensuite à deux seuils adaptatifs β_1 et β_2 :

- β_1 pour activer un lien supplémentaire lorsque le taux d'utilisation de la RU est élevé,
- β_2 pour désactiver un lien lorsque l'activité est faible sur ce lien.

Ce procédé permet d'ajuster efficacement la configuration MLO en fonction des conditions du réseau, en assurant un bon compromis entre performance et efficacité énergétique. L'algorithme 2 fournit les détails de l'adaptation de la configuration MLO dans WiFi 7.

Algorithm 2: Pseudo-code for MLO Configuration Adaptation

```

1 Define:
2   - MLO configuration mode:  $m \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ;
3   - We use the Duty-Cycle score (referring to Table 1 given 6GHz, 5GHz, and 2.4GHz
      links are used) to characterize the MLO configuration;
4   - Set of activated links under MLO configuration mode  $m$ :  $\mathcal{A}_m$ ;
5     (e.g.,  $\mathcal{A}_1 = \{5GHz\}$ ,  $\mathcal{A}_2 = \{5GHz, 2.4GHz\}$ )
6 Initialize:
7   MAC/IP-layer count down timers:  $\tau_{MAC}, \tau_{IP}$  ( $\tau_{MAC} > \tau_{IP}$ );
8   MLO configuration threshold  $\beta_1, \beta_2$  ( $\beta_1 > \beta_2$ );
9   Initial MLO configuration mode  $m$ ;
10 For every  $\tau_{MAC}$  seconds do {
11   Collect MAC-layer measurements:
12      $T_{cca}(i), T_{ro}(i), p_c(i), T_s(i), T_c(i)$ , for  $\forall$  link  $i$ .
13   Compute the  $MAR(i)$  for each link  $i$  based on (1);
14 }
15 For every  $\tau_{IP}$  seconds do {
16   Collect IP-layer measurements:  $payload\_bits(i)$ , for  $\forall$  link  $i$ .
17   Measure the device Throughput. Compute resource utilization rate:
18
19     
$$RU = \frac{\text{Throughput}}{\sum_{i \in \mathcal{A}_m} MAR(i)}$$

20     if  $RU > \beta_1$  and  $m \neq 6$  then
21     | Switch to the MLO configuration with one higher duty-cycle score:  $m \leftarrow m + 1$ ;
22     if  $RU < \beta_2$  and  $m \neq 0$  then
23     | Switch to the MLO configuration with one lower duty-cycle score:  $m \leftarrow m - 1$ ;
24 }

```

2.3.5 Bandit-Based Multiple Access Approach for Multi-link Operation in Heterogeneous Dynamic Networks (2024)

L'algorithme MP-CUCB (Multi-Player Combinatorial Upper Confidence Bound) a été proposée par **Han et al** dans [35] pour la transmission et la réception simultanée STR MLDs. L'algorithme MP-CUCB vise à optimiser l'accès multi-liens dans les réseaux Wi-Fi 7 en particulier dans les environnements hétérogènes où coexistent des appareils MLD avec des appareils SLD. Contrairement aux méthodes classiques basées sur CSMA/CA, MP-CUCB combine des algorithmes de bandits multi-armés et multi-joueurs MP-MAB (Multi-Player Multi-Armed Bandit) et combinatoires CMAB (Conventional Multi-Armed Bandit) pour allouer intelligemment les ressources. Son approche repose sur une extension de l'espace des bras (arm space) en

intégrant à la fois le temps de transmission et le lien de transmission dans chaque intervalle de décision. Cela permet de garantir que le nombre de bras disponibles est suffisant pour les joueurs (MLDs), une condition essentielle pour éviter les collisions. De plus, l'algorithme intègre un mécanisme de bras combinatoire (combinatorial arm) qui permet à chaque MLD de sélectionner plusieurs bras de base lors de chaque intervalle de décision. Ce mécanisme optimise conjointement les décisions de transmission sur plusieurs liens, améliorant ainsi l'efficacité du réseau. Les Figures 2.16 et 2.17 illustrent la procédure de transmission des MLD et des SLD dans un réseau hétérogène et le mécanisme d'accès du modèle MP-CUCB proposé, respectivement.

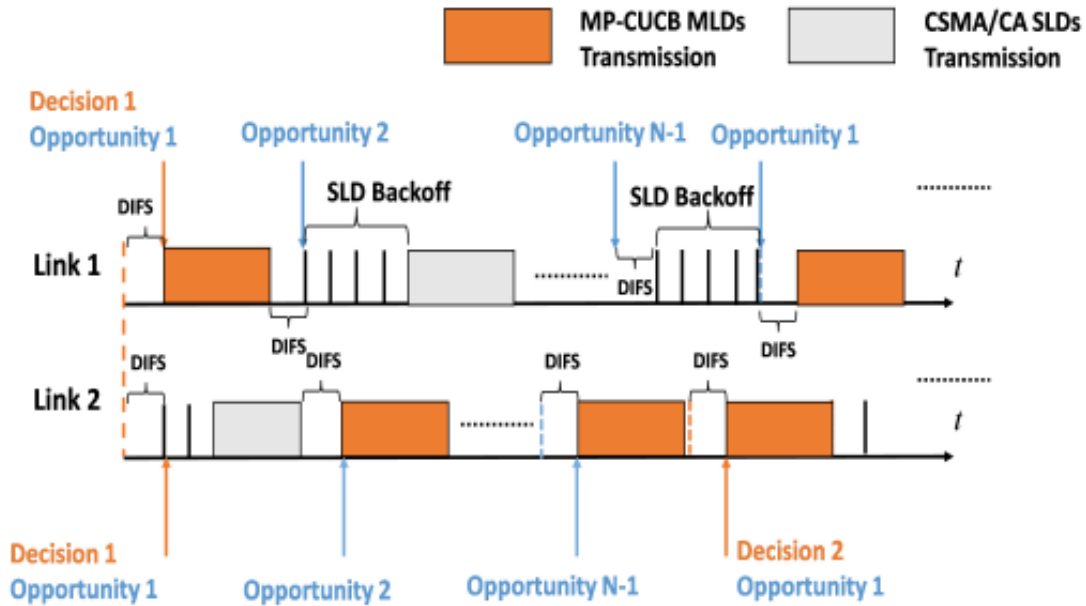


Figure 2.16: Procédure de transmission des MLD et SLD dans un réseau hétérogène [35].

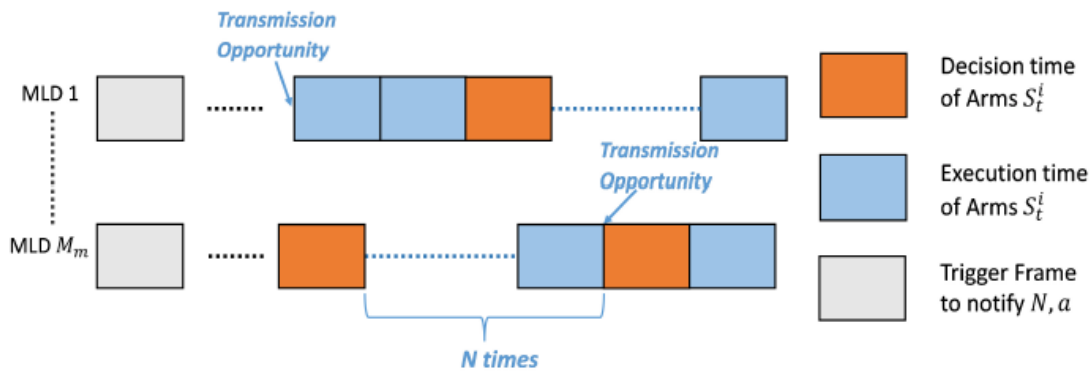


Figure 2.17: Mécanisme d'accès du modèle MP-CUCB proposé [35].

2.3.6 WiFi 7 with Different Multi-Link Channel Access Schemes: Modeling, Fairness and Optimization (2024)

Les auteurs **Zhang et al** dans [36] ont proposé un modèle analytique pour optimiser la gestion des transmissions multi-liens dans les réseaux Wi-Fi 7, en se concentrant sur le mode non-STR, où les appareils doivent transmettre de manière synchrone sur plusieurs canaux.

Le modèle prend en compte la coexistence de deux schémas d'accès : Backoff long ou LB (Longest Backoff) et Backoff court ou SB (Shortest Backoff), qui présentent des comportements très différents en termes d'accès au canal, telles qu'illustrés dans le Figure 2.18.

Le modèle évalue, plus précisément, l'impact de ces schémas sur le débit et le délai d'accès, en utilisant une chaîne de Markov pour modéliser l'évolution des paquets en tête de file. L'étude démontre que les SB-MLDs bénéficient d'un avantage systématique lorsqu'ils utilisent les mêmes paramètres que les LB-MLDs, ce qui génère une inéquité marquée. Pour corriger cela, les auteurs introduisent une méthode d'optimisation qui ajuste dynamiquement les tailles des fenêtres de backoff initiales Widow LB (WLB) et Window SB (WSB) afin d'atteindre un ratio de débit cible γ entre LB et SB, tout en maximisant le débit global du réseau et en réduisant le délai moyen d'accès. Ainsi, cette solution analytique offre une gestion équitable et performante des transmissions MLO, mieux adaptée aux environnements Wi-Fi 7 hétérogènes.

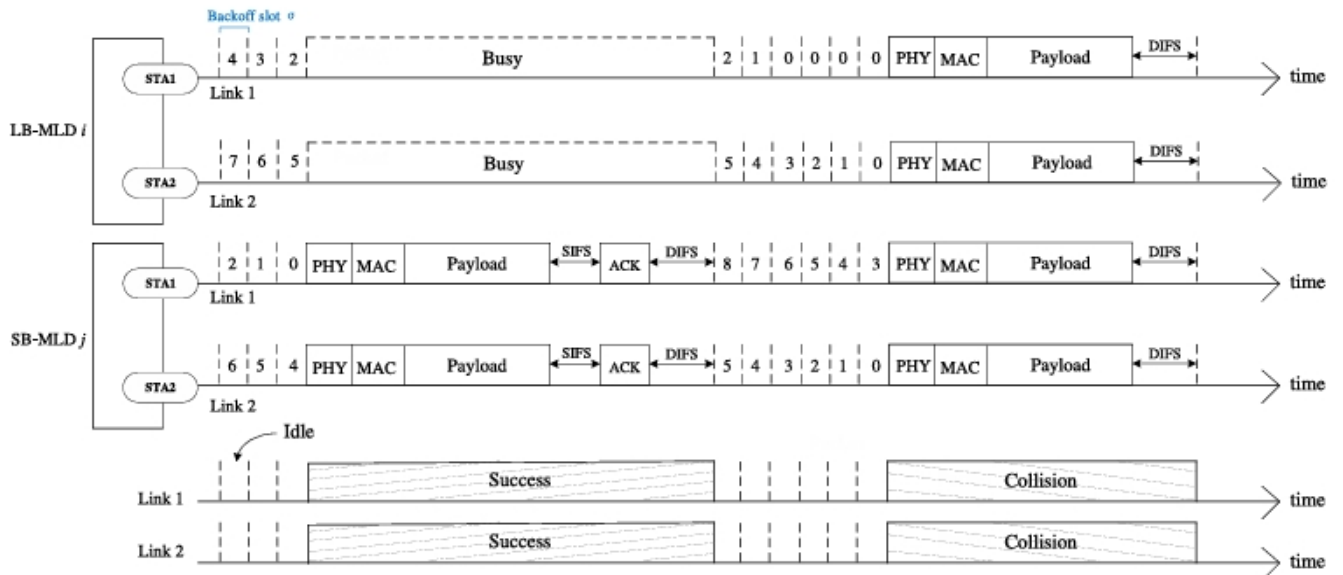


Figure 2.18: Long Backoff et Short Backoff dans un réseau Wi-Fi 7 à deux liens [36].

2.3.7 IEEE 802.11be Network Throughput Optimization with Multi-Link Operation and AP Controller (2024)

Les auteurs **Zhang et al** dans [38] ont proposé une approche d'optimisation du débit dans les réseaux Wi-Fi 7 en s'appuyant sur le principe de fonctionnement de MLO. La solution proposée introduit un contrôleur centralisé ou APC (Access Point Controller) intégré à une architecture de coordination entre plusieurs points d'accès ou MAPC (Multi-Access Point Coordination). Ce contrôleur est chargé de gérer de manière dynamique à la fois l'association des stations (STA) aux points d'accès (AP) et l'allocation des liens radio. L'objectif principal de la proposition étant de maximiser les performances réseau tout en assurant une répartition équitable des ressources, en particulier dans des environnements denses. Pour ce faire, les auteurs mettent en place une solution en deux étapes décrites comme suit :

- La première consiste à résoudre le problème d'appariement AP-STA en exploitant une modélisation en graphe biparti, dont la structure totalement unimodulaire permet une résolution exacte par programmation linéaire,
- La deuxième étape propose un algorithme glouton inspiré du scheduler permettant la répartition équitable ou PF (Proportional Fairness), pour allouer les liens radio entre les AP et les STA de manière équilibrée et adaptative, en tenant compte des conditions de canal et des historiques de débit.

La Figure 2.19 illustre l'architecture proposée pour le MAPC avec un exemple de scénario réseau WiFi 7 utilisant MLO sur trois bandes de fréquences 2.4, 5 et 6 GHz.

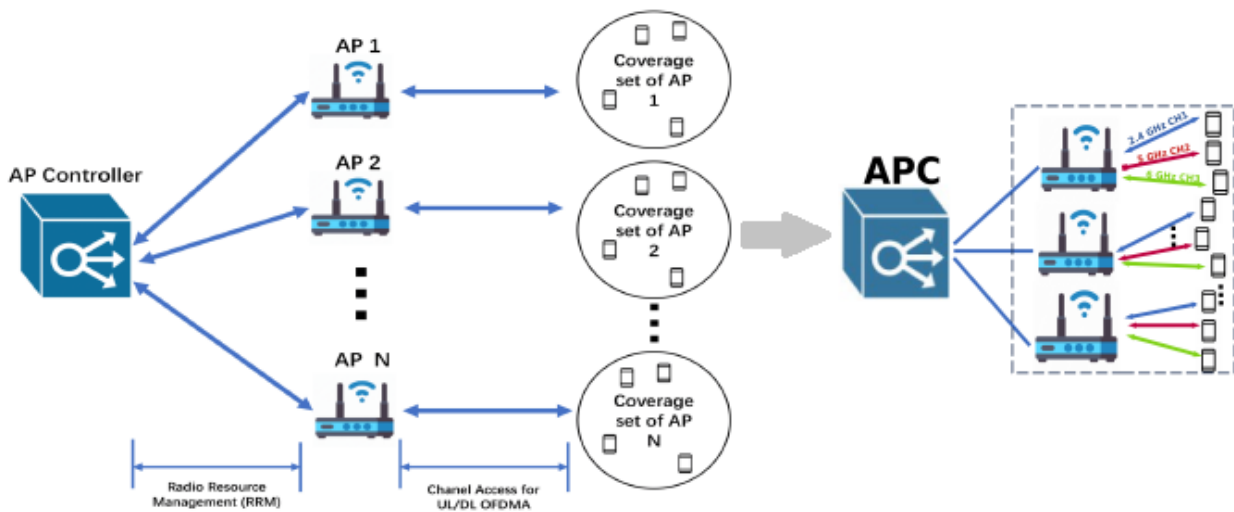


Figure 2.19: Architecture proposée MAPC avec exemple de scénario réseau WiFi 7 [38].

2.3.8 Comparaison entre les travaux de recherche étudiés

Dans le tableau 2.1, nous spécifions pour chaque travail étudié, la solution MLO proposée, le types de réseaux, les types de transmissions et capacité des appareils utilisés dans les réseaux, le simulateur choisi et enfin les métriques de performances mesurées.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décortiqué le fonctionnement de la technique d'accès multi-liens/multi-bandes sur différents niveaux liés à ses différentes thématiques de recherche, à savoir la gestion multi-liens, les schémas de transmission, les modes de transmission et les mécanismes d'économie d'énergie. Nous avons ensuite dressé une synthèse des travaux de recherche antérieurs et récents de la littérature liés à cette fonctionnalité.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de notre proposition d'amélioration du MLO, suivie d'une évaluation détaillée de ses performances à travers des simulations réalisées dans un environnement adapté.

Critères Articles	Solution MLO	Types de réseaux	Type et capacité MLO	Simulateur utilisé	Métriques mesurées
Fontanesi et al [31] (2024)	ConMLO: accès continu au canal sans contention	Réseau WiFi 7 denses	EMLSR	WACA Dataset	Temps d'occupation du canal (airtime), durée d'accès continu, équité inter-appareils
Paroshin et al (2024) [32] (2024)	DAMLA: agrégation dynamique ajustant la taille des A-MPDU	WiFi 7 MLO	STR-MLD	NS-3	Débit
Kwon et al [34] (2024)	CLST: contention-less synchronous transmission (jetons STT + ECT)	Réseau local synchronisé	NSTR-MLD	NS-3	Latence, équité, nombre collisions
Cheng et al [33] (2025)	Faible cycle d'activité (low-duty) + robustesse congestion adaptative	Réseau résidentiel avec IoT	STR MLMR	NS-3	Consommation énergie, taux de collision, adaptabilité
Han et al [35] (2024)	MP-CUCB: algorithme d'apprentissage combinatoire pour l'activation dynamique des liens MLO	Réseau dynamique (type générique)	STR-MLD SLD	Simulation personnalisée	Débit, efficacité d'allocation, convergence
Zhang et al [36] (2024)	Équité d'accès avec LB/SB dans MLO	Réseau WiFi dense	non-STR MLD	Analyse analytique (Modèle Markovien)	Débit équitable, probabilité d'accès
Zhang et al [38] (2024)	MAPC: coordination multi-AP centralisée	Réseaux denses multi-AP	STR-MLMR	Python	Débit total, utilisation équitable des AP, délai moyen

Table 2.1: Tableau récapitulatif des travaux de recherche antérieurs

Chapitre 3

Proposition et Évaluation de performances d'un nouveau mode de transmission MLO

3.1 Introduction

L'évolution des systèmes AAL repose en grande partie sur des communications sans fil fiables et performantes. Avec l'introduction de la fonctionnalité d'accès multi-liens/multi-bandes ou MLO dans la WiFi 7, de nouvelles possibilités émergent pour répondre aux exigences de latence, de débit et de fiabilité. Deux modes de transmission MLO, Redundancy et Joint, ont été conçus pour les applications en temps réel, avec chacun avec ses propres avantages et limites.

Dans ce chapitre, nous allons proposer un mode de transmission améliorée, combinant les points forts des deux modes existants tout en s'adaptant aux contraintes spécifiques des applications en temps réel des systèmes AAL. Nous allons élaborer également les organigrammes associés aux trois modes de transmission MLO : Redundancy , Joint et le mode proposé. Enfin, l'évaluation de performances des trois modes MLO sera réalisée par simulation à l'aide du simulateur réseau OMNeT++ avec le framework INET. Les métriques de performances et les résultats obtenus seront analysés en détail.

3.2 Problématique et motivations

Les mode Redundancy et Joint présentent, Chacun des deux, des avantages et des inconvénients qui influencent fortement sur les performances globales du réseau, les délais d'accès et de transmission pour les trames de données, la fiabilité de la transmission, ainsi que l'efficacité spectrale et énergétique.

- **Mode Redundancy** : Le mode Redundancy consiste à envoyer simultanément la même trame de données sur plusieurs liens, avec chacun des liens sur une bande de fréquence différente. Cette stratégie vise principalement à améliorer la fiabilité de la communication: en cas de perte sur un lien, la trame peut être reçue correctement sur un autre. Ce comportement est particulièrement adapté aux applications critiques, où la perte de données est intolérable (par exemple dans le domaine médical ou les systèmes de contrôle industriels en temps réel). Cependant, ce mode présente plusieurs inconvénients majeurs:

- Surcharge des ressources radio : la duplication des trames entraîne une consommation excessive de bande passante et d'énergie, puisqu'une même donnée est transmise plusieurs fois sur des canaux différents.
- Latence accrue : la transmission ne démarre qu'une fois que tous les liens ont atteint un backoff nul, même si un ou plusieurs liens sont déjà prêts. Cette attente provoque un ralentissement inutile du processus.
- Synchronisation stricte : tous les liens doivent être parfaitement synchronisés. Le système devient alors dépendant du lien le plus lent, ce qui peut réduire drastiquement les performances globales.
- Délai d'ACK : même si une trame est rapidement reçue sur l'un des liens, l'accusé de réception (ACK) est envoyé uniquement après la fin de la transmission sur tous les liens, ce qui allonge encore le temps de réponse global.

Pour son exemple de fonctionnement (voir la figure 3.1), la station 802.11be, ayant des trames à transmettre, commence par une phase d'écoute du canal sur chaque lien pendant une durée AIFS[VI]. Si les liens sont détectés libres, elle déclenche alors un backoff sur chacun d'eux. Le lien 1, atteint un compteur de backoff nul en premier, mais ne commence pas à transmettre immédiatement.

En mode Redundancy, la transmission débute si et seulement si les deux liens ont atteint un backoff nul. Une fois cette condition remplie, la transmission est lancée simultanément sur les deux liens. La trame transmise sur le lien 1 arrive plus rapidement à destination en raison de la largeur de bande plus élevée, mais l'ACK n'est pas envoyé immédiatement. Le récepteur attend que la transmission sur le lien 2 soit également terminée, puis, après un intervalle SIFS, il envoie l'ACK en même temps sur les deux liens.

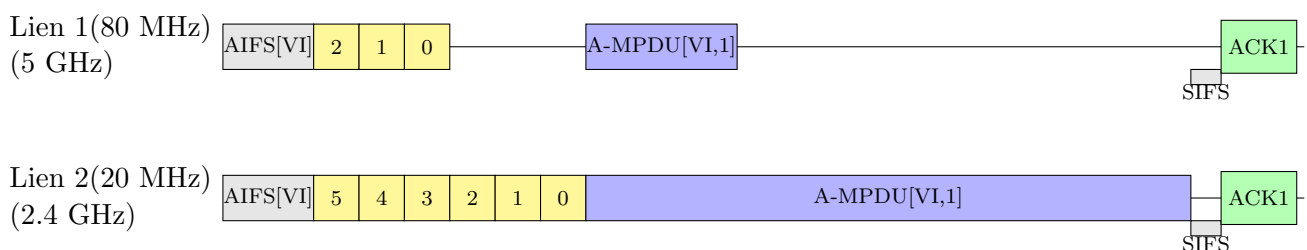


Figure 3.1: Exemple de fonctionnement du mode Redundancy

■ **Mode Joint :** À l'inverse, le mode Joint consiste à répartir les trames de données entre les différents liens, sans duplication. Ce mode vise à maximiser l'utilisation de la bande passante disponible et à réduire la latence, en profitant de la transmission parallèle de trames distinctes. Il est particulièrement efficace si les liens sont bien synchronisés et équilibrés, permettant ainsi une meilleure efficacité réseau. Toutefois, ce mode présente lui aussi des limites importantes :

- Moins de fiabilité : contrairement au mode Duplicate, une perte de trame sur un lien implique une retransmission, ce qui peut ralentir la communication et dégrader les performances, en particulier pour les applications sensibles au temps comme celles utilisées dans les systèmes AAL.
- Complexité de gestion : le mode Joint nécessite un suivi précis des trames réparties sur différents liens, ce qui alourdit la gestion des files d'attente et des accusés de réception.
- Risque de déséquilibre : en cas de désynchronisation ou de variation de qualité entre les liens, certaines trames peuvent arriver en retard, provoquant un réassemblage désordonné ou une latence accrue.
- Pertes critiques : une seule perte sur un lien oblige à réémettre la trame complète, ce qui consomme du temps et des ressources.

Pour son exemple de fonctionnement (voir la figure 3.2), la station 802.11be ayant des trames à transmettre commence par une phase d'écoute du canal sur chaque lien pendant une durée AIFS[VI]. Si les liens sont détectés comme étant libres, elle déclenche alors un backoff sur chacun d'eux. Le lien 1 atteint un compteur de backoff nul en premier et commence à transmettre la première trame. Après un intervalle SIFS, il reçoit l'ACK correspondant. Ensuite, le lien 2, ayant un backoff plus long, atteint zéro à son tour et transmet la deuxième trame.

Ces limites montrent qu'il est nécessaire de concevoir des stratégies adaptatives, capables de s'ajuster dynamiquement aux conditions du réseau et aux exigences de l'application. Trouver un équilibre optimal entre débit, latence, fiabilité, occupation spectrale et efficacité énergétique est donc au cœur des défis actuels en communication multi-liens.

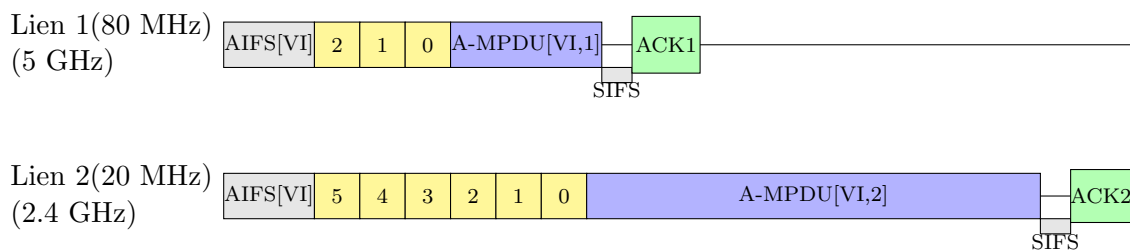


Figure 3.2: Exemple de fonctionnement du mode Joint

3.3 Proposition d'un mode de transmission MLO pour les applications de AAL

Afin d'améliorer les performances des transmissions multi-liens dans les réseaux Wi-Fi 7, nous proposons une nouvelle stratégie nommée ProposedMLO, conçue pour combiner intelligemment les avantages des deux modes classiques : Redundancy et Joint. Cette proposition vise à optimiser l'efficacité des transmissions et l'utilisation du canal, deux éléments essentiels dans les environnements exigeants tels que les systèmes AAL.

Il s'agit d'une amélioration à deux niveaux, elle repose sur une optimisation conjointe de la phase de contention et de la phase de transmission, les points importants dans le fonctionnement de notre propositions sont tirés dans ce qui suit :

- Nous considérons un scénario où les stations et les points d'accès sont compatibles STR (Simultaneous Transmit and Receive), utilisant chacun, deux liens différents sur deux bandes de fréquences différentes : 20 MHz (bande 2,4 GHz) et 80 MHz (bande 5 GHz).
- Nous considérons des stations virtuelles (catégories d'accès) dans chaque station physique. Donc un réseau WiFi 7 avec QoS où dans chaque station physique il y a quatre stations virtuelles : BK, BE, VO et VI avec des valeurs des paramètres de contention et de transmission différentes d'une catégorie à une autre suivant le principe de priorité.
- Dans un premier temps, le système adopte le mode Redundancy, en transmettant la même trame sur les deux liens afin de maximiser les chances de réussite de la réception de la trame du côté du récepteur.
- Cette double émission est déclenchée via une stratégie de Short Backoff, c'est-à-dire que la transmission commence dès qu'un des deux liens atteint un backoff nul, sans attendre que l'autre soit prêt. Ce mécanisme permet de réduire le temps d'accès au canal.
- Dès qu'un accusé de réception (ACK) est reçu sur l'un des deux liens, la transmission redondante sur l'autre lien est immédiatement interrompue afin d'éviter toute utilisation superflue des ressources radio.
- Le système bascule ensuite en mode Joint, en exploitant le lien pour transmettre une nouvelle trame, sans repasser par une nouvelle phase de contention pour cette deuxième trame de données puisque le lien a été déjà acquis et utilisé par la même station.

Pour son exemple de fonctionnement (voir la figure 3.3), la station 802.11be ayant des trames à transmettre commence par une phase d'écoute du canal sur chaque lien pendant une durée AIFS[VI]. Si les liens sont détectés comme étant libres, les deux liens initient un backoff indépendamment. Dès que le lien 1 atteint un backoff de zéro, la transmission commence immédiatement en mode Duplicate, même si le backoff du lien 2 n'est pas encore nul. La première trame est transmise en parallèle sur les deux liens. Comme le lien 1 est plus rapide, il

reçoit l'ACK plus tôt. Cela provoque une interruption de la transmission sur le lien 2. Ensuite, une deuxième trame est transmise via le lien 2.

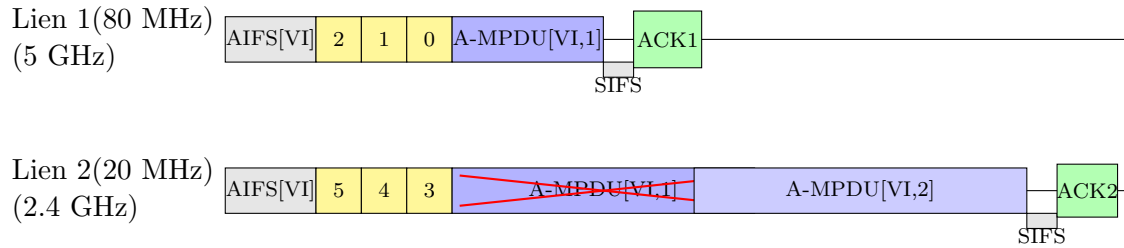


Figure 3.3: Exemple de fonctionnement du mode ProposedMLO

3.4 Organigrammes des modes MLO Redundancy, Joint et Proposed

Dans cette section, nous élaborons et présentons les organigrammes décrivant en détail le fonctionnement des trois modes de transmission multi-liens étudiés : Redundancy, Joint ainsi que notre mode proposé. Ces organigrammes permettent de visualiser les étapes de fonctionnement instruction par instruction pour les deux phases de contention et de transmission et sur les deux différents liens (L1 et L2). Les variables utilisées dans ces organigrammes sont listées dans le Tableau 3.1 ci-dessous.

Variable	Signification
AC[VI]	Catégorie d'accès Vidéo
A-MPDU[VI]	Longueur de la trame DATA (inclus les entêtes MAC et le code de détection d'erreur) pour la catégorie vidéo.
CWmin[VI]	Valeur minimale de la fenêtre de contention pour la vidéo
CWmax[VI]	Valeur maximale de la fenêtre de contention pour la vidéo
CW	Valeur courante de la fenêtre de contention pour la vidéo
L1, L2	Lien 1 de 80 MHz (5 GHz), Lien 2 de 20 MHz (2.4 GHz)
BO	Délai aléatoire d'attente exprimé en slots de temps pour VI
AIFS[VI]	Temps d'attente avant l'accès au canal pour la vidéo
SIFS	Espace IFS le plus court entre la transmission DATA et ACK
ACK	Accusé de réception pour une trame A-MPDU[VI]

Table 3.1: Variables utilisées dans les organigrammes des modes de transmission MLO

Dans cette partie, nous allons présenter les organigrammes des trois modes d'accès MLO:

- Organigramme du mode JointMLO (voir la figure 3.4)
- Organigramme du mode RedundancyMLO (voir la figure 3.5)
- Organigramme du mode PrposedMLO (voir la figure 3.6)

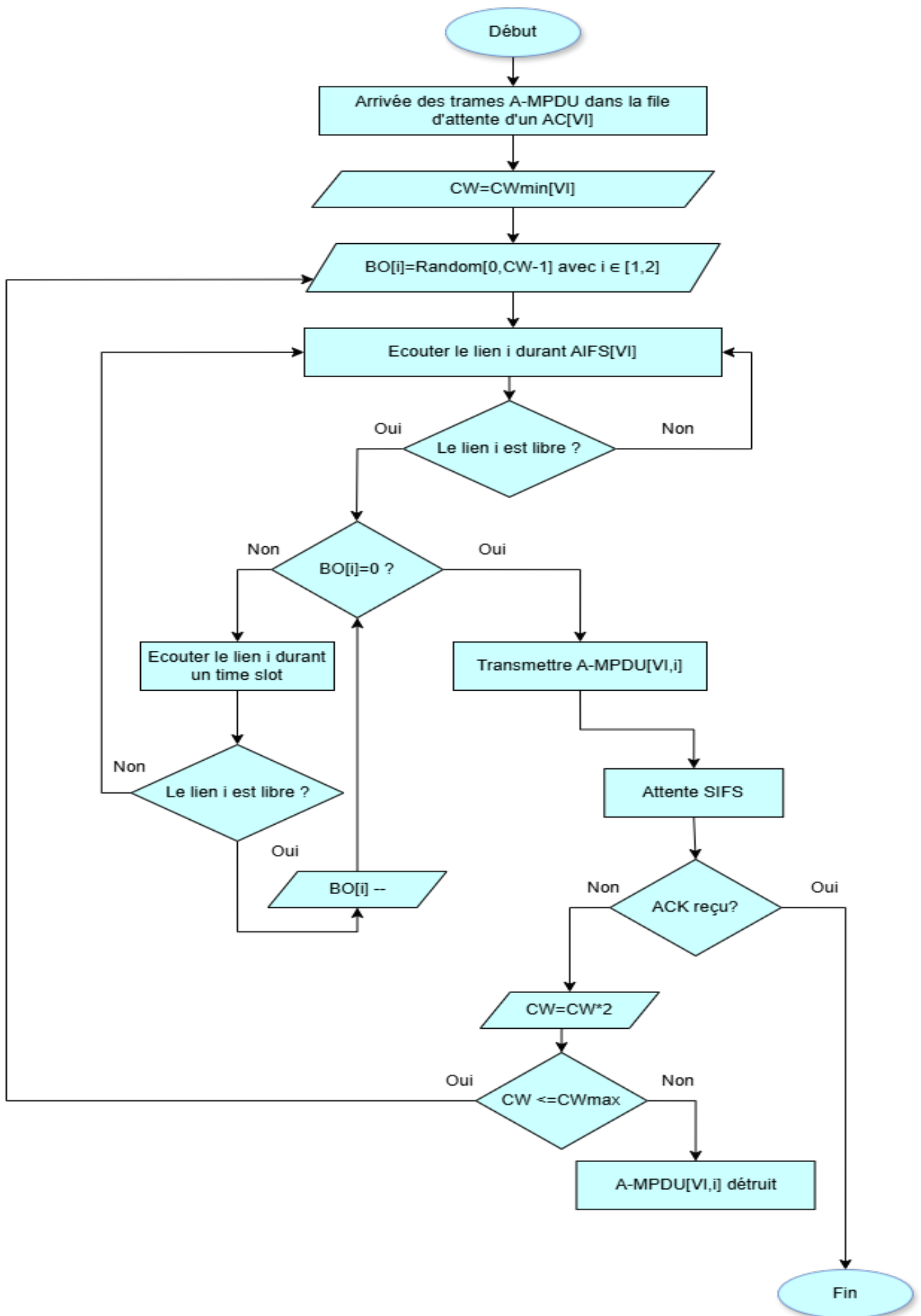


Figure 3.4: Organigramme du mode JointMLO

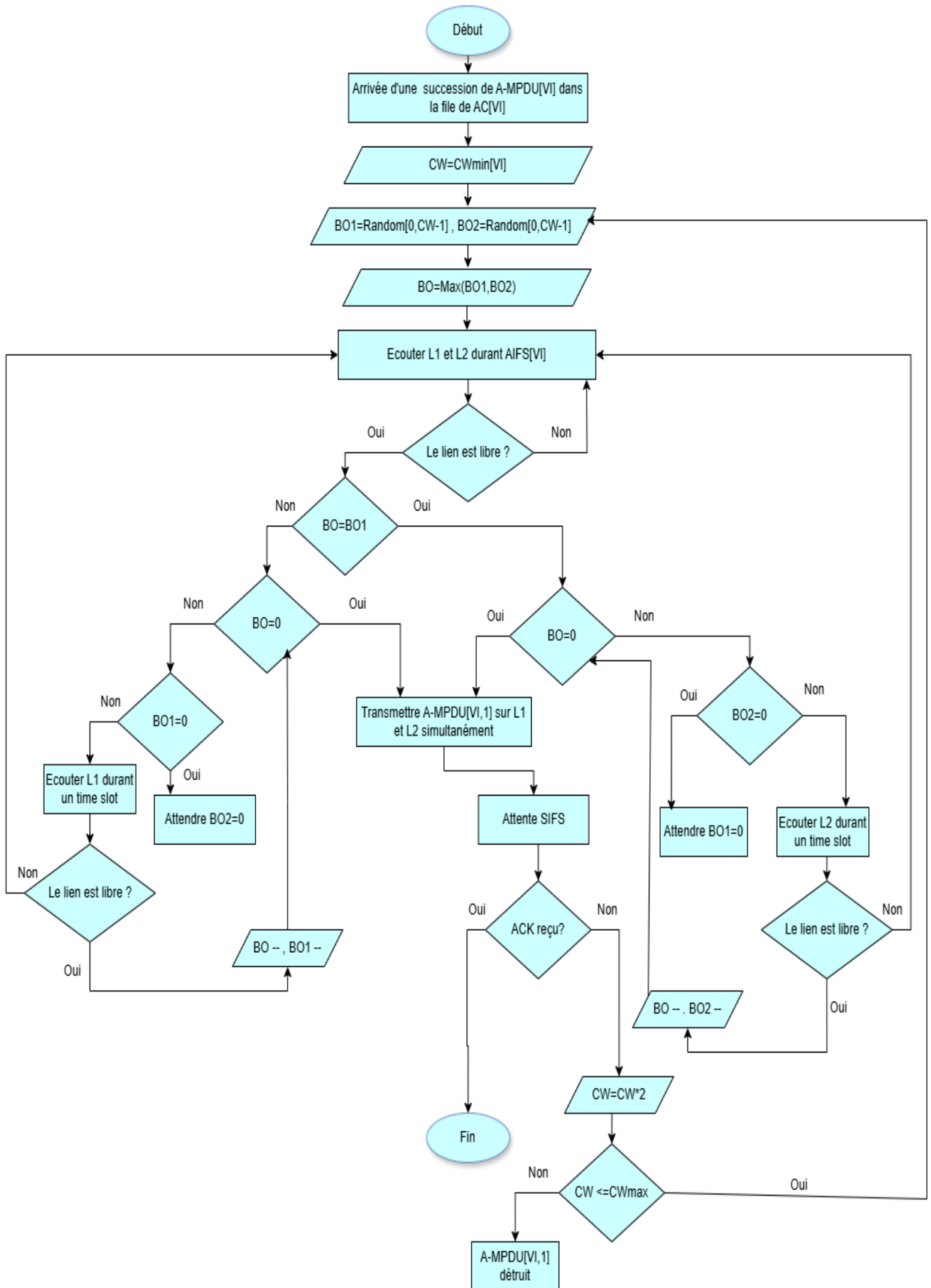


Figure 3.5: Organigramme du mode RedundancyMLO

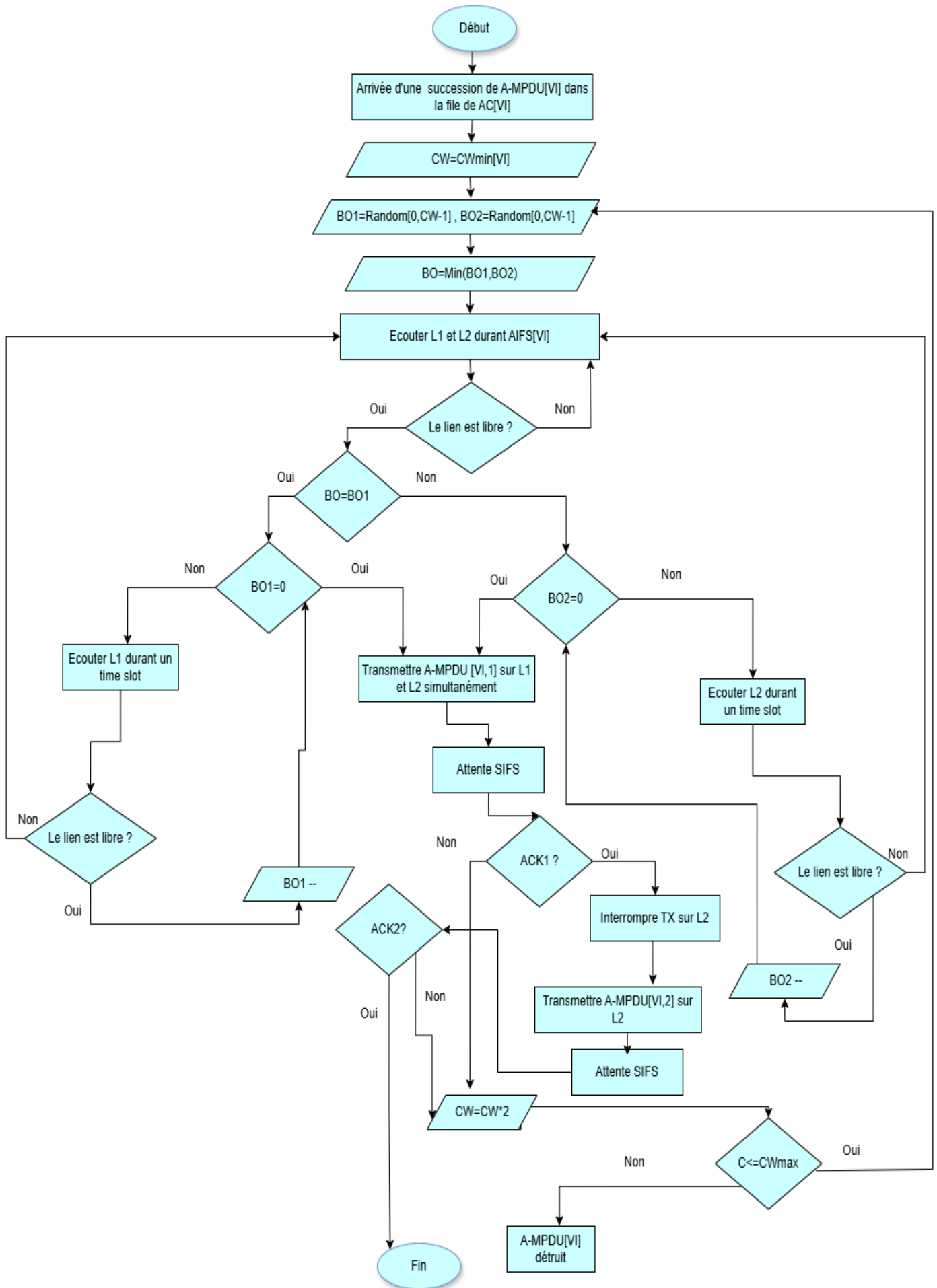


Figure 3.6: Organigramme du mode ProposedMLO

3.5 Implémentation, Simulation et Évaluation de performances

3.5.1 Simulateur OMNeT++

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) est un environnement de simulation à événements discrets, orienté objet et modulaire, permettant la modélisation et la simulation de réseaux (Voir le logo du simulateur dans la figure 3.7). Il repose sur une architecture composée de modules programmés en C++. OMNeT++ permet de simuler une grande variété de réseaux filaires et sans fil, notamment: les réseaux cellulaires, les réseaux WiFi, les réseaux véhiculaires ad hoc VANET (Vehicular Adhoc NETWORK), les réseaux corporels sans fil WBAN (Wireless Body Area Network), etc [49].



Figure 3.7: Simulateur réseau OMNeT++6.0.

■ **Composants d'OMNeT++** : les principaux sont les suivants :

- La bibliothèque du noyau de simulation (kernel) en C++.
- Le langage NED (Network Description) utilisé pour définir la structure et la topologie du réseau.
- L'environnement de développement intégré (IDE) basé sur Eclipse.
- L'interface graphique Qtenv pour l'exécution interactive des simulations.
- L'interface en ligne de commande Cmdenv pour des exécutions automatisées.
- Des utilitaires divers (génération de Makefile, outils de build...).
- Des frameworks spécialisés (INET, SimuLTE, OverSim, Castalia...) proposant des bibliothèques de protocoles et modèles pour les couches de la pile TCP/IP dans les réseaux filaires et sans fil.

- Documentation.
- **Modélisation dans OMNeT++**: la modélisation dans OMNeT++ repose sur quatre types d'éléments :
 - **Le module simple (simple module)** : unité de base représentant un composant réseau.
 - **Le canal (channel)** : élément de communication entre les modules.
 - **Le module composé (compound module)** : regroupement hiérarchique de modules simples.
 - **Le réseau ou module système (network)** : instance principale de la simulation.
- **Fichiers constituant un projet OMNeT++**: un projet OMNeT++ standard comprend généralement les fichiers suivants :
 - **.ned** : fichiers décrivant la structure et la topologie du réseau via le langage NED.
 - **.cc** : fichiers source C++ implémentant le comportement des modules (programmes).
 - **.h** : fichiers d'entête ou d'interface déclarant les méthodes des modules.
 - **.msg** : fichiers définissant les types de messages échangés entre modules.
 - **.ini** : fichiers de configuration définissant les paramètres de simulation (durée, topologie utilisée, valeurs par défaut...).

Le processus d'exécution d'une simulation sous OMNeT++ est illustré dans la figure 3.8.

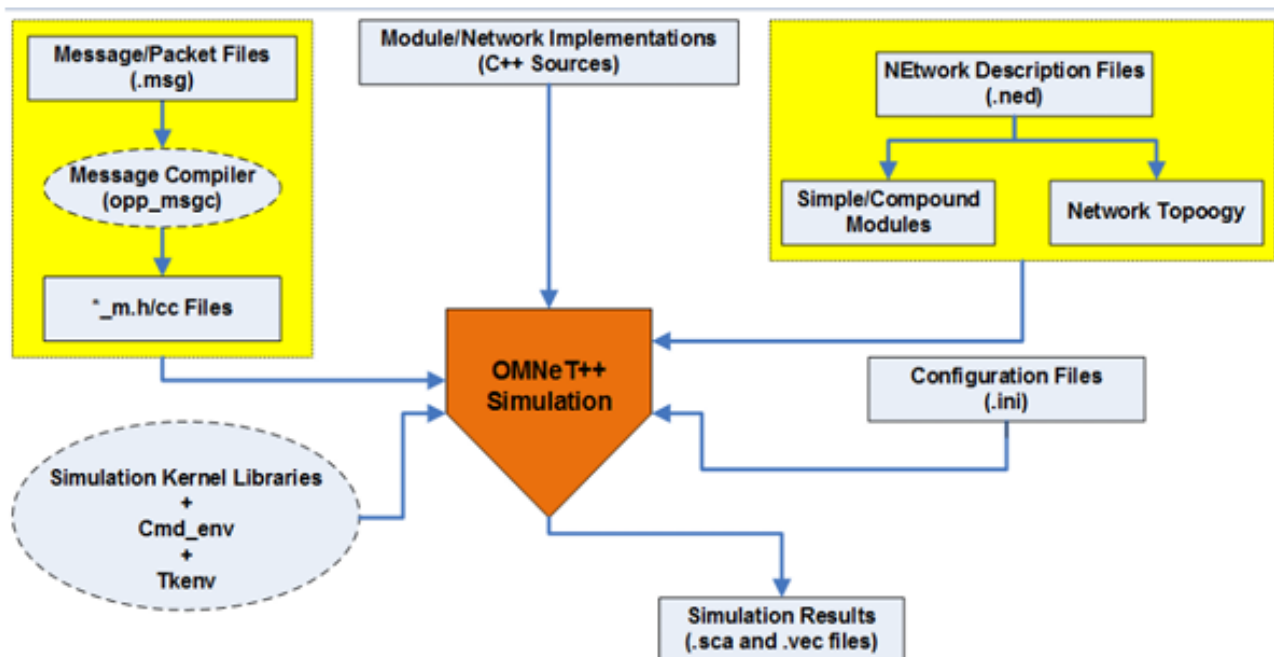


Figure 3.8: Composants et fonctionnement de la simulation OMNeT++ [49].

3.5.2 Framework INET

INET Framework est une bibliothèque open-source de modèles réseau destinée à l'environnement de simulation OMNeT++. Elle fournit une suite complète de protocoles et composants couvrant les couches réseau (par exemple TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP), la couche liaison (Ethernet, PPP, IEEE802.11), la mobilité, les réseaux mobiles ad hoc (MANET), ainsi que la gestion de la qualité de service (DiffServ, MPLS). En s'appuyant sur la structure modulaire d'OMNeT++, INET est organisé, voir la figure 3.9, autour de modules simples et composés définis en langage NED, correspondant aux protocoles et appareils réseau (hôtes, routeurs, points d'accès. . .). INET offre également des outils pour la configuration automatique des réseaux, la mobilité, et les médias radio en simulation sans fil [50].

Le mode de fonctionnement (infrastructure ou ad hoc) est déterminé par les composants de l'interface sans fil `Ieee80211Interface`, qui contient plusieurs sous-modules :

- **Management(Mgmt)** : effectue les opérations d'association/dissociation avec les points d'accès, le balayage des canaux, le beaconing, etc,
- **Agent** : initie des actions telles que le balayage des canaux ou la connexion/déconnexion,
- **MAC** : gère la transmission et la réception des trames conformément à la procédure d'accès au support IEEE 802.11,
- **PHY** : représente la couche physique (radio).

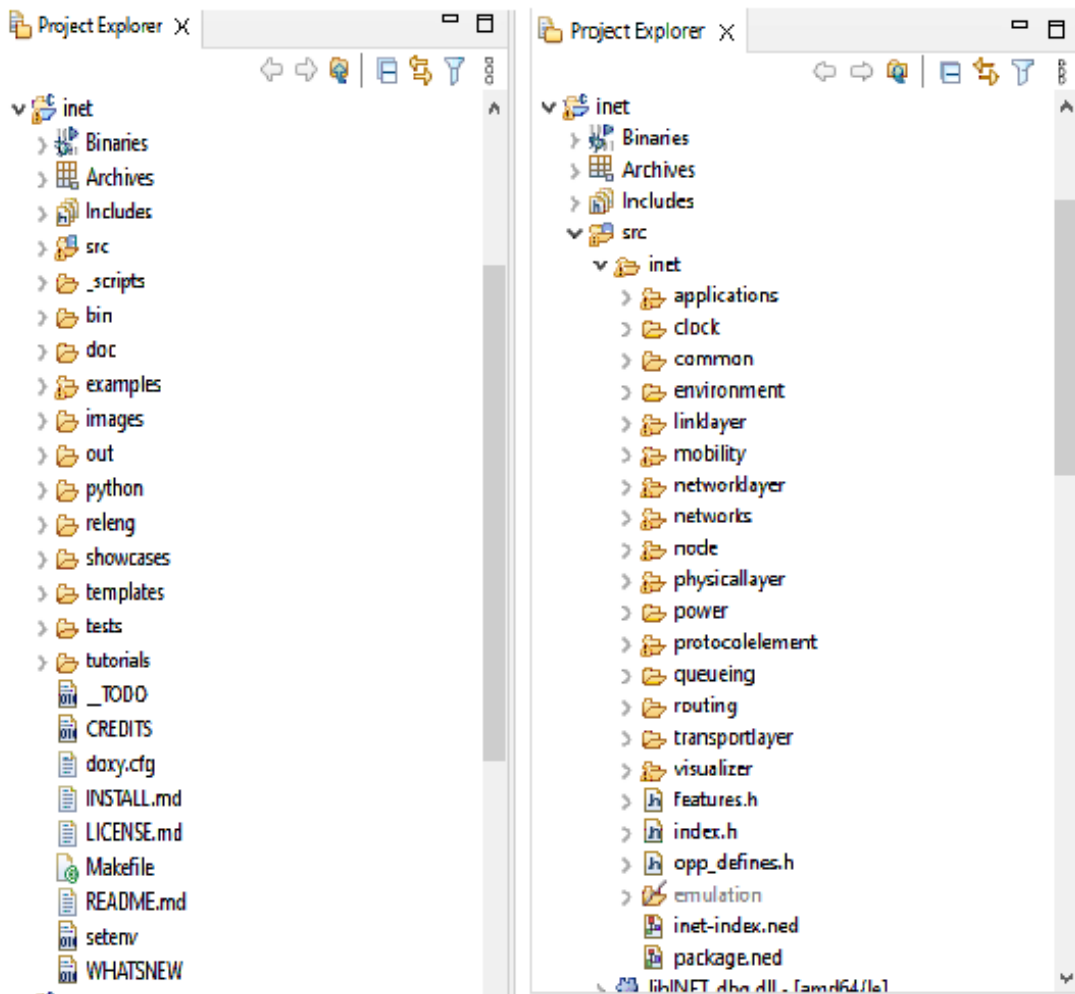


Figure 3.9: Contenu de Framework INET4.5.2 [50].

3.5.3 Simulateur WiFi MLO

Afin de valider notre proposition et comparer ses performances à celles des modes existants Redundancy et Joint, nous avons utilisé le simulateur OMNeT++ (version 6.0.3) en combinaison avec le framework réseau INET (version 4.5.2). Le projet utilisé a été téléchargé depuis le site officiel de OMNeT (lien vers GitHub) sous le nom de WiFiMLO, un dépôt open source proposant une implémentation de l'opération à liens uniques SLO et multi-liens MLO basique du standard Wi-Fi 7. Le code source du projet est réparti en deux répertoires principaux : **src**, qui contient les modules implémentés ou étendus des fichiers de INET (par exemple les couches MAC/PHY, les fonctions de contention, de coordination ou de gestion de canal), et **simulations**, qui regroupe les fichiers de configuration .ini, et les fichiers de topologies réseau utilisées .ned. L'arborescence de ces répertoires est représentée dans la figure 3.10, offrant un aperçu clair des différentes composantes du projet.

Dans le dossier src/node, nous trouvons l'implémentation de la station MLO ainsi que celle du point d'accès. Ces entités sont des modules composés qui encapsulent plusieurs sous-modules, conformément à leur définition dans les fichiers .ned. La figure 3.11 présente la structure de la station MLO [51].

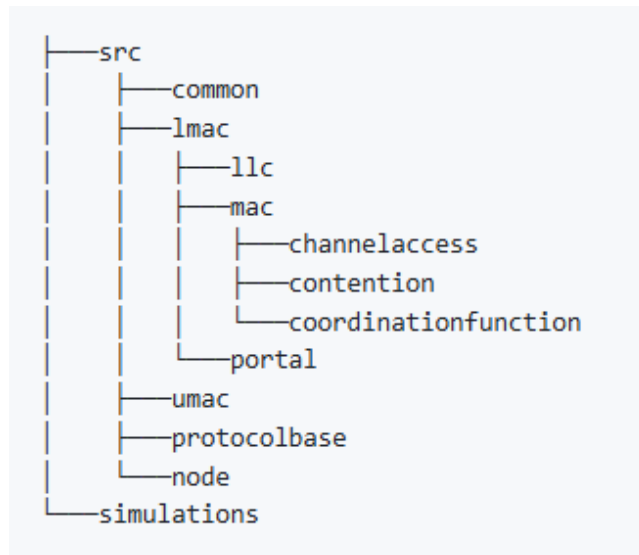


Figure 3.10: Structure et organisation du Projet WiFi MLO [51].

Dans le cadre de notre travail, nous avons apporté plusieurs modifications au projet original. Plus précisément, nous avons introduit un nouveau mécanisme dans le répertoire umac, en y ajoutant un module Proposed, représentant notre schéma de transmission combinant les modes Redundancy et Joint. Par ailleurs, des ajustements ont été réalisés dans le répertoire lmac/mac/contention pour intégrer la logique de Short Backoff, permettant de déclencher une transmission dès qu'un lien atteint un compteur de backoff nul sans attendre la terminaison de Backoff sur l'autre lien. Nous avons également modifié les implémentations existantes des modes Redundancy et Joint, afin de comparer leurs performances avec celles de notre solution.

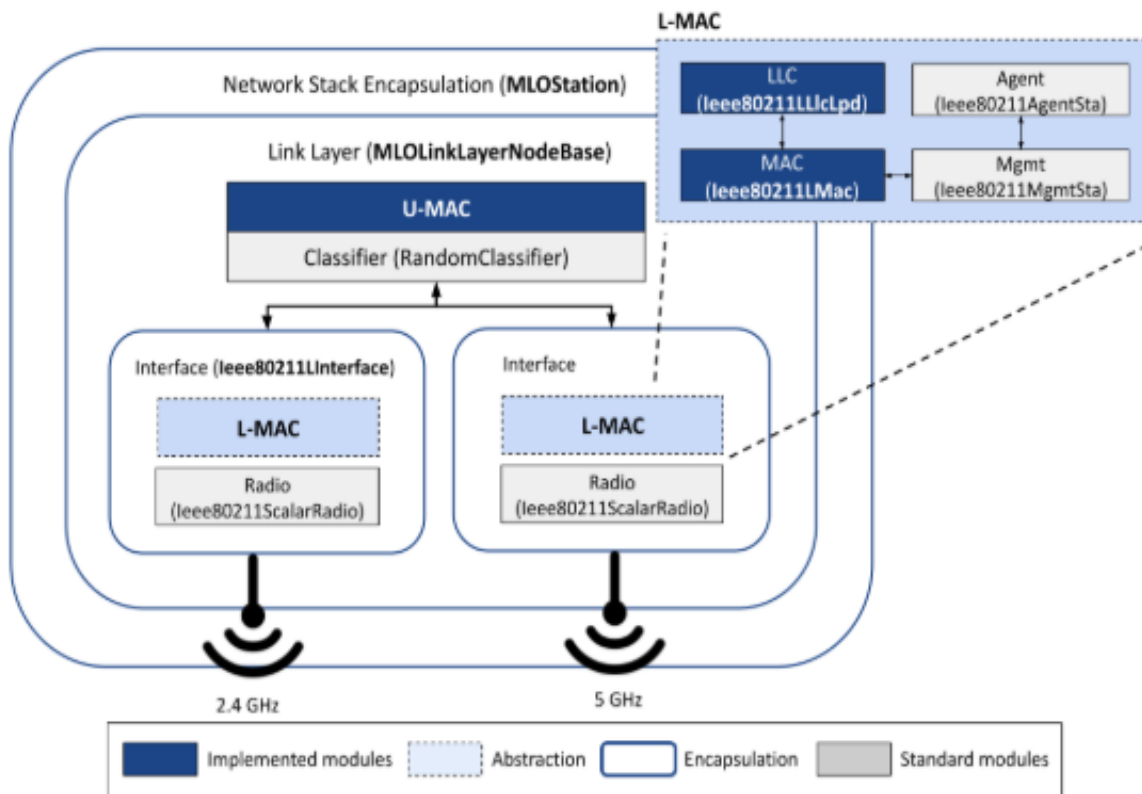


Figure 3.11: Structure de la station MLO [51].

La figure 3.12 illustre l'arborescence du répertoire src mis à jour, incluant les fichiers et modules ajoutés ou modifiés après implémentation des modes de transmission RedundancyMLO, JointMLO et ProposedMLO.

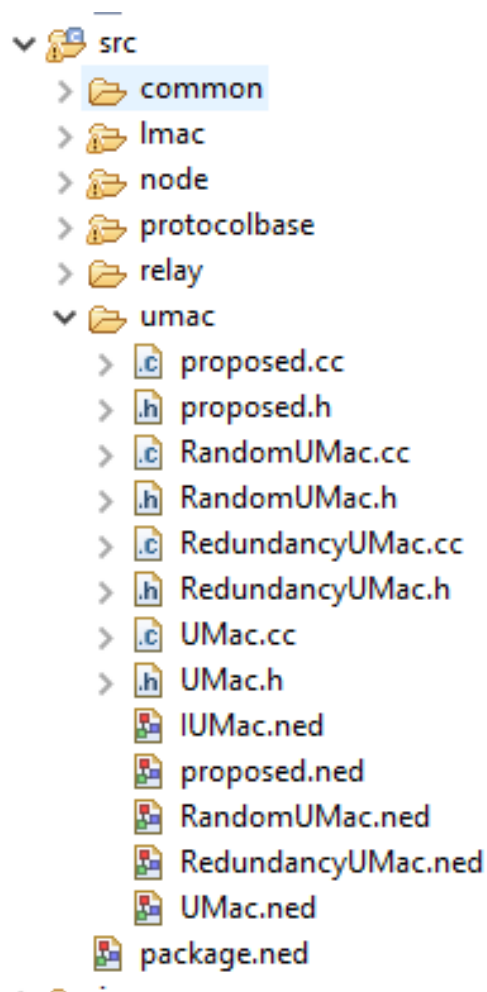


Figure 3.12: Structure du projet WiFiMLO après modifications

Afin d'illustrer le déroulement des simulations, des captures d'écran de l'environnement graphique QtEnv ont été ajoutées. Elles permettent de visualiser le comportement des stations et l'évolution de la transmission en mode MLO durant l'exécution du scénario.

La Figure 3.13 représente la phase d'initialisation du réseau avec l'apparition du signal WirelessSignalBeacon, indiquant le démarrage du processus de scrutation des stations par le point d'accès du BSS afin de les interroger sur leur besoin en transmission des trames de données donc le démarrage de la simulation.

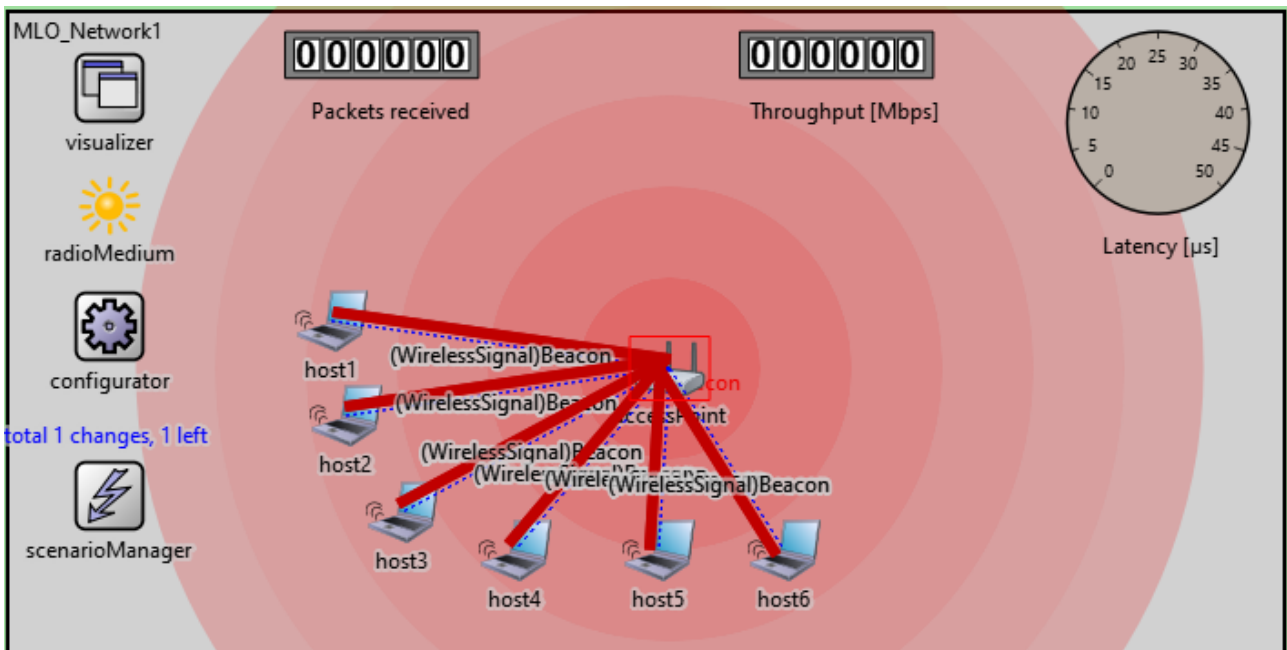


Figure 3.13: Démarrage de la simulation avec l'émission du signal Wi-Fi.

La Figure 3.14 illustre l'activation des liens WiFi 7 sur les bandes 2.4 GHz et 5 GHz pour deux stations MLO. À ce stade, le message Associated AP s'affiche pour chacune d'elles, indiquant qu'elles sont bien connectées à leur point d'accès.

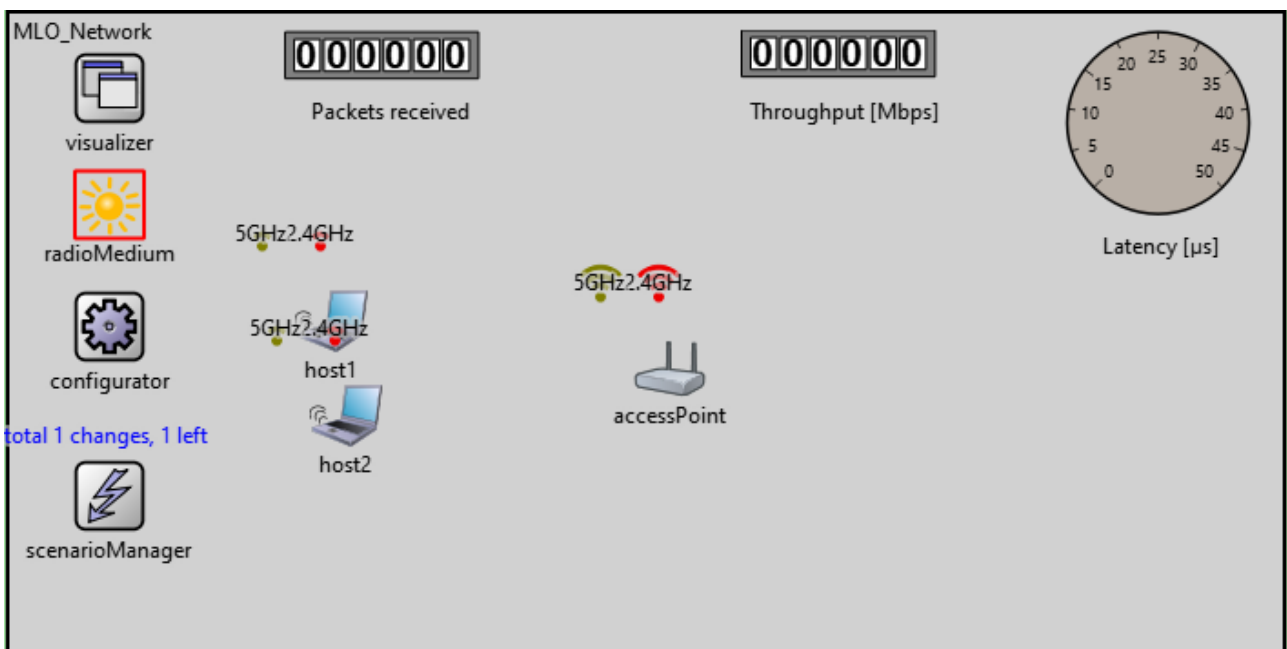


Figure 3.14: Connexion via les bandes 2.4 GHz et 5GHz dans un BSS à deux STA

La Figure 3.15 illustre l'activation des liens Wi-Fi dans les bandes 2.4 GHz et 5 GHz pour dix stations.

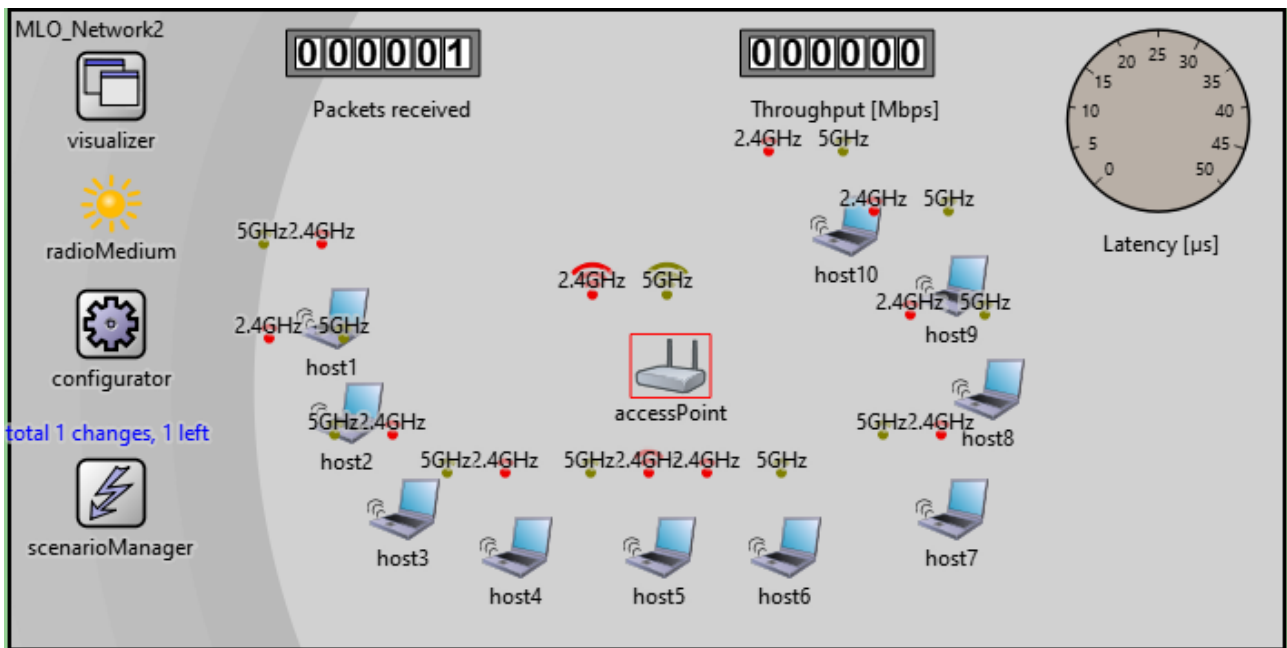


Figure 3.15: Connexion via les bandes 2.4 GHz et 5GHz dans un BSS à dix STA

La Figure 3.16 représente l'échange de trames ACK entre le point d'accès (AP) et les stations (STA) . Ces trames ACK sont transmises en réponse à divers types de trames Data ou de contrôle.

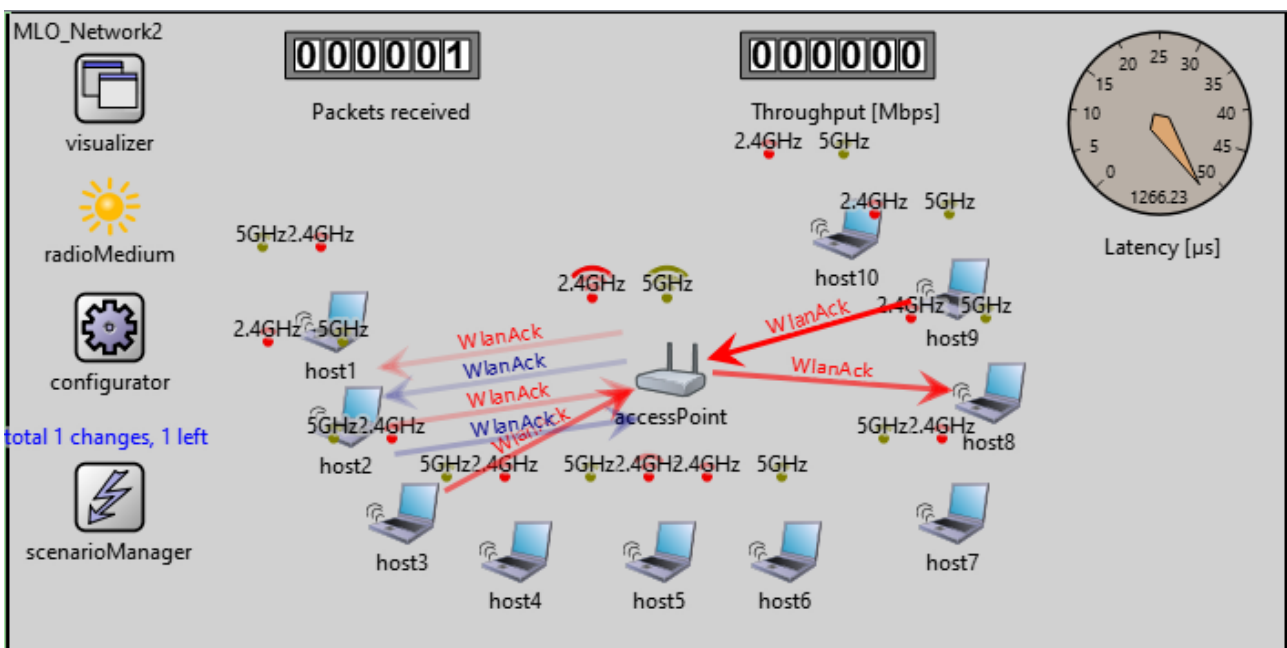


Figure 3.16: Échange de trame ACK entre AP et les STA de son BSS

3.5.4 Métriques de Performances et Paramètres de Simulation

3.5.4.1 Paramètres de Simulation

Afin d'évaluer les performances de notre proposition et les comparer à celles des deux autres, nous avons configuré la simulation avec les paramètres présentés dans le Tableau 3.2 ci-dessous.

Paramètre	Signification	Valeur
AC	Catégorie d'accès	VI
AIFS	Temps d'attente avant l'accès au canal pour la vidéo	34 μ s
CWmin	Valeur minimal de la fenêtre de contention pour la vidéo	7
CWmax	Valeur maximal de la fenêtre de contention pour la vidéo	15
CW	Valeur courante de la fenêtre de contention pour la vidéo	[CWmin,CWmax]
BO	Délai aléatoire d'attente	Random[0,CW-1]
SIFS	Espace IFS le plus court entre la transmission DATA et ACK	16 μ s
Slot Time	Durée d'un slot	9 μ s
BW	Bande passante des liens	I1 = 80 MHz ; I2 = 20 MHz
MCS	Schéma MCS	I1 = QAM-256 ; I2 = QAM-64
NSS	Nombre de flux spatiaux	2
WLANACK	Longueur d'une trame ACK	194 bits
$T_{WLANACK}$	Temps transmission d'une trame ACK	44 μ s
A-MPDU	Longueur de la trame DATA avec les entêtes Mac et le code CRC	12610 Bits
A-MSDU	Longueur de la trame DATA	12 KBits
ProtocoleTransport	Protocole utilisé pour l'envoi	UDP
TXopLimit	Période de temps pour les transmission en rafale de la vidéo	0
Beacon	Longueur de la trame Beacon	482 bits
ProbeRequest	Longueur de la trame de requête de sondage	338 Bits
ProbeResponse	Longueur de la trame de réponse à la requête de sondage	466 Bits
AssocReq	Longueur de la requête d'association	370 Bits
AssocResp	Longueur de la réponse à la requête d'association	370 Bits
Auth	Longueur de la trame d'authentification	354 Bits

Table 3.2: Paramètres de simulation

3.5.4.2 Métriques de Performances

Dans le cadre de notre étude, nous avons évalué les performances des différents modes de transmission (JointMLO, RedundancyMLO, ProposedMLO) en nous basant sur trois métriques clés, couramment utilisées dans l'évaluation des protocoles réseau :

- **Nombre de trames uniques reçues :** Cette métrique représente le nombre total de trames DATA uniques reçues avec succès par le récepteur au cours de la simulation. Elle permet d'estimer la fiabilité du mécanisme de transmission utilisé. Un nombre élevé de trames uniques reçues indique une meilleure capacité du système à transmettre les données sans pertes.
- **Débit (Throughput) :** Le débit est défini comme la quantité totale de trames transmises avec succès par unité de temps. Il permet d'évaluer l'efficacité du canal de communication et la capacité du système à exploiter la bande passante disponible. Il est généralement exprimé en kilobits par seconde (kbps) ou mégabits par seconde (Mbps). Dans nos simulations, le débit a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{throughput}_{bps} = \frac{N \times L}{T}$$

où :

- **N :** est le nombre total de trame DATA uniques reçues.
 - **L :** est la taille d'une trame (en octets).
 - **T :** est la durée totale de la simulation (en secondes)
- **La Latence (latency) :** La latence correspond au temps nécessaire pour qu'une trame atteigne le récepteur après avoir été créée. Elle est généralement exprimée en microsecondes (μs) ou en millisecondes (ms) selon le contexte. Dans notre simulation, la latence de chaque trame a été calculée à l'aide de la formule :

$$\text{latence}_{\text{trame}} = (\text{temps_réception} - \text{temps_création}) \times 10^6 \quad [\mu s]$$

3.5.5 Analyse des Résultats de Simulation

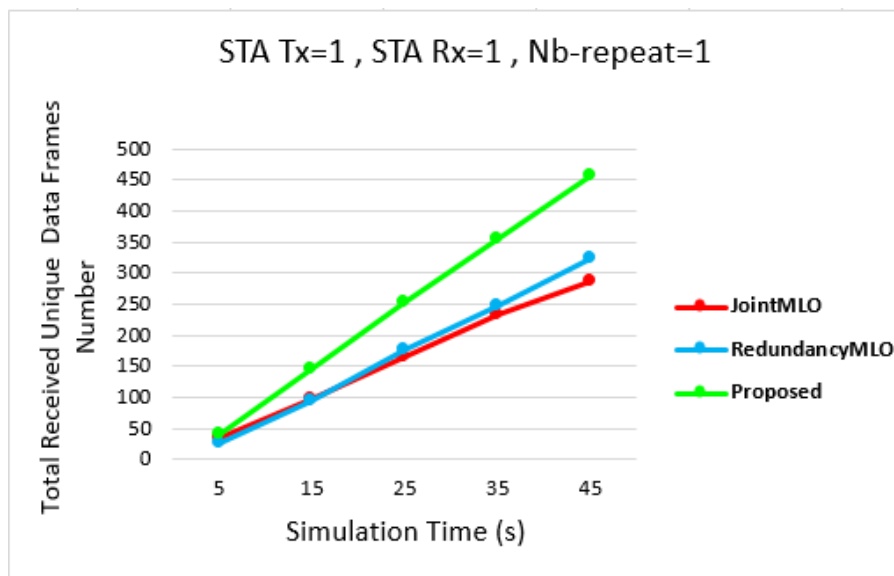
Nous avons réalisé neuf études de performances afin d'évaluer et comparer les performances des trois modes de transmission MLO : Redundancy, Joint et Proposed. Nous avons choisi deux cas d'utilisation: variation du temps de simulation et variation du nombre de stations. Notre analyse se résume aux points suivants :

- Nombre de trames reçues par interface en fonction du temps de simulation.
- Nombre total de trames uniques reçues en fonction du temps de simulation et du nombre de stations.
- Débit effectif par interface en fonction du temps de simulation .
- Débit effectif total en fonction du temps de simulation et du nombre de stations.
- Latence moyenne par interface en fonction du temps de simulation.

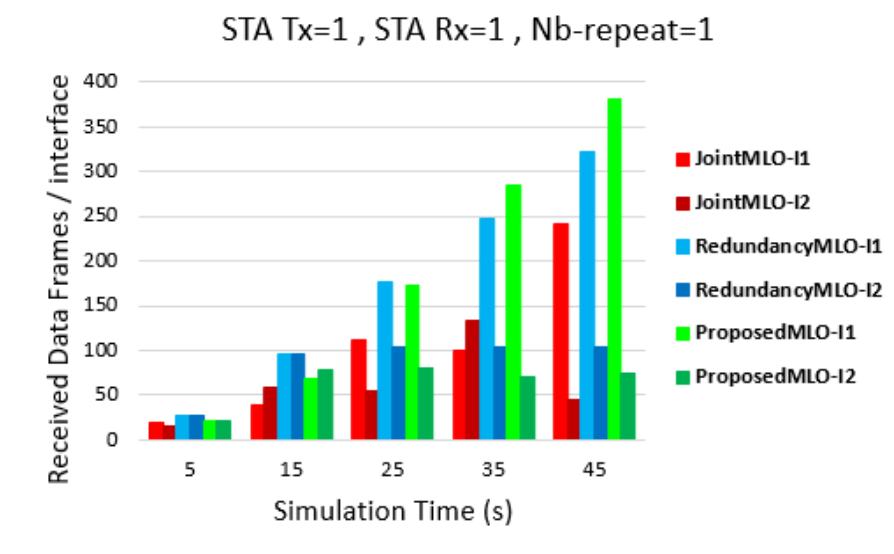
- Latence moyenne totale en fonction du temps de simulation et du nombre de stations.

Pour les cas d'études où l'on mesure les trois métriques par chaque interface réseau (L1 et L2), l'évaluation se fait au niveau d'une station MLO (une station Tx et une station Rx). Ceci afin d'obtenir des conditions idéales et parfaites du réseau en général et des liens en particulier (sans collisions et sans pertes) et comprendre ainsi l'impact de la répartition des trames données dans chaque lien de chaque interface sur la fiabilité, le débit et la latence.

3.5.5.1 Nombres de trames reçues Vs Temps de simulation



Total Received Unique Data Frames Number Vs Time



Received Data Frames / interface Vs Time

Figure 3.17: Nombre de trames reçues (total uniques et par interface) Vs temps de simulation

Dans ce premier cas de simulation (voir la Figure 3.17), nous évaluons et analysons l'évolution du nombre total de trames uniques reçues, ainsi que leur répartition par interface (I1 et I2), pour les trois modes de transmission : JointMLO, RedundancyMLO et Proposed, en fonction de la variation du temps de simulation.

À $t = 5$ secondes, les trois modes présentent un comportement presque similaire, lié à une faible occupation du canal due à la limite du temps.

Pour RedundancyMLO, une répartition équilibrée entre les deux interfaces est observée jusqu'à $t = 15$ secondes, conformément à son principe de duplication des trames. Par conséquent, le nombre total de trames uniques reçues est inférieur au nombre total de trames reçues sur les deux interfaces. Toutefois, à partir de $t = 25$ secondes, un déséquilibre apparaît, suggérant des pertes de trames sur l'un des liens. Malgré cela, le total de trames uniques reçues continue de croître régulièrement, permettant à RedundancyMLO de surpasser JointMLO.

Le mode JointMLO, quant à lui, montre une répartition plus irrégulière : l'accès à chaque lien se fait de manière indépendante, ce qui entraîne une alternance d'activité entre I1 et I2, avec une préférence pour l'un des deux dans certains scénarios. De plus, si un ACK n'est reçue pour une trame, la trame doit être retransmise sur le même lien.

Le mode ProposedMLO se distingue par de meilleures performances à partir de $t = 15$ secondes. Grâce à sa stratégie hybride, il commence par une transmission redondante basée sur un short backoff pour garantir l'accès et la réception rapide de la trame, puis bascule vers le mode Joint dès qu'un ACK est reçu sur au moins un lien, afin d'optimiser l'utilisation des liens sans attendre une nouvelle contention. Cette approche permet d'augmenter la fiabilité de transmission et de réception des trames de données.

Enfin, à partir de $t = 25$ secondes, une asymétrie entre les interfaces devient plus marquée, principalement en raison des différences de bande passante : I1 utilise un canal de 80 MHz, ce qui permet des transmissions plus rapides que sur I2, limité à 20 MHz.

3.5.5.2 Débit effectif Vs Temps de simulation

Dans ce deuxième cas de simulation (voir la Figure 3.18), nous évaluons et comparons les performances des trois modes de transmission multi-liens JointMLO, RedundancyMLO et ProposedMLO en mesurant à la fois le débit global et sa répartition par interface (I1, I2), en fonction de la variation du temps de simulation.

Pour les trois modes, le débit effectif par interface et le débit effectif total augmentent proportionnellement avec l'augmentation du nombre de trames reçues par interface et le nombre total de trames uniques reçues, respectivement.

À noter que, avec le mode Redundancy, les trames de données redondantes ne seront considérées dans le calcul du débit effectif global, c'est pour cela, avec Redundancy, le débit effectif global est inférieur à la somme des deux débits effectifs par interface. Toutefois, il permet un débit supérieur à celui de JointMLO à partir de $t = 15$ secondes, grâce à l'envoi redondant des trames sur les deux liens, ce qui augmente les chances de réception de la trame.

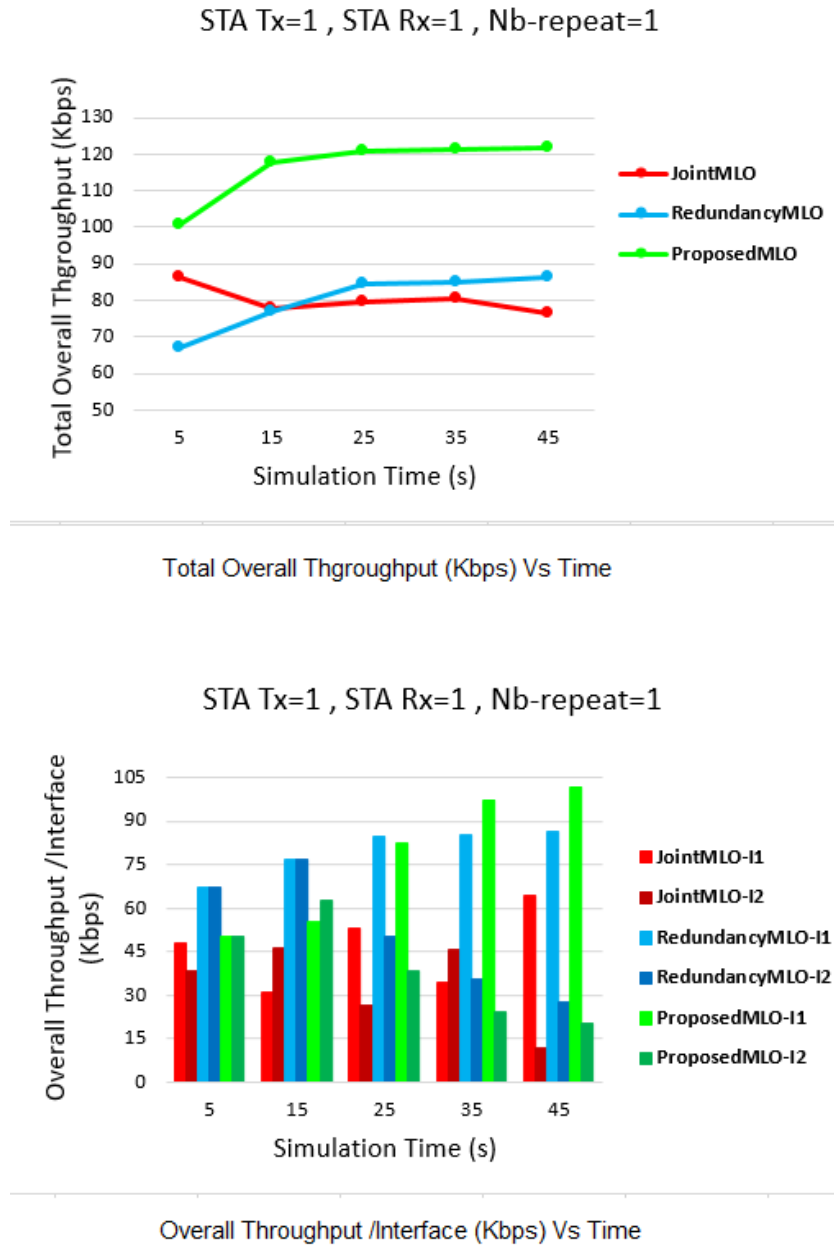


Figure 3.18: Débit (effectif total et par interface) Versus temps de simulation

JointMLO affiche le débit global le plus faible dès $t = 15$ secondes, en raison d’une utilisation séquentielle des liens : une seule interface transmet à la fois, ce qui limite le parallélisme et entraîne une sous-utilisation des capacités multi-liens.

ProposedMLO se distingue par un débit nettement supérieur pour toute les durées de simulation. Bien évidemment, avec Proposed MLO, nous marquons le plus grand nombre de trames reçues par interface, et le plus grand nombre total de trames uniques reçues. C’est pourquoi, nous obtenons les plus hautes valeurs pour le débit effectif par interface et le débit effectif total.

3.5.5.3 Latence moyenne Vs Temps de simulation

Dans ce dernier cas de simulation (voir la Figure 3.19), nous évaluons et analysons les variations de la latence moyenne totale ainsi que par interface (I1 et I2) pour les trois modes

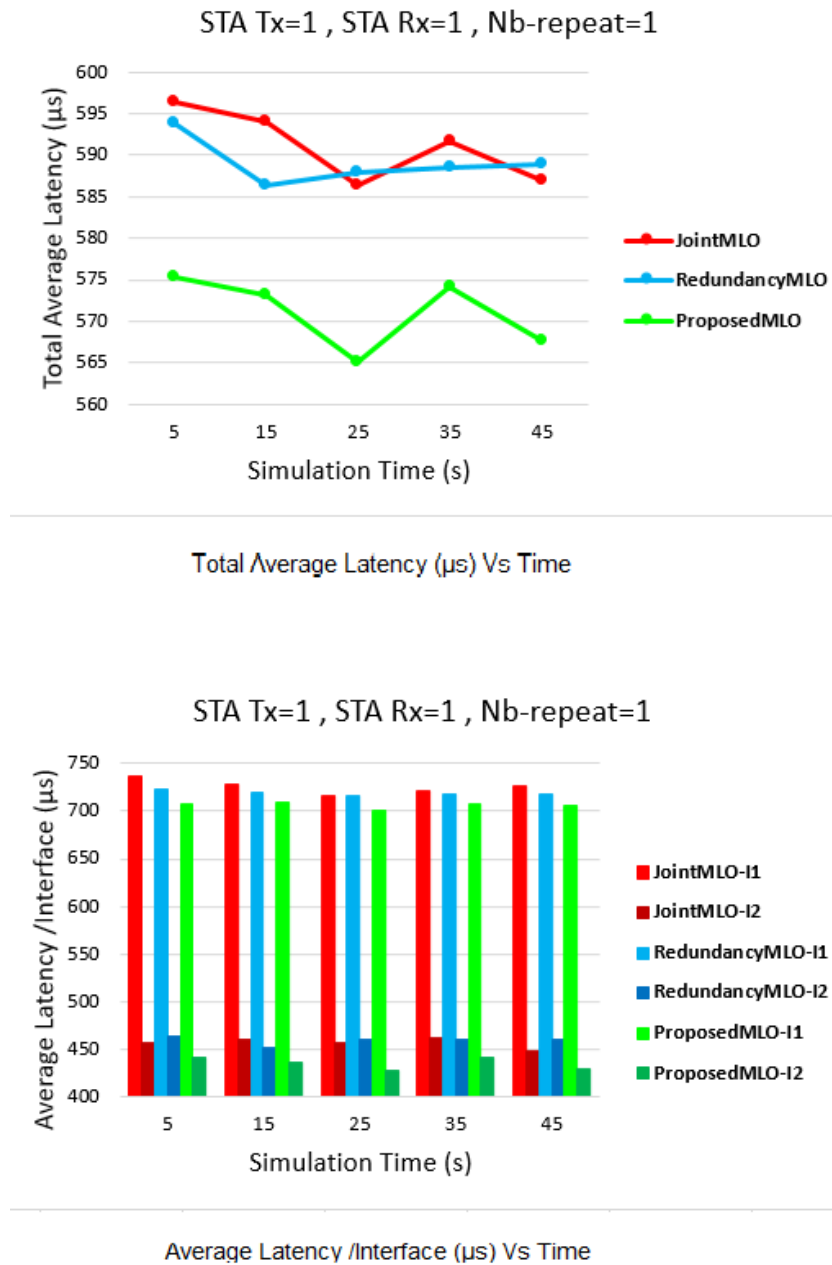


Figure 3.19: Latence moyenne (totale et par interface) Vs temps de simulation

de transmission : JointMLO, RedundancyMLO et ProposedMLO, en fonction du temps de simulation.

À partir de $t = 25s$, JointMLO devient plus performant, car il évite la contrainte de synchronisation entre transmission Data et réception ACK imposée par le fonctionnement de RedundancyMLO, où la STA émettrice doit attendre pour que les deux liens soient disponibles. Même si le BO sur un lien atteint zéro, d’une part, et la station réceptrice doit attendre la terminaison de la durée de la phase de transmission des trames DATA pour passer à la phase de transmission de la trame ACK, d’autre part. Ce mécanisme statique ralentit RedundancyMLO.

Le mode ProposedMLO présente globalement la latence la plus faible, grâce à l’optimisation du mécanisme de contention (via le Short Backoff) et à la bascule dynamique entre les modes Redundancy et Joint, ce qui permet de réduire les délais d’accès au canal.

Cependant, en analysant la latence par interface, on remarque que l'interface I1, qui utilise un canal de 80 MHz, subit une latence plus élevée que I2 (20 MHz), notamment avec les trois modes . Cela s'explique par la stratégie de regroupement de canaux statique : dans l'accès multi-canaux, la transmission sur un canal large (comme celui de 80 MHz) n'est possible que si tous les sous-canaux qui le composent sont simultanément disponibles. Autrement dit, si un seul des sous-canaux est occupé, la station doit recommencer la contention et attendre que l'ensemble du canal soit libre. Cette contrainte introduit un retard supplémentaire sur les liens larges, comme I1, ce qui augmente leur latence effective, malgré leur capacité supérieure.

3.5.5.4 Nombres de trames reçues et débit effectif Vs Nombre de stations

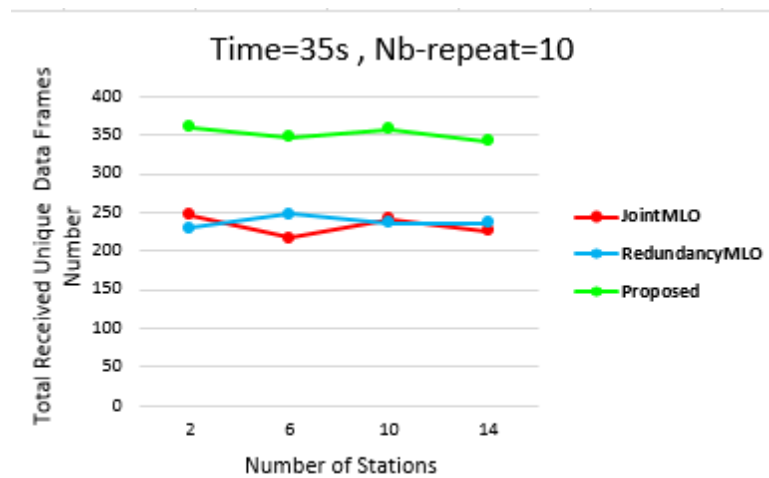


Figure 3.20: Nombre total de trames uniques reçues Vs Nombre de stations

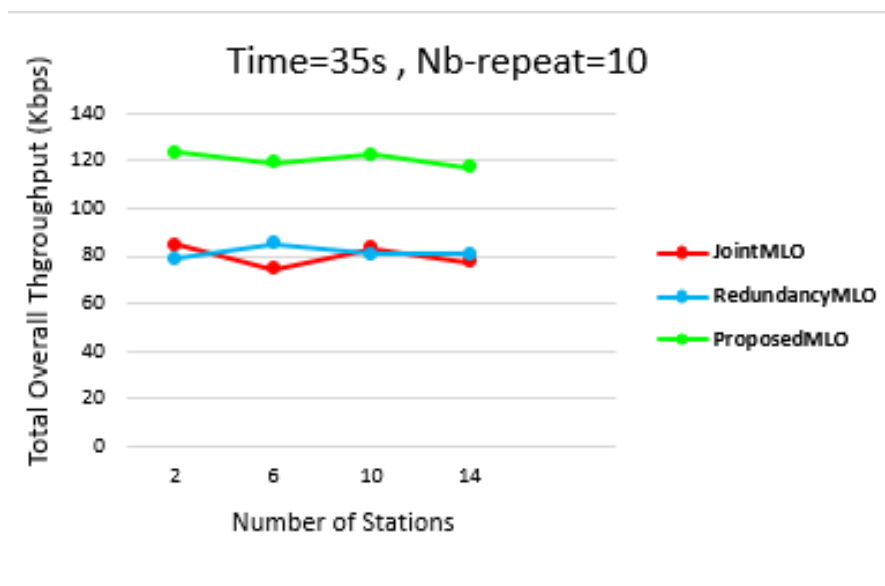


Figure 3.21: Debit effectif total Vs Nombre de stations

Dans les figures 3.20 et 3.21 , nous évaluons les variations du nombre total de trames

uniques reçues et le débit effectif global, respectivement, avec les trois modes Redundancy, Joint et proposed, en fixant le temps de simulation et en variant le nombre de stations.

Nous remarquons que, même en augmentant le nombre de stations de 2 à 14, et avec les trois modes, le nombre total de trames reçues uniques et le débit global obtenus évoluent légèrement ou même diminuent dans certains points de simulation. Ceci est en effet dû au nombre important de collisions qui se produisent durant les transmissions des stations, car plus le nombre de stations augmente, plus la probabilité d'accès au canal de transmission diminue d'une part, et plus le taux collisions augmente, d'autre part.

De plus, le nombre de trames reçues uniques et les débits effectifs globaux obtenus avec les trois MLO évoluent avec une même allure. Néanmoins, les résultats montrent qu'avec ProposedMLO, les valeurs des deux métriques surpassent celles obtenues avec les deux autres modes, et ce quel que soit le nombre de stations (2, 6, 10 ou 14 stations). Avec le mode proposé, l'évolution des valeurs des deux métriques conservent une courbe plus stable et plus élevée, ce qui traduit une meilleure efficacité d'utilisation du canal et une capacité à maintenir de bonnes performances même lorsque le nombre de stations augmente.

Par contre, avec les modes JointMLO et RedundancyMLO, nous obtenons des nombres de trames uniques reçues et des débits beaucoup plus faibles avec des valeurs presque proches.

3.5.5.5 Latence moyenne Vs Nombre de stations

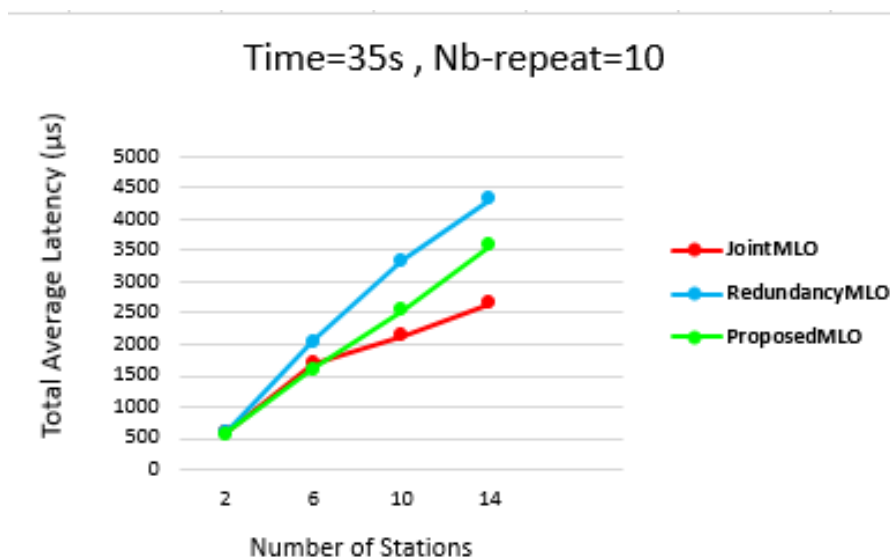


Figure 3.22: Latence moyenne totale Vs Nombre de stations

Dans la Figure 3.22, nous évaluons les variations de latence moyenne totale obtenue avec les trois modes Redundancy, Joint et proposed, en fixant le temps de simulation et en variant le nombre de stations.

Nous remarquons que, ProposedMLO fournit de meilleures performances que RedundancyMLO, surtout lorsque le nombre de stations devient élevé. Même s'il reste légèrement en dessous de JointMLO dans certaines configurations, il réussit à maintenir une latence modérée

tout en améliorant le débit et le taux de réception.

Le mode RedundancyMLO, subit une forte augmentation de latence, ce qui reflète une surcharge du réseau due à la transmission redondante sur plusieurs liens et aux délais additionnels dus aux valeurs de Long Backoff à la contention et à l'attente de réception de l'ACK après la transmission de la trame DATA.

En fait, avec ProposedMLO, la station procède, dans un premier temps, en suivant le principe de fonctionnement du mode Redundancy, c'est-à-dire transmettre la même trame de données en la dupliquant sur les deux liens (lien 20 MHz et lien 80 MHz), pour s'assurer bien de recevoir l'acquiescement pour cette trame sur au moins un des deux liens. Puis, dès que l'ACK arrive sur un lien, nous interrompons la transmission sur l'autre lien pour continuer la transmission en suivant le principe de joint. Par conséquent, il y a une probabilité qu'avec Proposed MLO, nous revenons au fonctionnement de Redundancy lorsque la trame l'ACK n'est pas arrivée ou n'est pas arrivée avant son arrivée sur l'autre lien. Cependant, même en recevant un ACK sur un lien avant son arrivée sur l'autre lien, on s'approche aussi du fonctionnement de joint après interrompre la transmission en cours sur l'autre lien, ce qui crée un délai additionnel en comparaison au fonctionnement de Joint.

Pour résumer, en augmentant le nombre de stations de 2 à 14, nous obtenons :

- Avec Redundancy MLO, une fiabilité faible, un débit faible et une latence élevée.
- Avec JointMLO, une latence réduite mais un débit faible et une fiabilité faible.
- Avec Proposed MLO, une bonne fiabilité, un haut débit et une latence suffisamment réduite.

Plus important encore, les résultats sont logiques car les applications en temps réel des systèmes AAL ne visent pas seulement à obtenir de hauts débits et de minimales valeurs de latences, mais l'objectif est de s'assurer de l'arrivée de la donnée transmise au côté du récepteur en temps réel, et donc de pouvoir permettre l'accès à une trame de donnée sans trop attendre, et puis assurer une transmission rapide de la données sur le réseau et arriver à temps au côté du récepteur. Par conséquent, un compromis entre la fiabilité, le débit et la latence.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et validé un mode de transmission MLO amélioré pour les applications temps réel en environnement AAL, en améliorant d'une part la procédure de tirage de Backoff et en combinant les avantages des modes existants Joint et Redundancy.

Les résultats obtenus montrent que notre proposition permet une meilleure gestion des transmissions multi-liens, avec une amélioration notable en termes de latence, de fiabilité, de débit, qui représentent des critères essentiels pour les systèmes AAL.

Conclusion Générale et Perspectives

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

Nous constatons aujourd’hui que l’évolution rapide des technologies numériques a permis l’émergence de solutions intelligentes pour les systèmes AAL. Ces systèmes nécessitent surtout des technologies de communications qui peuvent répondre aux exigences de bonne fiabilité, de faible latence, de haut débit et de sécurité .

Dans ce projet de fin d’études, nous avons pu examiner l’évolution des technologies de communication sans fil à travers le prisme des systèmes AAL et de la norme Wi-Fi 7, en particulier à travers la technique innovante du Multi-Link Operation (MLO).

Dans un premier temps, nous avons commencé par explorer les fondements des systèmes AAL ainsi que les exigences techniques qu’ils imposent aux réseaux de communication. Nous avons également mis en lumière l’évolution des normes Wi-Fi, de leurs débuts jusqu’à la norme de la 7ème génération.

Ensuite, une deuxième partie a été consacrée à une étude approfondie de la technique MLO du Wi-Fi 7. Cette partie a également été l’occasion de synthétiser plusieurs travaux de recherche récents autour de l’optimisation de MLO, dans des contextes variés allant de la gestion de la congestion à l’allocation adaptative des ressources.

Enfin, dans la troisième partie, nous avons proposé et évalué un nouveau mode de transmission basé sur MLO, spécifiquement conçu pour les besoins des applications en temps réel des systèmes AAL. Cette proposition combine intelligemment les avantages des modes Redundancy et Joint, tout en introduisant une procédure de Short Backoff pour optimiser la phase de contention. Des organigrammes détaillant le fonctionnement des modes Redundancy, Joint et proposé ont été élaboré afin de comprendre mieux et comparer ainsi leur étapes d’exécution. L’implémentation a été réalisée sur le simulateur OMNeT++ avec le framework INET, et des simulations ont été menées à l’aide du simulateur WiFi MLO. Les résultats ont montré des gains significatifs en termes de fiabilité, de débit et de latence par rapport aux modes classiques. Ce qui permet de statuer sur l’efficacité de la proposition.

En résumé, ce travail contribue à l’optimisation des communications sans fil pour les systèmes AAL, en tirant parti des innovations de la norme IEEE 802.11be. Il ouvre également la voie à de futures recherches sur des schémas d’accès plus intelligents et adaptatifs pour les réseaux multi-liens de nouvelle génération.

Dans la continuité du travail, parmi les perspectives envisagées, nous avons notamment

identifié les axes suivants :

- Adapter le fonctionnement de notre proposition pour l'accès multi-lien à trois bandes de fréquence (2.4, 5 et 6 GHz) .
- Prendre en considération le paramètre de qualité de service TXOPLimit pour les trafics vidéo, afin d'assurer une gestion optimisée des ressources dans les scénarios sensibles au délai.
- Évaluer notre proposition en y intégrant d'autres métriques de performances comme le taux de service et de collision.

Bibliographie

- [1] SilverEco, AAL (Ambient Assisted Living) : définition et enjeux, Silver Economie , 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.silvereco.fr/aal-ambient-assisted-living/> . [Consulté le 08-02-2025].
- [2] BMV Guerra, E. Torti, E. Marenzi, M. Schmid, S. Ramat, F. Leporati et G. Danese, Ambient assisted living for frail people through human activity recognition: state-of-the-art, challenges and future directions, *Frontiers in Neuroscience* , vol. 17, article 1256682, 2 oct. 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2023.1256682/full> . [Consulté le 08-02-2025].
- [3] A. El Murabet, A. Abtoy, T. Abdellah et T. Abderahim, Ambient Assisted Living system’s models and architectures: A survey of the state of the art, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.* , vol. 32, pp. 1–10, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.04.006> . [Consulté le 09-02-2025].
- [4] EnableMe, Ambient Assisted Living pour plus d’autonomie, EnableMe. [En ligne]. Disponible: <https://www.enableme.ch/fr/article/ambient-assisted-living-pour-plus-d-autonomie-948>. [Accédé le: 09-02-2025].
- [5] Ebyte, “Nouvelles,” Ebyte. [En ligne]. Disponible: <https://www.fr-ebyte.com/news/457>. [Accédé le: 10-02-2025].
- [6] Minew, Types et utilisations des réseaux IoT,” Minew. [En ligne]. Disponible: <https://www.minew.com/fr/iot-networks-types-and-usage/>. [Accédé le: 10-02-2025].
- [7] R. K. Singh, M. Aernouts, M. De Meyer, M. Weyn, and R. Berkvens, “Leveraging LoRaWAN technology for precision agriculture in greenhouses,” *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1827, Mar. 2020. doi: 10.3390/s20071827.
- [8] Amazon Web Services, La différence entre débit et latence, AWS, [En ligne]. Disponible : <https://aws.amazon.com/fr/compare/la-différence-entre-débit-et-latence/> . [Consulté : 11 -02-2025].
- [9] Datarockstars.ai, Quel est le rôle du WiFi dans notre vie ? [En ligne]. Disponible : <https://www.datarockstars.ai/quel-est-le-role-du-wifi-dans-notre-vie/>. [Consulté le : 12-02-2025].
- [10] T. Mokrani et B. Benamara, Adaptation de la carte réseau WiFi pour les applications IoT , mémoire de master en Administration et Sécurité des Réseaux, Université Abderrahmane

- Mira - Béjaïa, Faculté de Sciences Exactes, Département d'Informatique, année universitaire 2022/2023.
- [11] M. Terré, Le Standard 802.11 : Couche physique et couche MAC , version 1.1, Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), mars 2007. [En ligne]. Disponible : www.cnam.fr/elau .
- [12] AR Rebai, Contributions à l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux sans fil WiFi , thèse de doctorat en Informatique , Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Spécialité Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains , soutenue publiquement le 11 décembre 2009.
- [13] K. Abdelalim, Study and Optimisation of IEEE 802.11 PHY and MAC Protocols Towards a New Generation Integrated in 5G, Ph.D. dissertation, École Nationale Supérieure Mines-Télécom Atlantique, Université Bretagne Loire, Rennes, France, 2019.
- [14] C. Akmouche, Proposition d'un protocole MAC Full Duplex pour la prochaine génération des réseaux HEW IEEE 802.11ax, Mémoire de Master, Département d'Informatique, Faculté des Sciences Exactes, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, Algérie, 2018.
- [15] N. Chendeb Taher, 'Modélisation analytique et contrôle d'admission dans les réseaux 802.11e pour une maîtrise de la Qualité de Service'; , Thèse de doctorat, Université d'Évry Val d'Essonne, École doctorale SITEVRY, Laboratoire Réseaux et Systèmes Multimédia, 31 mars 2009.
- [16] A. Ksentini, *Qualité de Service (QoS) dans les réseaux locaux sans fil basés sur la technologie IEEE 802.11*, Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences et Ingénierie, Université de Cergy-Pontoise, Laboratoire Informatique de Cergy-Pontoise (LICP), France, 8 déc. 2005.
- [17] S. Zhang, L. Yu, and Y. Cheng, "An Introduction to Key Technologies of Wi-Fi 7," International Journal of Frontiers in Engineering Technology, vol. 6, no. 2, pp. 1–5, 2024, doi: 10.25236/IJFET.2024.060201.
- [18] H. M. K. Abdelgawad, How Wi-Fi 7 Enhances the Way of The Future of Smart City Wi-Fi, CWNP CWNE Candidate Whitepaper Series, 2023.
- [19] J. Sun, "Investigating the Role of WiFi7 for Machine Type Communication", Bachelor's thesis, Faculty of Information Technology and Electrical Engineering, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering, Apr. 2024.
- [20] Anritsu, "White Paper: Key Technologies for IEEE 802.11be Wi-Fi 7," Anritsu Corporation, [En ligne]. Disponible: <https://www.anritsu.com>. [Accès le: 10-Oct-2023].
- [21] W. Lin, Bit level diversity combining for D-MIMO, Master's thesis, Dept. Elect. Comput. Eng., McGill Univ., Montreal, Canada, Nov. 2011.

- [22] S. Ould Amara, M. Yazid, et S. Mammeri, "Double-Stage UORA to Meet the Requirements of IoT Applications Operating over Wi-Fi 7," *Proceedings of IEEE Conference*, 2024, pp. 1-6.
- [23] Y. A. Qadri, Zulqarnain, A. Nauman, S. W. Kim, A. Musaddiq, and E. Garcia-Villegas, "Preparing Wi-Fi 7 for Healthcare Internet-of-Things," **Sensors**, vol. 22, no. 16, p. 6209, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22166209.
- [24] A. Jeknić and E. Kočan, "Development Steps that Brought to Wi-Fi 7," *ETF Journal of Electrical Engineering*, vol. 29, no. 1, Nov. 2023.
- [25] T. Adame, M. Carrascosa-Zamacois, and B. Bellalta, "Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 4954, Jul. 2021. doi: 10.3390/s21154954.
- [26] S. Mammeri, S. Ould Amara, and M. Yazid, "Performance Study of Up-Link OFDMA Random Access for IoT Applications-based WiFi 7," in *Modèles de Fiabilité et Sciences de l'Ingénieur (MFSI'23)*, Bejaia, Algeria, 19-20 Novembre 2023.
- [27] M. Carrascosa-Zamacois, G. Geraci, L. Galati-Giordano, A. Jonsson, et B. Bellalta, "Understanding Multi-link Operation in Wi-Fi 7: Performance, Anomalies, and Solutions", préimpression arXiv arXiv: 2210.07695, octobre 2022.
- [28] A.A. Abdalhafid, Z.A. Zukarnain, S.K. Subramaniam, and F.H. Ayob, "Multi-Link Operation in IEEE 802.11be Extremely High Throughput: A Survey," *IEEE Access*, vol.12, pp. 46891-46906, Apr. 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3378997.
- [29] M. Alsakati, C. Pettersson, S. Max, J. Gross, and V. N. Moothedath, "Performance of 802.11be Wi-Fi 7 with Multi-Link Operation on AR Applications," arXiv preprint arXiv:2304.01693v1, April 2023.
- [30] A. Lopez-Raventos and B. Bellalta, "Multi-link Operation in IEEE 802.11be WLANs," arXiv preprint arXiv: 2201.07499, Jan.2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2201.07499>.
- [31] G. Fontanesi, F. Wilhelmi, and L. Galati-Giordano, "Continuous Multi-Link Operation: A Contention-Free Mechanism for the Unlicensed Spectrum," arXiv preprint arXiv:2405.09390, May 15, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2405.09390>
- [32] V. Paroshin, I. Levitsky, V. Loginov, and E. Khorov, "Aggregation Algorithm to Increase Throughput of Multi-link Wi-Fi 7 Devices," *IEEE Wireless Communications Letters*, Dec. 2024, doi: 10.1109/LWC.2024.3474294.
- [33] Y. Cheng, K. J. Kim, A. Sehgal, N. Dawar, and Y. Zhu, "A low-duty-cycle and congestion-robust design of adaptive Wi-Fi 7 multi-link operation control over user side," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 10412–10421, Jan. 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3524999.

- [34]] L. Kwon and E.-C. Park, "Contention-less synchronous multi-link transmission for throughput enhancement and heterogeneous fairness in Wi-Fi 7," *Sensors*, vol. 24, no. 11, Art no. 3642, Jun. 2024, doi: 10.3390/s24113642
- [35] M. Han, Z. Chen, and X. Sun, "Bandit-Based Multiple Access Approach for Multi-Link Operation in Heterogeneous Dynamic Networks," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. [Early Access], 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.011100.
- [36] J. Zhang, Q. Tan, Y. Gao, X. Sun, and W. Zhan, "WiFi 7 with Different Multi-Link Channel Access Schemes: Modeling, Fairness and Optimization," *IEEE Transactions on Communications*, 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3400278.
- [37] A. Hsu, C. Yeh, P. Lin, S. Ku, and J. Chiang, "Wi-Fi 7 Multi-Link Operation (MLO) White Paper," MediaTek Inc, 2022
- [38] L. Zhang, H. Yin, S. Roy, L. Cao, X. Gao, and V. Sathya, "IEEE 802.11be network throughput optimization with multi-link operation and AP controller," arXiv preprint arXiv:2312.00345v2, Apr. 7, 2024.
- [39] E. Dorronzoro, I. Gómez, A. V. Medina, and J. A. Gómez, "Design and Implementation of a Prototype with a Standardized Interface for Transducers in Ambient Assisted Living," *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 3000–3022, Jan. 2015, doi: 10.3390/s150202999.
- [40] G. Cicirelli, R. Marani, A. Petitti, A. Milella, and T. D'Orazio, "Ambient Assisted Living: A Review of Technologies, Methodologies and Future Perspectives for Healthy Aging of Population," *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3549, May 2021, doi: 10.3390/s21103549.
- [41] W. Murti and J. Yun, "Multi-link operation with enhanced synchronous channel access in IEEE 802.11 be wireless LANs: Coexistence issue and solutions," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 7974, 2021.
- [42] A. Sivo, O. Pohudina, N. Cordeschi, and L. A. Grieco, "Queue Simulation Study for Multi-Link Operation in IEEE802.11be Networks," in *Proc. 15th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2024, pp. 60–64.
- [43] F. Wilhelmi Roca, *Towards spatial reuse in future wireless local area networks: a sequential learning approach*, Universitat Pompeu Fabra, 2020.
- [44] G. Pedone, *Implementazione ed Ottimizzazione di Tecniche di Ridondanza WiFi a Livello Applicativo*, Ph.D. dissertation, Politecnico di Torino, 2020.
- [45] M. Yazid, *Évaluation et optimisation des performances des réseaux locaux sans fil IEEE 802.11*, Ph.D. dissertation, Université de Bejaia, Bejaia, Algérie, 2015.
- [46] A. Ksentini, *Qualité de Service (QoS) dans les réseaux locaux sans fil basés sur la technologie IEEE 802.11*, Ph.D. dissertation, Université de Cergy Pontoise, Cergy Pontoise, France, 2015.

- [47] Á. López-Raventós and B. Bellalta, “IEEE 802.11 be multi-link operation: When the best could be to use only a single interface,” in *Proc. 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)*, 2021, pp. 1–7.
- [48] M. Yang and B. Li, “Survey and perspective on extremely high throughput (EHT) WLAN—IEEE 802.11 be,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, no. 5, pp. 1765–1780, 2020.
- [49] A. Varga et al., “OMNeT++ Discrete Event Simulator,” [Online]. Available: <https://omnetpp.org>. [Accessed: 10-Mai-2025].
- [50] INET Framework Team, “INET Framework for OMNeT++,” [Online]. Available: <https://inet.omnetpp.org>. [Accessed: 10-Mai-2025].
- [51] D. Ergenç and F. Dressler, “Wi-Fi 7 Multi-Link Operation for OMNeT++ – Source Code,” GitHub repository, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/inet-framework/wifi7-mlo> [Accessed: 05-Mai-2025].

Résumé

Dans ce mémoire de Master, nous nous sommes intéressés à la technologie WiFi 7 et les systèmes AAL. Nous avons étudié la technique de transmission multi-liens ou MLO, qui permet d'opérer simultanément sur trois bandes de fréquences 2.4, 5 et 6 GHz. En particulier, nous avons étudié les modes de transmission MLO conçus pour les applications temps réel : Redundancy et Joint. Dans ce contexte, nous avons proposé un nouveau mode de transmission au service des applications en temps réel des systèmes AAL permettant d'assurer des communications avec une latence réduite et un débit élevé. C'est une amélioration à deux niveaux, en optimisant la procédure de Backoff au niveau contention et en combinant le fonctionnement des deux modes MLO existants au niveau transmission. Nous avons implémenté, simulé et évalué les performances des trois modes de transmission MLO : Redundancy, Joint et le mode proposé en optant pour le simulateur réseau OMNeT++ avec le Framework INET. Les résultats de simulation montrent que notre mode MLO proposé permet des réceptions en temps réel des données vidéos tout en assurant un équilibre entre fiabilité élevée, débit élevé et latence réduite.

Mots clés : WiFi 7, Système AAL, Applications Temps Réel, MLO, Simulation, Évaluation.

Abstract

In this master's thesis, we are interested to WiFi 7 technology and AAL systems. We have studied the Multi-Link Operation technique or MLO that allows simultaneous operation over 2.4, 5 and 6 GHz frequency bands. Particularly, we have studied the MLO transmission modes designed for real-time applications : Redundancy and Joint. In this context, we have proposed a new transmission mode to the service of AAL Systems real-time applications allowing communications with reduced latency and high throughput. It is about a double level enhancement, by optimizing the Backoff procedure at the contention level and combining the existing modes functioning at the transmission level. We have implemented, simulated and evaluated the performance of the three MLO transmission modes: Redundancy, Joint and the proposed mode by opting for the OMNeT++ network simulator with the INET Framework. The simulation results demonstrate that our proposed MLO mode allows a real time receive of video traffics while ensuring a balance between high reliability, high throughput and reduced latency .

Keywords : WiFi 7, AAL System, Real-Time Applications, MLO, Simulation, Evaluation.