

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. Mira de Bejaia  
Faculté des Sciences Exactes  
Département d'Informatique



# Mémoire de Fin de Cycle

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

**Option :** Administration et sécurité des réseaux informatiques

## Thème

---

# Adaptation du Wi-Fi 7 pour les applications médicales basées sur l'IoT

---

### Réalisé par :

Mlle MESSOUAF Hana

M. MESSAOUDI Salim

### Devant le jury composé de :

<i>Président</i>	M. KHENOUS Lachemi	MCB	U. A/Mira Béjaïa.
<i>Examineur</i>	M. TOUAZI Djoudi	MCB	U. A/Mira Béjaïa.
<i>Examinatrice</i>	Mme ZIDANI Ferroudja	MCB	U. A/Mira Béjaïa.
<i>Examinatrice</i>	Mme HOCINI Kenza	MCB	U. A/Mira Béjaïa.

### Ce travail a été réalisé sous la direction de :

<i>Encadrant</i>	M. YAZID Mohand	Professeur	U. A/Mira Béjaïa.
------------------	-----------------	------------	-------------------

Année universitaire : 2024 – 2025

---

## REMERCIEMENTS

---

### **Nous tenons à remercier :**

Le bon Dieu de nous avoir donné la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

### **Nous exprimons notre profonde gratitude :**

À notre encadrant, Monsieur **YAZID Mohand**, pour son sérieux, sa disponibilité, ses conseils avisés, la qualité de ses orientations, ainsi que pour les connaissances précieuses qu'il a su nous transmettre tout au long de ce travail. Son accompagnement bienveillant et rigoureux a été essentiel à la réalisation de ce mémoire.

### **Nous remercions également :**

Le doctorant **M. OULD AMARA Saïd** du département d'Informatique pour ses idées fécondes qui ont été un élément très essentiel dans ce mémoire.

Nous exprimons notre gratitude aux **membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger, de lire et d'évaluer ce mémoire.

### **Nous tenons également à remercier :**

Tous les enseignants de notre département qui nous ont accompagnées au cours de notre formation.

## DÉDICACES

---

Ce mémoire est bien plus qu'un travail académique. C'est le fruit d'un chemin rempli d'efforts, de sacrifices, et de foi.

Je le dédie **à ma mère**, aujourd'hui absente, mais présente à chaque instant dans mon cœur et mon esprit, son souvenir reste ma plus grande force et source d'inspiration. Que Dieu lui accorde sa paix.

**À mon père**, pour sa présence constante, sa patience et ses encouragements qui ont été pour moi un refuge dans les moments de fatigue ou de découragement.

**À mes frères, mes sœurs, ma belle-sœur Ghania et ma belle-mère**, mes alliés dans les joies comme dans les épreuves.

À toutes ces personnes qui m'ont toujours tendu la main, guidé, écouté ou encouragé.

Mlle **MESSOUAF Hana**

Je dédie ce mémoire à ma famille, dont le soutien constant, l'amour indéfectible et les encouragements ont été essentiels tout au long de mon parcours universitaire. Leur présence bienveillante m'a permis d'avancer avec confiance et persévérance.

Je tiens également à dédier ce travail à mes amis, pour leur amitié sincère, leur écoute, ainsi que pour les moments de partage et de réconfort qui ont contribué à alléger les difficultés rencontrées.

À vous tous, ma profonde reconnaissance.

**M. MESSAOUDI Salim**

# Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

1

Introduction Générale

3

## 1 Réseaux Wi-Fi pour les applications médicales

4

1.1	Introduction	4
1.2	Présentation du Wi-Fi et du standard IEEE 802.11be	5
1.2.1	Historique et évolution des normes IEEE 802.11	5
1.2.1.1	Les normes physiques	5
1.2.2	Généralités sur le Wi-Fi 7	7
1.2.3	Principales caractéristiques du Wi-Fi 7	8
1.2.4	Améliorations de la couche PHY pour le Wi-Fi 7	9
1.2.4.1	Une bande passante étendue de plus de 160 MHz	9
1.2.4.2	Allocation de plusieurs RUs à un seul utilisateur (SU)	9
1.2.4.3	Modulation 4096-QAM	10
1.2.4.4	Conception avancée des préambules et technique de perforation	11
1.2.4.5	Modification du préambule PHY et compatibilité descendante dans la norme 802.11be	11
1.2.5	Amélioration de la couche MAC pour Wi-Fi 7	13
1.2.5.1	Fonctionnement MLO sur une bande passante élargie	13
1.2.5.2	Augmentation des flux spatiaux et améliorations MIMO (Multiple-input multiple-output)	14
1.2.5.3	Coopération de plusieurs points d'accès	15
1.3	Intégration du Wi-Fi 7 dans l'IoT Medical (IoMT)	16
1.3.1	Introduction à l'Internet des objets (IoT)	16
1.3.1.1	Calendrier historique de l'Internet des objets	16
1.3.1.2	Le fonctionnement de l'IoT	17
1.3.2	L'IoT dans divers contextes de soins de santé	18
1.3.2.1	Environnements de soins de santé intérieurs	18
1.3.2.2	Environnements de soins de santé extérieurs	19

1.3.2.3	Surveillance à distance des patients . . . . .	19
1.3.2.4	Villes intelligentes . . . . .	20
1.3.3	Avantages du Wi-Fi 7 pour les dispositifs médicaux intelligents . . . . .	20
1.4	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>État de l'art sur les communications OFDMA-UL</b>	<b>23</b>
2.1	Introduction . . . . .	23
2.2	Communication OFDMA-UL dans le Wi-Fi 7 pour les applications médicales. . . . .	24
2.2.1	OFDMA dans le Wi-Fi 7 . . . . .	24
2.2.1.1	Généralités . . . . .	24
2.2.1.2	Phases de communication . . . . .	25
2.2.1.3	Phase Downlink (DL) . . . . .	26
2.2.1.4	Phase Uplink (UL) . . . . .	26
2.2.1.5	Étapes internes à chaque phase . . . . .	26
2.2.1.6	Principe des trames Trigger, BSRP et BSR . . . . .	27
2.2.2	UORA : Protocole d'accès aléatoire en montée basé sur l'OFDMA . . . . .	29
2.2.2.1	Principe général . . . . .	29
2.2.2.2	Fonctionnement de l'UORA standard . . . . .	30
2.2.2.3	Avantages de l'UORA . . . . .	31
2.2.2.4	Déroulement de l'UORA : exemple avec trois stations associées . . . . .	31
2.2.2.5	Limites de UORA dans les réseaux denses . . . . .	32
2.3	État de l'art sur le protocole UORA . . . . .	33
2.3.1	E-OBO : Adaptation centralisée par l'AP . . . . .	33
2.3.1.1	Règles d'adaptation de $\alpha$ . . . . .	33
2.3.1.2	Procédure E-OBO . . . . .	35
2.3.2	OBO_CTRL : Adaptation locale par les stations . . . . .	35
2.3.2.1	Résultats de simulation . . . . .	36
2.3.2.2	Algorithme OBO_CTRL . . . . .	36
2.3.3	$\alpha$ -UORA : Accès aléatoire OFDMA avec décrémentation adaptative . . . . .	37
2.3.3.1	Détermination et mise à jour de $\alpha$ . . . . .	37
2.3.3.2	Estimation du nombre de stations participantes ( $n$ ) . . . . .	38
2.3.3.3	Algorithme du fonctionnement $\alpha$ -UORA . . . . .	38
2.3.4	Protocole M-OBO (Modified OFDMA Backoff) . . . . .	38
2.3.5	Protocole MAC OFDMA à contention en deux phases . . . . .	40
2.3.6	CODOBO_CTRL : Backoff distribué adaptatif par estimation locale . . . . .	40
2.3.6.1	Principe de fonctionnement . . . . .	40
2.3.6.2	Equations utilisées : . . . . .	41
2.3.6.3	Règles d'adaptation de $\beta$ . . . . .	41
2.3.6.4	Procédure CODOBO_CTRL . . . . .	42
2.3.7	Discussion sur les solutions proposées pour améliorer le mécanisme UORA . . . . .	42
2.4	Conclusion . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Proposition et évaluation des performances</b>	<b>44</b>
3.1	Introduction . . . . .	44
3.2	Problématique . . . . .	45
3.3	Objectifs et motivations . . . . .	45
3.4	Proposition : protocole UORA amélioré par le mécanisme $\alpha\beta$ -OBO . . . . .	46
3.4.1	Fonctionnement du mécanisme $\alpha\beta$ -OBO . . . . .	46
3.4.1.1	Formule améliorée du OBO . . . . .	46

3.4.1.2	Justification des choix de conception . . . . .	46
3.4.1.3	Évolution du paramètre alpha ( $\alpha$ ) . . . . .	46
3.4.1.4	Évolution du paramètre beta ( $\beta$ ) . . . . .	47
3.4.1.5	Organigramme . . . . .	47
3.4.1.6	Schéma de fonctionnement . . . . .	49
3.4.1.7	Déroulement . . . . .	52
3.4.2	Avantages de la solution proposée . . . . .	54
3.5	Environnement de simulation . . . . .	54
3.5.1	Métriques d'évaluation . . . . .	55
3.5.2	Paramètres et valeurs de simulation . . . . .	55
3.5.3	Scénario de simulation . . . . .	56
3.5.4	Comparaison des performances : UORA vs $\alpha\beta$ -OBO . . . . .	56
3.5.4.1	Comparaison des performances en fonction du nombre de STA . . . . .	56
3.5.4.2	Comparaison des performances en fonction du nombre de RUs (STA = 50) . . . . .	60
3.6	Conclusion . . . . .	63
<b>Conclusion générale</b>		<b>64</b>

# Table des figures

1.1	Comparaison de l'allocation des unités de ressources entre Wi-Fi 6 et Wi-Fi 7. . . . .	10
1.2	Comparaison des schémas de modulation QAM pour Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 et Wi-Fi 7 . . . . .	11
1.3	Le format de la trame EHT . . . . .	12
1.4	Détection automatique du préambule pour les trames héritées . . . . .	13
1.5	Illustration du mode STR dans MLO . . . . .	14
1.6	Illustration du mode NSTR dans MLO . . . . .	14
1.7	Comparaison entre la réutilisation spatiale 11ax et la réutilisation spatiale coordonnée . . . . .	15
1.8	Historique de l'Internet des objets (IoT) . . . . .	17
1.9	Santé connectée : l'IoT pour un suivi médical à distance . . . . .	20
2.1	Comparaison entre OFDM et OFDMA dans la répartition des ressources entre utilisateurs . . . . .	25
2.2	Structure des cycles en OFDMA . . . . .	25
2.3	Réception de BA . . . . .	27
2.4	Composition d'une trame Trigger dans OFDMA . . . . .	28
2.5	Format de la trame BSR . . . . .	29
2.6	Fonctionnement UORA pour l'accès aléatoire dans UL-OFDMA. . . . .	31
2.7	Mécanisme du "M-OBO" . . . . .	39
3.1	Organigramme du processus d'accès par $\alpha\beta$ -OBO (côté station) . . . . .	48
3.2	Organigramme de la mise à jour du paramètre $\alpha$ par le point d'accès . . . . .	49
3.3	Séquence des échanges de trames dans le mécanisme $\alpha\beta$ -OBO . . . . .	50
3.4	Évolution du nombre moyen de collisions par cycle en fonction du nombre de stations . . . . .	57
3.5	Débit moyen par cycle en fonction du nombre de STAs (en octets/cycle) . . . . .	58
3.6	Taux d'allocation moyen par cycle en fonction du nombre de STAs . . . . .	59
3.7	Evolution du nombre moyen de collisions en fonction du nombre de RUs . . . . .	60
3.8	Taux d'allocation moyen des RUs par cycle en fonction du nombre de RUs. . . . .	61
3.9	Débit moyen obtenu par cycle en fonction du nombre de RUs . . . . .	62

# Liste des tableaux

1.1	Résumé des normes Wi-Fi (IEEE 802.11)	7
1.2	Résumé des principales caractéristiques du Wi-Fi 7	9
2.1	Mise à jour de $\alpha$ – Cas de congestion	33
2.2	Mise à jour de $\alpha$ – Cas sous-utilisation et autres cas	34
2.3	Nombre de RUs selon le type à chaque round $i$	34
3.1	Paramètres et valeurs utilisés dans l’environnement de simulation	56
3.2	Comparaison des débits obtenus	63

# Liste des abréviations

<b>AP</b>	Access Point
<b>AR</b>	Réalité Augmentée
<b>BA</b>	Block Acknowledgment
<b>BSS</b>	Basic Service Set
<b>BSR</b>	Buffer Status Report
<b>BTF</b>	Basic Trigger Frame
<b>BSRP</b>	Buffer Status Report Poll
<b>BPSK</b>	Binary Phase Shift Keying
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>CODOBO_CTRL</b>	Collision-Based Distributed OFDMA Backoff Control
<b>Co-OFDMA</b>	coordinated-OFDMA
<b>CTS</b>	Clear to Send
<b>CF</b>	Collision Factor
<b>DL</b>	Downlink (Liaison descendante)
<b>EHT</b>	Extremely High Throughput (IEEE 802.11be)
<b>E-OBO</b>	Enhanced OFDMA Backoff
<b>GI</b>	Guard Intervall
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat Request
<b>IoT</b>	Internet of Things (Internet des objets)
<b>IoMT</b>	Internet of Medical Things (Internet des objets médicaux )
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme
<b>MLD</b>	Multi-Link Device
<b>MLO</b>	Multi-Link Operation
<b>M-OBO</b>	Modified OFDMA Backoff
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>MU-MIMO</b>	Multi-User Multiple Input Multiple Output
<b>MU-BA</b>	Multi-User Block Acknowledgment
<b>NSTR</b>	Non-Simultaneous Transmit and Receive
<b>OBO</b>	OFDMA Backoff
<b>OCW</b>	OFDMA Contention Window
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

---

<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>OBO_CTRL</b>	OFDMA Backoff Control
<b>PC</b>	Personnel Computer
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PPDU</b>	Physical Protocol Data Unit
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QBPSK</b>	Quadrature Binary Phase Shift Keying
<b>QoS</b>	Qualité de Service
<b>RA-RU</b>	Random Access Resource Unit
<b>RU</b>	Resource Unit
<b>RSE</b>	Réutilisation Spatiale Coordonnée
<b>RTS</b>	Request to Send
<b>SINR</b>	Signal to Interference plus Noise Ratio
<b>STA</b>	Station (Équipement utilisateur Wi-Fi)
<b>STR</b>	Simultaneous Transmit and Receive
<b>TF</b>	Trigger Frame
<b>TID</b>	Traffic Identifier
<b>UL</b>	Uplink (Liaison montante)
<b>UORA</b>	Uplink OFDMA Random Access
<b>VR</b>	Réalité Virtuelle
<b>VHT</b>	Very High Throughput
<b>VLC</b>	Visible Light Communication
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b><math>\alpha</math>-UORA</b>	Alpha-based Uplink OFDMA Random Access
<b><math>\beta</math>-UORA</b>	beta-based Uplink OFDMA Random Access
<b><math>\alpha\beta</math>-OBO</b>	$\alpha\beta$ -OFDMA Backoff

# Introduction Générale

Dans un monde toujours plus connecté, la transformation numérique impacte profondément tous les secteurs, y compris celui de la santé. La convergence entre l'Internet des objets (IoT) et les technologies sans fil de nouvelle génération ouvre de nouvelles perspectives pour les soins médicaux, la gestion des infrastructures hospitalières et la surveillance à distance des patients. L'IoT médical (IoMT) devient ainsi un pilier central de cette évolution.

Parmi les avancées majeures, la norme Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) marque un tournant. Succédant au Wi-Fi 6, elle offre des performances accrues en termes de débit, de latence et de gestion multi-utilisateur. Elle s'adapte particulièrement bien aux environnements exigeants comme les hôpitaux, où la fiabilité, la stabilité et la réactivité du réseau sont vitales. Grâce à ses innovations — telles que la modulation 4096-QAM, le Multi-Link Operation (MLO) ou encore l'agrégation de bandes jusqu'à 320 MHz — le Wi-Fi 7 peut atteindre des débits théoriques de 46 Gbps avec une latence réduite, répondant aux besoins critiques des dispositifs médicaux connectés.

Cependant, malgré cette avancée, le mécanisme d'accès aléatoire en montée (UORA) présente des limites en environnement dense. Son schéma de décrémentation (OBO) reste rigide et peu réactif, ignorant les fluctuations de charge réseau. Cette rigidité engendre des collisions, des temps d'accès imprévisibles et une sous-utilisation des ressources, problématiques dans un contexte hospitalier fortement sollicité.

Dès lors, une question centrale se pose : Comment adapter intelligemment le fonctionnement du Wi-Fi 7, en particulier le mécanisme UORA, pour garantir un accès plus efficace dans les environnements médicaux connectés ?

Ce mémoire propose une réponse à travers le mécanisme -OBO, une version améliorée du backoff OFDMA, qui ajuste dynamiquement le décrétement OBO selon deux paramètres : la charge réseau globale () et l'historique d'activité des stations (). L'objectif est d'optimiser l'allocation des ressources, de réduire les collisions et d'améliorer le débit global.

La structure du mémoire s'articule comme suit :

Le Chapitre 1 présente les bases des réseaux Wi-Fi et les apports spécifiques du Wi-Fi 7 dans le domaine médical.

Le Chapitre 2 dresse un état de l'art des mécanismes d'accès en montée (OFDMA-UL), en exposant leurs limites et quelques pistes d'amélioration.

Le Chapitre 3 est dédié à la solution -OBO, son fonctionnement, les simulations réalisées, et l'analyse comparative avec UORA standard.

Ce travail s'inscrit dans une dynamique alliant innovation technologique et amélioration des services de santé, afin de contribuer à un réseau médical plus fiable, intelligent et performant.

# Chapitre1: Réseaux Wi-Fi pour les applications médicales

## 1.1 Introduction

Dans un monde toujours plus connecté, l'évolution des normes Wi-Fi joue un rôle central dans l'amélioration des performances des réseaux sans fil. Depuis la fin des années 1990, ces normes ont continuellement évolué pour répondre aux besoins croissants en matière de débit, de latence et de gestion d'un grand nombre d'appareils connectés.

Parmi les évolutions les plus marquantes, le Wi-Fi 7 (IEEE 802.11be) constitue une avancée majeure. Il offre des débits théoriques allant jusqu'à 46 Gbps, une latence réduite, une meilleure efficacité spectrale (via la modulation 4096-QAM) et la technologie Multi-Link Operation (MLO), permettant aux équipements de transmettre simultanément sur plusieurs bandes de fréquence (2.4, 5 et 6 GHz). Ces innovations techniques s'accompagnent d'améliorations importantes aux couches PHY et MAC, permettant une gestion plus efficace du spectre, une réduction des interférences et une meilleure qualité de service, même dans les environnements denses.

Le Wi-Fi 7 trouve des applications dans de nombreux domaines :

Dans l'industrie, il optimise la communication entre machines et systèmes de gestion. Dans l'éducation, il facilite la diffusion de contenus HD et les classes virtuelles. Dans le divertissement, il permet une expérience fluide en jeux vidéo, VR/AR ou streaming. Dans le secteur financier, il soutient des échanges en ligne rapides et sécurisés. Et dans les villes intelligentes, il contribue à une meilleure gestion du trafic et des transports.

Mais c'est dans le secteur médical que son impact est le plus stratégique. Avec l'essor de l'IoMT (Internet of Medical Things), les établissements de santé s'appuient de plus en plus sur des dispositifs connectés pour la surveillance continue des patients, l'automatisation des diagnostics, et la télémédecine. Ces usages nécessitent une connectivité stable, rapide et sans latence, que le Wi-Fi 7 est en mesure de fournir.

Grâce à sa faible latence, sa haute fiabilité et ses capacités multi-utilisateurs avancées, le Wi-Fi 7 renforce la qualité des soins, permet des consultations à distance réactives, facilite les interventions chirurgicales assistées par robot, et assure une interopérabilité fluide entre les dispositifs médicaux. Il optimise aussi l'utilisation des ressources hospitalières en limitant les interruptions de service.

Ce chapitre vise à poser les fondations de cette étude en analysant d'abord l'évolution des normes Wi-Fi, les innovations spécifiques du Wi-Fi 7 (comme le Multi-RU, l'agrégation de bande et la 4096-QAM), puis en explorant son impact concret sur les applications médicales : télémédecine, capteurs intelligents, gestion hospitalière et connectivité critique.

## 1.2 Présentation du Wi-Fi et du standard IEEE 802.11be

### 1.2.1 Historique et évolution des normes IEEE 802.11

Le **Wi-Fi (Wireless Fidelity)** est un ensemble de protocoles de communication sans fil régi par les normes du groupe IEEE 802.11. Il permet de relier plusieurs appareils informatiques (ordinateurs, routeurs, smartphones, modems Internet, etc.) par ondes radio au sein d'un réseau informatique afin d'assurer la transmission de données entre eux.

Apparues pour la première fois en 1997, les normes IEEE 802.11, utilisées internationalement, décrivent les caractéristiques des réseaux locaux sans fil (WLAN). La marque déposée Wi-Fi correspond initialement à la certification délivrée par la Wi-Fi Alliance (« Wireless Ethernet Compatibility Alliance », WECA). Cet organisme a pour mission de garantir l'interopérabilité entre les matériels conformes à la norme 802.11 et d'attribuer le label Wi-Fi aux équipements respectant ses spécifications.

Le Wi-Fi est désigné par la norme générique IEEE 802.11, à laquelle des suffixes sont ajoutés pour indiquer les différentes versions. Il repose sur un ensemble de matériels et de services permettant une transmission de données sans fil à haut débit. [1].

#### 1.2.1.1 Les normes physiques

Les normes IEEE 802.11 définissent les spécifications des couches physique (couche 1) et liaison de données (couche 2) d'un réseau WLAN. Depuis la première version de 1997, plusieurs évolutions ont vu le jour, parmi lesquelles 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax et 802.11be et 802.11bn. Elles partagent plusieurs caractéristiques communes [1] :

- Elles utilisent toutes la signalisation **Half-Duplex**, ce qui signifie qu'un appareil ne peut pas émettre et recevoir simultanément. En pratique, lorsqu'un appareil transmet des données, il doit attendre la fin de la transmission avant de pouvoir écouter une réponse. Ce mode de communication est comparable à une conversation avec un talkie-walkie, où une seule personne parle à la fois.
- Toutes exploitent les bandes de fréquences **2,4 GHz** ou **5 GHz**.

Voici un récapitulatif des principales versions du Wi-Fi :

**802.11b (1999) :** C'est la première norme Wi-Fi fonctionnant sur la bande 2,4 GHz, cette norme offre une vitesse maximale de 11 Mbps. Elle utilise la modulation **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum). C'est la version la plus ancienne utilisée et elle est la moins chère [1].

**802.11a (1999) :** Première version utilisant la bande 5 GHz, elle repose sur la modulation **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), permettant d'atteindre jusqu'à 54 Mbps. Bien qu'elle offre des performances supérieures à celles de la norme 802.11b, son adoption est restée limitée en raison de son coût plus élevé [1].

**802.11g (2003) :** Fonctionnant sur la bande 2,4 GHz, cette version offre une vitesse maximale de 54 Mbps, identique à celle de 802.11a. Elle utilise aussi la modulation **OFDM** tout en assurant une compatibilité avec les anciens réseaux 802.11b, ce qui a favorisé sa large adoption [1].

**802.11n (2009)** : Dès son lancement, cette norme est devenue la référence dominante. Compatible avec les bandes 2,4 GHz et 5 GHz, elle offre des débits allant de 65 Mbps à 600 Mbps. Elle utilise la modulation **OFDM** et reste rétrocompatible avec toutes les normes précédentes [1].

Trois innovations majeures ont été introduites avec 802.11n :

- **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) : cette technologie utilise plusieurs émetteurs et récepteurs pour améliorer la vitesse et la qualité de la connexion [1].
- **Channel Bonding** : Cette technique regroupe plusieurs petits canaux en un seul plus large, ce qui permet de faire passer plus de données à la fois.
- **Agrégation de trames** : plusieurs petites trames sont regroupées en une seule plus grande, ce qui réduit la surcharge et améliore l'efficacité globale [1].

**802.11ac (2013)** : Fonctionnant exclusivement sur la bande 5 GHz, cette norme promet des vitesses allant jusqu'à 3,5 Gbps, bien que les débits réels dépassent rarement 1 Gbps. Son innovation clé est le **MU-MIMO** (Multi-User MIMO), qui permet au point d'accès de communiquer simultanément avec plusieurs appareils, améliorant ainsi l'efficacité globale du réseau [1].

**802.11ax (2018)** : Considérée comme une évolution majeure, cette norme apporte de nombreuses améliorations par rapport à ses prédécesseurs. Elle prend en charge les bandes 2,4 GHz et 5 GHz, tout comme 802.11n [1].

Son innovation phare est la technologie **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), qui divise la bande passante en plusieurs petites unités appelées **Resource Units** (RU). Cette approche permet de transmettre simultanément des données vers plusieurs appareils, optimisant ainsi l'utilisation du spectre et réduisant la latence [1].

Bien que la vitesse maximale de 802.11ax atteigne 9,6 Gbps, son objectif principal n'était pas uniquement d'augmenter la vitesse, mais surtout d'améliorer l'efficacité globale du réseau, en particulier dans les environnements denses avec de nombreux appareils connectés. Aujourd'hui, cette norme est largement adoptée sous le nom de **Wi-Fi 6** [1].

**802.11be (2024)** : également connue sous le nom de Wi-Fi 7, est une norme de réseau sans fil faisant partie de la famille de protocoles IEEE 802.11 [2]. Désignée par la Wi-Fi Alliance comme Wi-Fi 7 [3], elle vient après la norme 802.11ax et se concentre sur l'amélioration des performances des réseaux locaux sans fil (WLAN) pour des usages intérieurs et extérieurs, en exploitant les bandes de fréquences 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz [4]. Ses innovations clés incluent l'utilisation étendue de la bande 6 GHz, la modulation d'amplitude en quadrature (**QAM**) **4K**, le fonctionnement multi-link (**MLO**) et le **MU-MIMO 16 x 16** afin d'atteindre des débits maximaux théoriques de 46 Gbps[5].

**802.11bn (2028)** : Également connue sous le nom de **Wi-Fi 8**, cette norme de réseau sans fil fait partie de la famille de protocoles IEEE 802.11. Elle succède à la norme 802.11be (Wi-Fi 7) et vise à repousser les limites des performances des réseaux locaux sans fil (WLAN) pour des usages intérieurs et extérieurs. Le Wi-Fi 8 exploitera les bandes de fréquences 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz, tout en explorant de nouvelles technologies pour atteindre des débits maximaux théoriques de 100 Gbps et une latence inférieure à 0,1 milliseconde [1].

Ses innovations potentielles incluent l'intégration d'ondes millimétriques et de bandes TéraHertz, l'élargissement des canaux de communication, l'utilisation de constellations d'ordre supérieur, et l'ajout de techniques avancées comme le Massive-MIMO. Le Wi-Fi 8 pourrait également introduire des fonctionnalités disruptives, telles que le duplex de flux InChannel avec annulation des interférences ou l'accès multiple non orthogonal [1].

En outre, le Wi-Fi 8 pourrait intégrer l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique (ML) au cœur de sa conception. Ces technologies permettraient non seulement d'optimiser la configuration des réseaux, mais aussi de concevoir de nouveaux protocoles et fonctionnalités adaptatifs, capables de répondre à des scénarios et situations inédits [1].

Le Wi-Fi a évolué au fil des années avec plusieurs normes IEEE 802.11, chacune apportant des améliorations en termes de fréquence, de vitesse et de technologies sous-jacentes. Le tableau ci-dessous résume les principales normes Wi-Fi, en mettant en avant leurs caractéristiques clés et les avancées qu'elles ont introduites.

Norme	Année	Fréquence	Vitesse max	Technologies clés
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	DSSS
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	OFDM
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	OFDM
802.11n	2009	2.4/5 GHz	600 Mbps	OFDM, MIMO, Channel Bonding
802.11ac	2013	5 GHz	1 Gbps	MU-MIMO
802.11ax	2018	2.4/5 GHz	9.6 Gbps	OFDMA
802.11be	2024	2.4/5/6 GHz	46 Gbps	QAM 4K, MLO, MU-MIMO 16x16
802.11bn	2028	2.4/5/6 GHz, mmWave, THz	100 Gbps	Massive-MIMO, IA/ML, Duplex InChannel

TABLE 1.1 – Résumé des normes Wi-Fi (IEEE 802.11)

## 1.2.2 Généralités sur le Wi-Fi 7

Le Wi-Fi 7, également appelé IEEE 802.11be (Extremely High Throughput - EHT), est la nouvelle génération de la technologie Wi-Fi. Il est conçu pour offrir des performances bien supérieures à celles du Wi-Fi 6, en répondant aux besoins croissants en débit, en latence et en fiabilité des applications modernes [4].

L'un des objectifs principaux du Wi-Fi 7 est d'atteindre un débit maximal de 46 Gbps, soit quatre fois celui du Wi-Fi 6, en exploitant des bandes de fréquences allant de 1 à 7,125 GHz, y compris la nouvelle bande 6 GHz [4]. Cette augmentation de débit est rendue possible grâce à plusieurs innovations techniques, telles que l'utilisation de canaux de 320 MHz, une modulation 4096-QAM et la prise en charge de 16 flux spatiaux (MIMO) [1], [4].

Le Wi-Fi 7 introduit également des fonctionnalités disruptives comme :

- **l'agrégation multi-bandes** : permettant aux appareils d'utiliser simultanément plusieurs bandes de fréquences (2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz) pour améliorer la fiabilité et réduire la latence [4], [6].
- **Opération multi-liaisons** : Cette technologie permet l'utilisation simultanée des bandes de fréquences 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz, améliorant ainsi la stabilité, la fiabilité et réduisant la latence. Elle est particulièrement bénéfique dans les environnements fortement congestionnés [6].
- **Formation de faisceaux coordonnés** : Les points d'accès peuvent diriger les signaux vers les appareils tout en réduisant les interférences avec les autres appareils à proximité [1].

Ces mécanismes avancés optimisent l'utilisation des ressources radio et réduisent les interférences entre les points d'accès (AP), améliorant ainsi les performances globales du réseau [1].

En termes de latence, le Wi-Fi 7 vise à répondre aux besoins des applications sensibles au temps, telles que la réalité augmentée, la réalité virtuelle, les jeux cloud et les communications industrielles, avec des exigences de latence inférieures à 5 ms [4]. Pour y parvenir, des techniques comme le **HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request)** sont envisagées, permettant une combinaison souple des retransmissions pour améliorer la fiabilité des transmissions [4].

Enfin, le Wi-Fi 7 est conçu pour coexister avec les technologies existantes, notamment dans la bande **6 GHz**, où des mécanismes de coordination et de détection proactive sont mis en place pour éviter les interférences avec les services fixes et mobiles [1]. Cette coexistence est essentielle pour garantir une utilisation efficace du spectre tout en respectant les réglementations locales [6].

### 1.2.3 Principales caractéristiques du Wi-Fi 7

Le Wi-Fi 7 apporte plusieurs avancées majeures par rapport aux générations précédentes. Parmi ses principales caractéristiques :

- **Débits théoriques élevés** : Le Wi-Fi 7 peut atteindre des vitesses allant jusqu'à 46 Gbps, soit près de 4,8 fois plus que le Wi-Fi 6. Toutefois, ces performances ne sont possibles que dans des conditions optimales (peu d'obstacles, proximité du point d'accès et faible interférence) [7].
- **Optimisation des environnements denses** : Grâce à une modulation améliorée et à l'exploitation simultanée de plusieurs bandes, le Wi-Fi 7 offre de meilleures performances dans les lieux très fréquentés (bureaux, hôtels, campus, salles de spectacle), limitant la congestion et optimisant l'expérience utilisateur [7].
- **Latence réduite** : L'amélioration de la gestion des fréquences et l'adoption du MLO permettent une diminution significative de la latence. Cette avancée est cruciale pour les applications sensibles au temps, telles que la visioconférence HD, le cloud computing ou la téléopération [7].
- **Connectivité plus stable et fiable** : L'agrégation des bandes de fréquences renforce la résilience du réseau face aux interférences et aux congestions, assurant ainsi une connexion plus fiable, même dans des environnements complexes [7].
- **Sécurité renforcée** : Le Wi-Fi 7 intègre le protocole de sécurité WPA3 et améliore la gestion des connexions simultanées, offrant une meilleure protection contre les attaques réseau. Cet aspect est particulièrement important pour les entreprises soumises à des exigences strictes en matière de cybersécurité [7].
- **Impact énergétique** : Bien que le Wi-Fi 7 optimise la consommation d'énergie des terminaux, la puissance accrue des infrastructures (points d'accès, routeurs) entraîne une consommation électrique plus importante. Cet aspect doit être pris en compte dans une démarche de sobriété énergétique [7].

Ce tableau résume les principales caractéristiques du Wi-Fi 7.

Caractéristique	Description
Débits théoriques	Jusqu'à 46 Gbps (4,8 fois plus que le Wi-Fi 6)
Gestion des environnements denses	Réduction de la congestion dans les espaces très fréquentés
Latence réduite	Optimisation pour les applications sensibles au temps
Connectivité stable et fiable	Meilleure résilience aux interférences et congestions
Sécurité renforcée	Adoption de WPA3 et gestion améliorée des connexions simultanées

TABLE 1.2 – Résumé des principales caractéristiques du Wi-Fi 7

#### 1.2.4 Améliorations de la couche PHY pour le Wi-Fi 7

Afin de répondre aux exigences croissantes des réseaux sans fil modernes, la norme IEEE 802.11be introduit des améliorations significatives au niveau de la couche physique. Ces évolutions visent à maximiser les débits, réduire la latence et optimiser l'utilisation du spectre, pour offrir des performances adaptées aux nouvelles générations d'applications.

Les principales avancées de la couche PHY se concentrent sur l'élargissement de la bande passante, l'amélioration de la modulation et la gestion plus flexible des ressources spectrales. Ces optimisations permettent d'exploiter pleinement les bandes de fréquences disponibles tout en garantissant une meilleure efficacité spectrale, même dans des environnements denses en appareils connectés [8].

Cette partie suivante détaille ces améliorations techniques et leur impact sur les performances des réseaux Wi-Fi de nouvelle génération :

##### 1.2.4.1 Une bande passante étendue de plus de 160 MHz

Les réseaux WLAN 802.11 actuels, comme la norme IEEE 802.11ax, utilisent principalement les bandes de fréquences 2,4 GHz et 5 GHz, qui sont souvent encombrées et limitées en spectre non autorisé. Cette congestion entraîne inévitablement une détérioration de la qualité de service (QoS), en particulier lors de l'exécution d'applications émergentes, qui nécessitent des débits de données élevés et une faible latence.

Pour répondre à cette demande croissante et tenir la promesse d'un débit maximal d'au moins 30 Gbps, l'EHT envisage d'étendre la bande passante au-delà de 160 MHz. Trois nouvelles configurations sont proposées : 240 MHz en continu, 160+80 MHz en fragments et 320 MHz pour un débit maximal [8] :

- **240 MHz contigus** : Permet d'augmenter le débit en utilisant une plus grande largeur de bande en continu.
- **160+80 MHz non contigus** : Offre plus de flexibilité en utilisant des blocs de spectre séparés.
- **320 MHz contigus** : Conçu pour maximiser le débit et répondre aux besoins des applications les plus exigeantes.

##### 1.2.4.2 Allocation de plusieurs RUs à un seul utilisateur (SU)

La norme IEEE 802.11ax limite chaque utilisateur à une seule RU spécifique pour les transmissions, ce qui restreint considérablement la flexibilité dans l'allocation des ressources spectrales. Pour améliorer cette situation, l'EHT a approuvé une motion permettant l'attribution de plusieurs RUs à un seul utilisateur. Cette évolution vise à [8] :

- **Améliorer l'efficacité spectrale** : En permettant une utilisation plus dynamique et optimisée des ressources disponibles.
- **Réduire les interférences** : En ajustant plus précisément les ressources allouées selon les besoins des utilisateurs.
- **Optimiser le débit pour les utilisateurs individuels** : Notamment dans des environnements denses avec plusieurs appareils connectés simultanément. Cette image illustre l'amélioration de l'allocation des ressources entre le Wi-Fi 6 et le Wi-Fi 7. Le Wi-Fi 6 ne permet d'attribuer qu'une seule RU par utilisateur, laissant certaines parties du spectre inutilisées. Cependant, le Wi-Fi 7 introduit le concept de Multi-RUs. Cette avancée permet à un utilisateur de combiner plusieurs unités de ressource.

La figure 1.1 illustre la différence d'allocation des RUs entre le Wi-Fi 6 et le Wi-Fi 7, mettant en évidence l'introduction du concept de Multi-RUs dans le Wi-Fi 7, qui permet à un utilisateur unique d'exploiter plusieurs unités de ressources simultanément pour une meilleure efficacité spectrale et un débit optimisé.

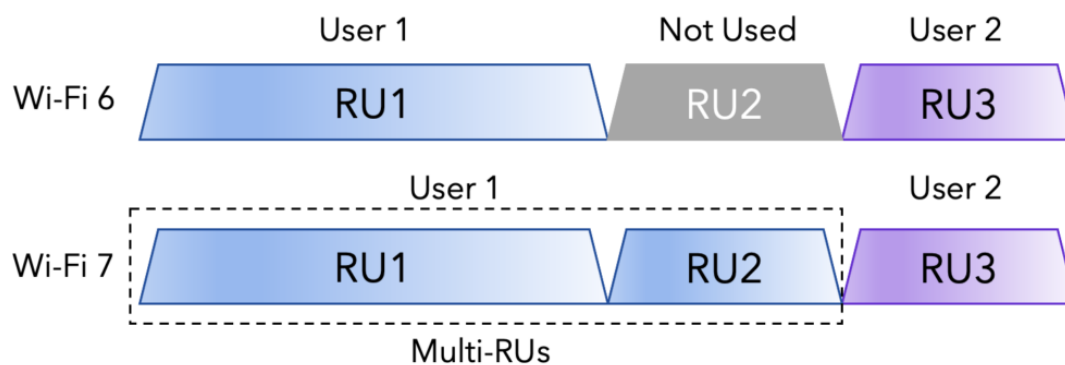


FIGURE 1.1 – Comparaison de l'allocation des unités de ressources entre Wi-Fi 6 et Wi-Fi 7.

### 1.2.4.3 Modulation 4096-QAM

La norme IEEE 802.11ax utilise le schéma de modulation 1024-QAM, qui permet de transmettre 10 bits par symbole modulé. L'EHT propose d'augmenter le débit maximal en introduisant le 4096-QAM, permettant de transporter 12 bits par symbole. Cette augmentation se traduirait par un gain de 20 % du débit par rapport au 1024-QAM pour un taux de codage équivalent [8].

La figure 1.2 illustre l'évolution de la modulation QAM utilisée dans les différentes générations du Wi-Fi, passant de 256-QAM pour le Wi-Fi 5 à 4096-QAM pour le Wi-Fi 7.

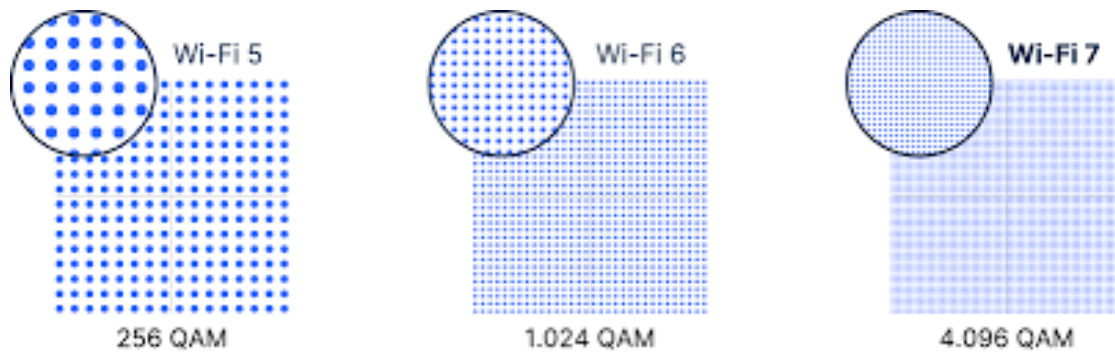


FIGURE 1.2 – Comparaison des schémas de modulation QAM pour Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 et Wi-Fi 7

#### 1.2.4.4 Conception avancée des préambules et technique de perforation

Les préambules jouent un rôle crucial dans les transmissions WLAN en permettant la synchronisation, l'estimation de canal et la signalisation. L'EHT prévoit de définir des formats de préambule compatibles avec les normes précédentes tout en introduisant des améliorations pour les nouvelles fonctionnalités, telles que le multi-RU et le MU-MIMO [8].

##### Objectifs du nouveau préambule :

- **Rétrocompatibilité** : Assurer la coexistence avec les PPDU (Protocol Data Unit) existants sur les bandes 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz.
- **Compatibilité future** : Faciliter l'intégration de nouvelles technologies sans nécessiter de modifications majeures des infrastructures existantes.
- **Optimisation de la signalisation** : Réduire les frais de signalisation pour maximiser le débit effectif.
- **Mécanisme de perforation** : Actuellement, la perforation du préambule est autorisée uniquement pour le MU PPDU (Multi-User PPDU), mais pas pour le SU PPDU (Single-User PPDU). Cette limitation contraint le SU PPDU à transmettre sur toute la largeur de bande contiguë disponible. L'EHT envisage d'étendre le mécanisme de perforation au SU PPDU pour :
  - **Optimiser l'utilisation du spectre** : Permettre des transmissions plus flexibles et plus efficaces.
  - **Améliorer l'efficacité pour les transmissions multi-utilisateurs** : En réduisant les interférences et en optimisant les ressources [8].

#### 1.2.4.5 Modification du préambule PHY et compatibilité descendante dans la norme 802.11be

Pour prendre en charge toutes les nouvelles fonctionnalités de PHY, 11be doit modifier les formats de trame. De nombreuses modifications sont liées au préambule PHY des trames (voir Fig 1.4 ) Pour la rétrocompatibilité, dans les bandes 5 GHz et 6 GHz, toutes les trames Wi-Fi commencent avec l'héritage du préambule de 11a.

Le préambule de l'héritage contient un domaine d'entraînement court et un long domaine d'entraînement utilisé pour la détection de trame et la synchronisation du récepteur.

Le symbole OFDM suivant porte le champ de signal hérité (L-SIG) qui indique quel MCS est utilisé pour le signal suivant et quelle est la longueur de trame. Le Wi-Fi n'a pas de moyen explicite d'indiquer la ver-

sion du protocole PHY. Dans toutes les versions Wi-Fi au-delà de 11n, la longueur MCS et la longueur de trame indiquées dans L-SIG sont fausses, mais les appareils existants peuvent calculer la durée de la trame. Ils considèrent donc le canal comme occupé lorsque le cadre est en l'air. Les valeurs réelles de MCS, de taille de trame et d'autres paramètres sont transmises dans les symboles suivants selon une version particulière [3].

La figure 1.3 représente le format détaillé de la trame EHT.

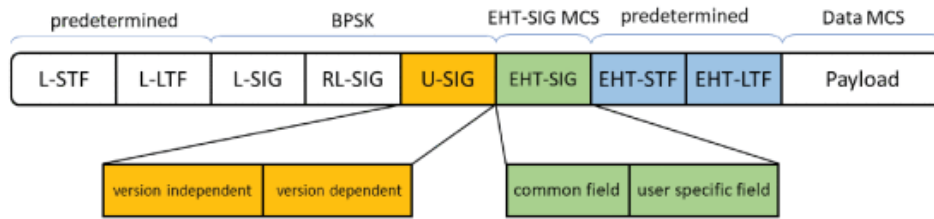


FIGURE 1.3 – Le format de la trame EHT

Pour différencier les formats de trame, les normes 11n, 11ac et 11ax modifient la modulation du symbole OFDM suivant L-SIG, ainsi que le contenu de L-SIG (voir la figure 1.4). Plus précisément, dans la norme 11n, L-SIG est suivi d'un champ HT-SIG composé de deux symboles OFDM modulés en BPSK avec une rotation de 90 degrés (QBPSK). Comme le QBPSK n'était pas utilisé dans les versions Wi-Fi précédentes, la réception de tels symboles permet à un appareil d'identifier une trame conforme à l'amendement 11n.

La norme 11ac, quant à elle, introduit deux symboles VHT-SIG-A après L-SIG : le premier est modulé en BPSK, tandis que le second utilise QBPSK. De plus, la longueur indiquée dans L-SIG est un multiple de trois. Concernant la norme 11ax, celle-ci commence par une répétition de L-SIG, où la longueur est définie comme égale à un ou deux modulo trois. Ensuite, son champ de signal à haute efficacité (HE) comprend deux symboles OFDM : le premier est modulé en QBPSK et le second en BPSK ou QBPSK [3].

Avec l'introduction de la norme 802.11be, ces mécanismes d'identification des trames sont encore optimisés pour garantir une compatibilité descendante tout en intégrant de nouvelles fonctionnalités. Wi-Fi 7 apporte des modifications avancées au préambule PHY afin d'améliorer la signalisation et la gestion des ressources spectrales, une modulation plus dense (4096-QAM) et exploitation élargie des canaux de 320 MHz nécessitent des ajustements dans le format des trames pour optimiser l'efficacité spectrale et réduire la latence.

Ainsi, la norme 802.11be continue l'évolution amorcée par ses prédécesseurs en renforçant la robustesse des transmissions tout en garantissant une meilleure flexibilité des réseaux sans fil.[3].

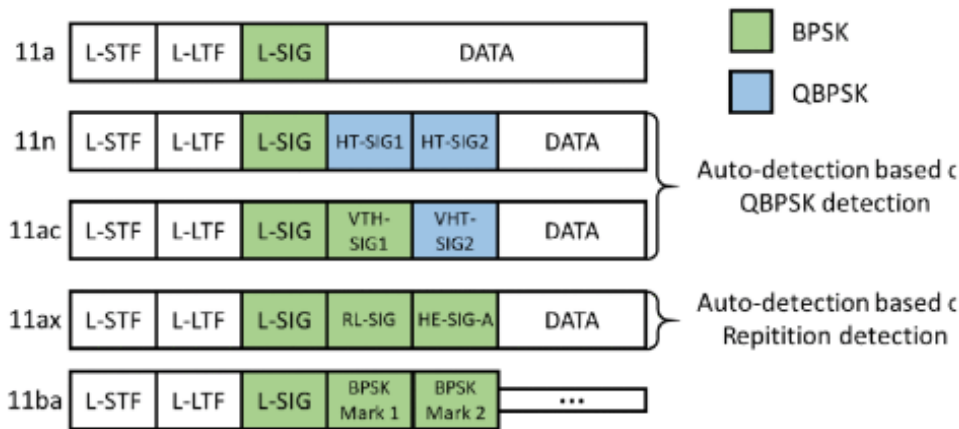


FIGURE 1.4 – Détection automatique du préambule pour les trames héritées

## 1.2.5 Amélioration de la couche MAC pour Wi-Fi 7

Dans le cadre de la norme EHT, plusieurs améliorations ont été apportées à la couche MAC afin d'optimiser la gestion des ressources spectrales, d'accroître l'efficacité des transmissions et de répondre aux exigences croissantes des nouvelles applications, notamment en matière de débit, de latence et de densité de connexions. Ces améliorations s'articulent autour des axes suivants :

### 1.2.5.1 Fonctionnement MLO sur une bande passante élargie

Les réseaux Wi-Fi existants, comme la norme IEEE 802.11ax, utilisent principalement les bandes de fréquences sans licence de 2,4 GHz et 5 GHz. Cependant, ces bandes sont limitées et fortement encombrées, ce qui dégrade la qualité de service, en particulier pour les nouvelles applications comme la VR et AR.

Pour atteindre un débit d'au moins 30 Gbps, la technologie EHT élargit la bande passante en combinant plusieurs bandes : 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz. Grâce à cette agrégation multibande, la bande passante totale peut atteindre jusqu'à 320 MHz.

Cependant, cette agrégation pose plusieurs défis techniques. Il faut gérer la sélectivité des canaux (car la bande combinée est plus large et parfois non continue), s'adapter aux différents modes de fonctionnement multibande et garantir la compatibilité avec les appareils Wi-Fi existants fonctionnant sur ces bandes.

Dans les anciens mécanismes multibandes (comme le transfert rapide de session), une limitation existait : les données appartenant à un même flux de trafic (TID) devaient passer par une seule bande. Cela entraînait une surcharge importante au niveau de la couche MAC lors des changements de bande.

Pour améliorer la flexibilité de la transmission et réduire cette surcharge MAC, EHT propose de modifier ce fonctionnement. Désormais, un appareil (STA) pourrait transmettre des données du même flux (ou de flux différents) sur plusieurs bandes, soit en même temps, soit de manière décalée. Cette approche, appelée « multi-liaison » (multi-link) dans EHT, remplace le terme traditionnel de « multi-bande » [8].

**Le MLO comprend principalement deux modes :**

— **Le mode STR (transmission et réception simultanées)**

Le mode STR fait référence au mode émetteur-récepteur simultané ou au mode asynchrone. Autrement dit, deux liens ou plus fonctionnent de manière totalement indépendante et n'interfèrent pas les uns avec les autres [9].

La figure 1.5 montre le fonctionnement de MLO dans un environnement Wi-Fi 7, mettant en évidence la transmission et la réception simultanées de données sur différents liens.

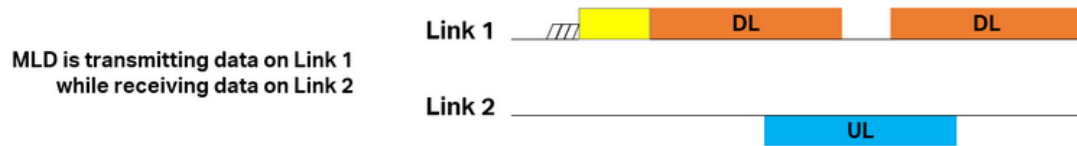


FIGURE 1.5 – Illustration du mode STR dans MLO

#### — Le mode NSTR (transmission et réception non simultanées)

Le mode NSTR (Non-Simultaneous Transmit and Receive) désigne un mode de fonctionnement synchrone dans lequel l'émission et la réception ne peuvent pas avoir lieu simultanément. À un instant donné, tous les liens sont soit en réception, soit en transmission, mais ne peuvent pas effectuer les deux opérations en même temps. [9].

Figure 1.6 représente le mode NSTR qui transmet simultanément des données en DL sur les deux liens. À droite, MLD reçoit simultanément des données en UL sur les deux liens.



FIGURE 1.6 – Illustration du mode NSTR dans MLO

En plus des modes STR et NSTR, d'autres modes MLO existent pour répondre aux divers scénarios d'application du Wi-Fi 7, tels que Mesh et EasyMesh. Dans ces configurations, plusieurs liaisons peuvent être établies entre des circuits intégrés (IC) radio distincts situés aux deux extrémités de la connexion AP-STA.

#### 1.2.5.2 Augmentation des flux spatiaux et améliorations MIMO (Multiple-input multiple-output)

Avec l'augmentation continue du nombre d'appareils Wi-Fi, les points d'accès ont progressivement ajouté plus d'antennes et amélioré leurs capacités de transmission simultanée (multiplexage spatial).

Dans la norme actuelle IEEE 802.11ax, un point d'accès équipé de 8 antennes peut transmettre ou recevoir en même temps avec jusqu'à 8 utilisateurs grâce à la technologie MU-MIMO, aussi bien en liaison montante qu'en liaison descendante.

Pour EHT, cette capacité est encore étendue avec un maximum de 16 flux spatiaux, permettant une capacité réseau encore plus élevée. Cependant, gérer autant de flux nécessite de collecter davantage d'informations sur l'état du canal (CSI), ce qui alourdit considérablement la signalisation.

Si EHT utilise la même méthode de sondage de canal que celle de 802.11ax, la surcharge liée à la rétroaction CSI deviendrait trop importante. [8].

### 1.2.5.3 Coopération de plusieurs points d'accès

Dans la norme IEEE 802.11ax, chaque point d'accès fonctionne de manière indépendante, sans coordination directe avec les points d'accès voisins. Cela limite fortement la gestion flexible des ressources en temps, fréquence et espace.

Pour améliorer cette situation, EHT introduit la possibilité de partager des données et des informations de contrôle entre plusieurs points d'accès, via des liaisons filaires ou sans fil. Cette coordination permet une meilleure utilisation du spectre, une augmentation du débit maximal et une réduction de la latence [8]. Les systèmes multi-AP envisagés sont présentés ci-dessous, en commençant par ceux dont la mise en œuvre est la plus simple.

**Réutilisation géographique coordonnée (RSE) :** est une approche avancée introduite dans WiFi 7 pour améliorer la gestion des interférences dans les environnements multi-AP. Elle vise à optimiser la réutilisation spectrale en permettant aux APs de coordonner leurs transmissions afin de minimiser les interférences entre les BSS (Basic Service Sets).

Contrairement à la réutilisation spatiale (SR) de 802.11ax, où un AP peut transmettre à pleine puissance tandis que les autres réduisent leur puissance TX de manière indépendante, la RSE repose sur une coordination inter-AP plus fine. Grâce à cette approche, les APs ajustent dynamiquement leur puissance de transmission et utilisent des mécanismes de filtrage spatial avancés pour maximiser le rapport signal sur bruit et interférence (SINR) de chaque STA [3].

La figure 1.7 illustre deux approches de gestion des interférences dans un réseau Wi-Fi multi-AP.

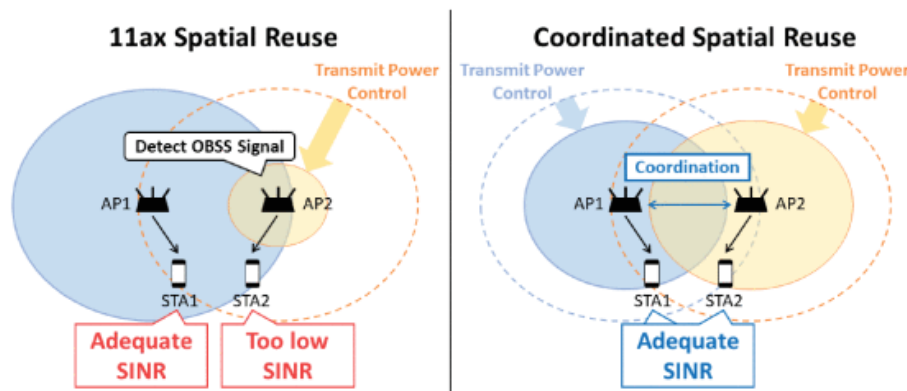


FIGURE 1.7 – Comparaison entre la réutilisation spatiale 11ax et la réutilisation spatiale coordonnée

**OFDMA coordonné (Co-OFDMA) :** Permet aux points d'accès de synchroniser leurs allocations de ressources en fonction du temps et des fréquences. Grâce à cette coordination, les APs proches peuvent attribuer les mêmes RUs à certaines stations lorsque cela n'entraîne pas d'interférences, ou assigner des RUs distinctes pour minimiser les perturbations. Les simulations préliminaires indiquent que la Co-OFDMA est particulièrement efficace dans les environnements à densité moyenne ou élevée d'AP [3].

**Transmission conjointe et réception :** Cette méthode permet à plusieurs points d'accès de desservir une même STA en mettant en place un système MU-MIMO distribué et dynamique. Ce système fonctionne de manière coordonnée entre plusieurs points d'accès. Dans le cas du DL, les tests expérimentaux ont démontré que l'émission et la réception conjointes offrent les meilleurs gains de performance parmi les systèmes multi-AP coordonnés. Cependant, cette approche est particulièrement complexe et impose des exigences strictes, telles qu'une liaison filaire à haut débit et une synchronisation précise entre les APs[3].

## 1.3 Intégration du Wi-Fi 7 dans l’IoT Medical (IoMT)

### 1.3.1 Introduction à l’Internet des objets (IoT)

L’**Internet des objets** désigne un réseau d’objets physiques interconnectés via Internet, équipés de capteurs, de logiciels et d’autres technologies. Ces dispositifs « intelligents » sont capables de collecter, d’analyser et d’échanger des données, favorisant ainsi l’automatisation et l’optimisation des processus.

L’IoT ne se limite pas aux **ordinateurs** et aux **smartphones** ; il englobe une large gamme d’appareils du quotidien, tels que les équipements électroménagers, les véhicules connectés et même les vêtements intelligents. Grâce à cette interconnexion, il est possible d’assurer une surveillance à distance, d’améliorer le contrôle des systèmes et d’exploiter les données recueillies pour renforcer l’efficacité et l’innovation.

L’Internet des objets joue un rôle clé dans divers domaines, allant des **maisons intelligentes** aux **systèmes de santé**, en passant par l’**industrie manufacturière**, les transports et bien d’autres secteurs. Son développement rapide transforme profondément notre quotidien et ouvre la voie à de nouvelles avancées technologiques [10].

#### 1.3.1.1 Calendrier historique de l’Internet des objets

L’Internet des objets est aujourd’hui omniprésent, mais son concept remonte à plusieurs décennies. Dès les années 1980, des discussions sur l’interconnexion des objets émergeaient, et certaines idées précurseures datent même d’encore plus tôt. Voici les grandes étapes de son évolution :

- **L’émergence du protocole TCP/IP** : En 1974, **Robert E. Kahn** et **Vinton Cerf** ont conçu le **protocole Internet (IP)** et le **protocole de contrôle de transmission (TCP)**. L’IP garantit que les données transitent d’un point à un autre sans être perdues, tandis que le TCP assure leur réassemblage pour reconstituer le message d’origine [10].
- **La naissance du premier objet connecté** : En 1990, **John Romkey** a mis au point un grille-pain contrôlable via Internet. Présenté à la conférence **INTEROP** d’octobre 1989, il marque le premier exemple d’un appareil physique connecté au réseau [10].
- **La première page Web voit le jour** : En 1991, **Tim Berners-Lee** a développé la toute première page Web, accessible à l’adresse **info.cern.ch**. Hébergée sur un ordinateur **NeXT** au **CERN**, cette avancée a jeté les bases du **World Wide Web** tel que nous le connaissons aujourd’hui [10].
- **L’IoT reçoit son nom officiel** : C’est en 1999 que **Kevin Ashton** a introduit le terme « **Internet des objets** » lors d’une présentation pour **Procter & Gamble**. Il y décrivait un monde où des capteurs et des logiciels permettraient aux objets de collecter et d’échanger des informations [10].
- **L’IoT entre dans le dictionnaire** : Bien que le concept d’IoT existât depuis plus d’une décennie, ce n’est qu’en **2013** que le terme « **Internet des objets** » a été officiellement ajouté au dictionnaire **d’Oxford**. Des experts comme **Helen Duce** ont contribué à cette reconnaissance [10]. Elle déclarait alors : « Nous avons une vision claire : créer un monde où chaque objet, des avions aux aiguilles à coudre, est connecté à Internet. »
- **Plus de 20 milliards d’appareils connectés** : En 2020, le nombre d’appareils IoT a dépassé les **20 milliards**, une croissance qui ne cesse d’accélérer. L’essor de l’IoT est principalement alimenté par les entreprises qui intègrent la **connectivité Internet** dans leurs produits et services. Désormais, un ap-

pareil électronique semble presque obsolète s'il ne propose pas au moins une connexion à Internet [10].

La figure 1.8 illustre de manière succincte l'évolution historique de l'IoT, de 1974 à 2020.

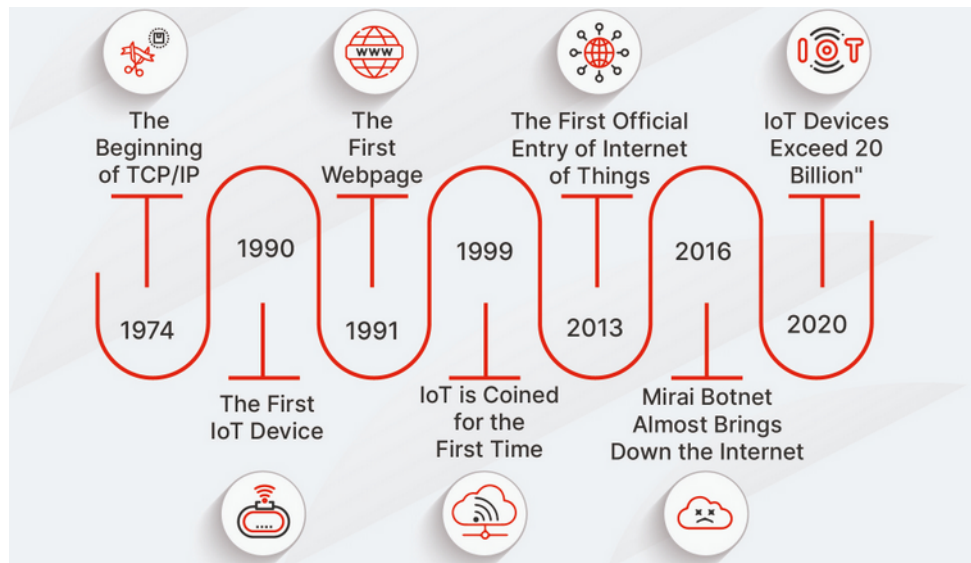


FIGURE 1.8 – Historique de l'Internet des objets (IoT)

### 1.3.1.2 Le fonctionnement de l'IoT

Les dispositifs IoT sont équipés de capteurs et de logiciels qui leur permettent de collecter des données. Ces données sont ensuite envoyées à un serveur ou à un cloud pour être analysées, permettant ainsi une action ou une réponse automatique de l'appareil.

**Les capteurs** sont des dispositifs qui mesurent une ou plusieurs variables physiques de l'environnement et envoient les données à un réseau ou à une plateforme IoT pour une utilisation ultérieure. Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, telles que la surveillance environnementale, la sécurité, la santé, l'agriculture, la logistique, les bâtiments, etc. Ils permettent de collecter des données précises et en temps réel pour améliorer l'efficacité et la précision de nombreuses opérations. Ils fonctionnent en mesurant une variable physique de l'environnement, telle que la température, la pression, l'humidité, la lumière, le mouvement, etc. Ces mesures sont converties en données numériques et envoyées à un réseau ou à une plateforme IoT pour être traitées [11].

Finalement le fonctionnement d'un dispositif IoT peut ainsi être résumé en 4 étapes :

- **L'acquisition des données** : Cette étape repose sur l'utilisation de capteurs intégrés aux appareils connectés pour collecter des informations sur leur environnement ou leur état de fonctionnement. Ces capteurs peuvent mesurer divers paramètres, allant d'une simple température à une pression exercée sur un moteur. Les données ainsi obtenues sont ensuite converties en signaux numériques, filtrées pour éliminer les erreurs, puis préparées pour la transmission ou le stockage local [12].
- **La transmission des données** : Une fois collectées, les données doivent être envoyées vers un système de stockage ou de traitement. Cette transmission peut s'effectuer via différents réseaux de communication (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, NB-IoT, 5G, etc.), en fonction des besoins et de l'infrastructure disponible. Dans la majorité des cas, les données sont envoyées vers une plateforme cloud (publique ou privée) pour un accès distant et un traitement avancé. Cependant, elles peuvent aussi être stockées

et analysées localement sur un serveur ou un edge device pour un traitement en temps réel et une réduction de la latence. [12].

- **Le traitement des données :** À cette étape, les informations reçues sont traitées par des logiciels spécialisés afin d’extraire des données exploitables. Ce traitement peut inclure des algorithmes d’analyse, des systèmes d’intelligence artificielle ou des modèles prédictifs. Selon les résultats obtenus, des actions peuvent être déclenchées automatiquement, comme l’émission d’alertes en cas d’anomalie, l’ajustement d’un paramètre de fonctionnement ou l’activation d’un mécanisme de sécurité pour prévenir un dysfonctionnement [ [12].
- **L’analyse des données :** les données accumulées provenant de tous les dispositifs d’un réseau IoT sont analysées pour générer des perspectives approfondies, facilitant ainsi des prises de décisions éclairées et fiables pour optimiser le fonctionnement du système ou encore faciliter le travail des ingénieurs pour de futures innovations [12].

### 1.3.2 L’IoT dans divers contextes de soins de santé

L’Internet des objets révolutionne le domaine des soins de santé en intégrant des technologies intelligentes qui transforment la prise en charge des patients, optimisent la gestion des infrastructures et renforcent l’accessibilité aux soins. Grâce à des capteurs avancés, des dispositifs portables et des réseaux de communication sécurisés, l’IoT permet une surveillance continue et en temps réel, garantissant une détection précoce des anomalies et une intervention rapide. Dans les hôpitaux, il améliore la localisation des patients et du personnel, réduit les délais d’intervention et assure une gestion efficace des équipements médicaux. En dehors des établissements de santé, il facilite la télésurveillance, permettant aux patients de suivre leurs paramètres vitaux à distance et aux professionnels d’adapter les traitements en conséquence. Par ailleurs, les villes intelligentes exploitent ces innovations pour promouvoir la santé publique à travers des services de télémédecine et des infrastructures connectées. Ainsi, l’IoT s’impose comme un pilier essentiel d’un système de santé plus intelligent, réactif et accessible [13].

Dans le domaine des soins de santé, l’IoT se décline en plusieurs applications adaptées aux environnements intérieurs, extérieurs et à la surveillance à distance, contribuant ainsi à une prise en charge plus efficace et connectée des patients.

#### 1.3.2.1 Environnements de soins de santé intérieurs

L’IoT joue un rôle clé dans les hôpitaux en permettant la surveillance des patients, la gestion des équipements médicaux et le suivi des stocks. L’IoT facilite également le suivi de la localisation des patients et du personnel via des appareils portables et des solutions basées sur des smartphones, améliorant la navigation et réduisant les délais d’intervention. Par exemple, des architectures comme le CNN-LSTM et des capteurs infrarouges passifs (PIR) sont utilisées pour estimer la localisation intérieure et analyser les déplacements dans les espaces fermés [13].

Les réseaux de capteurs aident aussi à surveiller l’emplacement et l’état des équipements médicaux, réduisant les coûts liés aux pertes et à la maintenance.

En plus, l’IoT permet de maintenir un environnement sain et économe en énergie grâce à des capteurs qui surveillent la température, l’humidité et l’occupation des espaces. Un système de communication par lumière visible (VLC) assure la collecte fiable des données.

Enfin, l'IoT renforce la sécurité avec des systèmes de surveillance, de contrôle d'accès et d'appel d'urgence, garantissant une réponse rapide aux incidents et une meilleure protection pour les patients et le personnel.

### 1.3.2.2 Environnements de soins de santé extérieurs

Dans les espaces extérieurs comme les parcs ou les centres de transport, les installations compatibles IoT facilitent l'accès aux soins. Les kiosques interactifs fournissent des informations en temps réel sur les établissements de santé à proximité et offrent une assistance rapide en cas d'urgence.

À l'avenir, des stations de fitness intelligentes pourraient surveiller l'activité des utilisateurs, offrir des recommandations personnalisées et suivre des paramètres de santé essentiels.

Ainsi, les environnements de soins extérieurs évoluent vers des écosystèmes intelligents qui rendent les soins de santé plus accessibles et adaptés aux besoins des individus [13].

### 1.3.2.3 Surveillance à distance des patients

L'IoT permet une surveillance continue des patients en dehors des établissements de santé. Grâce à des dispositifs portables et des capteurs, les prestataires peuvent détecter précocement des changements dans l'état de santé et intervenir rapidement [13].

Le RPM (Remote Patient Monitoring) améliore l'accès aux soins pour les populations éloignées ou à mobilité réduite, réduisant ainsi la nécessité de déplacements fréquents. Les patients peuvent suivre leurs signes vitaux (fréquence cardiaque, tension, glycémie) via des dispositifs connectés, et les données sont transmises en toute sécurité aux professionnels de santé pour analyse [13].

Cette approche proactive améliore la prise en charge des maladies chroniques, réduit les complications et limite les réadmissions hospitalières, contribuant ainsi à une meilleure qualité de vie pour les patients.

La figure 1.9 illustre les interactions entre différents éléments du domaine médical via un réseau numérique centralisé (symbolisé par un nuage). Ce schéma met en évidence la connectivité entre ces éléments pour un suivi en temps réel, une meilleure coordination des soins et une amélioration de la gestion des dossiers médicaux.

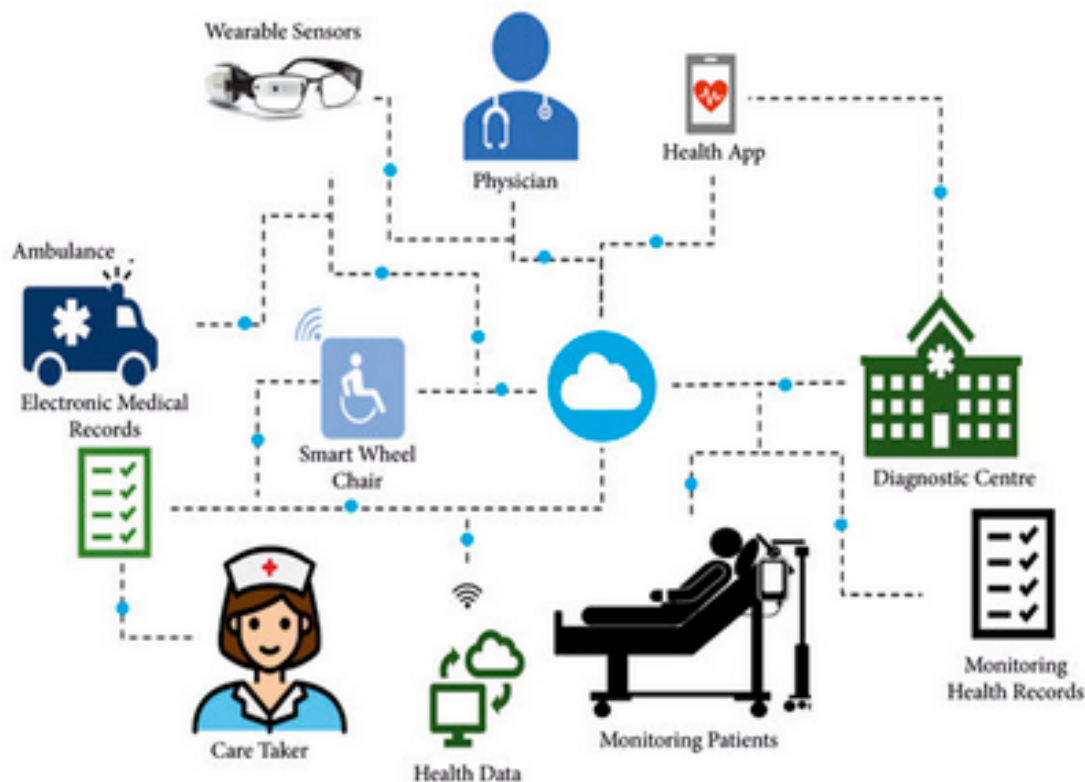


FIGURE 1.9 – Santé connectée : l’IoT pour un suivi médical à distance

### 1.3.2.4 Villes intelligentes

Les villes intelligentes utilisent l’IoT pour surveiller l’environnement et prévenir les risques sanitaires. Les citoyens bénéficient de la télémédecine et d’appareils de santé connectés. Les gouvernements investissent dans l’infrastructure numérique et la sécurité des données. Ils encouragent la collaboration entre acteurs de la santé et entreprises technologiques. Ces avancées rendent les soins plus accessibles, personnalisés et réactifs.

Ces efforts créent des environnements urbains où les soins sont plus accessibles, personnalisés et réactifs, améliorant ainsi le bien-être général de la population [13].

### 1.3.3 Avantages du Wi-Fi 7 pour les dispositifs médicaux intelligents

Le Wi-Fi 7 apporte des améliorations significatives en termes de vitesse, stabilité, latence et gestion des connexions multiples, répondant parfaitement aux besoins des environnements médicaux modernes et permettant d’optimiser les soins aux patients tout en réduisant les risques d’interruption des services critiques. Ces progrès se traduisent par plusieurs avantages clés, notamment ;

- **Débits plus élevés pour une transmission rapide des données :** Le Wi-Fi 7 promet d’atteindre des vitesses allant jusqu’à 40 Gbps, soit près de quatre fois plus rapides que celles offertes par le Wi-Fi 6 (9,6 Gbps). Cette amélioration considérable facilitera le transfert rapide de données médicales volumineuses comme les images haute résolution de radiologie, les scanners 3D et les dossiers médicaux électroniques. Une telle vitesse permettra également de soutenir sans interruption des applications critiques telles que la télémédecine en 8K et les consultations vidéo HD [14].
- **Gestion optimisée de la bande passante :** L’intégration de la bande de fréquence des 6 GHz (en plus des bandes 2,4 GHz et 5 GHz) permet une gestion plus efficace de la bande passante. Cette capacité accrue à gérer un plus grand nombre de canaux réduit significativement les risques de congestion réseau,

garantissant ainsi une connexion plus stable et fiable. Pour les hôpitaux et les cliniques, cela signifie que des dizaines d'appareils médicaux connectés pourront fonctionner simultanément sans perte de performance, même dans des environnements denses en dispositifs connectés [14].

- **La latence ultra-faible du Wi-Fi 7**, qui pourrait descendre en dessous de 2 millisecondes, est cruciale pour les applications médicales en temps réel. Par exemple, lors d'une chirurgie assistée par robot, une latence réduite permet des réactions instantanées entre le chirurgien et le robot opérateur, minimisant les risques liés aux délais. De même, le monitoring des patients en temps réel, comme la surveillance cardiaque ou respiratoire, bénéficiera de cette réduction drastique de la latence [14].
- **Technologies avancées pour une connectivité optimisée** : Le Wi-Fi 7 intègre également des technologies avancées telles que **le MU-MIMO** et **le QAM 4096**. Le MU-MIMO permet de transmettre des données à plusieurs appareils simultanément sans dégradation de la vitesse, optimisant ainsi les flux de travail dans les hôpitaux où chaque médecin, infirmier et équipement connecté nécessite une bande passante dédiée. De son côté, le QAM 4096 offre une capacité de modulation supérieure par rapport au QAM 1024 du Wi-Fi 6, augmentant la quantité de données transmises par signal et améliorant la qualité globale du réseau [14].

## 1.4 Conclusion

L'évolution du Wi-Fi 7 représente une avancée technologique majeure qui répond aux exigences croissantes des applications médicales modernes et de l'IoT dans le domaine de la santé. Grâce à des améliorations significatives en matière de débit, de latence et de fiabilité, cette nouvelle génération de connectivité sans fil permet une transmission rapide et sécurisée des données critiques, essentielle pour les établissements de santé.

Le Wi-Fi 7 se distingue par des innovations telles que le MLO, qui optimise l'utilisation simultanée des bandes de fréquences 2,4 GHz, 5 GHz et 6 GHz, réduisant ainsi la congestion et améliorant la stabilité des connexions. De plus, sa latence extrêmement faible, inférieure à 5 millisecondes, en fait la technologie idéale pour les applications médicales sensibles, comme la télémédecine, la chirurgie assistée par robot et la surveillance à distance des patients.

Dans le domaine de l'IoT, le Wi-Fi 7 offre des débits pouvant atteindre 46 Gbps, garantissant une transmission fluide des données issues des capteurs biométriques, des dispositifs de monitoring à distance et des équipements hospitaliers connectés. Il permet également une interopérabilité améliorée entre les dispositifs médicaux intelligents, assurant une meilleure coordination des soins et une prise en charge plus efficace des patients.

En intégrant ces avancées dans les infrastructures de santé, le Wi-Fi 7 contribue à la création d'hôpitaux intelligents, où les professionnels de santé peuvent accéder en temps réel aux informations critiques, améliorer la réactivité des soins et optimiser la gestion des ressources médicales. De plus, la sécurité renforcée avec le protocole WPA3 garantit une protection accrue contre les cyberattaques, un enjeu essentiel dans un contexte où la confidentialité des données de santé est primordiale.

En conclusion, le Wi-Fi 7 s'impose comme la meilleure solution pour les applications médicales modernes et la surveillance à distance des patients. Sa combinaison unique de débit élevé, faible latence, fiabilité et sécurité en fait un élément clé pour soutenir l'expansion de l'IoT médical et l'amélioration des soins de santé à l'échelle mondiale. Son adoption permettra d'accélérer la transition vers un environnement médical plus connecté, intelligent et réactif, garantissant ainsi un suivi patient optimisé et une meilleure qualité des soins.

Dans le chapitre suivant, nous explorerons les mécanismes d'accès multiple en montée (Uplink), l'étude de l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) et du protocole UORA (Uplink OFDMA Random Access), ensuite étudier et analyser les solutions existantes, en tirant leurs avantages et inconvénients.

# Chapitre2: État de l'art sur les communications OFDMA-UL

## 2.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude de l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), une des avancées majeures introduites dans la norme IEEE 802.11ax pour permettre l'accès multiple efficace au canal, en particulier dans les scénarios à forte densité des stations, tels que les environnements urbains, les campus ou les espaces publics. Ce mécanisme divise le spectre en plusieurs RUs, permettant à plusieurs stations de transmettre simultanément sur des sous-canaux orthogonaux, réduisant ainsi les interférences et les temps d'attente.

Nous nous focalisons sur son application en transmission montante à travers le mécanisme UORA, qui permet aux stations de tenter un accès au canal sans coordination préalable avec le point d'accès, à l'aide d'un processus de contention distribué. Ce processus repose sur deux éléments essentiels : la fenêtre de contention OFDMA (OCW), qui définit la plage dans laquelle une valeur aléatoire OBO (OFDMA Backoff), choisie, décrémente à chaque occasion de transmission. Lorsque l'OBO atteint zéro, la station est autorisée à transmettre, à condition qu'une RU libre soit disponible. Ce fonctionnement permet une certaine souplesse mais introduit également de nouveaux défis.

Dans un second temps, nous analysons les limites de ce mécanisme en termes de collisions entre stations candidates, de sous-utilisation des ressources disponibles (RUs non utilisées), et d'inefficacité dans l'allocation dynamique des RU, surtout lorsque le trafic est irrégulier ou que la densité du réseau évolue rapidement. Ces problématiques peuvent engendrer une baisse du débit global, une augmentation de la latence et une dégradation de l'équité entre utilisateurs.

Pour répondre à ces problèmes, plusieurs solutions sont explorées, notamment des stratégies d'adaptation dynamique de l'OCW et de gestion intelligente de l'OBO, capables de réagir aux conditions du canal et au comportement des stations. Plus précisément, nous implémentons et évaluons différents algorithmes d'amélioration qu'elles soient centralisées (E-OBO,  $\alpha$ \_UORA) ou distribuées (OBO\_CTRL, CODOBO\_CTRL). Ces méthodes présentent chacune des compromis spécifiques, notamment en termes de performances atteignables, de complexité algorithmique, et de capacité à s'adapter dynamiquement aux variations du trafic et à la densité du réseau.

Enfin, une discussion critique est menée pour comparer ces approches, analyser leurs performances respectives dans divers scénarios de charge et de densité, et identifier les pistes d'amélioration les plus prometteuses pour un accès aléatoire plus efficace, plus équitable et mieux adapté aux réseaux de nouvelle génération.

## 2.2 Communication OFDMA-UL dans le Wi-Fi 7 pour les applications médicales.

### 2.2.1 OFDMA dans le Wi-Fi 7

#### 2.2.1.1 Généralités

L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est l'une des technologies importantes qui joue un rôle clé dans les performances multi-utilisateurs des réseaux sans fil, et en particulier pour le Wi-Fi 6 et Wi-Fi 7. Bien que l'OFDMA ait été introduit dans le Wi-Fi 6, son extension à des bandes de fréquences plus élevées, ainsi que sa gestion améliorée des ressources, en font un composant encore plus tactique pour le Wi-Fi 7.

L'OFDMA est une extension de l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) qui permet de diviser un canal de communication en plusieurs RUs, où chaque RU est constituée de sous-porteuses orthogonales. Contrairement à l'OFDM traditionnel où une seule station occupe l'intégralité du canal, l'OFDMA permet à plusieurs stations de coexister et de transmettre simultanément sur différentes bandes. Ainsi, un cycle de transmission peut fournir des données à de nombreux utilisateurs simultanément et ainsi améliorer au maximum l'efficacité spectrale [15].

Dans le cas de l'OFDMA, un seul canal de 20 MHz est divisé en 256 sous-porteuses qui peuvent être regroupées en unités de ressources (RUs) [16]. Les RUs sont de différentes tailles et comprennent :

- 26 RU (26 sous - porteuses).
- 52 RU (52 sous-porteuses).
- 106 RU (106 sous - porteuses).
- 242 RU (242 sous - porteuses).

Le nombre de RU disponibles varie en fonction de leur taille. Par exemple, un canal de 20 MHz peut contenir entre 9 RU de type 26 ou une seule RU de type 242. Une seule RU est attribuée à un seul utilisateur, ce qui permet d'éviter les interférences et de garantir des transmissions efficaces et sans interférences. Il est possible de servir jusqu'à 9 utilisateurs simultanément dans un seul canal de 20 MHz grâce à cette architecture. Dans le Wi-Fi 7, plusieurs améliorations rendent cette technologie possible. Le Wi-Fi 7 prend en charge des canaux plus larges ( jusqu'à 320 MHz ), ce qui permet d'augmenter la capacité du réseau. De plus, le Wi-Fi 7 introduit le MLO, qui permet à un appareil de se connecter simultanément à plusieurs canaux, augmentant ainsi la vitesse et la stabilité des connexions. Cette fonctionnalité est particulièrement utile dans les environnements à haute densité, où de nombreux appareils doivent être connectés simultanément [16].

De plus, le Wi-Fi 7 améliore la coordination des communications montantes et descendantes, permettant un contrôle plus efficace des flux de données dans des scénarios complexes. Une gestion plus sophistiquée de l'OFDMA est nécessaire pour répondre aux besoins des applications modernes, comme l'IoT dans le secteur de la santé, où une faible latence et une fiabilité sont essentielles. La capacité à gérer dynamiquement les ressources, tout en maintenant une faible latence et un débit élevé, est cruciale pour ces applications, qui nécessitent une communication constante et fluide entre un grand nombre d'appareils [17].

Finalement, l'OFDMA est une technologie essentielle à l'évolution des réseaux sans fil, en particulier avec le Wi-Fi 7. Cette technique prend en charge l'allocation dynamique et simultanée des ressources, ce qui améliore considérablement les performances des réseaux multi-utilisateurs. Grâce aux nouvelles fonctionnalités offertes par le Wi-Fi 7, comme l'extension de la bande passante et la gestion multi-liens améliorée, cette

technologie est encore plus performante, répondre aux besoins des applications contemporaines à fort trafic, en particulier dans les scénarios IoT avancés.

La figure 2.1 montre comment l'OFDM alloue toutes les sous-porteuses à un seul utilisateur à la fois, tandis qu'OFDMA les divise entre plusieurs utilisateurs simultanément.

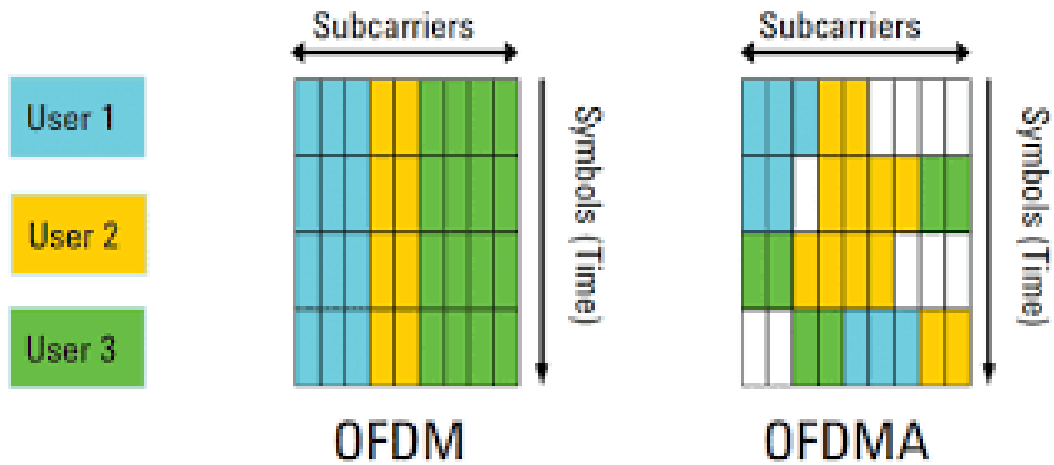


FIGURE 2.1 – Comparaison entre OFDM et OFDMA dans la répartition des ressources entre utilisateurs

### 2.2.1.2 Phases de communication

Le fonctionnement d'un réseau Wi-Fi OFDMA repose sur une structure temporelle ouverte appelée cycle OFDMA. Ce cycle permet de synchroniser la communication entre le AP et les STAs, tout en garantissant une efficacité spectrale optimale et une bonne coordination de l'accès aux canaux radio [16].

Comme illustré dans la Figure 2.2 Un cycle OFDMA se compose de deux phases principales :

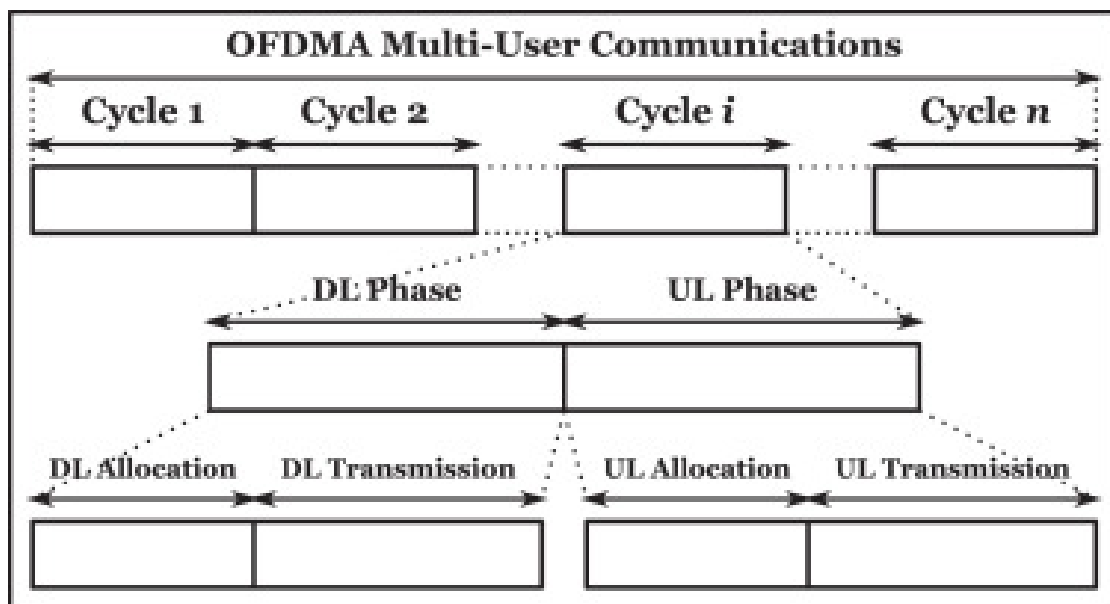


FIGURE 2.2 – Structure des cycles en OFDMA

### 2.2.1.3 Phase Downlink (DL)

Au cours de cette étape, l'AP envoie des données à plusieurs STAs simultanément en attribuant à chacune des RUs différentes. Les attributions sont indiquées dans une trame de contrôle appelée Trigger Frame qui contient des informations concernant la bande passante utilisée, la puissance de transmission, le type de RU et l'identité des stations cibles [16].

En réponse à cette trame, chaque STA allouée à un RU écoute attentivement et se prépare à recevoir sa portion de données sur la fréquence dédiée. Cette parallélisation réduit le temps d'attente pour les stations et optimise le débit agrégé.

Dans un contexte médical, cette phase permet par exemple la transmission rapide de consignes de traitement ou de mises à jour vers des dispositifs connectés comme moniteurs d'activité ou implants intelligents.

### 2.2.1.4 Phase Uplink (UL)

La période de liaison montante permet à plusieurs STAs de transmettre simultanément à l'AP, une sur chaque RU disponible. Le point d'accès déclenche cette période à l'aide d'une trame de donnée (Trigger Frame) ou d'un BSRP (Buffer Status Report Poll). Cette dernière trame demande aux stations d'indiquer la quantité de données qu'elles souhaitent envoyer dans une trame BSR [16].

Si la STA reçoit une RU en retour, elle envoie ses données. Dans certains cas, comme pour les dispositifs en mode aléatoire le point d'accès alloue certaines RU comme RA-RU. Elles sont utilisées dans le mécanisme UORA, qui fournit un accès opportuniste sans planification préalable [17].

Pour les dispositifs médicaux, cette phase est importante pour transmettre des informations vitales (tension artérielle, température corporelle, saturation en oxygène, etc.) à un serveur central ou à une interface médicale en temps réel.

### 2.2.1.5 Étapes internes à chaque phase

Comme le montre **la Figure 2.2** Chacune des deux phases (DL et UL) se décompose en deux étapes successives :

#### Étape d'allocation :

- L'AP utilise une trame Trigger ou BSRP pour informer les STAs des RUs disponibles et attribuées.
- Ces trames contiennent les champs nécessaires à l'identification des STAs, à la description de la bande passante, de l'intervalle de garde, etc [16].

#### Étape de transmission :

- Une fois les ressources allouées, les STAs envoient ou reçoivent leurs données.
- Chaque flux est transporté de façon orthogonale et sans interférence grâce à l'indépendance des RUs.
- l'AP fournit un accusé de réception global sous la forme d'un BA (Block Acknowledgment) pour signifier que tous les flux ont été correctement reçus, comme montré sur la **figure 2.3**.

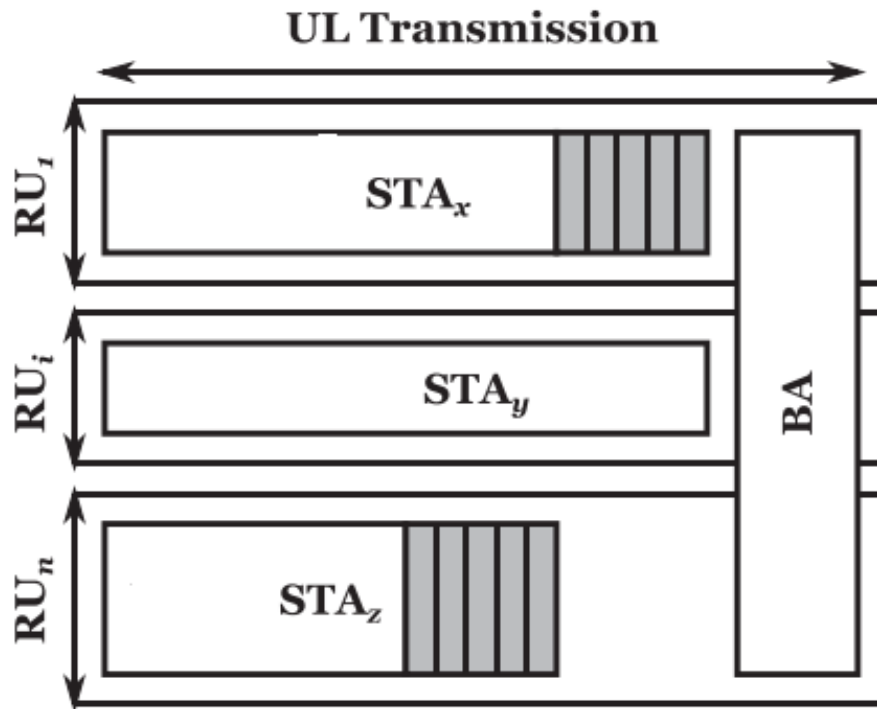


FIGURE 2.3 – Réception de BA

### 2.2.1.6 Principe des trames Trigger, BSRP et BSR

Afin de permettre la transmission simultanée de plusieurs flux de données en liaison descendante et montante sur un réseau Wi-Fi 7, la norme IEEE 802.11ax, dont la norme 802.11be est issue et améliorée, spécifie un ensemble de trames de contrôle essentielles à la gestion des ressources radio. Elles permettent au point d'accès de planifier, d'initier et de modifier les transmissions OFDMA en fonction de l'état du réseau, des capacités de la station et des exigences de QoS, notamment dans les scénarios où le temps est critique, comme les applications médicales.

#### La trame Trigger

Le Trigger est un composant clé du mécanisme d'attribution dynamique des ressources en OFDMA. Il est utilisé pour synchroniser les transmissions pour un groupe d'utilisateurs en définissant ceux autorisés à transmettre ou recevoir des données ainsi que leurs conditions associées. Sa configuration est composée d'un certain nombre de champs dont le champ **Common Info** est le plus important car il englobe les paramètres applicables à toutes les STAs participantes dans un cycle de transmission.

**La figure 2.4**, illustre les champs de la trame Trigger

- La largeur de bande utilisée (20, 40, 80, 160 ou 320 MHz).
- La puissance de transmission.
- L'intervalle de garde (GI).
- Le type de Trigger.
- D'autres paramètres de configuration PHY/MAC.

Ces éléments sont cruciaux pour garantir la synchronisation entre les STAs et assurer la cohérence temporelle nécessaire aux transmissions simultanées sur des RUs distinctes.

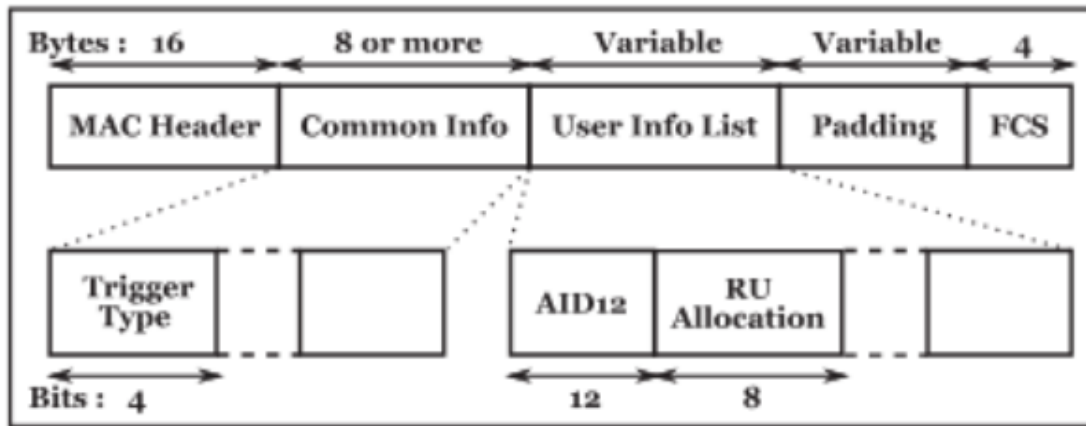


FIGURE 2.4 – Composition d'une trame Trigger dans OFDMA

### Les types de trames Trigger : BTF et BSRP

Le sous-champ Trigger Type de la trame permet de distinguer plusieurs variantes, dont les deux principales sont :

- **BTF (Basic Trigger Frame)** : est utilisée pour encadrer clairement les transmissions montantes. Elle contient une liste d'utilisateurs (User Info List) à qui des RUs précis sont attribués. Chaque entrée inclut un champ AID12 (identifiant de la STA) et RU Allocation, indiquant l'unité de ressource réservée à cette STA.
- **BSRP (Buffer Status Report Poll)** : est chargé d'interroger les STAs sur leur statut de file d'attente uplink. Elle ne planifie pas encore la transmission mais prépare l'AP à répartir les ressources dans un cycle suivant.

Cette différenciation permet à l'AP de basculer entre l'accès centralisé (via BTF) et l'accès adaptatif (via BSRP) en fonction des besoins du réseau et du degré d'urgence que demandent les transmissions attendues.

### La trame BSR (Buffer Status Report)

En réponse à une trame BSRP, toutes les STAs dont la file d'attente est non vide doivent envoyer une trame BSR, qui transmet des informations détaillées sur le trafic en attente. Cette trame contient plusieurs champs :

- **Queue Size All** : taille totale des données en attente de transmission.
- **Queue Size High** : taille de la plus grosse trame en attente.
- **Scaling Factor** : le facteur de mesure des données.

La figure 2.5 illustre le format d'une trame BSR. Cette trame est essentielle pour informer l'AP des données en attente dans les files d'attente des STAs.

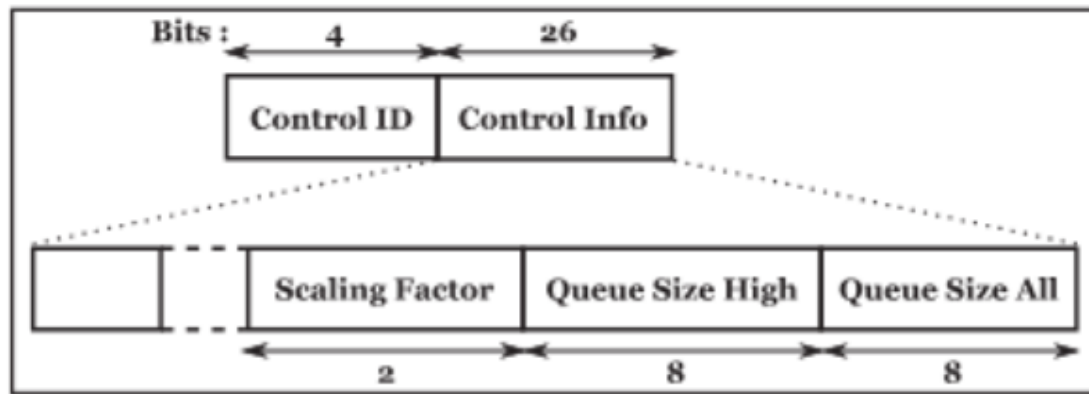


FIGURE 2.5 – Format de la trame BSR

Ces champs permettent à l'AP de connaître l'état exact de la file d'attente des STAs et d'ajuster l'allocation des ressources en conséquence. La trame BSR peut être envoyée de manière implicite après la réception de la trame BTF ou explicitement selon les besoins.

Finalement, la transmission descendante est généralement bien coordonnée par le point d'accès, c'est au niveau de la transmission montante que les défis majeurs apparaissent, notamment en raison de la nature aléatoire et concurrente de l'accès au canal car plusieurs stations tentent d'accéder simultanément sans coordination préalable. Ce manque de coordination entraîne des risques accrus de collisions, une utilisation inefficace des ressources et une variabilité importante des performances, d'où l'introduction du mécanisme UORA dans la norme 802.11ax.

## 2.2.2 UORA : Protocole d'accès aléatoire en montée basé sur l'OFDMA

### 2.2.2.1 Principe général

UORA (Uplink OFDMA-based Random Access) a été introduit dans la norme IEEE 802.11ax et utilisé dans le Wi-Fi 7 pour permettre aux stations d'envoyer des données en UL sans programmation directe par l'AP. Il s'agit d'un mécanisme optimisé de contention d'accès multiple pour les environnements denses et dynamiques, particulièrement pertinent dans les réseaux IoMT, où les capteurs connectés doivent occasionnellement envoyer des données critiques de manière autonome et non programmée [17].

Dans le contexte des réseaux IoMT, ce mécanisme est particulièrement pertinent. Les capteurs médicaux, souvent contraints en énergie, doivent pouvoir transmettre des données vitales ou des alertes critiques à des moments imprévisibles, sans attendre un créneau programmé. UORA permet à ces capteurs de contester dynamiquement l'accès à un ou plusieurs RUs disponibles, en s'appuyant sur une logique de backoff aléatoire et un suivi de l'état de contention.

Ce mode d'accès aléatoire basé sur l'OFDMA contribue à :

- Réduire la latence de transmission, ce qui est crucial pour les applications médicales en temps réel.
- Améliorer la fiabilité de l'accès UL dans des scénarios où la densité de dispositifs est élevée.
- Diminuer la consommation énergétique des stations grâce à l'accès non planifié et opportuniste, évitant des cycles d'écoute prolongée.

En résumé, UORA joue un rôle clé dans la prise en charge d'applications critiques nécessitant une connectivité souple, rapide, consolidant ainsi la place du Wi-Fi dans les déploiements IoT sensibles tels que ceux du

domaine de la santé.

### 2.2.2.2 Fonctionnement de l'UORA standard

Le fonctionnement de l'UORA repose sur une série d'étapes consécutives, encadrées par l'allocation de RUs pour l'accès aléatoire et un compteur de backoff OFDMA pour chaque STA.

- **Allocation des RA-RUs** : le point d'accès réserve une ou plusieurs unités de ressource à l'accès au hasard (Random Access RUs, ou RA-RUs). Cette réservation est annoncée dans un Trigger Frame, qui déclare également le type de station ciblée par le champ AID12 (0 pour STA associé, 2045 pour non associé) [18].
- **Initialisation du OBO** : chaque STA en attente de transmission initialise un compteur OBO avec une valeur aléatoire comprise entre 0 et OCW (OFDMA Contention Window). Cette fenêtre est dérivée des champs EOCWmin et EOCWmax inclus dans la trame Trigger. Les valeurs effectives sont calculées selon les formules standard [18] :

$$OCW_{\min} = 2^{EOCW_{\min}} - 1 \quad (2.1)$$

$$OCW_{\max} = 2^{EOCW_{\max}} - 1 \quad (2.2)$$

Dans le cas contraire, la STA applique les valeurs par défaut définies par la norme, à savoir  $OCW_{\min} = 7$  et  $OCW_{\max} = 31$ .

- **Décrémentation du compteur** : à chaque réception d'une trame de déclenchement, la STA décrémente sa valeur OBO - r, qui correspond au nombre de RA-RU disponibles. Lorsque la valeur OBO atteint zéro, la STA devient éligible à la transmission [17].
- **Sélection aléatoire d'une RU** : la STA choisit alors au hasard l'une des RA-RUs disponibles pour transmettre sa trame [17].
- **Transmission ou collision** :
  - Si une seule STA choisit la RU, la transmission est un succès (confirmé par un Block ACK) [17].
  - Si plusieurs STAs choisissent la même RU, une collision survient, et les transmissions échouent [17].
- **Réaction à l'échec** : en cas de collision, la STA double sa fenêtre OCW (jusqu'à OCWmax) et tire un nouvel OBO pour réessayer ultérieurement [17].

La figure ci-dessous détaille le fonctionnement UORA pour l'accès aléatoire dans UL-OFDMA.

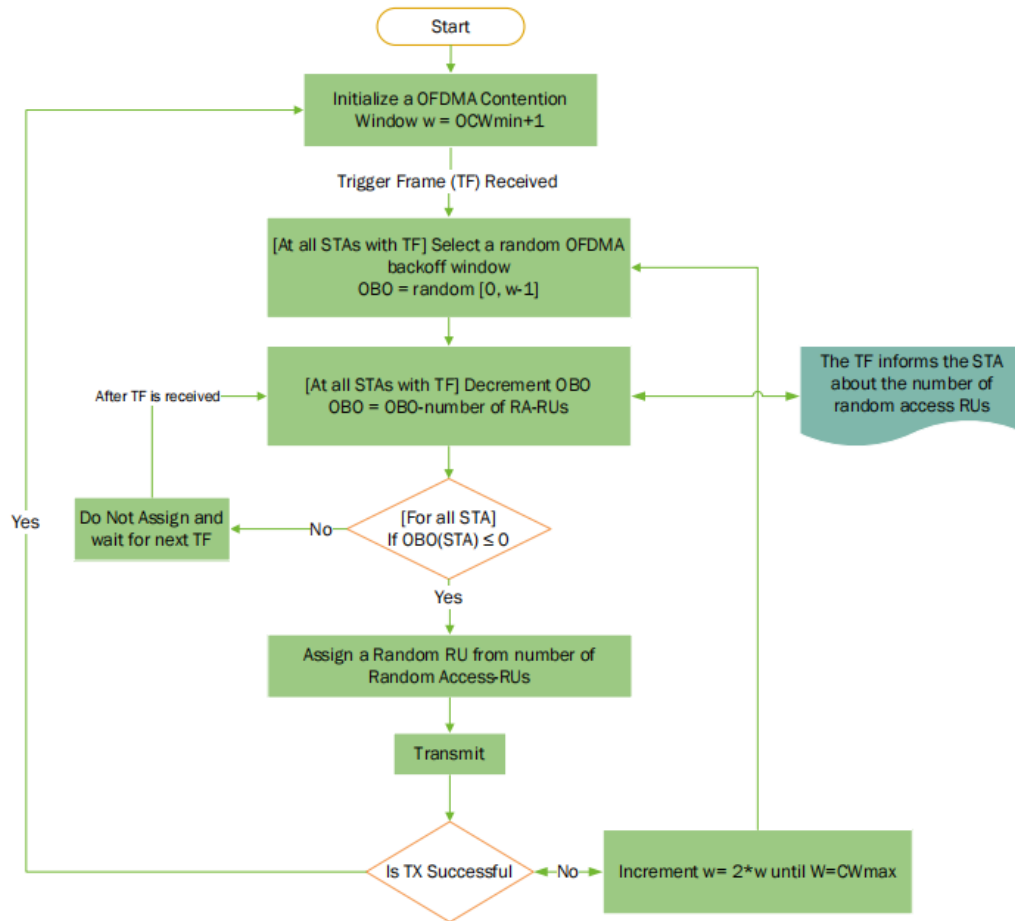


FIGURE 2.6 – Fonctionnement UORA pour l'accès aléatoire dans UL-OFDMA.

### 2.2.2.3 Avantages de l'UORA

Le mécanisme UORA est précisément bien adapté aux transmissions courtes et épisodiques :

- Il autorise une autosuffisance des appareils, qui peuvent s'entretenir sans intervention de l'AP.
- Il propose une scalabilité : plusieurs STAs pourront tenter d'accéder au canal en même temps.
- Il réduit les échanges de signaux avec le point d'accès, ce qui convient bien aux appareils médicaux à faible consommation, comme les capteurs portables ou les dispositifs implantés.

### 2.2.2.4 Déroulement de l'UORA : exemple avec trois stations associées

Pour illustrer le fonctionnement normal du mécanisme UORA dans un réseau Wi-Fi, prenons l'exemple de trois stations (STA1, STA2, STA3) connectées à un même AP.

#### — Étape 1 : Envoi de la trame Trigger

L'AP diffuse une trame *Trigger* indiquant :

- $EOCW_{\min} = 3$  et  $EOCW_{\max} = 5$
- $r = 3$ , soit 3 RA-RUs disponibles pour l'accès aléatoire.
- Le champ AID12 = 0, indiquant que la trame concerne les STAs associées.

Chaque station calcule :

$$OCW_{\min} = 2^3 - 1 = 7 \quad \text{et} \quad OCW_{\max} = 2^5 - 1 = 31$$

— **Étape 2 : Initialisation du compteur OBO**

Chaque station choisit aléatoirement un entier OBO dans l'intervalle  $[0, OCW]$ ,  
 $OCW = OCW_{\min} = 7$  pour la première tentative :

- STA1  $\rightarrow$  OBO = 4
- STA2  $\rightarrow$  OBO = 2
- STA3  $\rightarrow$  OBO = 6

— **Étape 3 : Réception d'une trame Trigger avec 3 RA-RUs**

À chaque trame *Trigger* reçue, les stations décrémentent leur OBO de  $r = 3$  :

- STA1  $\rightarrow$  OBO =  $4 - 3 = 1$
- STA2  $\rightarrow$  OBO =  $2 - 3 = 0$
- STA3  $\rightarrow$  OBO =  $6 - 3 = 3$

Seule STA2 a son OBO à 0. Elle devient éligible pour transmettre.

— **Étape 4 : Transmission de STA2**

STA2 choisit au hasard un des 3 RA-RUs disponibles (ex. RU2) et transmet sa trame. L'AP reçoit la transmission et renvoie un *Block ACK* confirmant la réception.

— **Étape 5 : Nouvelle Trigger Frame**

L'AP renvoie une nouvelle trame *Trigger* avec les mêmes paramètres. Les stations décrémentent à nouveau leur OBO de 3 :

- STA1  $\rightarrow$  OBO =  $1 - 3 = 0$
- STA3  $\rightarrow$  OBO =  $3 - 3 = 0$

Maintenant, STA1 et STA3 ont toutes deux un OBO égal à 0.

— **Étape 6 : Tentative de transmission et collision**

Les deux stations choisissent aléatoirement une RU parmi les 3 :

- STA1  $\rightarrow$  choisit RU1
- STA3  $\rightarrow$  choisit aussi RU1

**Résultat :** Collision sur RU1, les données sont perdues. L'AP ne renvoie pas d'ACK.

— **Étape 7 : Réinitialisation des stations en échec**

STA1 et STA3 mettent à jour leur OCW selon :

$$OCW \leftarrow \min(2 \times OCW + 1, OCW_{\max}) = \min(2 \times 7 + 1, 31) = 15$$

Elles tirent un nouvel OBO aléatoire entre 0 et 15 pour la prochaine tentative.

### 2.2.2.5 Limites de UORA dans les réseaux denses

Malgré ses avantages, UORA présente aussi plusieurs inconvénients :

- Collisions fréquentes : plus le nombre de STAs est élevé, plus le risque que deux ou plusieurs stations choisissent la même RU augmente.
- Sous-utilisation des ressources : certaines RUs restent inutilisées tandis que d'autres sont en collision.
- Absence de gestion de priorité : le mécanisme standard ne distingue pas les types de trafic, ce qui pose problème pour la gestion des priorités médicales.

## 2.3 État de l'art sur le protocole UORA

Le protocole UORA, introduit dans la norme IEEE 802.11ax, permet aux stations de transmettre en liaison montante sans planification directe par l'AP, en utilisant des RUs pré-réservées pour l'accès aléatoire. Cependant, la méthode standard présente des limitations en environnement dynamique et dense : collisions fréquentes, mauvaise adaptation au trafic, et gaspillage de ressources.

Plusieurs travaux ont proposé des améliorations, sont présentés en détails ci-dessous.

### 2.3.1 E-OBO : Adaptation centralisée par l'AP

L'article [19] propose l'algorithme **E-OBO (Efficient OBO)**, qui introduit un contrôle centralisé de la décrémentation du OBO. Contrairement à la méthode classique où :

- chaque station choisit un OBO aléatoire dans  $[0, OCW]$ .
- puis décrémente ce OBO à chaque trame *Trigger* reçue d'un montant égal au nombre de RA-RUs disponibles ( $r$ ).

E-OBO remplace cette décrémentation fixe par une version pondérée :

$$OBO \leftarrow OBO - \alpha \times r$$

Le paramètre  $\alpha$  est un facteur d'adaptation dynamique, déterminé par le point d'accès, selon deux indicateurs mesurés pendant un intervalle  $\zeta$  de contention :

- $p_{uRU}$  : probabilité de collision sur les RUs.
- $p_{eRU}$  : probabilité de RUs inactives (non utilisées).

Ces probabilités sont calculées par AP :

$$p_{uRU} = \frac{\sum_{i=1}^{\zeta} n_{uRU}(i)}{\sum_{i=1}^{\zeta} (n_{sRU}(i) + n_{uRU}(i) + n_{eRU}(i))} \quad p_{eRU} = \frac{\sum_{i=1}^{\zeta} n_{eRU}(i)}{\sum_{i=1}^{\zeta} (n_{sRU}(i) + n_{uRU}(i) + n_{eRU}(i))}$$

où :

- $n_{sRU}(i)$  : nombre de RUs avec transmission réussie au round  $i$ .
- $n_{uRU}(i)$  : nombre de RUs ayant échoué (collision ou bruit).
- $n_{eRU}(i)$  : nombre de RUs vides.
- $\zeta$  : nombre de rounds de contention (période d'observation).

#### 2.3.1.1 Règles d'adaptation de $\alpha$

Condition réseau	Action de l'AP	Nouvelle valeur de $\alpha$
$p_{RU}^u \geq 0.33$ et $p_{RU}^e < 0.33$	Réseau congestionné (beaucoup de collisions, peu de RUs vides)	$\alpha \leftarrow \max(0.1, \alpha - 0.1)$ ( $\rightarrow \alpha$ diminue)

TABLE 2.1 – Mise à jour de  $\alpha$  – Cas de congestion

Condition réseau	Action de l'AP	Nouvelle valeur de $\alpha$
$p_{\text{RU}}^u \leq 0.5$ et $p_{\text{RU}}^e \geq 0.5$	Réseau peu utilisé (peu de collisions, beaucoup de RUs vides)	$\alpha \leftarrow \min(2, \alpha + 0.2)$ ( $\rightarrow \alpha$ augmente)
Autres cas	Situation neutre	$\alpha$ reste inchangé

 TABLE 2.2 – Mise à jour de  $\alpha$  – Cas sous-utilisation et autres cas

L'AP transmet la valeur de  $\alpha$  dans la trame *Trigger*, ce qui permet aux stations d'adapter dynamiquement leur stratégie de backoff. Cette approche réduit les collisions en période de surcharge et améliore l'efficacité spectrale quand le trafic est faible.

### Exemple illustratif :

Supposons qu'on observe 3 rounds de contention ( $\zeta = 3$ ) :

Round $i$	$n_{\text{RU}}^s(i)$	$n_{\text{RU}}^u(i)$	$n_{\text{RU}}^e(i)$
1	3	2	1
2	2	3	1
3	1	4	1

 TABLE 2.3 – Nombre de RUs selon le type à chaque round  $i$ 

On calcule :

$$\begin{aligned}
 & \text{— } \sum_{i=1}^3 n_{\text{RU}}^u(i) = 2 + 3 + 4 = 9 \\
 & \text{— } \sum_{i=1}^3 n_{\text{RU}}^e(i) = 1 + 1 + 1 = 3 \\
 \text{— } \sum_{i=1}^3 (n_{\text{RU}}^s(i) + n_{\text{RU}}^u(i) + n_{\text{RU}}^e(i)) &= (3 + 2 + 1) + (2 + 3 + 4) + (1 + 1 + 1) = 6 + 9 + 3 = 18
 \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 & \text{— } p_{\text{RU}}^u = 9/18 = 0.5 \\
 & \text{— } p_{\text{RU}}^e = 3/18 = 0.166
 \end{aligned}$$

Cela signifie : réseau assez congestionné  $\rightarrow$  l'algorithme va réduire  $\alpha$  pour ralentir l'accès.

### 2.3.1.2 Procédure E-OBO

---

**Algorithm 1** Procédure E-OBO [19]
 

---

```

1:  $\alpha \leftarrow 1$ 
2: Intervalle d'observation :  $\zeta$  rounds de contention
3: if  $p_{uRU} \geq 0.33$  and  $p_{eRU} < 0.33$  then
4:    $\alpha \leftarrow \max(0.1, \alpha - 0.1)$ 
5: else if  $p_{uRU} \leq 0.5$  and  $p_{eRU} \geq 0.5$  then
6:    $\alpha \leftarrow \min(2, \alpha + 0.2)$ 
7: else
8:    $\alpha$  reste inchangé
9: end if
10: AP transmet  $\alpha$  dans le Trigger Frame
11: for all stations do
12:    $OBO \leftarrow OBO - \alpha \times n_{RU}$ 
13:   if  $OBO \leq 0$  then
14:     Sélectionner un RU aléatoire pour transmettre
15:   end if
16: end for

```

---

**Avantages :**

- **Adaptation centralisée** : L'AP ajuste dynamiquement le facteur  $\alpha$  en fonction des collisions et de l'utilisation des RUs, optimisant ainsi l'accès au canal.
- **Réduction des collisions** : Le contrôle par l'AP permet une meilleure gestion des ressources en temps réel.
- **Efficacité dans les réseaux IoT** : Particulièrement adapté aux environnements critiques où la coordination est essentielle tel que les applications médicales.

**Inconvénients :**

- **Surcharge de signalisation** : Nécessite des échanges supplémentaires pour transmettre  $\alpha$  aux stations.
- **Dépendance à l'AP** : Si l'AP est surchargé ou mal configuré, les performances peuvent se dégrader.

### 2.3.2 OBO\_CTRL : Adaptation locale par les stations

L'article [18] introduit un schéma léger et décentralisé nommé **OBO\_CTRL** (**OBO CONTROL**), où chaque station ajuste son propre facteur  $\alpha$  selon l'issue de sa dernière tentative de transmission. Ce mécanisme élimine la nécessité de signalisation additionnelle (comme les BSR), et repose sur une simple règle d'adaptation :

$$\alpha = \begin{cases} \min(\alpha + \delta, \alpha_{\max}) & \text{si la transmission est un succès} \\ \max(\alpha - \delta, \alpha_{\min}) & \text{si la transmission échoue} \end{cases}$$

La décrémentation du compteur OBO se fait localement :

$$OBO \leftarrow OBO - \alpha \times M_{RU}$$

où :  $M_{RU}$  est le nombre de RUs annoncées par le Trigger Frame.

**Paramètres typiques** utilisés :

- $\alpha_{\text{init}} = 1.0$
- $\delta = 0.1$  ou  $0.2$
- $\alpha_{\text{min}} = 0.5$ ,  $\alpha_{\text{max}} = 2.0$

**Exemple de cycle :**

- Cycle 1 : succès  $\rightarrow \alpha = 1.2$
- Cycle 2 : succès  $\rightarrow \alpha = 1.4$
- Cycle 3 : échec  $\rightarrow \alpha = 1.2$
- Cycle 4 : échec  $\rightarrow \alpha = 1.0$

### 2.3.2.1 Résultats de simulation

- Débit jusqu'à 15 fois supérieur à UORA standard dans les environnements surchargés.
- Meilleure utilisation des RUs, avec moins de gaspillage.
- Stabilité et équité maintenues même avec un nombre variable de stations.

### 2.3.2.2 Algorithme OBO\_CTRL

---

**Algorithm 2** Schéma OBO\_CTRL [18]

---

```

1: procedure RECEVOIR_TF
2:   Lire  $M_{RU}$  depuis la trame
3:    $OBO \leftarrow OBO - \alpha \times M_{RU}$ 
4:   if  $OBO \leq 0$  then
5:     Tenter une transmission UL sur un RU aléatoire
6:   else
7:     Attendre le prochain Trigger Frame
8:   end if
9: end procedure
10: procedure ACK_TIMEOUT
11:    $OCW \leftarrow 2 \times (OCW + 1) - 1$ 
12:    $OCW \leftarrow \min(OCW, OCW_{\text{max}})$ 
13:    $\alpha \leftarrow \max(\alpha - \delta, \alpha_{\text{min}})$ 
14:   Tirer OBO aléatoire dans  $[1, OCW]$ 
15: end procedure
16: procedure RECEVOIR_ACK
17:    $OCW \leftarrow OCW_{\text{min}}$ 
18:    $\alpha \leftarrow \min(\alpha + \delta, \alpha_{\text{max}})$ 
19:   Tirer OBO aléatoire dans  $[1, OCW]$ 
20: end procedure

```

---

**Comportement détaillé :**

- *RECEVOIR\_TF* : décrémente OBO.
- *ACK\_TIMEOUT* : double OCW, diminue  $\alpha$ , tire un nouveau OBO.
- *RECEVOIR\_ACK* : remet OCW à  $OCW_{\text{min}}$ , augmente  $\alpha$ , tire un nouveau OBO.

**Avantages :**

- **Adaptation locale** : Chaque station ajuste son propre  $\alpha$  sans intervention de l'AP, réduisant la surcharge réseau.

- **Réactivité** : Réagit rapidement aux succès/échecs de transmission, améliorant l'équité entre stations.
- **Léger et simple** : Facile à implémenter sans modification majeure du standard.

**Inconvénients :**

- **Moins efficace dans les réseaux denses** : L'absence de coordination centralisée peut entraîner des déséquilibres.
- **Variabilité des performances** : Les stations peuvent avoir des comportements divergents, réduisant l'efficacité globale.

### 2.3.3 $\alpha$ -UORA : Accès aléatoire OFDMA avec décrémentation adaptative

L'article *Collision-Based Uplink OFDMA Random Access Mechanism Based on Adaptive Modulation Backoff Step* [20] propose une approche nommée  $\alpha$ -UORA, visant à améliorer le protocole standard UORA en introduisant une stratégie de décrémentation OBO plus flexible et dynamique.

Contrairement à UORA standard où le compteur est décrémentation de façon rigide :

$$\text{OBO} \leftarrow \text{OBO} - r$$

Le schéma  $\alpha$ -UORA introduit une décrémentation pondérée :

$$\text{OBO} \leftarrow \text{OBO} - \alpha \times r$$

où :

- $r$  est le nombre de RA-RUs disponibles, communiqué dans la trame *Trigger*.
- $\alpha$  est un facteur d'adaptation dynamique qui évolue en fonction de la densité du réseau et du succès ou de l'échec des transmissions.

#### 2.3.3.1 Détermination et mise à jour de $\alpha$

Le facteur  $\alpha$  est initialisé à 1, puis mis à jour dynamiquement par la STA selon l'issue de sa dernière tentative de transmission :

**Transmission réussie :**

Une transmission réussie indique un réseau fluide. La station augmente  $\alpha$  afin de rendre l'accès futur plus agressif :

$$\alpha' = \alpha + \frac{100 + n}{n} \times S_{\text{inc}}, \quad \alpha \leftarrow \min(\alpha', \alpha_{\text{max}})$$

**Transmission échouée (collision) :**

Une collision reflète un environnement congestionné. La STA diminue alors  $\alpha$  pour ralentir les tentatives d'accès :

$$\alpha' = \alpha - \frac{n}{200 + n} \times S_{\text{dec}}, \quad \alpha \leftarrow \max(\alpha', \alpha_{\text{min}})$$

où :

- $n$  : nombre estimé de STAs tentant d'accéder au canal.
- $S_{\text{inc}}, S_{\text{dec}}$  : constantes typiquement égales à 0.1.
- $\alpha_{\text{min}}, \alpha_{\text{max}}$  : bornes de sécurité (ex.  $0.1 \leq \alpha \leq 2.0$ ).

### 2.3.3.2 Estimation du nombre de stations participantes ( $n$ )

Le AP joue un rôle clé en estimant le nombre total de stations actives :

- **Stations associées** : l'AP connaît précisément le nombre de STAs associées à son BSS.
- **Stations non associées** : leur nombre est une estimation arrondie, en supposant qu'il est faible.  
Exemple : 83 STAs associées  $\Rightarrow n = 90$ .

La valeur estimée de  $n$  est transmise dans des bits réservés de la trame Trigger.

### 2.3.3.3 Algorithme du fonctionnement $\alpha$ -UORA

---

#### Algorithm 3 Procédure $\alpha$ -UORA [20]

---

```

1:  $\alpha \leftarrow 1$  ▷ Initialisation locale
2: function RECEVOIR_TF( $r, n$ )
3:   OBO  $\leftarrow$  OBO  $- \alpha \times r$ 
4: end function

5: function RECEVOIR_ACK( $n$ )
6:    $\alpha' \leftarrow \alpha + \frac{100+n}{n} \times S_{\text{inc}}$ 
7:    $\alpha \leftarrow \min(\alpha', \alpha_{\text{max}})$ 
8: end function

9: function ACK_TIMEOUT( $n$ )
10:   $\alpha' \leftarrow \alpha - \frac{n}{200+n} \times S_{\text{dec}}$ 
11:   $\alpha \leftarrow \max(\alpha', \alpha_{\text{min}})$ 
12: end function

```

---

#### Avantages :

- **Adaptation intelligente** : Le facteur  $\alpha$  est ajusté en fonction du nombre estimé de stations ( $n$ ), améliorant l'équilibre entre agressivité et prudence.
- **Meilleure estimation de la charge** : L'AP fournit une estimation de  $n$ , permettant une adaptation plus précise.
- **Gain de débit** : Réduction des collisions et amélioration du taux de transmission.

#### Inconvénients :

- **Complexité accrue** : L'estimation de  $n$  nécessite des calculs supplémentaires.
- **Dépendance à la précision de l'AP** : Une mauvaise estimation peut dégrader les performances.

### 2.3.4 Protocole M-OBO (Modified OFDMA Backoff)

Le schéma M-OBO modifie uniquement la phase de retransmission du processus UORA :

**Premier tirage du compteur OBO** : reste identique au protocole standard (entre 0 et OCWmin).

#### En cas d'échec de transmission (collision ou absence de MU-BA) :

OCW est doublé :  $OCW_{\text{inc}} = 2 \times OCW_{\text{old}} + 1$  jusqu'à  $OCW_{\text{max}}$ .

**Dans le protocole standard** : OBO est sélectionné dans  $[0, OCW_{\text{inc}}]$ .

**Dans M-OBO** : OBO est sélectionné dans  $[OCW_{\text{inc}}, OCW_{\text{max}}]$ .

Cela réduit la probabilité de collisions successives, car les STAs ayant échoué attendront plus longtemps avant de retenter une transmission.

La figure 2.7 est un diagramme qui simplifie le fonctionnement du M-OBO

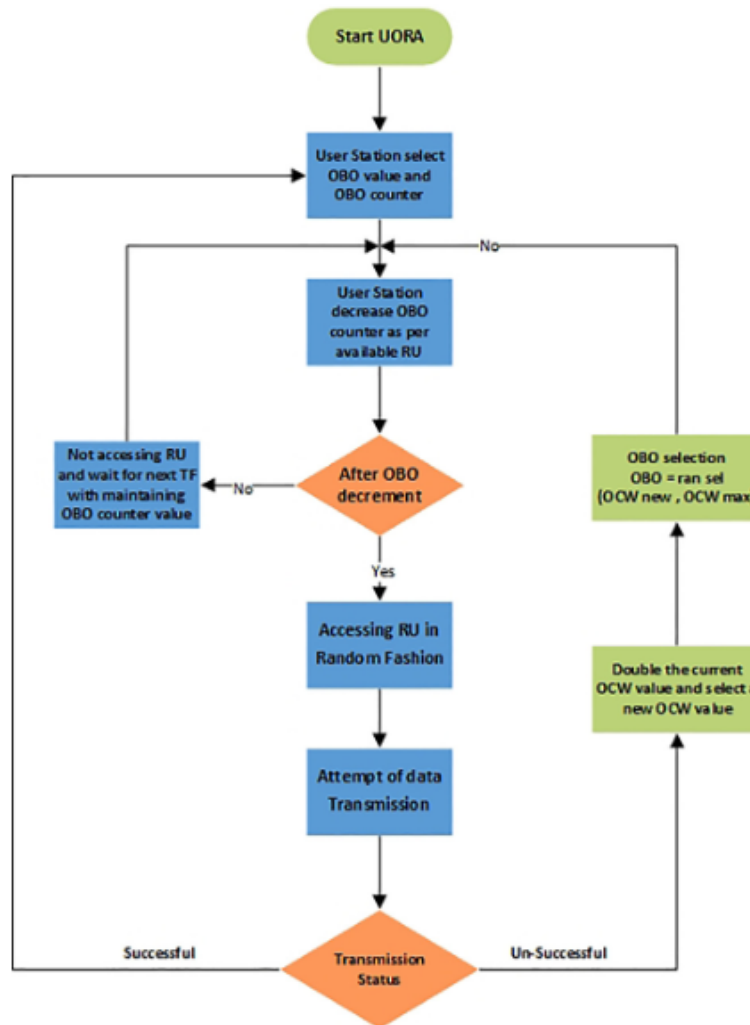


FIGURE 2.7 – Mécanisme du "M-OBO"

#### Activation du M-OBO :

M-OBO ne s'active que dans deux cas :

- Si la station subit une collision d'accès aux RUS.
- Si elle ne reçoit pas d'accusé de réception (MU-BA) après une transmission.

Dans ces cas, la station :

Calcule une nouvelle OCW (en la doublant), tire un nouveau OBO dans une plage plus haute, pour espacer les tentatives futures.

#### Avantages :

- **Réduction des collisions successives** : Après un échec, le nouveau OBO est tiré dans une plage plus élevée, espaçant les tentatives.
- **Simplicité** : Aucune modification majeure du protocole ni signalisation supplémentaire.
- **Efficacité en environnement dense** : Limite l'engorgement en réduisant les accès simultanés.

#### Inconvénients :

- **Augmentation de la latence** : Les stations en échec attendent plus longtemps avant de retenter.
- **Pas d'adaptation dynamique** : Moins flexible que d'autres solutions comme E-OBO ou  $\alpha$ -UORA.

### 2.3.5 Protocole MAC OFDMA à contention en deux phases

L'article [21] introduit un protocole MAC basé sur l'OFDMA, visant à améliorer l'efficacité des WLANs dans les environnements denses. Contrairement au Wi-Fi traditionnel (IEEE 802.11), qui repose sur CS-MA/CA et une contention mono-utilisateur, ce protocole permet à plusieurs STAs de transmettre simultanément grâce à une **coordination centralisée par l'AP**.

Le canal est divisé en  $K$  sous-canaux, chacun pouvant être alloué à une STA. L'accès au canal s'effectue via une procédure en deux phases :

- **Phase de contention** : chaque STA choisit aléatoirement un sous-canal et démarre un backoff. À l'issue du décompte, elle envoie une trame RTS contenant la liste des sous-canaux qu'elle peut utiliser.
- **Phase de transmission** : l'AP reçoit les trames RTS, sélectionne les STAs et leur attribue un sous-canal avec un créneau temporel. Il répond via une trame OFDMA-CTS contenant les allocations, évitant ainsi les collisions futures.

La synchronisation OFDMA est coordonnée par l'AP, ce qui évite aux STAs d'avoir une synchronisation stricte au niveau de la sous-porteuse. Ce mécanisme permet un fonctionnement efficace sans alourdir la complexité côté utilisateur.

#### Exemple :

Dans un scénario à forte densité, le protocole obtient plus de  $2\times$  de gain en débit par rapport au Wi-Fi classique. Par exemple, pour un réseau avec  $K = 4$  sous-canaux et  $N = 20$  STAs, le système parvient à maintenir un taux de collision minimal tout en assurant une utilisation efficace des ressources.

#### Avantages :

- **Coordination centralisée** : L'AP gère l'allocation des ressources, réduisant fortement les collisions.
- **Scalabilité** : Performant même dans les réseaux très denses.
- **Équité améliorée** : L'AP peut prioriser certaines stations si nécessaire.

#### Inconvénients :

- **Surcharge de signalisation** : Nécessite des trames RTS/CTS, augmentant la charge réseau.
- **Complexité** : Plus difficile à implémenter que les solutions purement distribuées.

### 2.3.6 CODOBO\_CTRL : Backoff distribué adaptatif par estimation locale

L'article *Collision-Based Up-Link OFDMA Random Access Mechanism for Wi-Fi 6* [22] propose un schéma nommé **CODOBO\_CTRL** (Collision-Based Distributed OFDMA BACK-off control), qui vise à améliorer les performances du protocole UORA sans modifier la norme IEEE 802.11ax. L'idée principale est de réduire les collisions et d'optimiser l'accès au canal, en adaptant dynamiquement le compteur OBO de chaque STA, selon le résultat de ses transmissions précédentes (succès ou collision).

#### 2.3.6.1 Principe de fonctionnement

Contrairement à UORA standard, où :

- chaque STA décrémente son OBO d'un montant fixe égal au nombre de RA-RUs disponibles ( $Mru$ ).
- le comportement reste statique, même en cas de congestion ou d'échec répété.

CODOBO\_CTRL introduit un ajustement adaptatif du OBO basé sur deux paramètres :

- $\beta$  : un *indice d'optimisation dynamique* qui évolue selon les résultats de transmission (succès ou collision),
- $CF$  : un *facteur de collision* constant ( $CF = 0,63$ ), représentant la probabilité maximale de collision quand le nombre de STA dépasse largement le nombre de RA-RUs.

### 2.3.6.2 Equations utilisées :

#### 1. Initialement :

$$OBO = [(OBO - Mru) + \beta]$$

$\beta$  est d'abord nul, donc on a le comportement standard UORA.

#### 2. apres une collision

$$\beta_{i+1} = \min(\beta_i + CF, \beta_{\max})$$

$$OBO_{\beta_{i+1}} = [(OBO - Mru) + \beta_{i+1}]$$

La STA augmente progressivement  $\beta$ .

#### 3. Apres une ressite :

$$\beta_{i+1} = \min(\beta_i - CF, \beta_{\min})$$

$$OBO_{\beta_{i+1}} = [(OBO - Mru) + \beta_{i+1}]$$

$\beta$  diminue doucement, ameliorant les chances de reaccés

### 2.3.6.3 Règles d'adaptation de $\beta$

- À chaque échec (*ACK timeout*) :  $\beta \leftarrow \min(\beta + CF, \beta_{\max})$
- À chaque succès (*ACK reçu*) :  $\beta \leftarrow \max(\beta - CF, \beta_{\min})$

Les valeurs de  $\beta_{\min}$  et  $\beta_{\max}$  :

- $\beta_{\min}$  : le nombre de RUs divie par le nombre maximum de STA

$$\beta_{\min} = \frac{\text{nbr RU}}{\text{nbr STA}}$$

mais il supposent que le nombre de STA est 10 fois superieur au nombre de RU donc.

$$\beta_{\min} = \frac{\text{nbr RU}}{10 \times \text{nbr STA}} = 0,1$$

- $\beta_{\max}$  est fixé selon la largeur de bande : 8 pour 20 MHz, 16 pour 40 MHz, etc.

L'idée est de **pénaliser les STAs après un échec** (augmentation de  $\beta$ ) et de **récompenser après un succès** (réduction de  $\beta$ ), ce qui améliore la répartition des accès au canal.

### 2.3.6.4 Procédure CODOBO\_CTRL

---

**Algorithm 4** Procédure CODOBO\_CTRL [22]
 

---

```

1: Chaque RA-STA initialise  $OCW \in [OCW_{min}, OCW_{max}]$ 
2:  $OBO \leftarrow$  valeur aléatoire dans  $[0, OCW]$ 
3: procedure RÉCEPTION DU TF-R
4:    $OBO \leftarrow (OBO - Mru) + \beta$ 
5:   if  $OBO \leq 0$  then
6:     Accès à un RA-RU
7:   else
8:     Conserver OBO pour le prochain TF-R
9:   end if
10: end procedure
11: procedure ACK_FRAME_TIMEOUT
12:    $OCW \leftarrow \min(2 \cdot (OCW + 1) - 1, OCW_{max})$ 
13:    $\beta \leftarrow \min(\beta + CF, \beta_{max})$ 
14:   Sélectionner un nouveau  $OBO \in [0, OCW]$ 
15: end procedure
16: procedure ACK_FRAME_REÇU
17:    $OCW \leftarrow OCW_{min}$ 
18:    $\beta \leftarrow \max(\beta - CF, \beta_{min})$ 
19:   Sélectionner un nouveau  $OBO \in [0, OCW]$ 
20: end procedure

```

---

**Avantages :**

- **Optimisation distribuée** : Chaque station ajuste son  $\beta$  en fonction de ses propres transmissions, sans dépendre de l'AP.
- **Réduction des collisions** : Le facteur de collision (CF) permet une meilleure répartition des accès.
- **Équilibre entre performance et simplicité** : Plus flexible que le standard UORA, mais moins complexe que les solutions centralisées.

**Inconvénients :**

- **Paramétrage délicat** : Le choix de CF et des bornes  $\beta_{min}/\beta_{max}$  influence fortement les résultats.
- **Moins efficace en cas de forte congestion** : Peut souffrir des mêmes limites qu'UORA dans les réseaux extrêmement denses.

### 2.3.7 Discussion sur les solutions proposées pour améliorer le mécanisme UORA

Le protocole UORA, introduit dans le Wi-Fi 6 et amélioré dans le Wi-Fi 7, permet à plusieurs stations d'accéder simultanément au canal uplink via des RUs attribuées aléatoirement. Bien qu'innovant, ce mécanisme présente des limitations majeures dans les environnements denses, où les collisions fréquentes, la latence élevée et la faible efficacité spectrale deviennent problématiques. Face à ces défis, plusieurs améliorations ont été proposées, chacune apportant des solutions spécifiques mais présentant également des compromis.

Parmi les approches centralisées, E-OBO se distingue par son ajustement dynamique du backoff ( $\alpha$ ) par l'AP, offrant une réduction notable des collisions et une meilleure adaptation aux réseaux IoT critiques, au prix cependant d'une surcharge de signalisation et d'une forte dépendance à l'AP.  $\alpha$ -UORA va plus loin en

intégrant une estimation du nombre de stations actives ( $n$ ) pour optimiser, améliorant ainsi l'efficacité spectrale, mais cette solution complexifie les calculs et reste sensible aux erreurs d'estimation. Le protocole MAC OFDMA à deux phases, quant à lui, élimine quasiment les collisions grâce à une coordination centralisée en deux étapes (RTS/CTS suivie d'une allocation contrôlée), mais cette robustesse s'accompagne d'une lourdeur protocolaire et d'une complexité de mise en œuvre élevée.

À l'opposé, les solutions distribuées comme OBO\_CTRL permettent aux stations d'ajuster localement leur backoff en fonction de leurs transmissions passées, garantissant réactivité et équité sans surcharge réseau, mais peinent à maintenir leur efficacité dans les environnements ultra-denses par manque de coordination globale. CODOBO\_CTRL affine cette approche avec un facteur de collision (CF) permettant un ajustement plus fin du backoff, offrant un bon équilibre entre performance et simplicité, bien que son efficacité dépende fortement du paramétrage choisi et reste limitée dans les situations de congestion extrême. Enfin, M-OBO adopte une approche minimaliste en augmentant simplement la plage de backoff après un échec de transmission, réduisant ainsi les collisions successives sans modifier profondément le protocole, mais au détriment d'une latence accrue pour les stations en échec et sans capacité d'adaptation dynamique.

Ces différentes solutions illustrent bien les compromis inhérents à l'amélioration d'UORA : entre centralisation et distribution, complexité et simplicité, réactivité et stabilité. Le choix optimal dépendra donc des contraintes spécifiques du réseau considéré, qu'il s'agisse de densité, de criticité des applications ou des capacités des dispositifs.

Pour les travaux à venir, nous envisageons d'explorer des mécanismes hybrides innovants, combinant des approches centralisées et distribuées, afin d'optimiser davantage le backoff.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en profondeur le mécanisme UORA dans le Wi-Fi 7, en analysant ses forces pour les applications médicales IoT, telles que sa flexibilité d'accès au canal, sa réactivité aux transmissions non planifiées, autant d'atouts cruciaux dans un contexte de dispositifs médicaux contraints. Toutefois, notre étude a également mis en lumière les limites importantes de ce mécanisme, notamment les collisions récurrentes, la sous-utilisation des ressources radio, en particulier dans les réseaux denses à forte dynamique.

Face à ces contraintes, nous avons passé en revue plusieurs solutions proposées dans la littérature, qu'elles soient centralisées (E\_OBO,  $\alpha$ \_UORA) ou distribuées (OBO\_CTRL, CODOBO\_CTRL), en soulignant les compromis qu'elles impliquent entre performance, complexité de mise en œuvre, et adaptabilité. Cette exploration nous a permis d'identifier les approches les plus prometteuses, en particulier celles qui misent sur une adaptation dynamique du backoff, une estimation du trafic, ou une gestion intelligente des retransmissions, ouvrant la voie à des solutions hybrides plus efficaces.

Fort de cette analyse, le dernier chapitre sera consacré à la présentation détaillée de notre propre contribution, qui consiste en un mécanisme de backoff intelligent à double paramètre, pensé pour surmonter les limites identifiées. Nous y exposerons les fondements théoriques et algorithmiques de cette approche, ainsi que les choix de conception justifiés par les observations du chapitre précédent. Une attention particulière sera portée à la campagne de simulations avancées, visant à évaluer les performances du mécanisme sous divers scénarios de densité, et de charge. Enfin, une phase de validation expérimentale viendra renforcer la crédibilité de notre solution, en démontrant sa robustesse et son applicabilité dans des conditions proches de la réalité opérationnelle.

# Chapitre3: Proposition et évaluation des performances

## 3.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies médicales s'accompagne d'un besoin croissant en connectivité fiable, rapide et adaptée aux contraintes du secteur de la santé. Qu'il s'agisse de dispositifs de surveillance en temps réel, de télémédecine ou de capteurs intelligents déployés dans des environnements critiques, les exigences en matière de communication sans fil sont devenues particulièrement strictes.

Dans ce contexte, le Wi-Fi 7 représente une avancée majeure. En intégrant des mécanismes comme l'accès aléatoire basé sur l'OFDMA (UORA), cette norme promet une meilleure exploitation du spectre et une communication plus efficace, même lorsque de nombreux équipements sont actifs simultanément.

Le fonctionnement du UORA repose sur un accès distribué au canal, sans coordination centralisée. Chaque station décrémente un compteur OBO avant de tenter sa chance sur une RU disponible. Cette simplicité opérationnelle rend le mécanisme attractif, notamment pour les réseaux à faible densité, où les risques de conflits restent limités. Mais à mesure que les usages critiques se multiplient, et que les environnements deviennent plus dynamiques, cette stratégie atteint ses limites. Il devient alors indispensable d'introduire une forme d'intelligence dans la façon dont les stations évaluent leur accès au canal, en s'adaptant aux conditions changeantes du réseau.

Dans ce cadre, notre travail explore une piste d'amélioration du mécanisme OBO, en intégrant des paramètres adaptatifs capables d'influencer la stratégie de décrémentation selon l'état du réseau et le vécu de chaque station.

Ce chapitre présente notre proposition. Dans la section suivante, nous exposons la problématique du mécanisme UORA et les motivations ayant conduit à notre réflexion. On va discuter les objectifs de notre travail, la description complète de notre modèle, l'environnement de simulation et l'analyse des résultats, avant de conclure par une synthèse et des perspectives d'évolution.

## 3.2 Problématique

Le mécanisme UORA introduit dans le standard Wi-Fi 7, a pour objectif de permettre un accès efficace au canal en montée pour un grand nombre de stations. Grâce à une approche distribuée et aléatoire, chaque station peut tenter d'accéder à une RA-RU sans coordination centralisée, en s'appuyant sur un compteur de retour en arrière décrémente à chaque opportunité de transmission.

Ce principe fonctionne de manière satisfaisante dans des environnements peu denses, où les risques de collision sont faibles et où la demande en ressources est relativement stable. Toutefois, dans des scénarios à forte densité, comme ceux que l'on retrouve dans les hôpitaux intelligents, les maisons de soins ou les réseaux de capteurs médicaux, les performances du mécanisme UORA se dégradent rapidement.

Plusieurs limitations majeures se posent :

- Le **comportement rigide** du décrémente OBO, basé uniquement sur le nombre de RUs disponibles (comme le définit le standard), ne permet pas de s'adapter dynamiquement aux conditions réelles du réseau : charge, et historiques de transmission hétérogènes.
- Le taux de **collisions** augmente de façon significative, car plusieurs STAs peuvent sélectionner la même unité de ressource au même moment.
- Des **unités de ressource restent inoccupées**, traduisant une sous-utilisation du spectre disponible malgré une forte demande.

Ces limites deviennent critiques lorsqu'il s'agit de garantir des communications fiables et rapides pour des applications médicales sensibles, où chaque retard ou collision peut avoir des conséquences importantes. Face à cette situation, une question centrale se pose :

**Comment adapter intelligemment le mécanisme OBO pour répondre à ces besoins, tout en restant conforme au cadre décentralisé du Wi-Fi 7 ?**

## 3.3 Objectifs et motivations

L'intégration de dispositifs connectés dans le domaine médical transforme profondément la manière dont les soins sont dispensés. Que ce soit dans les hôpitaux, les maisons de repos ou à domicile, ces technologies permettent un suivi continu des patients, une réactivité accrue en cas d'urgence, et une optimisation des interventions médicales. Dans ces contextes critiques, chaque seconde compte. Un retard dans la transmission d'un signal vital ou un échec de communication peut avoir des conséquences graves, voire irréversibles.

Or, les mécanismes actuels d'accès au canal, bien que performants dans des conditions normales, montrent leurs limites dès lors que le réseau est saturé ou que la demande devient hétérogène. Le standard Wi-Fi 7 introduit des améliorations notables, mais reste perfectible en ce qui concerne la gestion dynamique de l'accès en montée.

Notre objectif à travers ce travail est donc clair : **améliorer l'efficacité et la réactivité du mécanisme de décrémente OBO** dans les environnements médicaux connectés, en le rendant plus sensible aux conditions réelles du réseau et au comportement individuel des stations.

Plus précisément, nos motivations sont les suivantes :

- Réduire significativement le taux de collisions dans les contextes à forte densité d'équipements médicaux.
- Éviter le gaspillage de ressources (RUs inoccupées) tout en maintenant un accès équitable au canal.
- Introduire une forme d'intelligence locale, basée sur l'expérience de chaque STA, afin d'ajuster dynamiquement son comportement, en tenant compte de l'état global du réseau.

En apportant ces améliorations, nous visons à renforcer la fiabilité et la rapidité des communications dans les réseaux médicaux intelligents, où la continuité du suivi (y compris à distance) ne doit jamais être compromise.

## 3.4 Proposition : protocole UORA amélioré par le mécanisme $\alpha\beta$ -OBO

Pour répondre à ces défis, nous proposons une amélioration du protocole UORA baptisée  $\alpha\beta$ -OBO. Cette solution introduit une décrémentation dynamique et intelligente du compteur OBO, basée sur deux paramètres complémentaires  $\alpha$  et  $\beta$ .

### 3.4.1 Fonctionnement du mécanisme $\alpha\beta$ -OBO

#### 3.4.1.1 Formule améliorée du OBO

La décrémentation du compteur OBO est désormais régie par la formule suivante :

$$OBO \leftarrow OBO - (\alpha \times \beta) \times Mru$$

où :

- $Mru$  : nombre de RA-RUs disponibles dans la TF transmise par l'AP.
- $\alpha$  : facteur global, reflétant la charge globale du réseau.
- $\beta$  : facteur local propre à chaque STA, évoluant en fonction de son historique d'accès.

#### 3.4.1.2 Justification des choix de conception

La proposition  $\alpha\beta$ -OBO a été conçue spécifiquement pour répondre aux exigences rigoureuses des réseaux sans fil déployés dans des environnements médicaux critiques. Elle repose sur deux axes fondamentaux :

- **Adaptation multi-niveaux** : La combinaison des paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  permet d'adapter finement le comportement des stations aux contraintes d'un réseau hospitalier :
  - *Contrôle global* ( $\alpha$ ) : le point d'accès peut réguler dynamiquement l'accès au canal en fonction de la densité du trafic médical global.
  - *Réactivité locale* ( $\beta$ ) : chaque capteur ou dispositif médical ajuste sa stratégie d'accès en fonction de ses transmissions passées, assurant ainsi une réactivité accrue pour les dispositifs en difficulté.

Cette double adaptation garantit un fonctionnement stable et performant, même en situation de forte charge ou d'urgence médicale.

- **Compatibilité avec l'infrastructure médicale existante** : Le mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO est conçu pour s'intégrer de manière transparente dans les réseaux conformes à la norme IEEE 802.11ax. Il ne nécessite aucune modification matérielle ni remplacement des équipements déjà en place, ce qui en facilite le déploiement progressif dans des environnements sensibles.

#### 3.4.1.3 Évolution du paramètre alpha ( $\alpha$ )

Le facteur  $\alpha$  est initialement fixé à 1 par l'AP, puis est mis à jour dynamiquement par ce dernier en fonction de l'état du réseau. Sa valeur est transmise aux stations via la TF.

L'AP calcule deux indicateurs à partir des statistiques collectées sur les RUs durant tous les cycles de contention précédents :

$$P_{ruU} = \frac{\sum RU_{coll}}{\sum (RU_{coll} + RU_{vide} + RU_{util})}, \quad P_{ruE} = \frac{\sum RU_{vide}}{\sum (RU_{coll} + RU_{vide} + RU_{util})}$$

- **PruU** : probabilité de collision sur les RUs.
- **PruE** : probabilité de RUs restées inactives.
- $RU_{coll}$  : nombre de RUs ayant subi des collisions.
- $RU_{vide}$  : nombre de RUs restées inactives (non utilisées).
- $RU_{util}$  : nombre de RUs utilisées avec succès.

En fonction de ces deux probabilités, l'AP ajuste la valeur de  $\alpha$  selon les règles suivantes :

$$\alpha = \begin{cases} \max(\alpha - 0.1, 0.1), & \text{si } P_{ruU} \geq 0.33 \text{ et } P_{ruE} < 0.33 \quad (\text{forte congestion}) \\ \min(\alpha + 0.2, 2), & \text{si } P_{ruE} \geq 0.5 \text{ et } P_{ruU} \leq 0.5 \quad (\text{sous-utilisation}) \\ \alpha, & \text{sinon (ne change pas)} \end{cases}$$

Cette logique permet une **autorégulation intelligente** du niveau d'agressivité des stations dans la décrémentation du compteur OBO. En période de congestion,  $\alpha$  diminue afin de ralentir les tentatives d'accès. Inversement, si de nombreuses ressources sont inutilisées,  $\alpha$  augmente, incitant les stations à tenter l'accès plus rapidement.

#### 3.4.1.4 Évolution du paramètre beta ( $\beta$ )

Le paramètre  $\beta$  est un facteur local propre à chaque STA. Il sert à ajuster dynamiquement la stratégie d'accès de la station en fonction du résultat de ses transmissions précédentes. Il permet à chaque STA de s'adapter de manière autonome, sans coordination centrale, afin d'améliorer l'efficacité globale du réseau.

##### Règle d'évolution

Soit  $\beta_i$  la valeur actuelle du paramètre  $\beta$  pour une station donnée à l'instant  $i$ .

La mise à jour de  $\beta$  au cycle suivant ( $i + 1$ ) se fait selon le résultat de la tentative de transmission :

$$\beta_{i+1} = \begin{cases} \min(\beta_i + 0.1, 2), & \text{si la transmission est un succès (pas de collision)} \\ \max(\beta_i - 0.1, 0.1), & \text{si la transmission échoue (collision)} \end{cases}$$

- Transmission réussie :
  - $\beta$  augmente légèrement (+0.1), avec un plafond de 2.
  - **Effet** : la station devient progressivement plus rapide dans la décrémentation de son compteur OBO, ce qui lui permet d'accéder plus rapidement au canal.
- Transmission échouée :
  - $\beta$  diminue légèrement (-0.1), avec un plancher de 0.1.
  - **Effet** : la station devient plus prudente dans les cycles suivants, ralentissant son accès pour éviter de nouvelles collisions.

#### 3.4.1.5 Organigramme

Afin de mieux illustrer le déroulement du mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO, nous présentons ci-dessous deux organigrammes représentant respectivement le fonctionnement côté STA et le processus d'ajustement global réalisé

par l'AP.

### Organigramme côté STA

La figure 3.1 montre les différentes étapes qu'une station suit à chaque cycle de contention :

1. Initialisation du compteur OBO à partir d'un tirage aléatoire dans la fenêtre de contention.
2. Décrémentation du compteur OBO en tenant compte des deux paramètres dynamiques :  $\beta$  et  $\alpha$ .
3. Lorsque OBO devient inférieur ou égal à zéro, la station tente une transmission sur une RA-RU choisie aléatoirement.
4. Selon l'issue de cette tentative (succès ou collision), le paramètre  $\beta$  est mis à jour et la fenêtre de contention est éventuellement ajustée.

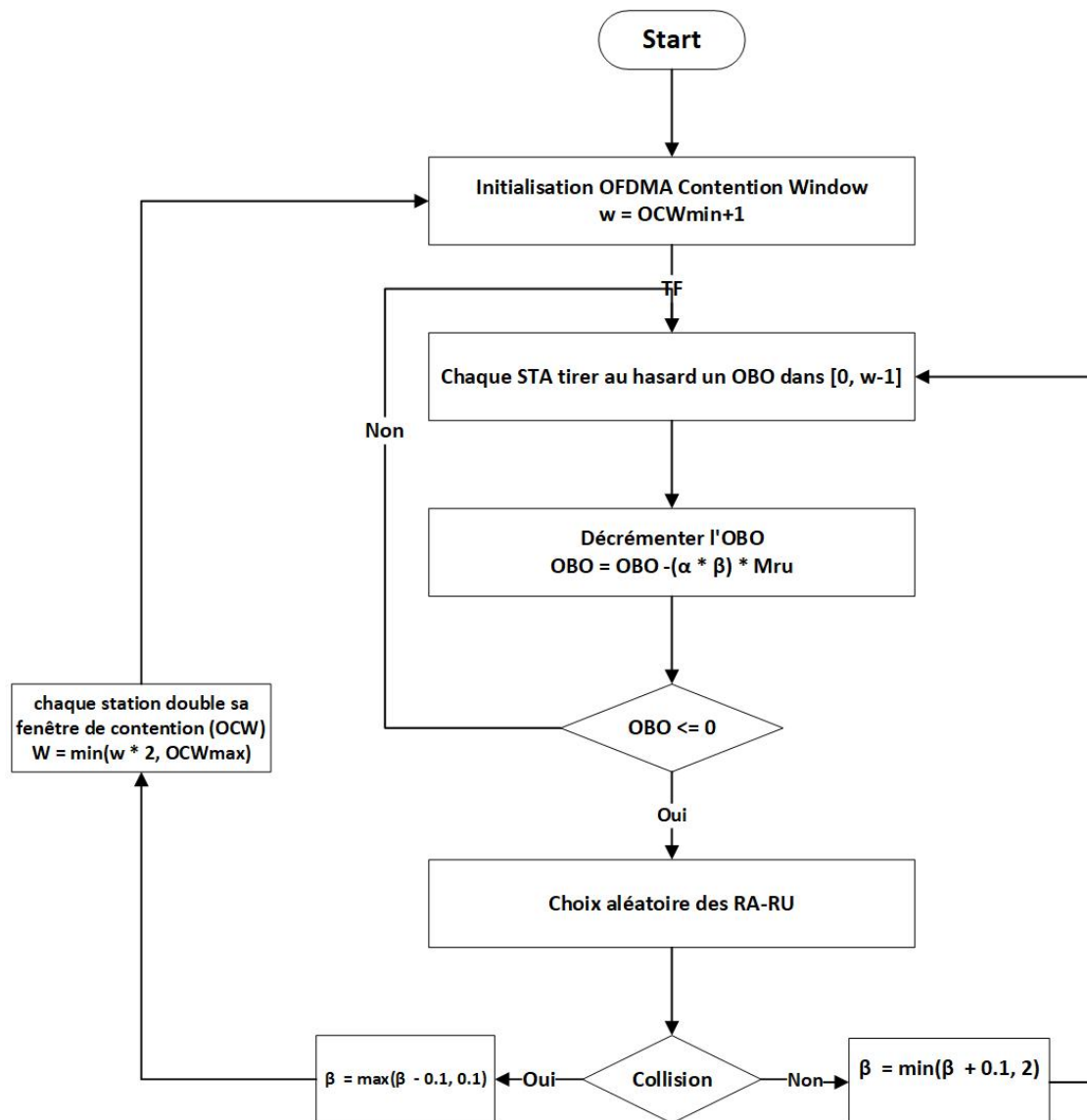


FIGURE 3.1 – Organigramme du processus d'accès par  $\alpha\beta$ -OBO (côté station)

### Organigramme côté AP

La figure 3.2 décrit le rôle du point d'accès dans le contrôle de la congestion. L'AP effectue une analyse périodique du comportement du réseau à travers deux paramètres :

- **PruU** : probabilité de collision sur les unités de ressource.
- **PruE** : probabilité d'unités de ressource restées inactives.

Sur cette base, l'AP ajuste dynamiquement le facteur global  $\alpha$  qui influence le rythme de décrémentation des stations. La valeur ajustée de  $\alpha$  est ensuite transmise aux stations via la TF.

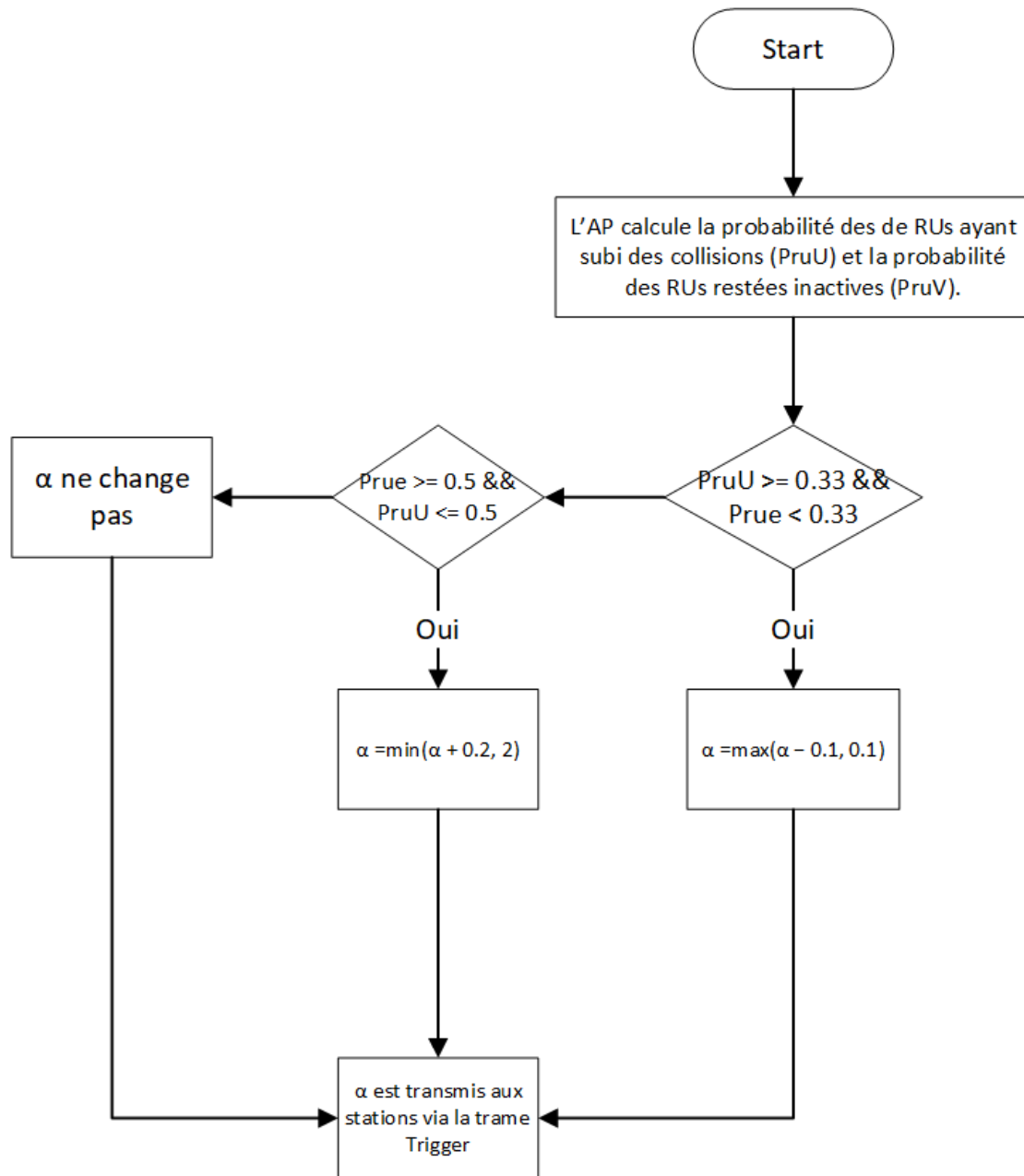
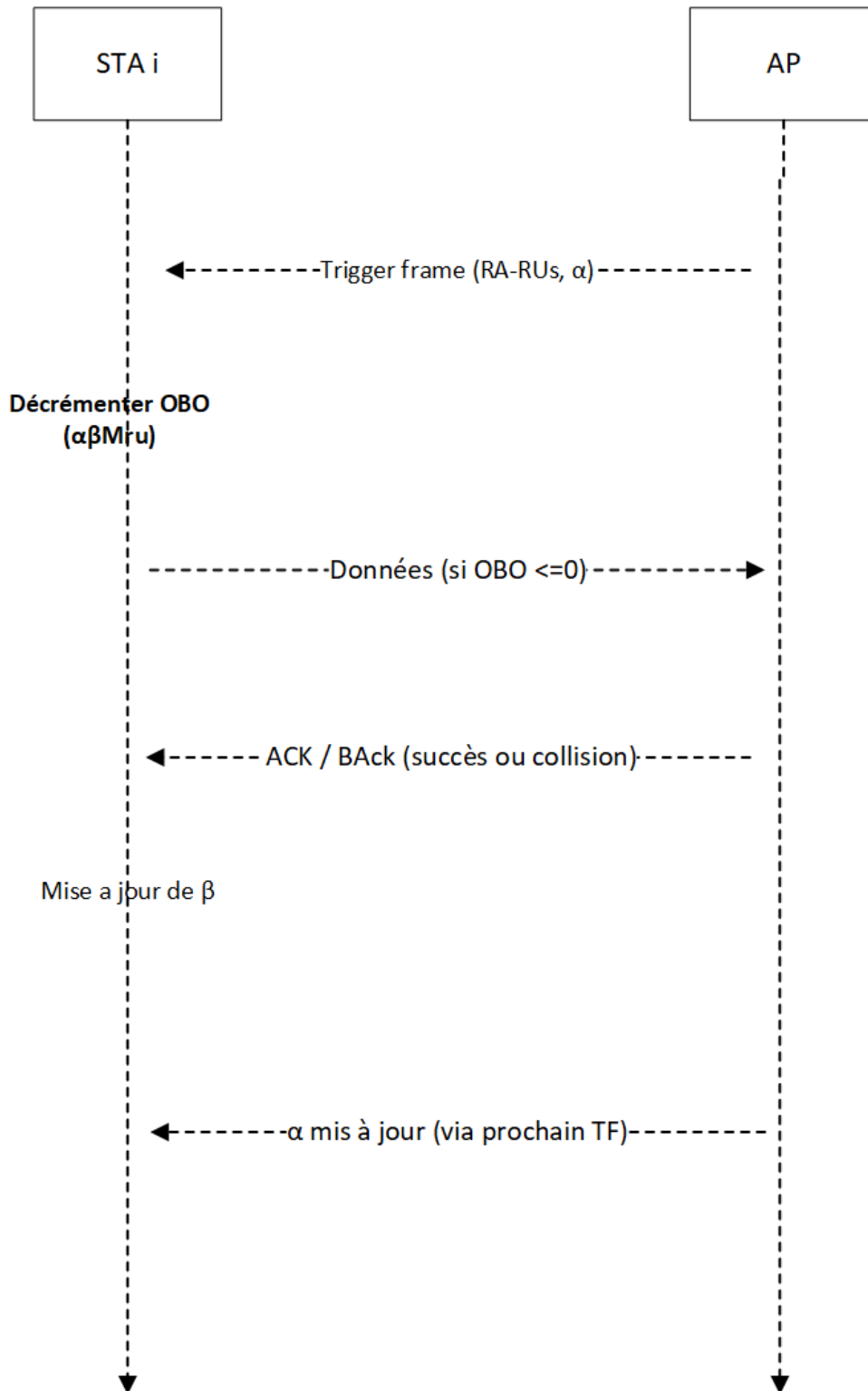


FIGURE 3.2 – Organigramme de la mise à jour du paramètre  $\alpha$  par le point d'accès

### 3.4.1.6 Schéma de fonctionnement

Le schéma 3.3 illustre la séquence des échanges entre l'AP et les STAs dans le cadre du mécanisme amélioré  $\alpha\beta$ -OBO. Il présente les différentes trames de contrôle (Trigger Frame, BAck, etc.) ainsi que les données transmises sur les RA-RUs.

FIGURE 3.3 – Séquence des échanges de trames dans le mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO

### Description de la séquence

#### 1. Trigger Frame :

L'AP envoie périodiquement une trame Trigger contenant :

- Le nombre de RA-RUs disponibles.
- La valeur mise à jour du facteur  $\alpha$ .

— Les identifiants de RU accessibles.

## 2. Décrémentation locale :

— Chaque station décrémente son OBO selon :

$$OBO \leftarrow OBO - (\alpha \times \beta) \times Mru$$

— Si  $OBO \leq 0$ , elle devient éligible à la transmission.

## 3. Transmission Uplink sur une RA-RU :

— Chaque station éligible choisit aléatoirement une RA-RU et transmet ses données.

## 4. Réception et traitement côté AP :

— L'AP reçoit les données. Il détecte :

- Les transmissions réussies (1 station par RU).
- Les collisions (plusieurs stations sur une même RU).
- Les RUs vides.

## 5. Trame de retour (BA ou ACK groupé) :

- L'AP répond avec une trame de type Block ACK ou ACK groupé, indiquant :
  - Les transmissions réussies.
  - L'absence de données (RU vide).
  - L'absence de réponse (RU en collision).

## 6. Mise à jour des paramètres locaux :

- Chaque station met à jour son paramètre  $\beta$  en fonction du succès ou de l'échec de sa tentative.
- L'AP ajuste  $\alpha$  selon  $PruU$  et  $PruE$  pour le cycle suivant.

---

### Algorithm 5 mise à jour du paramètre $\beta$ (Côté STA)

---

OCWmin, OCWmax,  $\alpha$ ,  $\beta_{init} = 1.0$  Accès au canal via RA-RU

#### Initialisation

$w \leftarrow OCWmin + 1$     $OBO \leftarrow \text{rand}(0, w - 1)$     $\beta \leftarrow \beta_{init}$

#### while True do

**while**  $OBO > 0$  **do**  $OBO \leftarrow OBO - (\alpha \times B \times Mtu)$

#### Transmission

Sélection aléatoire d'une RA-RU

Transmettre le paquet

#### if ACK reçu then

$\beta \leftarrow \min(\beta + 0.1, 2.0)$

$w \leftarrow OCWmin + 1$

else

$\beta \leftarrow \max(\beta - 0.1, 0.1)$

$w \leftarrow \min(w \times 2, OCWmax)$

$OBO \leftarrow \text{rand}(0, w - 1)$

---

**Algorithm 6** Mise à jour du paramètre  $\alpha$  (Côté AP)

 $P_{ruU}, P_{ruV}, \alpha$ 
**Calcul des probabilités :**
 $P_{ruU} \leftarrow$  Probabilité que les RUs aient subi des collisions

 $P_{ruV} \leftarrow$  Probabilité que les RUs soient inactives

**Mise à jour de  $\alpha$  :**
**if**  $P_{ruE} \geq 0.5 \ \&\& \ P_{ruU} \leq 0.5$  **then**
 $\alpha \leftarrow \min(\alpha + 0.2, 2.0)$  Augmenter  $\alpha$  (canal congestionné)

**else**
**if**  $P_{ruU} \geq 0.33 \ P_{ruE} < 0.33$  **then**
 $\alpha \leftarrow \max(\alpha - 0.1, 0.1)$  Réduire  $\alpha$  (canal sous-utilisé)

**else**
 $\alpha$  reste inchangé

**Diffusion aux STAs :**

 Inclure  $\alpha$  dans la trame Trigger (champ de gestion)

**3.4.1.7 Déroulement**
**Paramètres initiaux**
~~4~~ Nombre de stations : 4.

 —  $OCW_{min} = 7, OCW_{max} = 31$ .

 —  $\alpha = 1$  initialement.

 —  $\beta = 1$  pour toutes les stations.

 — OBO initial aléatoire dans  $[0, OCW_{min}]$ .

Station	$\beta$	$\alpha$	$OCW_{min}$	OBO initial
STA1	1	1	7	4
STA2	1	1	7	5
STA3	1	1	7	2
STA4	1	1	7	3

**TF1 : 3 RA-RU,  $\alpha = 1$** 

 Décrément :  $OBO \leftarrow OBO - (\alpha \times \beta \times 3)$ 

Station	Calcul	Nouveau OBO
STA1	$4 - (1 \times 1 \times 3)$	1
STA2	$5 - (1 \times 1 \times 3)$	2
STA3	$2 - (1 \times 1 \times 3)$	-1
STA4	$3 - (1 \times 1 \times 3)$	0

**Transmissions :** STA3 et STA4 transmettent sur RA-RU 2  $\rightarrow$  **collision**.

**Mise à jour des STAs :**

 STA3 et STA4 :  $OCW_{min} = \min(2 * OCW_{min}, OCW_{max})$ ;  $OBO = \text{rand}[0,14] \rightarrow$  STA3 = 4,  $\beta = 0.9$ 

 STA4 = 5,  $\beta = 0.9$ 
**Le calcul des statistiques cumulées TF1 par l'AP :**

RUs en collision : 1

RUs Vides : 2

 $P_{ruU} = \frac{1}{3}, P_{ruE} = \frac{2}{3}$ 

 donc :  $\alpha \leftarrow 1.2$  (car  $P_{ruU} \leq 0.5$  et  $P_{ruE} \geq 0.33$ )

**TF2 : 2 RA-RU ,  $\alpha = 1.2$**

Décrément :

Station	Calcul	Nouveau OBO
STA1	$1 - (1.2 \times 1 \times 2)$	-1.4
STA2	$2 - (1.2 \times 1 \times 2)$	-0.4
STA3	$4 - (1.2 \times 0.9 \times 2)$	1.84
STA4	$5 - (1.2 \times 0.9 \times 2)$	2.84

**Transmission :** STA1 transmet sur RA-RU 1 et STA2 transmet sur RA-RU 2  $\Rightarrow$  succès.

**Mise à jour des stations :**

STA1 : succès  $\Rightarrow \beta = 1.1$ , OBO = rand[0,7] = 2

STA2 : succès  $\Rightarrow \beta = 1.1$ , OBO = rand[0,7] = 5

**le calcul des statistiques cumulées TF1 + TF2 par l'AP :**

RUs collision : 1 (TF1) + 0 (TF2) = 1

RUs succès : 0 (TF1) + 2(TF2) = 2

RUs Vides : 2 (TF1) + 0 (TF2) = 2

Total RU : 3 + 2 = 5

$PruU = \frac{1}{5} = 0.2$ ,  $PruE = \frac{2}{5} = 0.4$

$\Rightarrow \alpha = 1,2$  (reste inchangé)

**TF3 : 5 RA-RU ,  $\alpha = 1.2$**

**Paramètres avant TF3 :**

—  $\alpha = 1$  (reinitialisé après TF2).

— Stations mises à jour après TF2 :

Station	$\beta$	$\alpha$	$W$	OBO initial
STA1	1.1	1,2	7	2
STA2	1.1	1,2	7	5
STA3	0.9	1,2	7	1.84
STA4	0.9	1,2	7	2.84

Décrément :  $OBO \leftarrow OBO - (\alpha \cdot \beta \cdot 5)$

Station	Calcul	Nouveau OBO
STA1	$2 - (1.2 \times 1.1 \times 5)$	-4.6
STA2	$5 - (1.2 \times 1.1 \times 5)$	-1.6
STA3	$1.84 - (1.2 \times 0.9 \times 5)$	-3.56
STA4	$2.84 - (1.2 \times 0.9 \times 5)$	-2.56

**Transmissions :**

STA1, STA2, STA3 et STA4 transmettent ( $OBO \leq 0$ ).

**Scénario :**

STA1  $\rightarrow$  RA-RU1 (succès).

STA3  $\rightarrow$  RA-RU3 (succès).

STA4 et STA2  $\rightarrow$  RA-RU4 (collision).

**Résultat** : Collision sur RA-RU4, succès sur RA-RU3 et RA-RU1, 2 RA-RU vides.

**Calcul des statistiques cumulées (TF1+TF2+TF3) :**

- RUs en collision : 1 (TF1) + 0 (TF2) + 1 (TF3) = 2
- RUs succès : 0 (TF1) + 2 (TF2) + 2 (TF3) = 4
- RUs vides : 2 (TF1) + 0 (TF2) + 2 (TF3) = 4
- Total RUs : 3 + 2 + 5 = 10

$$PruU = \frac{2}{10} = 0.2, PruE = \frac{4}{10} = 0.4$$

⇒  $\alpha$  (reste inchangé)

**Mise à jour des STAs :**

- STA2 et STA4 : en collision →  $OCW_{min} = \min(2 \times 7, 31) = 14$ 
  - STA2 : OBO = rand[0,14] = 6,  $\beta = 1$
  - STA4 : OBO = rand[0,14] = 8,  $\beta = 0.8$
- STA3 : succès →  $\beta = 1.1$ , OBO = rand[0,7] = 3
- STA1 : succès →  $\beta = 1.2$ , OBO = rand[0,7] = 4

Station	$\beta$	$\alpha$	$OCW_{min}$	OBO après TF3
STA1	1.2	1.2	14	4
STA2	1	1.2	7	6
STA3	1.1	1.2	7	3
STA4	0.8	1.2	14	8

Le point d'accès ajuste  $\alpha$  dynamiquement à chaque cycle en observant l'usage global des ressources. Ce mécanisme permet d'équilibrer agressivité et contention selon les besoins réels du réseau.

### 3.4.2 Avantages de la solution proposée

- **Optimisation contextuelle** : le facteur  $\alpha$  permet à l'AP d'adapter le comportement des stations selon la charge globale du réseau.
- **Équité dynamique** : le facteur  $\beta$  introduit une mémoire de collision locale permettant à chaque STA de s'ajuster en fonction de ses performances passées (Historique).
- **Amélioration de l'efficacité spectrale** : en ajustant finement la décrémentation du OBO, les risques de collision sont réduits et les ressources OFDMA sont mieux exploitées.
- **Conformité au standard** : aucune modification matérielle ou de structure de trame n'est nécessaire ; la solution reste pleinement compatible avec IEEE 802.11ax.

## 3.5 Environnement de simulation

Pour analyser et valider les performances du protocole UORA amélioré proposé dans ce travail, nous avons eu recours à des simulations réalisées à l'aide de l'environnement **MATLAB**.

**MATLAB** (MATtrix LABoratory), est un logiciel qui a été conçu pour fournir un environnement de calcul numérique de haut niveau. Il est particulièrement performant pour le calcul matriciel car sa structure de

données interne est basée sur les matrices. Il dispose également de grandes capacités graphiques pour, par exemple, la visualisation d'objets mathématiques complexes. Son fonctionnement repose sur un langage de programmation interprété qui permet un développement très rapide. [23]

Dans le cadre de notre étude, nous avons développé un ensemble de scripts MATLAB pour simuler le fonctionnement du protocole UORA amélioré. Le comportement des STAs, la gestion du compteur OBO, l'allocation des RA-RUs et la gestion des collisions ont été entièrement modélisés. Chaque station agit de manière autonome, en se basant sur les règles du protocole et les états dynamiques du canal. L'AP assure la diffusion des TFs et la gestion des RA-RUs disponibles.

### 3.5.1 Métriques d'évaluation

Afin d'évaluer l'efficacité de notre mécanisme proposé, plusieurs indicateurs de performance ont été mesurés :

**Débit moyen global du réseau :** Il s'agit de la somme des débits des stations ayant réussi à transmettre lors de chaque cycle, divisée par le nombre total de cycles.

Dans notre simulation, pour chaque RU, on enregistre la somme des débits des stations ayant transmis avec succès pendant 1000 cycles, puis on divise cette somme par 1000. La moyenne est ensuite agrégée sur l'ensemble des RUs ( $RU = \{1, 2, \dots, 9\}$ ).

**Nombre moyen de collisions :** Cette métrique correspond au nombre de stations ayant tenté d'accéder simultanément à une même RU, entraînant un échec de transmission.

Dans notre simulation, Pour chaque RU, on calcule le nombre total de collisions observées sur les 1000 cycles, puis on en déduit la moyenne.

**Taux d'allocation des ressources :** Il représente le pourcentage des RUs utilisées (succès ou collision) par rapport au nombre total de RUs disponibles. La formule utilisée est :

$$\text{Taux d'utilisation des RU} = \left( \frac{\sum_{\text{cycles}} RU_{\text{utilisés}}}{\sum_{\text{cycles}} RU_{\text{disponibles}}} \right) \times 100\%$$

Cette métrique permet d'estimer le taux d'occupation du canal et l'efficacité de l'allocation dynamique des ressources.

La combinaison de ces métriques permettent d'avoir une vue globale sur la qualité, l'efficacité et la robustesse de la solution proposée face à différents niveaux de densité réseau.

### 3.5.2 Paramètres et valeurs de simulation

Ce tableau présente les paramètres et leurs valeurs utilisés lors de la simulation.

Paramètre	Valeur
Nombre de stations (STA)	50
Nombre d'unités de ressource (RU)	[1,9]
OCWmin	7
OCWmax	31
Taille du MPDU	[1,11]*1000 octet
Nombre de cycles (Cmax)	1000

TABLE 3.1 – Paramètres et valeurs utilisés dans l'environnement de simulation

### 3.5.3 Scénario de simulation

- Le réseau dispose d'un seul **AP**, et **50 STAs**.
- **Disponibilité des données UL** : Toutes les STAs ont des données UL à transmettre.
- **Taille des données MPDU** : Toutes les données MPDU sont de taille variable générée aléatoirement avec **RANDOM(1 :11)\*1000**.
- **Pertes de données** :
  - Considérer un canal idéal.
  - Quantifier le taux de perte lié seulement au protocole.

### 3.5.4 Comparaison des performances : UORA vs $\alpha\beta$ -OBO

Afin d'évaluer l'efficacité de la solution proposée, nous avons réalisé une série de simulations en la comparant avec le mécanisme standard UORA, avec les trois métriques précédemment précisées.

#### 3.5.4.1 Comparaison des performances en fonction du nombre de STA

Les figures suivantes présentent l'évolution du nombre moyen de collisions, du taux d'allocation des ressources et du débit moyen par cycle, en fonction du nombre de STAs. Les performances de l'UORA standard (en rouge) sont comparées à celles de notre solution  $\alpha\beta$ -OBO (en bleu).

La figure 3.4 illustre l'évolution du **nombre moyen de collisions par cycle** en fonction du nombre de STAs. L'axe des abscisses indique le nombre de STAs (de 10 à 50), tandis que l'axe des ordonnées représente le nombre moyen de collisions par cycle.

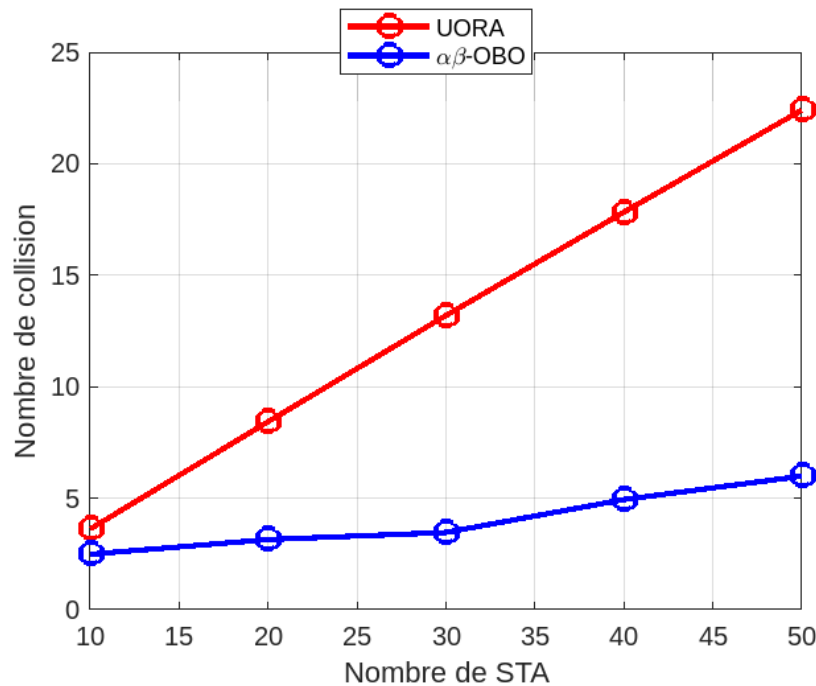


FIGURE 3.4 – Évolution du nombre moyen de collisions par cycle en fonction du nombre de stations

### Résultats observés

#### — UORA standard :

- Montre une croissance quasi-linéaire et rapide du nombre moyen de collisions dès que le nombre de STAs augmente.
- Le phénomène de saturation des ressources partagées est clair : plus il y a de STAs, plus la probabilité de collisions est forte.
- À partir de 40 STAs, les collisions dépassent 14 par cycle, confirmant l'inefficacité du UORA standard en environnement dense.

#### — $\alpha\beta$ -OBO :

- Le nombre moyen de collisions reste faible et presque stable, même avec l'augmentation du nombre de STAs.
- À 50 STAs, on observe environ 3 collisions par cycle, soit 80 % de moins que UORA standard.
- Cette courbe aplatie traduit une meilleure résilience et une capacité d'adaptation dynamique aux conditions de densité réseau.

### Analyse technique

- La différence majeure provient de l'introduction des paramètres dynamiques  $\alpha$  et  $\beta$  dans le  $\alpha\beta$ -OBO, qui :
  - Ajustent la probabilité de participation des STAs au cycle de contention en fonction de la charge du réseau.
  - Réduisent ainsi la compétition directe pour les RUs, limitant les accès simultanés.
- Cela signifie que le protocole  $\alpha\beta$ -OBO :
  - Équilibre la charge et module dynamiquement l'accès aux ressources.
  - Évite la saturation du canal, ce qui est particulièrement critique pour les applications médicales nécessitant une fiabilité élevée et une faible latence.

La figure 3.5 illustre l'évolution du **débit moyen par cycle** en fonction du nombre STAs. L'axe des abscisses indique le nombre de STAs (de 10 à 50), tandis que l'axe des ordonnées représente le débit moyen par cycle, exprimé en octets/cycle.

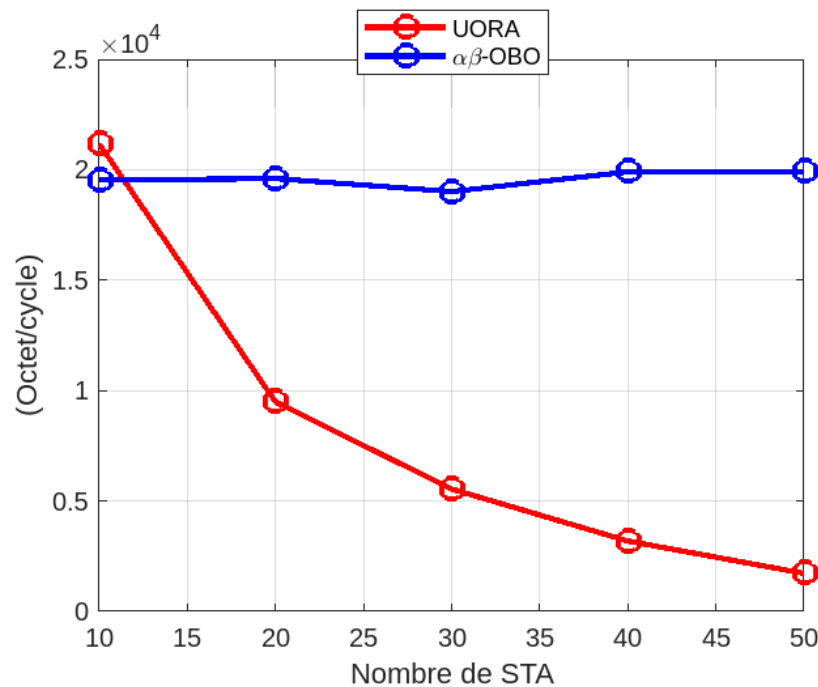


FIGURE 3.5 – Débit moyen par cycle en fonction du nombre de STAs (en octets/cycle)

### Résultats observés

#### — UORA standard :

- Montre une diminution forte et continue du débit moyen lorsque le nombre de STAs augmente.
- À 10 STAs, le débit atteint environ  $2 \times 10^4$  octets/cycle, mais chute à seulement 3000 octets/cycle à 50 STAs.
- Cette baisse significative traduit une perte d'efficacité de transmission due à l'augmentation des collisions et de la contention pour les ressources.

#### — $\alpha\beta$ -OBO :

- Affiche un débit moyen par cycle élevé et quasiment constant, proche de  $2 \times 10^4$  octets/cycle, indépendamment du nombre de STAs.
- Cette stabilité met en évidence une capacité à maintenir des performances élevées même lorsque le réseau est fortement sollicité.

### Analyse technique

- La différence de comportement entre les deux courbes s'explique par l'utilisation des paramètres dynamiques  $\alpha$  et  $\beta$  dans le  $\alpha\beta$ -OBO, qui :
  - Régulent intelligemment la probabilité de participation des stations en fonction de la charge réseau.
  - Réduisent la compétition pour les RUs, ce qui limite les collisions et assure une meilleure qualité de transmission.
- En conséquence, le protocole  $\alpha\beta$ -OBO :

- Maintient un débit stable et élevé, essentiel pour garantir une continuité de service pour les applications médicales critiques.
- Améliore l'efficacité globale du réseau, même dans des environnements denses et complexes.

Ainsi, cette analyse confirme que le mécanisme  $\alpha\beta$ -UORA offre une transmission plus stable et efficace par rapport au UORA standard, répondant ainsi aux besoins de fiabilité et de performance dans les réseaux médicaux intelligents.

La figure 3.6 illustre l'évolution du **taux d'allocation moyen par cycle** en fonction du nombre de stations. L'axe des abscisses indique le nombre de STAs (de 10 à 50), tandis que l'axe des ordonnées représente le taux d'allocation moyen des RUs par cycle, exprimé en pourcentage.

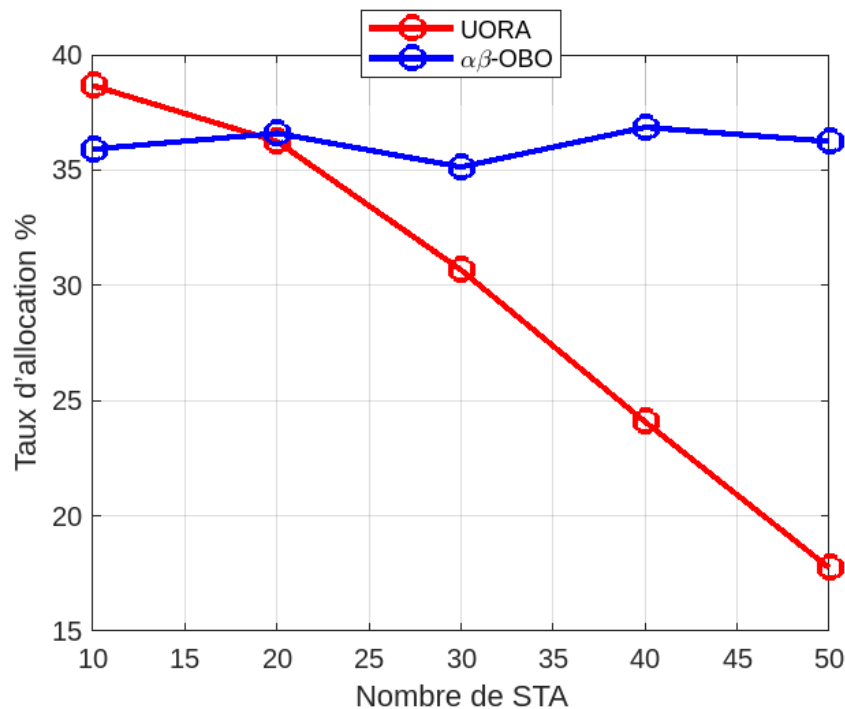


FIGURE 3.6 – Taux d'allocation moyen par cycle en fonction du nombre de STAs

### Résultats observés

- **UORA standard :**
  - Montre une diminution marquée du taux d'allocation des RUs à partir de 30 STAs.
  - À 50 STAs, le taux chute à environ 15 %, traduisant une baisse notable de l'efficacité dans l'utilisation des ressources partagées.
- **$\alpha\beta$ -OBO :**
  - Affiche un taux d'allocation quasiment constant et stable, oscillant entre 35 % et 37 %, même lorsque le nombre de STAs augmente.
  - Cette stabilité démontre la robustesse et la capacité d'adaptation dynamique du mécanisme proposé, qui parvient à maintenir une allocation efficace des ressources.

### Analyse technique

- Cette différence de comportement est directement liée à l'intégration des paramètres dynamiques  $\alpha$  et  $\beta$  dans le  $\alpha\beta$ -OBO, qui :

- Ajustent intelligemment la participation des stations en fonction de la charge réseau.
- Évitent la sous-utilisation des ressources en maintenant une allocation optimale même en présence d'un nombre élevé de STAs.
- Par conséquent, le protocole  $\alpha\beta$ -OBO :
  - Améliore significativement l'efficacité globale d'utilisation des RUs.
  - Garantit une meilleure continuité de service et une qualité de transmission optimale, indispensables pour les applications médicales sensibles.

Ces résultats confirment que le mécanisme  $\alpha\beta$ -UORA proposé améliore considérablement l'utilisation des ressources disponibles, même dans des environnements denses et fortement sollicités.

### 3.5.4.2 Comparaison des performances en fonction du nombre de RUs (STA = 50)

Afin d'approfondir l'évaluation de notre solution  $\alpha\beta$ -UORA, une seconde série de simulations a été réalisée. Contrairement à la première expérimentation où le nombre de STAs variait, ici, nous avons fixé le nombre de stations à 50 et avons fait varier les RUs disponibles, de 1 à 9. Chaque configuration a été simulée pendant 1000 cycles. Les métriques analysées sont identiques à la première série : le nombre moyen de collisions, le taux d'allocation moyen et le débit moyen par cycle.

La figure 3.7 présente l'évolution du nombre moyen de collisions en fonction du nombre de RUs disponibles.

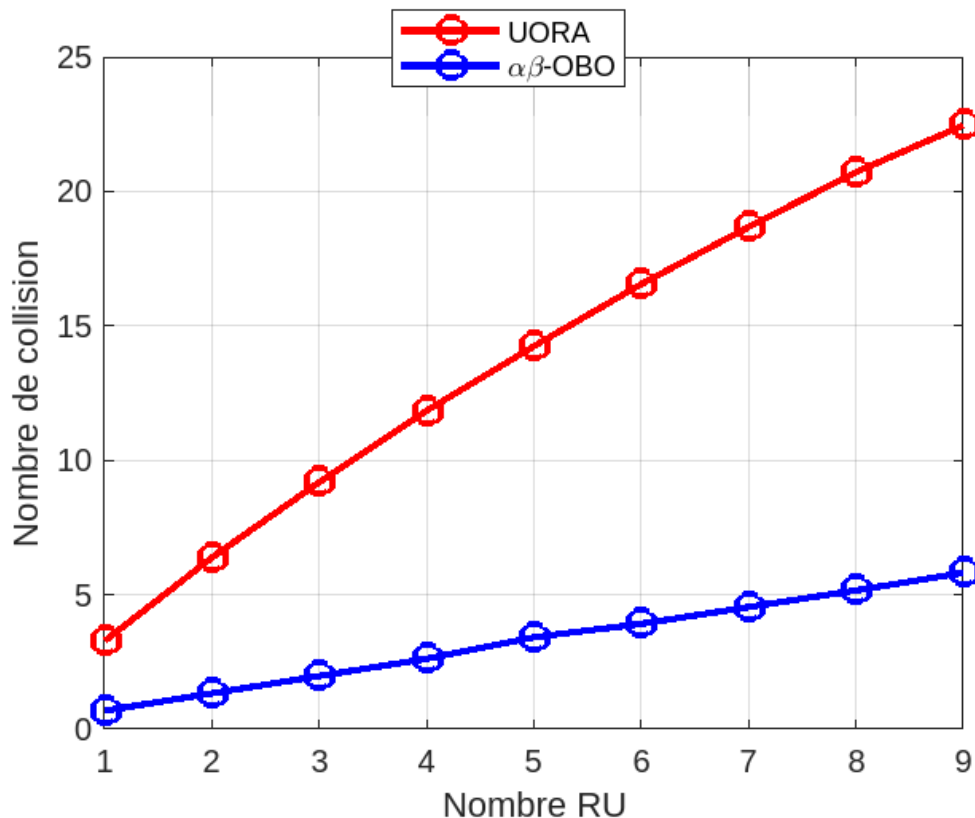


FIGURE 3.7 – Evolution du nombre moyen de collisions en fonction du nombre de RUs

### Résultats observés

- **UORA standard** :
  - Une croissance quasi-linéaire du nombre de collisions avec l'augmentation des RUs.
  - Atteint plus de 20 collisions par cycle pour 9 RUs.
  - Cette dégradation s'explique par une allocation non optimisée des ressources.
- **$\alpha\beta$ -OBO** :
  - Maintient un nombre de collisions remarquablement stable et bas.
  - Ne dépasse jamais 6 collisions par cycle.

### Analyse technique

La différence de performance provient fondamentalement de :

- Dans **UORA standard** :
  - Génère des concentrations aléatoires de STAs.
  - Exploite mal les ressources disponibles.
- **$\alpha\beta$ -OBO** :
  - Adaptent dynamiquement la probabilité d'accès.
  - Équilibrant la répartition entre les RUs.

La figure 3.8 traduit le **taux d'allocation moyen** des RUs par cycle en fonction du nombre de RUs.

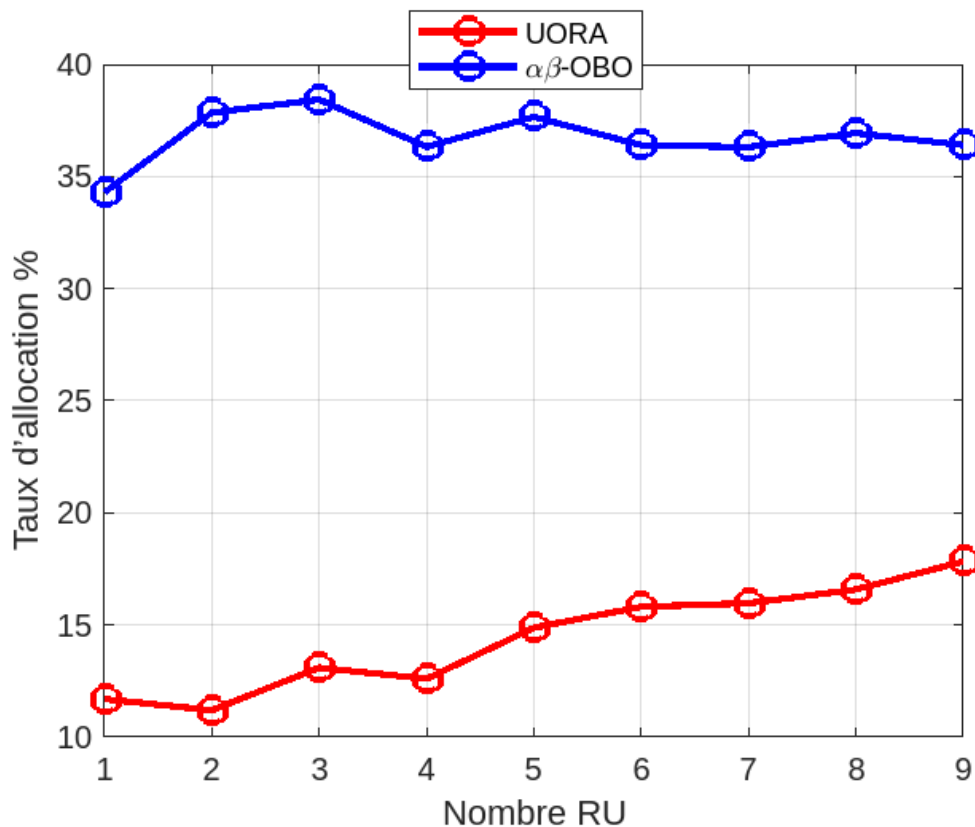


FIGURE 3.8 – Taux d'allocation moyen des RUs par cycle en fonction du nombre de RUs.

### Résultats observés

- **UORA standard** :
  - Taux d'allocation initial très faible (11% pour 1 RU).
  - Croissance limitée à 18% pour 9 RUs.
  - Traduit une sous-utilisation chronique des ressources.
- **$\alpha\beta$ -OBO** :
  - Maintient un taux stable entre 35% et 38%.
  - Démonstre une exploitation optimale des RUs.
  - Réduit considérablement le gaspillage de ressources.

### Analyse technique

Cette différence s'explique par :

- Dans **UORA standard** :
  - Les collisions répétées rendent les RUs inutilisables.
  - Absence de mécanisme de répartition intelligente.
- Dans  **$\alpha\beta$ -OBO** :
  - Paramètres dynamiques ajustant la probabilité d'accès.
  - Équilibrage automatique de la charge entre RUs.
  - Minimisation des RUs laissées vacantes.

Enfin, la figure 3.9 compare le **débit moyen obtenu par cycle** en fonction du nombre de RUs pour les deux mécanismes.

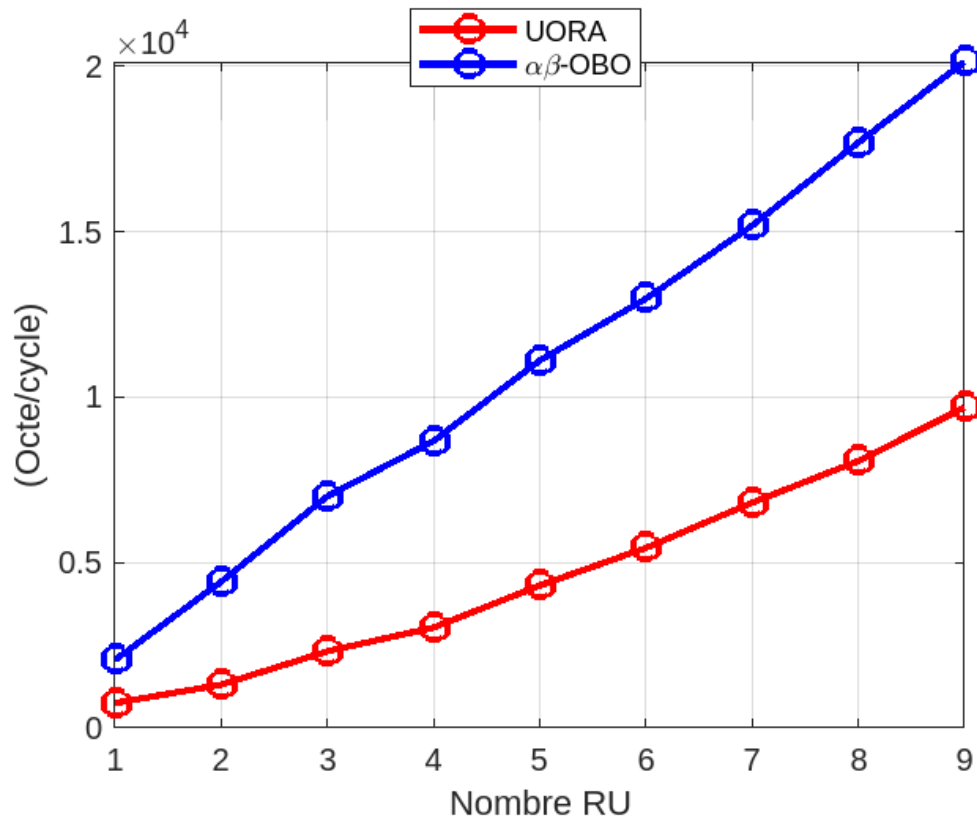


FIGURE 3.9 – Débit moyen obtenu par cycle en fonction du nombre de RUs

### Résultats observés

- **UORA standard** :
  - Croissance limitée du débit.
  - Atteint seulement 10000 octets/cycle pour 9 RUs.
- **$\alpha\beta$ -OBO** :
  - Augmentation linéaire et soutenue du débit.
  - Dépasse les 20000 octets/cycle à 9 RUs.

### Analyse technique

TABLE 3.2 – Comparaison des débits obtenus

Métrique	UORA standard	$\alpha\beta$ -UORA
Débit minimal	2000 octets/cycle	5000 octets/cycle
Débit maximal	10000 octets/cycle	20000 octets/cycle
Pente de croissance	Faible	Forte

Cette divergence s'explique par :

- Dans **UORA standard** :
  - Gaspillage de bande passante dû aux collisions.
  - Sous-utilisation chronique des RUs disponibles.
- Dans  **$\alpha\beta$ -OBO** :
  - Une utilisation plus efficace et homogène des RUs.
  - Une diminution significative des périodes d'inactivité.

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et évalué le mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO, une extension adaptative et dynamique du processus de backoff pour l'accès aléatoire en montée dans les réseaux Wi-Fi 7. Cette solution repose sur l'introduction de deux paramètres clés :  $\alpha$  et  $\beta$ . L'objectif principal est de réduire les collisions, d'améliorer l'efficacité d'allocation des RUs et d'assurer une meilleure continuité de service, tout en maintenant la compatibilité avec les standards existants.

Les résultats des simulations ont permis de démontrer les avantages significatifs de la solution proposée par rapport au mécanisme UORA standard. En particulier, une réduction de plus de 80 % du nombre moyen de collisions a été observée en environnement dense (jusqu'à 50 STAs). De plus, le mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO parvient à maintenir un débit moyen par cycle élevé et quasiment constant, même lorsque le nombre de stations augmente, alors que le débit du UORA standard chute rapidement. Cette capacité à préserver un débit stable et soutenu est essentielle pour répondre aux besoins de transmission des données médicales sensibles, garantissant ainsi la qualité de service et la réactivité du réseau.

Ces résultats confirment la capacité du mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO à réguler dynamiquement l'accès aux ressources, à équilibrer les charges et à éviter la saturation du canal, répondant ainsi aux besoins critiques des applications médicales connectées. En outre, l'étude met en lumière la pertinence de l'adaptation dynamique des paramètres de contention pour améliorer la performance globale des réseaux sans fil de nouvelle génération.

# Conclusion générale

Face aux exigences croissantes en matière de fiabilité, de rapidité dans les réseaux sans fil dédiés aux environnements critiques, le Wi-Fi 7 s'impose comme une réponse technologique de premier plan. Dans ce mémoire, nous avons étudié son adaptation aux besoins spécifiques des applications médicales basées l'IoT, en mettant l'accent sur l'efficacité de l'accès aléatoire en montée dans des contextes fortement sollicités.

Après avoir analysé les évolutions apportées par le standard IEEE 802.11be, notamment en termes de bande passante, de modulation et de fonctionnement multi-liaison, notre étude a mis en évidence les limites du protocole UORA standard, peu adapté aux contraintes des réseaux médicaux intelligents. Pour pallier ces insuffisances, nous avons conçu et proposé une nouvelle approche : le mécanisme  $\alpha\beta$ -OBO. Celui-ci repose sur une adaptation dynamique et contextuelle du OBO, basée sur deux paramètres clés : la charge globale du réseau ( $\alpha$ ) et la mémoire de collision de chaque station ( $\beta$ ). Cette stratégie vise à améliorer la prise de décision locale tout en maintenant une vision globale de l'état du réseau.

Les résultats obtenus à travers les simulations ont démontré des gains notables :

- Une réduction significative des collisions, notamment pour les flux critiques en temps réel.
- Une allocation plus stable et homogène des RUs .
- Une augmentation du débit moyen et une meilleure continuité de service.

Ces améliorations traduisent une meilleure qualité de service, une plus grande réactivité du système et une gestion des ressources plus fine et adaptée aux exigences des systèmes médicaux connectés.

Dans la continuité de ce travail, plusieurs axes de développement et de perfectionnement méritent d'être explorés. L'un des plus prometteurs réside dans l'intégration de l'intelligence artificielle, notamment à travers l'apprentissage automatique et le reinforcement learning. Ces techniques pourraient permettre d'anticiper dynamiquement les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  en fonction des fluctuations de la charge réseau, assurant ainsi une adaptation en temps réel du mécanisme de backoff et une allocation optimale des ressources, même dans les environnements denses.

Par ailleurs, la classification et la hiérarchisation des flux constituent un enjeu majeur, en particulier dans les applications médicales critiques. Il sera essentiel de mettre en place des mécanismes automatiques pour identifier et prioriser les données sensibles (par exemple, les signaux vitaux ou les alertes médicales) par rapport aux flux moins critiques (tels que les mises à jour logicielles). Cette différenciation pourrait être soutenue par les points d'accès, qui réserveraient dynamiquement des RUs spécifiques aux dispositifs médicaux prioritaires, réduisant ainsi la latence et garantissant la qualité des soins.

Enfin, la validation de la solution proposée en milieu réel représente une étape déterminante. Le déploiement pilote de l'approche  $\alpha\beta$ -OBO, avec des capteurs IoT et des équipements médicaux critiques dans un environnement hospitalier, permettra de confirmer les performances observées en simulation et de recueillir des données essentielles pour l'optimisation finale de la solution.

En définitive, ce travail confirme la pertinence d'une approche adaptative et différenciée de l'accès radio dans les réseaux Wi-Fi de nouvelle génération. Il ouvre des perspectives de recherche riches et variées, à la croisée des avancées en réseaux sans fil et des besoins critiques des infrastructures médicales intelligentes.

# Bibliographie

- [1] S. CHAUHAN, A. SHARMA, S. PANDEY, K. N. RAO et P. KUMAR, "IEEE 802.11 be : A review on Wi-Fi 7 use cases," in *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)*, IEEE, 2021, p. 1-7.
- [2] WI-FI ALLIANCE, *Wi-Fi 7 - Next Generation Wi-Fi Innovation*, Consulté le 05 mars 2025, 2025. adresse : <https://www.wi-fi.org/who-we-are/current-work-areas#Wi-Fi%207>.
- [3] E. KHOROV, I. LEVITSKY et I. F. AKYILDIZ, "Current status and directions of IEEE 802.11 be, the future Wi-Fi 7," *IEEE access*, t. 8, p. 88 664-88 688, 2020.
- [4] D. LOPEZ-PEREZ, A. GARCIA-RODRIGUEZ, L. GALATI-GIORDANO, M. KASSLIN et K. DOPPLER, "IEEE 802.11 be extremely high throughput : The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11 ax," *IEEE Communications Magazine*, t. 57, n° 9, p. 113-119, 2019.
- [5] zyxel NETWORKS, "What Are the Key Technologies in Wi-Fi 7?," 2023, Consulté le 17 Mars 2025. adresse : <https://www.zyxel.com/fr/fr/blogs/what-are-the-key-technologies-in-wifi-7>.
- [6] X. ZHOU, *Wi-Fi 7*, 2025. adresse : <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100331426>.
- [7] WIFIRST, *Tout savoir sur le Wi-Fi 7*, Consulté le 18 mars 2025, 2023. adresse : <https://www.wifirst.com/fr/blog/tout-savoir-sur-le-wifi-7>.
- [8] C. DENG, X. FANG, X. HAN et al., "IEEE 802.11 be Wi-Fi 7 : New challenges and opportunities," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, t. 22, n° 4, p. 2136-2166, 2020.
- [9] TP-LINK. "Qu'est-ce que le fonctionnement multi-liens (MLO) du WiFi 7?" Consulté le 19 février 2025. (), adresse : <https://www.tp-link.com/fr/blog/1067/qu-est-ce-que-le-fonctionnement-multi-liens-mlo-du-wifi-7>.
- [10] FORTINET. "Qu'est-ce que l'IoT? Définition de l'Internet des objets." Consulté le 9 mars 2025. (2025), adresse : <https://www.fortinet.com/fr/resources/cyberglossary/iot>.
- [11] IP SYSTÈMES, "Qu'est-ce qu'un capteur connecté IoT?," 2025, Consulté le 9 mars 2025. adresse : <https://www.ip-systemes.com/quest-ce-quun-capteur-connect-iot.html>.
- [12] VISIATIV, *Définition de l'Internet des objets (IoT)*, Consulté le 18 mars 2025, 2024. adresse : <https://www.visiativ.com/definition/iot/>.
- [13] C. LI, J. WANG, S. WANG et Y. ZHANG, "A review of IoT applications in healthcare," *Neurocomputing*, t. 565, p. 127 017, 2024.
- [14] NOVALYO. "WiFi 7 dans la santé : Révolution numérique." Consulté le 9 mars 2025. (2025), adresse : [https://fr.linkedin.com/posts/novalyo\\_wifi-7-dans-la-sant%C3%A9-r%C3%A9volution-num%C3%A9rique-activity-7150736591139852288-bxGP](https://fr.linkedin.com/posts/novalyo_wifi-7-dans-la-sant%C3%A9-r%C3%A9volution-num%C3%A9rique-activity-7150736591139852288-bxGP).
- [15] CISCO. "What is OFDMA in Wi-Fi 6?" Consulté le 10 avril 2025. (), adresse : <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html>.

- [16] M. Y. SALOUA BRAHMI, "Towards a Fair Allocation and Effective Utilization of Resource Units in Multi-User WLANs-based OFDMA technology," *Elsevier*, 2023.
- [17] Y. A. QADRI, ZULQARNAIN, A. NAUMAN, A. MUSADDIQ, E. GARCIA-VILLEGAS et S. W. KIM, "Preparing wi-fi 7 for healthcare internet-of-things," *Sensors*, t. 22, n° 16, p. 6209, 2022.
- [18] Y. KIM, L. KWON et E.-C. PARK, "OFDMA backoff control scheme for improving channel efficiency in the dynamic network environment of IEEE 802.11 ax WLANs," *Sensors*, t. 21, n° 15, p. 5111, 2021.
- [19] K. KOSEK-SZOTT et K. DOMINO, "An efficient backoff procedure for IEEE 802.11 ax uplink OFDMA-based random access," *IEEE Access*, t. 10, p. 8855-8863, 2022.
- [20] X. ZHU, Y. ZHONG, W. HE, L. WANG et T. HAN, "Uplink OFDMA Random Access Mechanism Based on Adaptive Modulation Backoff Step," in *2024 12th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications (ICWOC)*, IEEE, 2024, p. 113-117.
- [21] T. UWAI, T. MIYAMOTO, Y. NAGAO, L. LANANTE, M. KUROSAKI et H. OCHI, "Adaptive backoff mechanism for OFDMA random access with finite service period in IEEE802. 11ax," in *2016 IEEE conference on standards for communications and networking (CSCN)*, IEEE, 2016, p. 1-6.
- [22] A. REHMAN, F. B. HUSSAIN, R. ALI et T. KHURSHAD, "Collision-Based Up-Link OFDMA Random Access Mechanism for Wi-Fi 6," *IEEE Access*, t. 11, p. 117 094-117 109, 2023.
- [23] B. AUDOUX. "Introduction à la programmation en Matlab." Consulté le 18 mai 2025. (), adresse : [https://www.i2m.univ-amu.fr/perso/benjamin.audoux/enseignements\\_old/L1\\_labo\\_programmation\\_IntroMatlab.pdf](https://www.i2m.univ-amu.fr/perso/benjamin.audoux/enseignements_old/L1_labo_programmation_IntroMatlab.pdf).
- [24] WIKIPEDIA. "Wi-Fi 7." Consulté le 05 mars 2025. (4 mars 2025), adresse : [https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi\\_7](https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi_7).
- [25] C. LI, J. WANG, S. WANG et Y. ZHANG, "A review of IoT applications in healthcare," *Neurocomputing*, t. 565, p. 127 017, 2024.
- [26] A. GARCIA-RODRIGUEZ, D. LÓPEZ-PÉREZ, L. GALATI-GIORDANO et G. GERACI, "IEEE 802.11 be : Wi-Fi 7 strikes back," *IEEE Communications Magazine*, t. 59, n° 4, p. 102-108, 2021.
- [27] ZYXEL NETWORKS, *Understanding the Benefits of WiFi 7*, Consulté le 19 février 2025, 2023. adresse : [https://www.zyxel.com/sites/zyxel/files/library/assets/solutions/wifi7/Zyxe\\_Networks\\_WiFi7\\_White\\_Paper.pdf](https://www.zyxel.com/sites/zyxel/files/library/assets/solutions/wifi7/Zyxe_Networks_WiFi7_White_Paper.pdf).
- [28] IO THINK SOLUTIONS, *L'IoT dans le secteur de la santé*, Consulté le 20 février 2025, 2025. adresse : <https://iothink-solutions.com/fr/iot-secteur-sante>.
- [29] WI-FI ALLIANCE AND FACULTY OF MEDICINE RAMATHIBODI HOSPITAL, MAHIDOL, *Principales caractéristiques et avantages du Wi-Fi à 6 GHz dans les soins de santé*, Consulté le 23 février 2025, 2025. adresse : <https://www.wi-fi.org/beacon/matt-pekaraske/wi-fi-7-market-momentum-6-ghz-wi-fi-empowers-connectivity-in-crucial>.

## Résumé

Dans un contexte où les applications médicales connectées deviennent de plus en plus critiques, garantir une communication sans fil fiable et efficace constitue un enjeu majeur. Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en étudiant les capacités du Wi-Fi 7 à répondre aux besoins spécifiques des systèmes médicaux basés sur l'IoT.

L'objectif principal de ce travail est d'analyser le fonctionnement du mécanisme d'accès aléatoire UORA intégré au Wi-Fi 7, et d'en proposer une amélioration adaptée aux environnements denses, typiques des réseaux hospitaliers. Une approche nouvelle, dénommée  $\alpha\beta$ -OBO, a été développée. Elle introduit une pondération dynamique du processus de backoff, tenant compte à la fois de la charge réseau, et de l'historique d'activité des stations.

La méthodologie repose sur une modélisation précise des mécanismes MAC du Wi-Fi 7, suivie de simulations comparatives visant à évaluer les performances de la solution proposée face au protocole standard. Les résultats obtenus permettent de valider la pertinence de l'approche, notamment en termes de stabilité des allocations de ressources et d'amélioration du débit global.

Ce travail contribue à l'optimisation des réseaux sans fil pour les dispositifs médicaux intelligents et ouvre des perspectives concrètes pour la conception de protocoles plus adaptatifs et sensibles au contexte d'utilisation.

**Mots-clés :** Wi-Fi 7, IoT médical, UORA, accès aléatoire, OFDMA, protocole adaptatif,  $\alpha\beta$ -OBO.

## Abstract

In a context where connected medical applications are becoming increasingly critical, ensuring reliable and efficient wireless communication constitutes a major challenge. This thesis is part of this issue by studying the capabilities of Wi-Fi 7 to meet the specific needs of medical systems based on IoT.

The main objective of this work is to analyze the functioning of the UORA random access mechanism integrated into Wi-Fi 7, and to propose an improvement adapted to dense environments, typical of hospital networks. A new approach, called  $\alpha\beta$ -OBO, has been developed. It introduces a dynamic weighting of the backoff process, taking into account both the network load, and the activity history of the stations.

The methodology is based on a precise modeling of the MAC mechanisms of Wi-Fi 7, followed by comparative simulations aimed at evaluating the performance of the proposed solution against the standard protocol. The results obtained validate the relevance of the approach, particularly in terms of stability of resource allocation, and improvement of overall throughput.

This work contributes to the optimization of wireless networks for intelligent medical devices and opens concrete perspectives for the design of more adaptive and context-aware communication protocols.

**Keywords :** Wi-Fi 7, medical IoT, UORA, random access, OFDMA, adaptive protocol,  $\alpha\beta$ -OBO.