



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

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

---

## Département de Recherche Opérationnelle

Mémoire Présenté pour L'obtention du Diplôme de Master  
en Mathématiques Appliquées

Spécialité : Optimisation et Fiabilité des Réseaux de Communication

---

## Protocoles MAC dans les réseaux FANETs

---

Présenté par :  
**RABHI Elissa**  
**AMGHAR Cylia**

Sous la direction de : **Pr S. Boulfekhar**  
Et de : **Dr N. Khimoum**

Défendu le 29/06/2025, devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> N. Touche	Professeur	Président du jury	UAMB - Bejaia.
M <sup>me</sup> O.Lekadir	Professeur	Examinatrice	UAMB - Bejaia
M <sup>lle</sup> M.Talantikit	Doctorante	Examinatrice	UAMB - Bejaia.

**Année Universitaire 2024 – 2025**

# Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre reconnaissance infinie au bon Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a accordé la force, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadrants, **M<sup>me</sup> BOULFEKHAR Samra** et **M<sup>r</sup> KHIMOUM Nouredine**, pour leur accompagnement bienveillant, leurs conseils avisés et leur disponibilité constante, qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à **M<sup>me</sup> BACHIRI Lina**, pour son soutien particulier et son implication dans la partie modélisation de notre mémoire. Son expertise et sa générosité ont été d'un apport considérable, et nous lui en sommes sincèrement reconnaissantes.

Nous remercions chaleureusement les **membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail.

On n'oublie pas nos **chers parents**, véritables piliers de force et de compréhension, pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nos remerciements vont à toutes les personnes, proches ou lointaines, qui nous ont soutenues par un mot, un geste ou simplement leur présence. Chacune d'elles a contribué, à sa manière, à la concrétisation de ce travail. Merci pour votre soutien précieux et indéfectible.

**Elissa & Cylia**

# Dédicace

À ceux envers qui les mots seront toujours trop faibles pour traduire l'amour sincère que je leur porte, je dédie ce modeste travail avec toute ma reconnaissance.

## **À mes parents,**

Ce mémoire est le fruit de votre amour inconditionnel et de votre soutien indéfectible. Vos sacrifices silencieux, vos conseils éclairés et vos encouragements constants m'ont donné la force de croire en moi et de poursuivre mes rêves avec détermination.

Qu'il vous soit permis de voir dans ce travail le fruit de tous vos efforts et la récompense de vos sacrifices. Merci pour tout ce que vous êtes, et pour être les piliers solides de ma réussite.

## **À mes frères, Hamid et Aimad,**

Vous êtes cette force tranquille qui m'accompagne dans l'ombre, mes soutiens silencieux mais puissants. Merci d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir encouragée sans jamais m'en demander trop, d'avoir été là simplement, mais toujours.

## **À ma tante, Karima,**

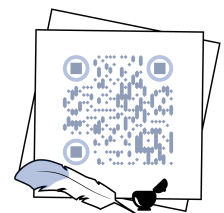
Merci pour ton amour sincère, ton soutien constant et ta bienveillance. Dans les instants de fragilité comme dans les moments de joie, tu as su m'apporter paix et confiance. Merci d'avoir été là, tout simplement.

## **À mes amies chères, Yasmine<sup>2</sup>, Amira, ... et toutes celles qui se reconnaîtront,**

Merci d'avoir été là dans les hauts comme dans les bas. Votre présence, vos encouragements, vos rires et votre patience ont rendu ce chemin plus doux. Je vous suis reconnaissante de tout cœur.

**Enfin, je dédie ce modeste travail à tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin.**

**RABHI Elissa**



# Dédicace

Je dédie ce travail, avec une profonde gratitude et un immense amour, à :

**Mes chers parents**, pour leurs sacrifices, leur tendresse, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de mes études.

À mes précieux frères, **Adel, Hani, Nadjim et Amirouche**, pour leur présence rassurante, leurs encouragements constants et leur appui moral dans les moments les plus difficiles.

À mes belles-sœurs bien-aimées, **Kahina, Yasmine et Hanane**, ainsi qu'à mon cher neveu **Oussama**, pour leur affection, leur compréhension et leur bienveillance.

À mes amies chères à mon cœur, **Amira, Mounia et Yasmine**, ainsi qu'à mes collègues, pour leur soutien moral, leur bienveillance et les moments partagés.

**AMGHAR Cylia**

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>I</b>
<b>Dédicace</b>	<b>II</b>
<b>Dédicace</b>	<b>III</b>
Liste des figures . . . . .	VI
Liste des tables . . . . .	VII
Liste d'abréviations et notations . . . . .	IX
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux FANETs</b>	<b>3</b>
Introduction . . . . .	3
1.1 Réseau ad-hoc mobile . . . . .	3
1.2 Réseaux FANATs . . . . .	4
1.2.1 Définition d'un réseau FANET . . . . .	4
1.2.2 Caractéristiques des réseaux FANETs . . . . .	4
1.2.3 Applications des FANETs . . . . .	5
1.3 Architecture de communication dans les réseaux FANETs . . . . .	6
1.3.1 Architecture de communication centralisée . . . . .	7
1.3.2 Architecture de communication réseau cellulaire . . . . .	7
1.3.3 Architecture de communication par satellite . . . . .	8
1.3.4 Architecture de communication ad hoc . . . . .	8
1.4 Modèles de communication dans les réseaux FANETs . . . . .	9
1.4.1 Drone à Drone . . . . .	9
1.4.2 Drones à Infrastructure . . . . .	9
1.5 Qualité de service . . . . .	10
1.5.1 QoS dans les réseaux FANET . . . . .	10
1.5.2 Paramètres de la qualité de service . . . . .	10
1.5.3 Métriques de la qualité de service . . . . .	11
1.6 Défis des réseaux FANETs . . . . .	12
1.7 Conclusion . . . . .	13
<b>2 État de l'art sur les protocoles MAC dans les FANETs</b>	<b>14</b>
Introduction . . . . .	14
2.1 Protocoles MAC dans les réseaux FANETs . . . . .	14
2.2 Critères de conception d'un protocole MAC pour les réseaux FANETs . . . . .	15

---

2.3	Classification des protocoles MAC dans les FANETs . . . . .	16
2.3.1	Protocoles MAC basés sur la contention . . . . .	17
2.3.2	Protocoles MAC sans contention . . . . .	21
2.3.3	Protocoles MAC hybride . . . . .	25
2.4	Comparaison des protocoles MAC pour les FANETs . . . . .	29
2.5	Conclusion . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Protocole AMAC basé sur la priorité pour les réseaux FANETs</b>	<b>34</b>
	Introduction . . . . .	34
3.1	Protocole MAC adaptatif pour les réseaux FANATs . . . . .	35
3.2	Analyse critique du protocole AMAC . . . . .	37
3.3	Amélioration du protocole AMAC : Protocole MAC Adaptatif Basé sur la Prio- rité (P-AMAC) . . . . .	37
3.4	Modélisation du protocole P-AMAC avec des chaînes de Markov . . . . .	39
3.4.1	Modèle analytique . . . . .	39
3.4.2	Probabilités de transition . . . . .	41
3.4.3	Débit normalisé . . . . .	42
3.4.4	Analyse du délai . . . . .	43
3.5	Résultats et discussion . . . . .	43
3.5.1	Paramètres de simulation . . . . .	43
3.5.2	Métriques de QoS utilisées . . . . .	44
3.6	Conclusion . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Évaluation de performances de P-AMAC par simulation</b>	<b>51</b>
	Introduction . . . . .	51
4.1	Validation du modèle analytique par simulation . . . . .	52
4.1.1	Paramètres de simulation . . . . .	52
4.1.2	Métriques de QoS utilisées . . . . .	52
4.2	Évaluation des performances de P-AMAC par simulation . . . . .	55
4.2.1	Paramètres de simulation . . . . .	55
4.2.2	Métriques de QoS utilisées . . . . .	55
4.3	conclusion . . . . .	61
	<b>Conclusion générale</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>
	<b>Résumé</b>	<b>69</b>
	<b>Abstract</b>	<b>69</b>

# Table des figures

1.1	Réseau FANET. . . . .	4
1.2	Applications des réseaux FANETs. . . . .	6
1.3	Différentes architectures de communication dans les réseaux FANETs. . . . .	7
1.4	Modèles de communication dans FANET. . . . .	9
2.1	Classification des protocoles MAC pour les FANETs. . . . .	16
3.1	Organigramme du protocole AMAC[2]. . . . .	36
3.2	Chaîne de Markov du protocole P-AMAC . . . . .	40
3.3	Débit normalisé en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité (BER = 0) . . . . .	44
3.4	Débit normalisé en fonction du nombre de véhicules avec BER = 0, BER = $2 \times 10^{-4}$ et BER = $5 \times 10^{-4}$ . . . . .	45
3.5	Délai moyen par classe de priorité en fonction du nombre de véhicules pour différentes valeurs de BER . . . . .	46
3.6	Délai moyen par classe de priorité en fonction du nombre de véhicules pour différentes valeurs de BER . . . . .	47
3.7	Probabilité de collision en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité . . . . .	48
3.8	Taux de réussite d'accès au canal de transmission en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité . . . . .	49
4.1	Comparaison du débit normalisé entre les résultats analytique et la simulation sous Python . . . . .	53
4.2	Comparaison du délai moyen entre les résultats analytique et la simulation sous Python . . . . .	54
4.3	Comparaison du débit moyen entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs . . . . .	56
4.4	Comparaison du délai moyen de bout-en-bout entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs. . . . .	57
4.5	Comparaison du taux de collision entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs. . . . .	58
4.6	Comparaison du taux de livraison des paquets entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs. . . . .	59
4.7	Comparaison de la consommation énergétique entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs. . . . .	60
4.8	Chaîne de Markov du DCF IEEE 802.11 . . . . .	67

# Liste des tableaux

2.1	Comparaison des protocoles MAC pour les FANETs centrés sur la QoS. . . . .	32
3.1	Paramètres du système . . . . .	44
4.1	Paramètres de simulation . . . . .	52
4.2	Paramètres de simulation . . . . .	55



# Liste d'abréviations et notations

<b>ACK</b>	Acknowledgment
<b>ACTS</b>	Aggregated Clear To Send
<b>AMAC</b>	Adaptive Medium Access Control
<b>ARTS</b>	Aggregated Request Clear To Send
<b>BER</b>	Bit-Error-Rate
<b>BS</b>	Base Station
<b>BTS</b>	Busy-To-Send
<b>CCH</b>	Control Channel
<b>CC-MAC</b>	Collision Coordination Medium Access Control
<b>CCHI</b>	Control Channel Interval
<b>CDMA</b>	Code division multiple access
<b>CI</b>	Control Interval
<b>CNPC</b>	Control and Non-Payload Communication
<b>CQ</b>	Code channel queue
<b>CRP</b>	Channel Reservation Phase
<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>CSAM/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>CTP</b>	Clear to Pairing
<b>CTS</b>	Clear-to-Send
<b>CU-MAC</b>	Centralized UAV Medium Access Control
<b>CW</b>	Contention Window
<b>DAB-MAC</b>	Directional Antenna-Based Medium Access Control
<b>DCF</b>	Distributed Coordination Function
<b>DND</b>	Directional Neighbor Database
<b>DNAV</b>	Directional Network Allocation Vector
<b>DPCS-SDMA</b>	Directional Physical Carrier Sensing–Space Division Multiple Access
<b>D-TDMA</b>	Dynamic Time Division Multiple Access
<b>FANETs</b>	Flying Ad hoc Networks
<b>FDRMRC-MAC</b>	Full-Duplex Radios and Multi-packet Reception Capability Medium Access Control
<b>FI</b>	Frame Information
<b>FM-MAC</b>	FANET Multi-Channel Medium Access Control
<b>FS-MAC</b>	Fault-Tolerant Synchronous Medium Access Control
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GU</b>	Ground Unit
<b>HP</b>	High Priority
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ISAC</b>	Integrated Sensing and Communication

---

<b>LDMAC</b>	Long Distance Medium Access Control
<b>LODMAC</b>	Location Oriented Directional Medium Access Control
<b>LP</b>	Low Priority
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MANETs</b>	Mobile Ad Hoc Network
<b>MH</b>	Multi-Hop
<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output,
<b>MPR</b>	multipacket reception
<b>MS-MAC</b>	Switching Medium Access Control
<b>NAV</b>	Network Allocation Vector
<b>NQ</b>	Neighbor information queue
<b>NP</b>	Normal Priority
<b>P-AMAC</b>	Priority Adaptive Medium Access Control
<b>PBFT</b>	Practical Byzantine Fault Tolerance
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RR-ALOHA</b>	Reliable Reservation ALOHA
<b>RTP</b>	Request for Temporary Pairing
<b>RTS</b>	Request-to-Send
<b>SCF</b>	Store-Carry-Forward
<b>SCH</b>	Service Channel
<b>SCHI</b>	Service Channel Interval
<b>SDMA</b>	Space Division Multiple Access
<b>SI</b>	Service Interval
<b>SIFS</b>	Short Interframe Space
<b>SPD-TDMA</b>	Service Priority-Based Dynamic Time Division Multiple Access
<b>TBI-MAC</b>	Token-Based Medium Access Control
<b>TC-CDMA</b>	Token -based and Code Division Multiple Access
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TQ</b>	Transmitter queue
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UD-MAC</b>	UAV Delay-Tolerant Multiple Access Control
<b>VANETs</b>	Vehicular Ad Hoc Networks

# Introduction générale

Depuis quelques années, le besoin d'être connecté est devenu fondamental pour l'homme. Ce besoin impose de plus en plus de défis pour la technologie moderne, l'obligeant à innover davantage et à faire preuve de créativité. Ainsi, de nouvelles technologies sont apparues, telles que les réseaux sans fil et, plus particulièrement, les réseaux ad hoc, capables de s'auto-organiser sans infrastructure, ce qui les rend parfaitement adaptés aux environnements mobiles.

L'évolution rapide des technologies de l'information et de la communication a conduit à l'apparition de nouveaux types de réseaux ad hoc, tels que les réseaux de capteurs, les VANETs (Vehicular Ad hoc Networks) et les FANETs (Flying Ad hoc Networks). Ces derniers, composés de véhicules aériens sans pilote (UAVs, 'Unmanned Aerial Vehicles') communiquant entre eux sans infrastructure, représentent une nouvelle ère de systèmes autonomes. Grâce à leur flexibilité et leur déploiement rapide, ils s'adaptent aux environnements dynamiques et hostiles, répondant à de nombreuses applications civiles, industrielles ou militaires.

Cependant, le déploiement des FANETs pose de nombreux défis, en particulier en matière de qualité de service (QoS). La forte mobilité des nœuds, la topologie changeante et de la variabilité des conditions de communication rendent la garantie d'une QoS stable et efficace particulièrement complexe. Assurer une bonne QoS dans ces réseaux nécessite une coordination efficace de plusieurs éléments, en particulier la couche MAC (Medium Access Control), qui gère l'accès au canal de communication partagé entre les UAVs. C'est elle qui détermine qui peut transmettre, quand et dans quelles conditions. En d'autres termes, la performance de la couche MAC influence directement la QoS du réseau, qui dépend de l'efficacité du protocole MAC utilisé. Il est donc essentiel de concevoir un protocole MAC adapté aux contraintes spécifiques des FANETs.

Or, les protocoles MAC traditionnels, conçus pour des réseaux plus stables, montrent rapidement leurs limites face aux contraintes spécifiques des FANETs : topologie dynamique, mobilité élevée, collisions fréquentes, bande passante limitée et gestion énergétique. Face à ces défis, plusieurs approches ont été développées pour concevoir des protocoles MAC adaptés aux FANETs.

Un protocole MAC efficace doit garantir non seulement l'accès au canal, mais également le faire d'une manière intelligente, adaptative et différenciée, en priorisant la transmission des données critiques tout en optimisant l'utilisation des ressources limitées.

Dans ce contexte, ce mémoire propose une amélioration du protocole AMAC (Adaptive Medium Access Control), qui se distingue par son approche adaptative, en exploitant des antennes directionnelles et des technologies de localisation telles que le GPS (Global Positioning System) et les unités de mesure inertielle (IMU) pour améliorer l'accès au canal dans des environnements à forte mobilité; nommée P-AMAC (Priority based Adaptive MAC), intégrant un mécanisme de gestion des priorités, permettant une différenciation entre les flux de données,

pour mieux répondre aux besoins des applications critiques.

L'évaluation des performances de P-AMAC repose sur un modèle analytique basé sur les chaînes de Markov, afin d'étudier le comportement théorique du protocole, puis validé par des simulations Python et OMNeT++ afin de confronter ces résultats à des scénarios réalistes et comparer les performances d'AMAC et de P-AMAC selon plusieurs métriques de QoS.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre introduit les généralités des FANETs : caractéristiques, applications, architecture et modèles de communication. Il présente également les exigences spécifiques en matière de QoS ainsi les principaux défis liés à ces réseaux.
- Le deuxième chapitre présente un état de l'art détaillé des protocoles MAC existants dans les FANETs, les critères de conception d'un protocole MAC, les différentes catégories de protocoles classés selon leur méthode d'accès au canal, leurs mécanismes de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et leurs limites.
- Le troisième chapitre décrit le fonctionnement du protocole AMAC, son analyse critique, introduit sa version améliorée P-AMAC, avec une modélisation analytique basée sur les chaînes de Markov et des résultats de simulation détaillés.
- Enfin, le dernier chapitre présente une évaluation complète des performances du protocole P-AMAC à travers des simulations menées dans deux environnements complémentaires : Python, pour valider le modèle analytique basé sur les chaînes de Markov, et OMNeT++, pour comparer de manière réaliste les performances d'AMAC et de P-AMAC selon plusieurs métriques de QoS.

Ce mémoire se conclut par une synthèse des principales contributions et des perspectives futures.

# 1

## Généralités sur les réseaux FANETs

### Introduction

Ces dernières années, des avancements remarquables ont été réalisés dans les technologies des réseaux sans fil, en particulier les réseaux ad hoc. Notamment, les réseaux de drones, appelés aussi FANETs (Flying Ad Hoc Network), qui sont un type de réseau de communication ad hoc sans fil composés de véhicules aériens sans pilote (UAV 'Unmanned Aerial Vehicle'). Les UAVs échangent des données et des signaux dans l'espace aérien sans dépendre d'une intervention humaine directe, ni d'une liaison physique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les réseaux FANETs . Nous y décrivons leurs principales caractéristiques, leurs domaines d'application, ainsi que leur architecture de communication. Nous présentons également les différents modèles de communication entre UAV. Enfin, nous explorerons la qualité de service (QoS) dans les FANETs, à travers l'étude de ses paramètres, de ses métriques, ainsi que les divers défis qui lui sont liés.

### Sommaire

---

Liste des figures . . . . .	VI
Liste des tables . . . . .	VII
Liste d'abréviations et notations . . . . .	IX

---

### 1.1 Réseau ad-hoc mobile

Un réseau ad hoc mobile (MANET : Mobile Ad Hoc Network) est un système autonome et dynamique composé de nœuds mobiles interconnectés par des liaisons sans fil, sans infrastructure fixe ni gestion centralisée. Les nœuds peuvent se déplacer librement et s'organiser de manière aléatoire. Par conséquent, la topologie du réseau peut changer rapidement et, surtout, de manière imprévisible.

## 1.2 Réseaux FANATs

### 1.2.1 Définition d'un réseau FANET

Les réseaux ad hoc de drones, appelés en anglais UAV ad hoc Network (UAANET) ou Flying Ad hoc Network (FANETs), appartiennent généralement à la catégorie des réseaux ad hoc mobiles, où les nœuds sont des véhicules aériens sans pilote.

Un FANET est composé de drones autonomes interconnectés qui communiquent entre eux ainsi qu'avec une station de base afin d'atteindre des objectifs communs.

Ils ne nécessitent aucune infrastructure fixe et s'appuient sur la collaboration des nœuds pour échanger des données. Chaque nœud dans le réseau FANET peut voler de manière autonome sans pilote, il fonctionne selon des plans de vol programmés ou par des systèmes d'automatisation dynamique [16].

La figure suivante illustre un réseau FANET.

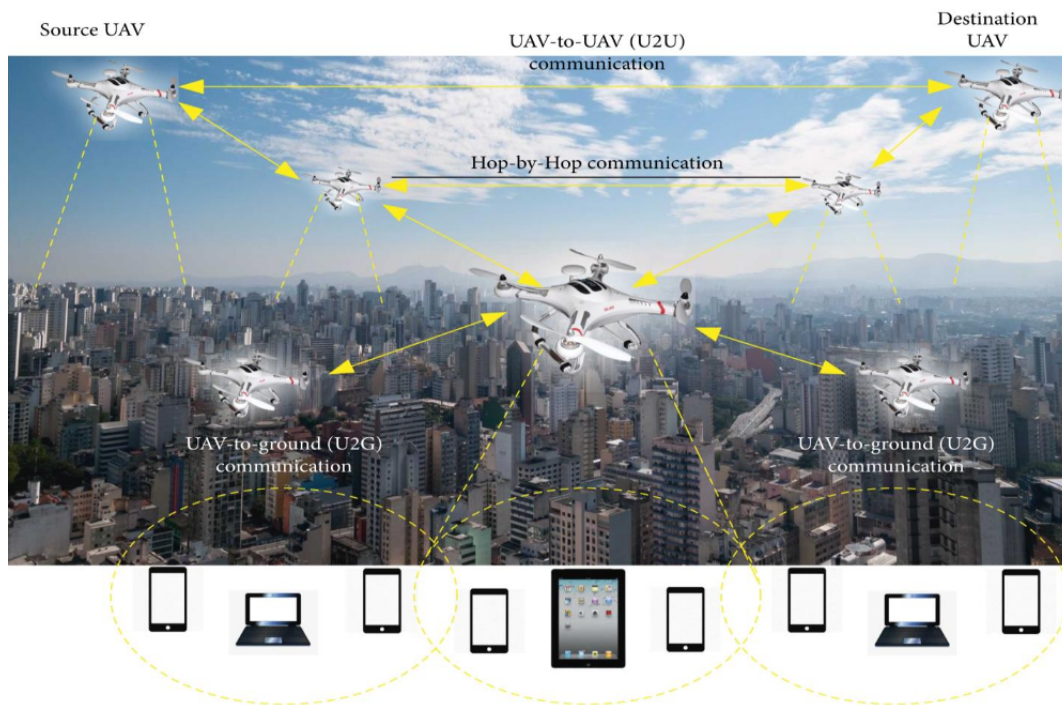


FIGURE 1.1 – Réseau FANET.

### 1.2.2 Caractéristiques des réseaux FANETs

Un réseau FANET possède des caractéristiques spécifiques qui le distinguent des autres types de réseaux MANETs.

- **Topologie du réseau**

Les FANETs sont des réseaux distribués, de type pair-à-pair et à connexions multiples. Les nœuds y établissent des connexions dynamiques selon un principe de communication directe et mutuelle entre eux. Cette topologie permet d'élargir la zone de couverture

et d'assurer une transmission continue des données (24h/24) en remplaçant successivement ou progressivement des UAVs. Par ailleurs, lorsqu'un ou plusieurs UAVs sont désactivés intentionnellement ou non, FANET permet une de la survie du réseau en réorganisant automatiquement la topologie du réseau.

- **Mobilité des nœuds**

La mobilité des nœuds dans un réseau FANET est plus élevée que dans les réseaux MANET et VANET ( Vehicular Ad Hoc Networks). Les UAVs se déplacent à des vitesses allant de 30 à 460 km/h, et cette vitesse provoque le problème de communication entre les UAVs.

- **Modèles de mobilité**

Dans plusieurs modèles de mobilité, le plan de vol est défini à l'avance et recalculé à chaque étape en fonction des changements. D'autres modèles utilisent des vitesses et des directions aléatoires pour les UAVs. [4].

- **Densité des nœuds**

Le nombre moyen d'UAVs présents dans une zone donnée est appelé densité de nœuds. Les nœuds sont généralement dispersés dans le ciel et séparés dans une grande distance, ce qui entraîne une densité très faible[4].

- **Consommation électrique et durée de vie du réseau**

La durée de vie du réseau est une question importante pour le réseau, qui consiste en des dispositifs informatiques alimentés par batterie. Dans les réseaux FANETs, le matériel de communication est directement alimenté par l'énergie des UAVs, ce qui les rend moins sensibles aux contraintes énergétiques comparés aux MANETs. Mais, cela reste un problème dans les mini-UAVs.

- **Localisation**

En raison de la grande mobilité des UAVs et de leurs déplacements fréquents, il est essentiel de mettre à jour régulièrement leur localisation. Pour cela, chaque UAV doit être équipé d'un GPS (Global Positioning System) et d'une unité de mesure initiale.

### 1.2.3 Applications des FANETs

Les FANETs présentent une flexibilité remarquable et peuvent être déployés dans une multitude de domaines, notamment la recherche, la livraison de marchandises, la surveillance, l'agriculture et la sécurité.

Les principales applications des FANETs sont présentées dans la figure suivante.

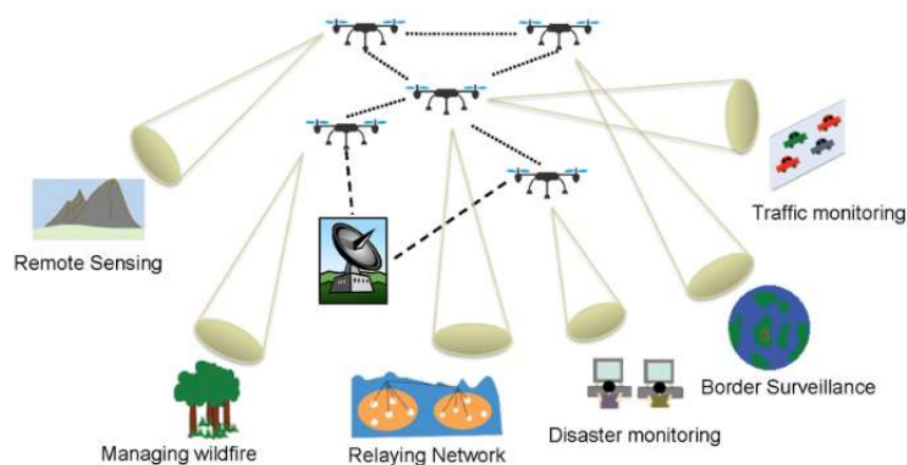


FIGURE 1.2 – Applications des réseaux FANETs.

Elles se répartissent principalement comme suit :

- **Application militaire**
  - Surveillance des navires adverses.
  - Identification et suivi des cible.
  - Élimination des bombes qui non pas explosées.
  - Leurre de missiles par émission de signatures artificielles.
- **Application commerciale**
  - Les UAVs peuvent être utilisés pour des livraisons de colis plus rapides, réduisant ainsi les coûts et les délais de transport.
  - Les UAVs permettent de réaliser des photos et vidéos, idéales pour le marketing visuel.
- **Application de surveillance en urgence**
  - Missions de recherche et de sauvetage sur le terrain.
  - Évaluation des dommages en cas de catastrophes naturelles.
  - Détection des incendies de forêts.
- **Application scientifique**
  - Analyse de la pollution et surveillance environnementale.
  - Exploration pétrolière et gazière.
  - Opérations de sauvetage en mer.

### 1.3 Architecture de communication dans les réseaux FANETs

La figure suivante représente les différentes architectures de communication dans les réseaux FANETs [22].

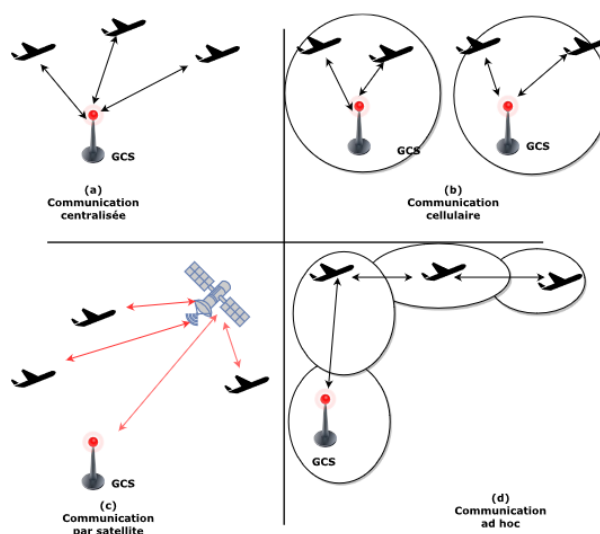


FIGURE 1.3 – Différentes architectures de communication dans les réseaux FANETs.

### 1.3.1 Architecture de communication centralisée

Une architecture de communication centralisée montrée par la figure 1.3.a, est définie par un lien sans fil direct entre un nœud centralisé (par exemple, la station sol) et les UAVs situés à proximité. Dans cette architecture, chaque UAV est directement connecté à la station sol pour transmettre les données de la charge utile et recevoir le flux de commande et de contrôle. Les UAVs ne sont pas directement connectés entre eux, ce qui oblige à faire transiter les informations entre UAVs voisins par la station sol. Dans ce cas, la station sol agit comme un nœud relais [22].

Cette architecture présente plusieurs inconvénients, parmi lesquels nous citons :

- La présence d'un obstacle entre un UAV et la station au sol (comme une montagne ou un bâtiment) peut bloquer le signal et empêcher toute communication.
- La transmission d'un paquet de données entre deux UAVs voisins peut prendre du temps, car les informations doivent d'abord passer par la station au sol avant d'atteindre l'UAV cible.

### 1.3.2 Architecture de communication réseau cellulaire

Il s'agit d'une architecture utilisée dans le domaine de la téléphonie, qui est illustrée par la figure 1.3.b. Elle repose sur une infrastructure constituée de stations de base. Des cellules sont déployées de manière plus ou moins dense en fonction de la couverture recherchée. Dans chaque cellule, on trouve généralement une station au sol qui gère un groupe d'UAVs.

Les UAVs peuvent communiquer entre eux soit directement lorsqu'ils se trouvent dans la même cellule, soit en passant par la station sol. Pour étendre la portée de la mission, plusieurs stations sol peuvent être déployées, offrant ainsi plusieurs liens de communication et permettant une bascule vers un autre lien en cas de défaillance d'une station [22].

Cependant, cette architecture présente certains inconvénients, principalement en raison des coûts élevés qu'implique son déploiement. En effet, la mise en œuvre de cette infrastructure est coûteuse, en particulier dans les zones où aucune couverture n'a encore été établie. Si l'uti-

lisation des UAVs n'est pas fréquente, comme c'est le cas pour des applications de surveillance lors de catastrophes naturelles, il devient alors difficile de justifier l'investissement, car le retour financier n'est pas toujours assuré.

### 1.3.3 Architecture de communication par satellite

Dans ce type d'architecture, illustré par la figure 1.3.c, le satellite fonctionne comme un relais de communication. Ses antennes de réception reçoivent les signaux émis depuis la station sol ; ces signaux sont par la suite transposés en fréquence et amplifiés avant d'être retransmis vers les UAVs.

On distingue principalement deux catégories de satellites utilisables : le satellite géostationnaire et le satellite orbital. Le satellite géostationnaire est situé dans le plan équatorial, il tourne à la même vitesse et dans le même sens que la terre ; sa trajectoire est ainsi fixe au-dessus d'un point au sol. Le second est le satellite orbital, c'est un satellite qui couvre des zones géographiques différentes. L'utilisation des satellites présente l'avantage d'assurer une couverture plus large et plus efficace [22].

### 1.3.4 Architecture de communication ad hoc

Un réseau ad hoc est constitué d'un ensemble d'entités, souvent mobiles, chacune équipée d'une ou plusieurs interfaces radio, qui établissent un réseau de communication temporaire selon les besoins de l'application. Ces nœuds peuvent rejoindre ou quitter le réseau à tout moment. Ce type de réseau, illustré par la figure 1.3.d, est entièrement décentralisé et capable de s'auto-organiser sans avoir besoin d'une infrastructure fixe.

Si un émetteur n'est pas à portée directe du destinataire, les informations sont transmises de manière relayée, suivant un chemin établi et maintenu par le réseau pour s'adapter aux modifications de la topologie. Contrairement aux réseaux sans fil classiques, la zone de service du réseau est la zone géographique dans laquelle les nœuds sont distribués. Ainsi, un réseau ad hoc sans fil permet la communication entre deux nœuds qui ne peuvent pas se connecter directement l'un à l'autre [22].

Les avantages de l'architecture ad hoc par rapport aux autres architectures pour une flotte d'UAVs sont :

- L'absence d'infrastructure dédiée contrairement aux autres types de réseaux, les réseaux ad hoc sans fil ne nécessitent pas d'infrastructure centralisée. Les nœuds du réseau assurent eux-mêmes la création et le maintien de la connectivité.
- La mise à l'échelle et la reconfiguration rapide de la mission exécutée par la flotte d'UAVs, avec l'utilisation d'un système à infrastructure centrale ou par satellite, limitent la zone d'opération à la zone de couverture de communication du relais. De plus, en cas de présence d'obstacles, la communication entre les UAVs peut être bloquée. Grâce à l'architecture ad hoc, il est possible de former une chaîne d'UAVs qui viendrait contourner l'obstacle.

## 1.4 Modèles de communication dans les réseaux FANETs

La figure ci-dessous illustre les modèles de communication dans les réseaux FANETs.

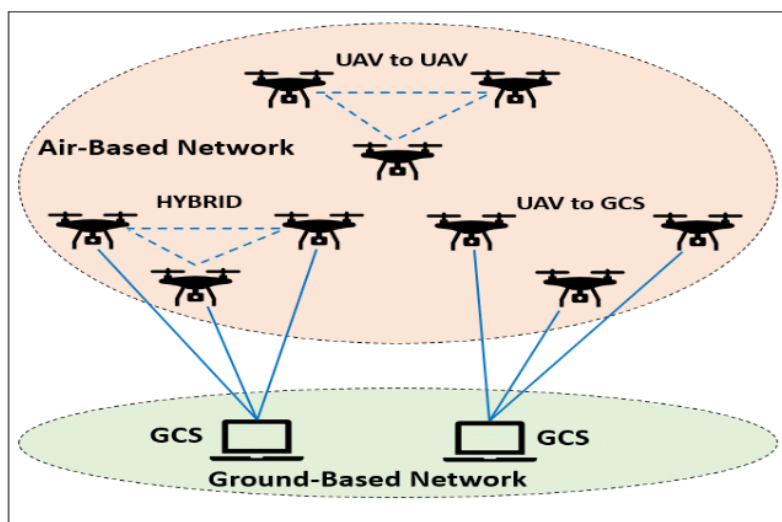


FIGURE 1.4 – Modèles de communication dans FANET.

On distingue deux types de communication :

- Communication Drone à Drone.
- Communication Drones à Infrastructure.

### 1.4.1 Drone à Drone

Dans ce type de communication, la transmission des données entre deux UAVs se fait de manière directe, sans passer par une station au sol. Ce mode est essentiel pour assurer une coordination rapide et autonome entre les UAVs, surtout dans des environnements mobiles et dynamiques où les conditions peuvent changer rapidement [15].

Cependant, l'absence d'infrastructure fixe, la mobilité élevée des UAVs et les variations constantes de distance, rendent le réseau instable et imprévisible. Dans ce contexte, le maintien de la QoS devient essentiel afin de garantir des communications à la fois fiables et efficaces.

### 1.4.2 Drones à Infrastructure

La communication entre drones et infrastructure repose sur un sous-ensemble d'UAVs communiquant avec l'infrastructure, qu'il s'agisse d'une station satellite ou terrestre. Ce type de communication est principalement utilisé pour la transmission de données à grande échelle et implique l'échange de données volumineuses [15].

Afin de répondre aux exigences de ce type de trafic en termes de débit, de fiabilité et de stabilité des transmissions, il est nécessaire de prendre en compte la QoS, celle-ci permet d'assurer une performance optimale du trafic réseau entre les UAVs et l'infrastructure.

La section suivante présentera en détail le concept de QoS dans les réseaux FANETs.

## 1.5 Qualité de service

### 1.5.1 QoS dans les réseaux FANET

Dans les réseaux FANETs, la QoS désigne la capacité du réseau à garantir un fonctionnement stable, fiable et performant, en particulier pour les applications critiques qui évoluent dans un environnement aérien.

Dans ces réseaux, certaines applications nécessitent des services en temps réel et fiables, comme celles dédiées à la mission de photographie aérienne et de vidéo pour une surveillance en temps réel. Pour garantir leur bon fonctionnement, plusieurs métriques doivent être prises en compte afin d'assurer la fiabilité de ces applications, telles que la latence, la bande passante disponible, les pertes de paquets, etc. Par exemple, dans le cas de la transmission vidéo, l'exigence principale de la QoS est de réduire la latence entre les sources et les destinataires. De plus, une bande passante suffisante doit être disponible pour transmettre la vidéo de manière efficace vers la destination cible, notamment lorsque les données transmises sont utilisées pour prendre des décisions importantes. Par conséquent, un minimum d'exigences en matière de QoS doit être garanti par les applications en temps réel, tout en tenant compte de la nature hautement dynamique des FANETs [25].

Afin de garantir une bonne QoS dans les FANETs, il est important de bien coordonner et d'ajuster plusieurs éléments du réseau, notamment les protocoles de routage orientés QoS, les mécanismes de gestion des ressources, ainsi que les protocoles d'accès au canal de transmission (MAC : Medium Access Control) optimisés.

La couche MAC, en particulier, joue un rôle essentiel en gérant l'accès aux canaux de communication, en réduisant les risques de collision et en garantissant une meilleure efficacité dans la transmission des données. Une étude approfondie de cette idée sera présentée dans le prochain chapitre.

### 1.5.2 Paramètres de la qualité de service

Dans ce qui suit, nous présentons les principaux paramètres de QoS utilisés pour l'optimisation des protocoles de communication. Ils jouent un rôle essentiel pour garantir une communication à la fois fiable et efficace.

- **Latence**

La latence désigne le délai nécessaire à un paquet pour atteindre le point de terminaison du récepteur après avoir été transmis depuis le point de terminaison expéditeur.

Elle est généralement liée aux conditions du réseau, telles que la congestion, qui peuvent affecter le temps total nécessaire au transit. Dans les FANETs, la latence est affectée par la vitesse des UAVs, la distance entre eux ainsi que par les changements dynamiques de la topologie du réseau. Une faible latence est essentielle pour les applications en temps réel.

- **Taux de livraison de paquets**

Le taux de livraison des paquets est calculé comme le nombre total de paquets reçus à destination par rapport au nombre total de paquets censés être reçus [18].

- **Débit**

Le débit est le nombre effectif de flux de données transportés sur une certaine période de temps, également spécifié comme bande passante dans certaines situations. En général,

un débit élevé améliore les performances du réseau [32].

- **Délai**

Le délai est la durée qui s'écoule entre l'émission d'un paquet de données depuis le nœud source jusqu'à sa réception au nœud de destination, incluant le délai d'accès, le délai de transmission, le délai de propagation et le délai de traitement [32].

- **Gigue**

La gigue fait référence à la variation du délai de livraison des paquets de données, affectant la fluidité et la qualité des applications en temps réel [32].

- **Taux de perte de paquets**

Le taux de perte de paquets est le pourcentage de paquets de données perdus pendant le processus de transmission. Un paquet peut être perdu en raison, par exemple, d'une congestion, d'une erreur de bit ou d'une mauvaise connectivité. Ce paramètre est étroitement lié à la fiabilité du réseau [32].

### 1.5.3 Métriques de la qualité de service

Les métriques de qualité de service (QoS) permettent d'évaluer la performance d'un réseau en tenant compte du niveau de satisfaction des utilisateurs. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories.

- Les métriques additives, comme le délai de transmission de bout en bout, sont calculées en sommant les délais de transmission à chaque saut nécessaire pour atteindre la destination[23].
- Les métriques concaves, comme la bande passante, qui consiste à la bande passante minimale offerte par les différents liens de transmission [23].
- Les métriques multiplicatives, comme la probabilité de perte des paquets, se calculent en multipliant les probabilités de perte à chaque saut pour obtenir une idée de la perte totale sur l'ensemble du chemin de transmission [23].

Parmi les différentes métriques de qualité de service, on peut citer :

- **Délai de bout en bout**

Le délai de bout en bout mesure le temps nécessaire à un paquet pour être envoyé par un expéditeur et arriver à sa destination. Le délai augmente avec la congestion du réseau et affecte négativement la QoS [5].

- **Bande passante**

La bande passante désigne la capacité d'un réseau à transmettre des données de bout à bout. Elle correspond à la largeur de bande en fréquence qui est réservée pour un service particulier. La gestion de la bande passante est un élément essentiel pour garantir la qualité de service [5].

- **Perte des paquets**

La perte de paquets mesure le pourcentage de paquets de données envoyés qui ne parviennent pas à leur destination, Cela peut signaler des problèmes de transmission ou une congestion au sein du réseau [5].

- **Puissance de la batterie**

La charge résiduelle de la batterie peut être estimée en mesurant la tension de la batterie et en la comparant avec la fonction de décharge du modèle de batterie.

- **Délai MAC**

Au niveau de la couche de liaison de données, ce délai correspond au temps nécessaire pour qu'un paquet soit transmis entre deux nœuds voisins utilisant un accès par contention. Ce délai fournit une indication précise de la charge de trafic des nœuds voisins en communication.

## 1.6 Défis des réseaux FANETs

Malgré les avancées significatives dans la technologie des drones, les réseaux FANETs présentent encore certaines incon vénients, qui peuvent être critiques selon les exigences spécifiques des applications. Parmi les principaux défis, on peut citer :

- **Sécurité** : Les UAVs s'appuient sur différents modèles de communication sans fil pour échanger des données sensibles. Toutefois, ces liaisons exposent le réseau à des menaces telles que l'espionnage, les cyberattaques, l'écoute passive et la falsification de données, pouvant entraîner des conséquences graves. Dans ce contexte, la sécurité des réseaux FANETs ne se limite pas aux principes classiques de protection ; elle doit également intégrer des contraintes spécifiques afin de réduire les vulnérabilités et prévenir les attaques potentielles [10].
- **Mobilité** : Les UAVs se distinguent surtout par leur grande mobilité et leur capacité à changer rapidement de vitesse. Grâce à ces caractéristiques, ils peuvent atteindre des zones difficiles d'accès et couvrir de longues distances en peu de temps. Pour assurer leur bon fonctionnement et leur sécurité, il est important que certaines données essentielles soient transmises au réseau ou à la station de base. Parmi ces informations, on retrouve les alertes anti-collision, la position GPS, la durée de vol restante, les conditions météo et environnementales, ainsi que les commandes de pilotage lorsque le drone est contrôlé à distance [13].
- **Consommation d'énergie** : Elle limite le temps de vol, la portée et la capacité de communication des UAVs. En effet, les UAVs sont alimentés par des batteries à capacité restreinte, tandis que la propulsion consomme bien plus d'énergie que les communications. Ainsi, la conception de systèmes de communication efficaces devient indispensable pour garantir la durée de vie du réseau et éviter les pannes imprévues [24].
- **Routage** : Les protocoles de routage sont essentiels dans le fonctionnement des FANETs, en assurant l'acheminement efficace des données entre les UAVs et leurs dispositifs connectés. Toutefois, ce processus représente un défi majeur en raison de la nature dynamique du réseau et des exigences spécifiques liées aux UAVs, pouvant entraîner des erreurs de connexion et, dans certains cas, la défaillance du réseau.
- **QoS** : Le support de la QoS dans les réseaux FANETs reste un défi, notamment lorsque les configurations réseau actuelles ne sont plus disponibles en raison de changements dans la vitesse, la position, la topologie ou la distance entre les UAVs. La forte mobilité des UAVs dans les réseaux FANETs rend le réseau instable, ce qui complique le maintien d'une communication fiable et stable.

Dans ce type d'environnement, ces réseaux doivent prendre en charge un ensemble de paramètres essentiels afin de répondre à des performances prédéterminées, tout en respectant des contraintes telles que le délai, la bande passante, la gigue, la latence et le taux de perte de paquets. Toute dégradation de ces paramètres peut compromettre le

fonctionnement des applications FANETs.

Face à cette problématique, il devient essentiel d'agir au niveau des couches protocolaires afin de garantir une meilleure QoS. La couche MAC, en particulier, elle joue un rôle essentiel, car elle est responsable de la gestion de l'accès concurrent des nœuds au canal de communication sans fil. Une gestion inefficace à ce niveau peut entraîner des collisions, des délais et une baisse générale des performances réseau.

Il est important de concevoir des protocoles MAC capables de s'adapter aux particularités des réseaux FANETs. Ces protocoles doivent intégrer des mécanismes flexibles et intelligents permettant de s'ajuster aux conditions dynamiques du réseau, tout en assurant un haut niveau de QoS.

Les objectifs fondamentaux que doivent viser ces protocoles sont les suivants :

- Éviter les collisions.
- Réduire le délai d'accès au canal et la latence.
- Augmenter le débit.
- Partager équitablement le canal de communication.
- etc.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les réseaux FANETs, en mentionnant les caractéristiques qui les distinguent des autres réseaux ad hoc. Nous avons identifié les domaines d'application les plus utiles, notamment les missions militaires, les utilisations commerciales, sans oublier les applications de surveillance en urgence. Cette variété montre à quel point ces réseaux peuvent être utiles dans de nombreux domaines et situations.

Ensuite, nous avons présenté les différentes architectures et modèles de communication, chacun étant conçu pour répondre à des exigences spécifiques en fonction du contexte d'utilisation.

Puis, nous avons souligné l'importance de la QoS, en particulier au niveau de la couche MAC. En effet, cette couche est essentielle pour la gestion de l'accès au canal de communication, comme les réseaux FANETs sont très dynamiques, elle aide à assurer des transmissions efficaces, fiables et adaptées aux variations constantes du réseau.

En conclusion, ce chapitre a permis d'établir les bases nécessaires à la compréhension des réseaux FANETs et les défis associés à leur fonctionnement.

Le chapitre suivant s'appuiera sur ces éléments pour présenter un état de l'art sur les protocoles MAC conçus ou adaptés aux spécificités de ce type de réseau.

# 2

## État de l'art sur les protocoles MAC dans les FANETs

### Introduction

Récemment, les réseaux FANETs ont été largement utilisés dans diverses applications, tant dans le domaine civil que militaire. Cette variété d'applications impose des exigences spécifiques en matière de communication, notamment en termes de fiabilité, de rapidité de transmission et d'efficacité. Pour atteindre ces objectifs, un protocole de contrôle d'accès au support MAC fiable et efficace est nécessaire.

En effet, les protocoles MAC jouent un rôle essentiel en assurant une bonne gestion de l'accès au canal de communication, en réduisant les risques de collision, en optimisant l'utilisation du canal et en contribuant à la stabilité du réseau, même dans des conditions de mobilité élevée.

Dans ce chapitre, nous commencerons par étudier les protocoles MAC adaptés aux réseaux FANETs, en soulignant les critères fondamentaux à considérer lors de leur conception. Nous aborderons ensuite la classification des différentes approches MAC développées pour ce type de réseau, en soulignant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites. Enfin, nous conclurons par un tableau comparatif mettant en perspective ces protocoles en fonction des différents paramètres et métriques de QoS.

### 2.1 Protocoles MAC dans les réseaux FANETs

Dans les réseaux FANETs, la gestion de l'accès au support de communication sans fil repose sur les protocoles MAC. Dans ce type de réseau, le canal de transmission radio est strictement contrôlé en raison de la bande passante limitée par rapport aux réseaux filaires. D'où la nécessité d'un contrôle strict par les protocoles MAC. Le niveau MAC est responsable de certains mécanismes très spécifiques comme la création des trames, l'adressage, l'adoption d'une stratégie d'économie d'énergie, le contrôle d'erreur et la résolution des conflits d'accès au ca-

nal entre les différents nœuds du réseau [22]. Son rôle principal est de contrôler efficacement l'échange des données critiques, notamment celles liées à la navigation, la coordination des UAVs et les transmissions de mission, qui comprennent des mises à jour périodiques, des notifications d'événements et des diffusions d'informations essentielles.

La mobilité élevée et les changements dynamiques de la topologie des FANETs modifient fréquemment la qualité des connexions et imposent des restrictions importantes sur la couche MAC. Un accès mal géré peut entraîner des collisions, des pertes de messages ou des retards, compromettant ainsi la QoS et l'efficacité des opérations en temps réel [3].

Plusieurs protocoles MAC ont été développés pour les communications dans les FANETs. Ils peuvent être classés en trois catégories selon les méthodes d'accès au canal utilisées ; à savoir la méthode d'accès au support basée sur la contention, la méthode d'accès au support sans contention, la troisième catégorie est une approche hybride combinant ces deux méthodes.

## 2.2 Critères de conception d'un protocole MAC pour les réseaux FANETs

Afin d'assurer des communications fiables et efficaces dans un réseau FANET, le protocole MAC s'appuie sur plusieurs critères essentiels. Il doit prendre en considération les éléments suivants :

- **Adaptabilité à la mobilité élevée :** La forte mobilité des UAVs dans les réseaux FANETs entraîne des changements rapides de topologie et des variations dans les canaux radio, cela entraîne des retards de communication ce qui est souvent inacceptable dans la majorité des applications FANETs.  
Pour garantir une communication réactive et fiable, ces réseaux nécessitent des informations réseau précises et en temps réel. Dans ce contexte, la couche MAC joue un rôle central, car elle doit s'adapter dynamiquement à ces changements afin d'assurer une gestion efficace de l'accès au canal [4].
- **Efficacité énergétique :** En raison des sources d'énergie limitées des UAVs, un protocole MAC économe en énergie est essentiel pour prolonger la durée de vie du réseau. La réduction de la puissance de transmission et des activités de réception constitue un moyen efficace de préserver la batterie des UAVs. Le développement d'un protocole MAC économe en énergie est donc important pour prolonger la durée de fonctionnement du réseau [3].
- **QoS :** Dans les réseaux FANETs, la prise en charge des communications en temps réel nécessite une QoS capable de s'adapter à un environnement hautement dynamique. Le protocole MAC joue un rôle fondamental en modulant la gestion du trafic en fonction de l'importance des messages. Il doit assurer la transmission fiable des messages critiques, en particulier lorsque le trafic est élevé, afin de garantir le maintien des services essentiels du réseau.
- **Évitement et gestion des collisions :** La compétition pour l'accès au canal peut entraîner des collisions, ce qui gaspille de la bande passante. Il est donc essentiel qu'un protocole MAC mette en œuvre des stratégies adaptées, comme l'écoute du support ou l'organisation des accès, afin de mieux gérer les ressources du réseau.

- **Équité** : L'objectif principal des protocoles MAC est de fournir un accès équitable aux canaux entre les nœuds concurrents [30].
- **Fiabilité** : La fiabilité d'un FANET se mesure par la probabilité de recevoir un message transmis par un drone à chaque cycle de communication [1].

## 2.3 Classification des protocoles MAC dans les FANETs

Les protocoles MAC utilisés dans les réseaux FANETs sont catégorisés selon leur méthode d'accès au canal de communication. Divers protocoles MAC ont été recommandés pour ce type réseau. Ceux présentés dans la littérature peuvent être regroupés en trois grandes catégories : les protocoles basés sur la contention, ceux sans contention et les protocoles hybrides (voir la figure 2.1). Chaque protocole est évalué selon les objectifs de conception, ses caractéristiques et la méthode d'accès au support.

Tout d'abord, les protocoles basés sur la contention reposent sur un accès compétitif au canal, ce qui peut entraîner des collisions et des retransmissions. Ensuite, les protocoles MAC sans contention fonctionnent de manière distincte, ils permettent d'éliminer le problème des collisions en préallouant les ressources de transmission aux nœuds du réseau. Enfin, les protocoles MAC hybrides combinent les avantages des approches avec et sans contention [3].

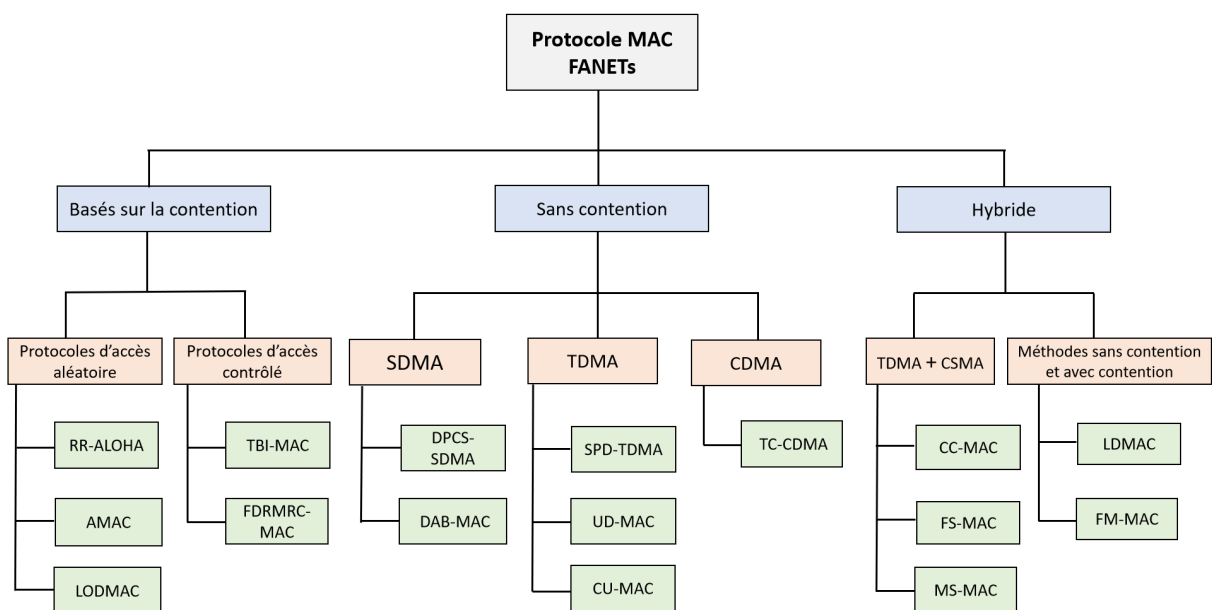


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles MAC pour les FANETs.

### 2.3.1 Protocoles MAC basés sur la contention

Les protocoles MAC basés sur la contention permettent à plusieurs nœuds de rivaliser pour accéder à un canal partagé. Pour cela, un mécanisme de compétition est nécessaire afin d'établir une connexion et de transmettre les données. Ces protocoles s'adaptent facilement aux changements de la topologie du réseau et sont mieux adaptés aux réseaux à faible charge. Néanmoins, leurs performances diminuent lorsque la densité de nœuds augmente [[14],[26]]. Ces protocoles se divisent en deux sous-catégories : l'**accès aléatoire** et l'**accès contrôlé**, ces protocoles sont résumés ci-dessous.

#### 2.3.1.1 Protocoles d'accès aléatoire

Dans les protocoles à accès aléatoire, les nœuds tentent d'accéder au canal de manière autonome, sans coordination centralisée. Comme tous les nœuds partagent le même canal, il est donc nécessaire d'avoir un mécanisme de compétition entre les nœuds pour établir la connexion de communication.

- **Protocole RR-ALOHA (Reliable Reservation ALOHA)**

Le protocole RR-ALOHA [7] est une amélioration du protocole ALOHA classique, conçu pour assurer une diffusion fiable des messages dans des environnements ad hoc, notamment les réseaux FANETs.

Son objectif principal est d'attribuer à chaque terminal un canal de base, composé d'un créneau par trame, utilisé pour la diffusion des messages. Lorsqu'un terminal souhaite transmettre, il tente d'accéder aléatoirement à un créneau disponible. En cas de succès, le créneau est réservé pour les transmissions futures. Les paquets transmis sur le canal de base contiennent une information de trame (Frame Information, FI) qui informe les autres terminaux sur l'état perçu des créneaux (libre, occupé ou en collision), et ainsi d'optimiser ses tentatives d'accès, réduisant les risques de collisions, notamment celles causées par les terminaux cachés. Les créneaux occupés sont libérés automatiquement lorsqu'un terminal s'éteint ou quitte le réseau. Le protocole permet aussi la réservation de créneaux supplémentaires selon les besoins en QoS.

- **Avantages**

- Le canal est géré de façon autonome par les terminaux, sans infrastructure centralisée.
- Le protocole permet une communication efficace à saut unique, même en l'absence de répéteur central.
- Grâce aux FI, les terminaux évitent d'utiliser les slots déjà occupés.

- **Limitations**

- Le protocole dépend des FI, dont une mauvaise réception peut entraîner des mauvaises décisions d'accès.
- L'échange fréquent des FI augmente la charge du réseau.
- Un grand nombre de terminaux peut entraîner des délais plus longs et des collisions lors de l'accès au canal.

- **Protocole AMAC (Adaptive MAC Protocol)**

Le protocole AMAC [2] a été conçu pour optimiser la communication entre les UAVs, en utilisant des antennes directionnelles au lieu des antennes omnidirectionnelles classiques. Son objectif est d'assurer une meilleure robustesse du lien, avec un délai de bout en bout réduit,

moins d'interférences et un débit amélioré, tout en renforçant l'efficacité globale du réseau.

Le système repose sur quatre antennes : deux directionnelles et deux omnidirectionnelles, la transmission est gérée de manière à alterner entre les antennes directionnelles et omnidirectionnelles, selon les conditions du réseau et les besoins de communication. De plus, Chaque drone est équipé de GPS et IMU pour connaître précisément la position des autres UAVs.

Lorsqu'un UAV doit transmettre des données, la position du destinataire est essentielle pour orienter l'antenne directionnelle. Un message RTS (Request-to-Send) est d'abord envoyé en mode omnidirectionnel, contenant la position et la durée de transmission, suivi d'un CTS (Clear-to-Send) du destinataire contenant les mêmes informations. Après avoir transmis et reçu avec succès les paquets RTS et CTS, les deux UAVs mettent à jour leurs tables d'informations cibles. Avant de commencer la transmission des données, le protocole examine la distance entre les deux UAVs. Selon la distance et l'altitude, l'UAV émetteur sélectionne l'antenne appropriée pour transmettre les données. Enfin, l'accusé de réception (ACK) est envoyé en mode omnidirectionnel, avec mise à jour des informations de position.

- **Avantages**

- Le protocole s'appuie sur le GPS et IMU pour garantir une localisation précise et ajuster dynamiquement la direction des antennes.
- Utilise une détection physique et virtuelle pour minimiser l'effet du terminal caché.
- AMAC offre un meilleur débit et un délai réduit grâce à l'exploitation des antennes directionnelles.

- **Limitations**

- Le protocole AMAC n'est pas en mesure d'éliminer totalement le problème du terminal caché, ce qui peut entraîner des collisions ou des interférences lors des transmissions.
- L'augmentation de la vitesse du drone entraîne une diminution de la précision des données GPS et IMU, ce qui peut affecter l'alignement correct des antennes directionnelles.
- Manque de prise en compte de la sécurité et de la gestion de l'énergie.

- **Protocole LODMAC (Location Oriented Directional MAC)**

Le protocole LODMAC [29] est un protocole conçu pour les réseaux FANETs. Il offre à la fois une méthode efficace pour exploiter la transmission de données via des antennes directionnelles, et des techniques de prédiction de la position des nœuds voisins à chaque intervalle de mise à jour GPS.

Il repose sur l'utilisation de deux émetteurs-récepteurs à faisceaux commutés : l'un pour les paquets de contrôle et l'autre pour la transmission des paquets de données.

Pour résoudre le problème de surdité directionnelle, LODMAC introduit un nouveau paquet de contrôle appelé BTS (Busy-To-Send), indiquant qu'un nœud est occupé et précisant la durée d'attente. Il maintient une base de données directionnelle des voisins (DND) pour orienter les antennes efficacement et éviter les blocages en file d'attente.

Le fonctionnement du protocole est divisé en deux phases parallèles : la phase de sondage (probing) où les UAVs diffusent leur position GPS aux nœuds voisins de manière directionnelle à intervalles réguliers et échangent les paquets de contrôle (RTS, CTS et BTS); et la phase de transmission des données qui exploite les informations de position stockées pour diriger les antennes vers les bons récepteurs.

Pendant la phase de sondage, un nœud vérifie la base DND avant d'envoyer une trame RTS directionnelle. Si le destinataire est libre, il répond par une CTS ; sinon, il envoie une BTS in-

diquant qu'il est occupé. Même lorsqu'il communique déjà, un UAV doit répondre par un BTS à tout nouvel émetteur pour éviter la surdité directionnelle. LODMAC est optimisé pour des scénarios réalistes où le nombre d'UAV reste limité (3 à 20), typique des applications militaires ou de secours.

- **Avantages**

- Tous les paquets (contrôle, position, données) sont transmis directionnellement, ce qui augmente la portée de communication.
- Suppression du problème de surdité directionnelle.
- Capacité du réseau accrue et réduction du délai lorsque deux transceivers sont utilisés simultanément.

- **Limitations**

- L'utilisation de deux transceivers augmente la le coût, la taille et la consommation d'énergie de l'équipement embarqué.
- L'absence de prise en compte de la localisation dans certaines phases peut dégrader les performances de communication entre UAVs.
- Le protocole est adapté aux petits réseaux (3 à 20 UAVs), mais sa gestion devient plus complexe à mesure que le nombre de nœuds augmente.

### 2.3.1.2 Protocoles d'accès contrôlé

Dans un protocole MAC à accès contrôlé, les nœuds communiquent entre eux pour coordonner l'envoi des données et éviter les collisions sur le support partagé.

- **Protocole TBI-MAC (Token-Based MAC)**

Le protocole TBI-MAC [8] a été conçu pour améliorer la gestion de l'accès au canal dans les réseaux FANETs hautement mobiles, en évitant les problèmes de collisions fréquentes et la dégradation des performances.

TBI-MAC repose sur un système de jetons circulant entre les UAVs. Avant de transmettre des données, un UAV doit d'abord obtenir un jeton qui lui donne la permission d'utiliser le canal sans causer des interférences avec les autres nœuds du réseau. Ce jeton contient des informations essentielles, en particulier une liste de codes identifiant les nœuds prêts à recevoir des données, une liste de gains de canal permettant d'optimiser l'allocation des ressources en fonction des conditions du réseau, ainsi qu'une liste de contraintes de retard pour assurer des délais de transmission acceptables. Dès réception du jeton, l'UAV sélectionne un code dans la liste et l'attribue au prochain UAV destiné à recevoir des données. Ce processus assure une transmission gérée de manière efficace, en réduisant les risques de collisions et en optimisant l'utilisation du canal. De plus, la mise à jour dynamique du jeton permet au réseau de s'adapter aux changements topologiques dus à la mobilité des UAVs, ce qui permet de maintenir une communication fluide et fiable.

- **Avantages**

- Le système de jetons réduit les collisions et optimise l'accès au canal.
- Le protocole s'adapte à la mobilité des UAVs tout en garantissant la QoS.
- L'attribution efficace des ressources permet d'augmenter le débit du réseau et de transmettre les données plus rapidement.

- **Limitations**

- La réception d'un seul paquet à la fois par un UAV limite les performances du réseau, surtout en cas de trafic dense.
- En l'absence de jeton, un UAV subit un retard de transmission, ce qui augmente les délais de communication.
- La mobilité élevée des UAVs impose des mises à jour fréquentes des jetons, ce qui peut surcharger le réseau et réduire l'efficacité du protocole.

- **Protocole FDRMRC-MAC (Full-Duplex Radios and Multi-packet Reception Capability MAC)**

Le protocole MAC FDRMRC [9] améliore la communication entre UAVs en combinant la radio full-duplex (émission et réception simultanée) et la réception multipaquets (MPR), pour optimiser l'utilisation du canal.

Il repose sur l'utilisation de deux canaux distincts : un canal commun pour la circulation des jetons, et un canal dédié aux données. Chaque UAV adapte ses transmissions en fonction de l'état du réseau et des exigences de QoS, en s'appuyant sur les informations encapsulées dans le jeton. Ce dernier contient notamment : une liste de codes (identifiants des trames), une liste de gains de canal (qualité des liens), et une liste des délais (temps d'attente moyen des émetteurs). Lorsqu'un nœud détient le jeton, il extrait un code et transmet les données au nœud voisin. Toutefois, conserver le jeton trop longtemps peut provoquer une latence. Le temps d'attente dépend principalement de deux paramètres : l'état du canal et les contraintes de délai, tous deux inclus dans le jeton. Ainsi, chaque nœud peut choisir dynamiquement le destinataire optimal pour minimiser les délais. Grâce à cette approche adaptative, FDRMRC garantit une transmission fiable et efficace, même dans les environnements UAVs à forte dynamique.

- **Avantages**

- La radio full-duplex et le MPR augmentent le débit, améliorant ainsi la rapidité et la fiabilité des communications.
- Grâce au passage de jetons, ce protocole dépasse les limites des MAC à contention en réduisant collisions et pertes de paquets.

- **Limitations**

- Une transmission de jeton échouée peut entraîner une dégradation des performances globales du réseau.
- Le maintien prolongé du jeton dans un réseau à forte mobilité pourrait causer des délais importants dans la transmission des données.

### 2.3.2 Protocoles MAC sans contention

Les protocoles MAC sans contention, ne nécessitent pas de compétition pour accéder au canal, ils reposent sur un système de canal réservé. Ces protocoles éliminent les collisions et permettent une meilleure utilisation du canal sous des charges élevées [14]. Cependant, ils rencontrent également certaines difficultés, en ce qui concerne la synchronisation correcte des ressources allouées. Ils reposent sur l'une des trois techniques classiques de planification des canaux sans fil : **l'accès multiple par répartition spatiale (SDMA)**, **l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA)**, et **accès multiple par répartition en code (CDMA)** [[14],[26]]. Les protocoles MAC sans contention proposés pour les FANETs sont présentés ci-dessous.

#### 2.3.2.1 Accès Multiple par Répartition Spatiale (SDMA)

Les protocoles MAC basés sur la répartition spatiale pour l'accès multiple exploitent la séparation spatiale des transmissions afin de créer plusieurs canaux indépendants à l'aide du multiplexage spatial et de la diversité spatiale. Cette approche optimise la capacité de transmission, améliore le débit et permet des échanges simultanés dans les réseaux ad hoc.

- **Protocole DPCS-SDMA (Directional Physical Carrier Sensing–Space Division Multiple Access)**

Le protocole DPCS-SDMA [11] optimise la communication dans les réseaux FANETs denses et dynamiques, en remplaçant les méthodes classiques comme CSMA/CA par une approche plus intelligente.

Il repose sur la technologie ISAC (Integrated Sensing and Communication), qui permet à chaque UAV de détecter passivement ses voisins via la rétrodiffusion MIMO et l'adresse MAC, réduisant latence et consommation énergétique. Grâce à une détection directionnelle de la porteuse, les UAVs analysent l'occupation du canal dans plusieurs directions, atténuant les effets des nœuds cachés et exposés et favorisant la réutilisation spatiale.

Lorsqu'un UAV souhaite transmettre, il identifie un faisceau libre. Si plusieurs UAVs partagent le même faisceau, un back-off exponentiel binaire est appliqué pour organiser l'accès. Le compte à rebours est suspendu en cas d'activité détectée, ce qui limite les collisions. La transmission se fait sans RTS/CTS, ce qui réduit le délai d'accès, et les liens sont ajustés dynamiquement selon la mobilité des UAVs, assurant une communication fiable même en topologie changeante.

- **Avantages**

- Le protocole DPCS-SDMA optimise le débit en autorisant des transmissions simultanées sans interférences grâce à la réutilisation spatiale via MIMO et des antennes intelligentes.
- La latence est réduite grâce à la suppression des trames RTS/CTS et à une détection directionnelle rapide.
- Faible consommation énergétique en réduisant les transmissions inutiles.

- **Limitations**

- La mise en œuvre de la détection directionnelle précise peut être coûteuse en pratique.
- Peut être sensible aux erreurs d'estimation de direction en cas de mobilité extrême.
- L'efficacité dépend fortement de la qualité de la détection directionnelle et de la synchronisation locale.

- **Protocole DAB-MAC (Directional Antenna-Based MAC)**

Le protocole DAB-MAC [17] améliore la communication dans les FANETs en utilisant des antennes directionnelles plutôt que des antennes omnidirectionnelles classiques. Cela permet d'augmenter la portée de transmission, permet la réutilisation des fréquences et de réduire les interférences, tout en facilitant les communications simultanées via la technique SDMA.

Pour assurer une communication efficace, le protocole introduit un mécanisme de gestion basé sur l'échange de messages RTS/CTS dans toutes les directions, afin de suivre la destination et les UAVs voisins. Ces messages contiennent la durée de la transmission des données, les coordonnées de position, l'alignement de l'antenne et le numéro du faisceau utilisé. L'UAV qui reçoit le signal le plus fort est identifié comme destinataire, tandis que les autres bloquent leurs antennes pour éviter les interférences en utilisant un vecteur d'allocation du réseau directionnel. De plus, les antennes directionnelles collectent efficacement des informations sur l'emplacement exact des nœuds de communication pour l'échange de données, et chaque UAV maintient une table de suivi des communications sur ses voisins en stockant les adresses, les faisceaux utilisés et les trames reçues, ce qui permet à la couche MAC de mettre à jour la position des UAVs voisins à chaque intervalle via le GPS et les antennes directionnelles.

- **Avantages**

- Grâce aux antennes directionnelles, les UAVs peuvent communiquer sur de plus longues distances.
- L'utilisation d'antennes directionnelles améliore les performances du réseau en permettant la réutilisation spatiale des canaux et en réduisant les interférences.
- Grâce à la séparation spatiale plusieurs communications peuvent être établies simultanément entre différents nœuds, sans provoquer d'interférences.

- **Limitations**

- L'antenne directionnelle nécessite une localisation précise des nœuds pour assurer un échange efficace des informations.
- La diffusion des messages RTS/CTS dans toutes les directions entraîne une surcharge en termes de temps et de ressources, affectant l'efficacité globale du protocole.
- Le basculement entre les antennes doit être soigneusement géré afin d'éviter les pertes de connexion ou les erreurs de transmission.

### 2.3.2.2 Accès Multiple par Répartition dans le Temps (TDMA)

L'accès multiple par répartition temporelle est une technique de contrôle d'accès au support permettant à plusieurs nœuds de partager un même canal de communication. Elle attribue à chaque nœud des intervalles de temps distincts pour effectuer ses transmissions. Grâce au TDMA, les UAVs peuvent transmettre leurs données de manière séquentielle selon des créneaux horaires prédéfinis, ce qui réduit les risques de collision et améliore l'efficacité globale du réseau.

- **Protocole SPD-TDMA (Service Priority-based Dynamic Time Division Multiple Access)**

Le protocole SPD-TDMA [33] est conçu pour améliorer l'efficacité des réseaux FANETs en intégrant la gestion des priorités et une utilisation optimisée des ressources réseau. Il structure chaque trame en trois sous-trames : Réclamation, Réponse et Information. Lorsqu'un paquet arrive à la couche MAC, il est placé dans une file d'attente selon sa priorité. Ensuite, chaque UAV met à jour le temps d'attente des paquets, calcule une priorité globale, puis estime le nombre de créneaux nécessaires pour la transmission.

Durant la phase Réclamation, les UAVs soumettent leur demande de créneaux. Lors de la phase Réponse, les créneaux sont attribués en fonction des priorités, et les paquets sont transférés dans la file d'envoi. Enfin, pendant la phase Information, les paquets sont transmis dans les créneaux réservés.

Un algorithme de planification basé sur le temps d'attente permet de gérer dynamiquement les priorités : un paquet à haute priorité ou avec un long temps d'attente sera transmis en premier. Pour éviter la surréservation et maximiser l'utilisation du canal, SPD-TDMA utilise une stratégie de planification proactive, estimant à l'avance les créneaux nécessaires selon l'état du trafic.

- **Avantages**

- Augmentation du taux de livraison des paquets et du débit global du réseau.
- Optimisation de l'utilisation des ressources en évitant la surréservation ou le gaspillage de créneaux horaires.
- Transmission efficace même dans des environnements à forte densité.

- **Limitations**

- SPD-TDMA est moins efficace quand le trafic est faible, car certains créneaux restent inutilisés.
- SPD-TDMA est complexe à gérer car chaque UAV doit estimer ses besoins en créneaux, ce qui demande plus de ressources.

- **Protocole UD-MAC (UAV Delay-Tolerant Multiple Access Control)**

Le protocole UD-MAC [21] a été conçu pour optimiser la transmission de données dans les réseaux FANETs à forte mobilité. Il s'appuie sur les liens CNPC (Control and Non-Payload Communication), qui permettent non seulement la transmission des commandes et des données de contrôle entre les stations au sol et les UAVs, mais aussi le partage d'informations de canal et d'état de vol entre les UAVs.

UD-MAC vise à résoudre le problème de la réduction du débit réseau lorsque les UAVs retournent à leur base pour se recharger. Pour cela, il exploite deux modes complémentaires : le mode SCF (Store-Carry-Forward) et le mode MH (Multi-Hop).

En mode SCF, les UAVs en retour vers la station au sol (GU) agissent comme des relais mobiles. Ils collectent les données des UAVs voisins et les transportent jusqu'à la GU, ce qui permet de réduire les interruptions de transmission et de résoudre le problème de la connexion intermittente et du faible débit. Le mode MH est quant à lui utilisé lorsque le SCF n'est pas possible. Dans ce cas, les UAVs transmettent leurs données via plusieurs sauts entre eux jusqu'à atteindre la GU. UD-MAC donne une priorité élevée au mode SCF, mais cela peut entraîner une distorsion des ressources réseau. Pour éviter cela, le protocole introduit une période de gel adaptative qui permet aux UAVs en mode MH d'accéder également aux ressources réseau. UD-MAC assure ainsi une communication robuste, même dans des environnements dynamiques.

- **Avantages**

- UD-MAC améliore le débit du réseau en utilisant les UAVs en retour comme relais mobiles via le mode SCF.
- Le mode SCF réduit la consommation d'énergie en minimisant les transmissions directes.
- Le protocole assure une communication fiable en adaptant dynamiquement l'allocation des ressources entre les modes SCF et MH.

- **Limitations**

- Chaque nœud doit avoir des informations sur tous les nœuds voisins dans sa portée de transmission à deux sauts, ce qui complique la gestion.
- Les priorités doivent être décidées correctement pour obtenir une efficacité supérieure, ce qui peut être difficile dans un environnement dynamique.

- **Protocole CU-MAC (Centralized UAV Medium Access Control)**

Le protocole CU-MAC [19] est conçu pour optimiser la gestion des ressources réseau dans les réseaux FANETs centralisés équipés d'antennes directionnelles.

Son fonctionnement repose sur une segmentation temporelle en deux phases distinctes : l'intervalle de contrôle (CI) et l'intervalle de service (SI). Pendant le CI, les UAVs utilisent leurs antennes omnidirectionnelles pour diffuser des paquets de sécurité via TDMA, synchroniser leurs positions et optimiser l'allocation des canaux via un UAV centralisé. Ensuite, pendant le SI, les UAVs passent en mode directionnel pour transmettre des paquets de service comme la vidéo, avec un ajustement dynamique des ressources en fonction de la congestion du réseau.

CU-MAC repose également sur deux mécanismes qui optimisent la communication. Le premier est un intervalle de temps prédictif, qui ajuste dynamiquement la durée du CI en anticipant les entrées et sorties des UAVs, réduisant ainsi les pertes de ressources et garantissant une diffusion fiable de sécurité. Le second est un schéma d'allocation dynamique des canaux, où l'UAV centralisé analyse en temps réel les files d'attente et priorise les paquets vidéo pour éviter les interruptions de transmission.

CU-MAC ajuste la transmission selon la congestion du réseau et s'appuie sur la synchronisation GPS pour une coordination efficace.

- **Avantages**

- La segmentation en phases CI et SI permet une gestion efficace et organisée des ressources réseau.
- CU-MAC offre une meilleure fiabilité pour la transmission des paquets de sécurité.
- L'allocation dynamique des canaux améliore le débit de transmission en priorisant les paquets critiques, notamment vidéo.

- **Limitations**

- CU-MAC nécessite davantage d'énergie, ce qui impacte l'autonomie des UAVs en particulier leur durée de fonctionnement.
- CU-MAC entraîne une surcharge et des frais généraux plus élevés pour la coordination des canaux.

### 2.3.2.3 Accès Multiple par Répartition en Code (CDMA )

L'accès multiple par répartition en code est une technique permettant à plusieurs utilisateurs de transmettre simultanément sur un même canal de communication, grâce à l'attribution d'un code unique à chaque transmission. Cela permet un partage efficace de la bande de fréquences tout en limitant les interférences entre utilisateurs.

- **Protocole TC-CDMA ( Token-based MAC CDMA Protocol)**

Le protocole TC-CDMA [20] est conçu pour les réseaux FANETs, notamment dans les missions de surveillance tactique en environnements dynamiques. Son fonctionnement repose sur trois étapes : la détection des voisins cachés ou perdus, l'attribution de codes CDMA, et la planification de la transmission coopérative.

Chaque UAV utilise un identifiant unique et trois files : la CQ (Code Queue) contenant les codes CDMA disponibles, la NQ (Neighbor Queue) stockant les informations sur les voisins, et la TQ (Transmitter Queue) listant les UAVs prêts à transmettre. Un temporisateur assure la circulation correcte du jeton entre les nœuds.

Le protocole repose sur plusieurs mécanismes de circulation du jeton. Il permet la détection en temps réel des voisins cachés ou perdus, facilitant l'adaptation à la topologie du réseau. Le jeton gère aussi l'attribution et la libération des codes CDMA, avec réutilisation spatiale pour éviter les collisions. Enfin, grâce à la planification et à la détection multi-utilisateurs, plusieurs UAVs peuvent transmettre simultanément vers un même récepteur, optimisant ainsi l'utilisation du spectre et évitant la contention.

- **Avantages**

- Le protocole optimise les performances du réseau en détectant rapidement les UAVs cachés ou perdus.
- L'attribution dynamique des codes CDMA minimise les collisions et assure une communication fluide entre les UAVs.
- La planification coopérative optimise les transmissions et améliore le débit global du réseau.

- **Limitations**

- Le jeton peut échouer à cause de la mobilité ou d'un retard, ce qui perturbe la synchronisation du réseau.
- L'augmentation de la taille du réseau accroît la latence de mise à jour, réduisant ainsi sa réactivité et son efficacité.

### 2.3.3 Protocoles MAC hybride

Les protocoles MAC hybrides pour les réseaux FANETs combinent les avantages des protocoles basés sur la contention et ceux sans contention. Ils visent à optimiser l'accès au canal

dans des environnements dynamiques, améliorant ainsi l'efficacité et la fiabilité des communications entre les UAVs. Ces protocoles se divisent en deux sous-classes : **TDMA combinée avec CDMA** et **les méthodes sans contention et avec contention**. Ils sont présentés ci-dessous.

### 2.3.3.1 TDMA combinée avec CSMA

Cette technique utilise à la fois le MAC TDMA sans conflit et le MAC CSMA/CA basé sur le conflit pour accéder au canal sans fil aérien [3].

- **Protocole CC-MAC (Collision Coordination MAC)**

Le protocole hybride CC-MAC [27], combinant TDMA et CSMA, est conçu pour les réseaux FANETs ultra-denses, où de nombreux UAVs coopèrent simultanément. Il vise à réduire les collisions, la surcharge de transmission et à accélérer les échanges.

Ce protocole distingue deux types d'UAVs : un UAV maître, doté d'une grande capacité de calcul et de stockage, qui agit comme passerelle vers un centre de contrôle, et les UAVs acteurs, équipés de capteurs intelligents et d'antennes multidirectionnelles, responsables de la détection, de la collecte et de la transmission des données environnementales.

Le protocole CC-MAC comprend deux variantes. CC-MAC I, introduit les trames ARTS (Aggregated Request To Send) et ACTS (Aggregated Clear To Send) pour synchroniser les transmissions et éviter les collisions. CC-MAC II, permet aux UAVs non actifs de se mettre en veille pour économiser l'énergie, ou de procéder à des transmissions parallèles via des antennes directionnelles, grâce aux trames RTP (Request for Temporary Pairing) et CTP (Clear to Pairing). Cette approche assure une meilleure utilisation du canal et une communication efficace même dans des environnements très denses.

- **Avantages**

- Réduction des collisions entre paquets grâce à une coordination hybride.
- Amélioration du débit et réduction des délais de transmission.
- Transférer simultanément des paquets de données sans délai.

- **Limitations**

- Dépendance au UAV maître, ce qui peut poser problème en cas de défaillance ou de surcharge.
- Une synchronisation précise entre les nœuds est requise.
- La sélection des nœuds partenaires doit être effectuée de manière judicieuse pour garantir l'efficacité du réseau.

- **FS-MAC (Fault-Tolerant Synchronous-MAC)**

Le protocole FS-MAC [34] optimise les transmissions dans les réseaux FANETs en permettant une commutation dynamique entre TDMA et CSMA/CA selon l'état du réseau. Il répond aux défis de mobilité élevée, de variabilité du trafic et de tolérance aux pannes.

Son fonctionnement repose sur un mécanisme de commutation synchrone basé sur le Q-Learning distribué, qui permet à chaque UAV de choisir dynamiquement le protocole MAC optimal selon plusieurs critères tels que le volume de données transmises avec succès, le délai de transmission et le taux de retransmission. Pour garantir une synchronisation fiable de la transition entre protocoles au sein du réseau, FS-MAC intègre une procédure de consensus PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance).

Au début de chaque créneau temporel, chaque UAV évalue l'état du réseau via l'algorithme de

Q-Learning et sélectionne le protocole MAC le plus adapté. Ensuite, un consensus global est établi entre tous les nœuds pour assurer une transition stable et cohérente.

Grâce à cette stratégie d'adaptation intelligente, FS-MAC réduit les collisions, les pertes de paquets et améliore l'allocation des ressources, offrant ainsi une communication plus stable et performante dans les FANETs dynamiques.

- **Avantages**

- Le Q-Learning permet une prise de décision intelligente et en temps réel pour adapter dynamiquement le protocole MAC aux conditions du réseau.
- Utilisation du consensus PBFT pour garantir une communication stable même en présence de nœuds défectueux.
- FS-MAC réduit les collisions et les pertes de paquets, tout en garantissant une gestion efficace des ressources réseau.

- **Limitations**

- La synchronisation entre les UAVs peut ralentir la prise de décision.
- Le temps de communication du protocole peut augmenter avec le nombre de UAVs.
- La mise en œuvre du PBFT peut entraîner une latence supplémentaire dans la prise de décision.

- **Protocole MS-MAC (Switching MAC Protocols )**

Le protocole MS-MAC [28] est conçu pour les FANETs utilisés dans des scénarios tactiques. Il répond aux défis liés aux interférences, aux pertes de connexion et aux variations de charge en assurant une gestion adaptative de l'accès au canal.

Il repose sur une commutation dynamique entre CSMA et TDMA : le CSMA est utilisé en cas de faible trafic pour limiter la surcharge, tandis que le TDMA dynamique (DTDMA) est activé lorsque le trafic est élevé, ajustant le nombre de créneaux horaires selon le nombre d'UAVs émetteurs afin d'éviter le gaspillage de bande passante.

Cette commutation est gérée par un chef de cluster, un UAV central doté de trois modules : un module de réception (collecte les messages de requête), un module de décision (évalue la charge réseau), et un module protocole (sélectionne le MAC optimal). Les UAVs du cluster sont classés en deux catégories : actifs (en mission) et en veille. La communication est coordonnée par le chef via des messages de contrôle, assurant une adaptation continue aux conditions du réseau.

Grâce à ce fonctionnement, MS-MAC garantit une allocation efficace des ressources et améliore la robustesse des transmissions dans les environnements dynamiques et instables.

- **Avantages**

- MS-MAC ajuste dynamiquement son protocole entre CSMA et TDMA en fonction de la charge du trafic réseau.
- MS-MAC utilise TDMA en cas de forte charge pour éviter les collisions et améliorer le débit réseau.
- La coordination centralisée du chef de cluster optimise la commutation et la synchronisation des UAVs.

- **limitations**

- Désigner un chef de cluster central peut représenter un point de défaillance unique en cas de piratage ou de perte d'UAV.
- La commutation entre protocoles peut introduire une latence, ce qui perturbe la transmission.

### 2.3.3.2 Méthodes sans contention et avec contention

Cette sous-classe de protocoles hybrides combine les mécanismes d'accès avec et sans contention, en intégrant les avantages propres à chacun. Elle associe la flexibilité et la simplicité des protocoles à contention à la réduction des collisions et à la gestion efficace des ressources offertes par les protocoles sans contention [10].

- **Protocole LDMAC (MAC for Long Distance UAVs)**

Le protocole LDMAC [12] a été conçu pour améliorer l'efficacité des transmissions dans les réseaux FANETs à longue distance. Il repose sur une approche hybride combinant un accès aléatoire et une allocation de créneaux sans collision, optimisant ainsi l'utilisation du canal tout en réduisant le risque de collision entre les transmissions, tout en exploitant le retard de propagation comme paramètre stratégique pour renforcer les performances réseau.

Son fonctionnement repose sur deux phases : durant la phase de contention, les UAVs envoient des requêtes à la station de base, qui applique une annulation des interférences et attribue les créneaux de transmission. Dans la phase de transmission, les UAVs transmettent leurs paquets dans les créneaux attribués. LDMAC s'appuie également sur le système mondial de navigation par satellite pour assurer une synchronisation temporelle précise et améliorer la gestion des communications.

- **Avantages**

- LDMAC exploite le retard de propagation pour assurer une communication à longue portée sans risque de collision.
- La prise en compte des délais de propagation permet une allocation efficace des créneaux, optimisant l'utilisation des ressources réseau.

- **Limitations**

- Le protocole demande une capacité de calcul accrue pour gérer les délais de propagation et l'allocation des créneaux temporels.
- L'intégration d'un accès aléatoire basé sur les délais rend la mise en œuvre et la gestion du protocole plus difficiles.

- **Protocole FM-MAC (FANET Multi-Channel MAC)**

Le protocole FM-MAC [31] vise à améliorer la transmission des données dans les réseaux FANETs en exploitant les antennes directionnelles et le multicanal. Pour faire face à la forte mobilité des UAVs et aux ruptures de lien, il adopte une stratégie de réservation de canaux fondée sur la prédiction de la mobilité.

FM-MAC utilise une architecture multicanal composée d'un canal de contrôle (CCH) pour la sécurité et de canaux de service (SCH) pour les données, eux-mêmes organisés en intervalles : intervalles de canal de contrôle (CCHI) et intervalles de canal de service (SCH). Pendant la phase CCHI, les UAVs échangent des paquets de sécurité via TDMA, avec une période de sécurité pour diffuser les informations et une période de réservation où ils prévoient leur mobilité pour réserver les canaux. Une coordination distribuée (DCF) permet d'éviter les conflits. En phase SCH, les UAVs passent en mode directionnel pour transmettre les données sur les SCH. FM-MAC intègre un mécanisme de préemption pour prioriser les paquets vidéo, assurant ainsi un meilleur débit et une faible latence pour les applications en temps réel. Ces optimisations renforcent la fiabilité, réduisent les interférences et permettent une gestion efficace des ressources, rendant le protocole adapté aux environnements de drones à haute mobilité.

- **Avantages**

- Dans FM-MAC, le débit des paquets de service est optimisé, avec une priorité particulière accordée aux paquets vidéo.
- Le protocole FM-MAC améliore le délai de transmission et augmente le taux de livraison des paquets de sécurité .

- **Limitations**

- Le protocole peut entraîner une surcharge du réseau à cause des nombreux paquets de sécurité et de contrôle échangés, ce qui peut affecter son efficacité.
- La gestion des priorités et les interférences dans la communication directionnelle rendent la mise en œuvre du FM-MAC complexe.

## 2.4 Comparaison des protocoles MAC pour les FANETs

Dans cette section, nous proposons une étude comparative en utilisant le tableau 2.1, qui présente les différents protocoles MAC que nous avons étudié. Cette analyse présente un résumé détaillé des objectifs, des fonctions et des différentes paramètres et métriques de performance considérées pour les protocoles MAC étudiés.

D'après cette comparaison, on observe :

- La plupart des protocoles MAC visent l'utilisation efficace de la bande passante, la réduction des collisions, la gestion des changements rapides de topologie et des liens instables.
- Chaque protocole est caractérisé par des techniques spécifiques, visant un ou plusieurs éléments de la QoS, telles que l'augmentation du débit, la réduction de la latence et des collisions, l'efficacité énergétique ou même l'équité au sein du réseau.
- Certains protocoles adoptent des solutions classiques mais efficaces, comme l'allocation dynamique des ressources, la réutilisation des canaux, ou encore la coordination basée sur le positionnement GPS, comme dans les protocoles RR-ALOHA ou AMAC. Ce dernier se distingue par l'utilisation combinée d'antennes directionnelles et omnidirectionnelles, une approche permettant d'améliorer la portée des communications, de limiter les interférences et de renforcer la qualité des liaisons entre UAVs. En complément de cet avantage matériel, AMAC prend également en compte les spécificités dynamiques des drones, telles que leur forte mobilité et leurs variations d'attitude, ce qui lui permet de s'adapter efficacement aux exigences des environnements civils et militaires.
- L'intégration d'antennes directionnelles dans des protocoles comme dans AMAC, FM-MAC ou DPCS-SDMA permet d'améliorer la portée, limiter les interférences et d'exploiter l'aspect spatial du canal de communication.
- Certains protocoles comme TBI-MAC ou FDMRCR-MAC, utilisent des mécanismes à base de jeton pour mieux organiser l'accès au canal dans des environnements denses.
- D'autres, comme le SPD-TDMA, appliquent des méthodes distinctes pour la gestion des paquets selon leur niveau de priorité, ce qui contribue à l'amélioration de la QoS, en particulier pour les applications nécessitant une sensibilité au temps réel.
- Avec l'évolution des besoins applicatifs, en particulier dans des environnements critiques ou à forte densité, des protocoles plus avancés ont été conçus. Ces solutions récentes elles englobent des méthodes hybrides, combinant les atouts du TDMA, du CSMA et du CDMA. Par exemple, le protocole MS-MAC effectue une commutation

dynamique en fonction de la charge du réseau, tandis que le protocole FS-MAC utilise le Q-learning pour optimiser les décisions d'accès au canal.

L'évaluation des protocoles MAC repose généralement sur plusieurs critères, tels que le débit, la latence, le taux de livraison, la robustesse du réseau, et parfois l'efficacité énergétique. Cependant, ils doivent également relever divers défis tels que la gestion des erreurs de transmission, l'adaptation à une topologie fortement dynamique ou encore l'assurance d'une communication stable et équitable entre les UAVs.

En conclusion, la conception d'un protocole MAC adapté aux réseaux FANETs nécessite de prendre en compte l'ensemble de ces contraintes. Le choix du protocole doit donc être effectué en tenant compte des objectifs applicatifs, des priorités fonctionnelles et des contraintes techniques spécifiques à chaque déploiement réseau, afin d'assurer des communications fiables, évolutives et équitables entre les UAVs.

Protocole	Objectif	Fonction	Paramètres utilisés	Métriques de performances
RR-ALOHA	Assurer une diffusion distribuée des messages dans les réseaux FANETs sans infrastructure centralisée	Attribue un canal de base par accès aléatoire et diffuse l'état du canal via les trames FI pour synchroniser les transmissions	Débit	Débit, taux de collision réduit
AMAC	Optimiser la communication entre UAVs grâce à une liaison stable, efficace et à faible latence	Utilise des antennes directionnelles et omnidirectionnelles, guidées par GPS/IMU, pour adapter dynamiquement les transmissions	Débit, délai	Débit, taux d'erreur binaire (BER), délai de bout en bout, taux de livraison des paquets
LODMAC	Optimiser l'accès au canal en utilisant des antennes directionnelles et une estimation de position, afin de résoudre les problèmes de surdité	Utilise la position des nœuds et des trames de contrôle directionnelles (RTS, CTS, BTS) pour organiser la communication et éviter la surdité	Délai moyen de transmission, débit	Débit, latence, équité, réutilisation spatiale, délai, faible interférence
TBI-MAC	Adopter un mécanisme basé sur un jeton pour améliorer les performances des réseaux FANETs à haute densité	Utilise un système de jetons contenant des informations de réseau pour réguler et prioriser les transmissions	Débit, délai	Débit, latence, faible collision, délai
FDMRCR-MAC	Améliorer le débit et réduire les délais dans les réseaux FANETs full-duplex avec réception multi-paquets	Utilise un jeton circulant entre UAVs pour organiser les transmissions selon l'état du canal et les priorités	Débit, délai, latence	Débit, tolérance aux interférences, délai
DPCS-SDMA	Assurer une communication fiable, rapide et efficace dans les réseaux FANETs dynamiques et denses	Assure un accès efficace et sans collision au canal grâce à la détection directionnelle et à la prédiction des liens	Débit, délai	Débit, latence, délai de bout en bout, retransmission de paquets
DAB-MAC	Améliorer les performances réseau en augmentant la portée de transmission et l'efficacité du canal	Exploite les antennes directionnelles et la réutilisation spatiale via SDMA	Débit, délai, latence	Débit, latence, délai de bout en bout, nombre de retransmission
SPD-TDMA	Garantir une transmission équitable et efficace en tenant compte des priorités de service	Priorise les paquets urgents à l'aide d'une planification basée sur le temps d'attente, tout en tenant compte des paquets de faible priorité	Débit, délai	Débit, délai moyen de bout en bout, taux de livraison des paquets
UD-MAC	Assurer une transmission efficace et un débit stable dans les réseaux FANETs	Favorise le SCF et équilibre l'accès avec le MH et une gelée adaptative	Débit, latence	Débit, latence, nombre de collisions

Protocole	Objectif	Fonction	Paramètres utilisés	Métriques de performances
CU-MAC	Optimiser les ressources et garantir la QoS dans les réseaux FANETs centralisés à antennes directionnelles	Utilise une coordination centralisée en deux phases (CI et SI) pour gérer dynamiquement les transmissions et la congestion réseau	Débit, délai	Débit, délai, taux de livraison des paquets
TC-CDMA	Optimiser les performances des réseaux FANETs pour les missions de surveillance en environnements tactiques	Utilise un jeton circulant entre UAVs pour détecter les voisins cachés, attribuer les codes CDMA et planifier les transmissions	Latence, délai moyen des paquets	Taux de livraison des paquets, délai, latence
CC-MAC	Optimiser la transmission dans les réseaux FANETs ultra-denses en limitant les collisions et en améliorant la coordination	Combine les mécanismes CSMA/CA et TDMA dans une approche hybride pour optimiser l'accès au canal	Débit, latence, délai	Débit, latence, délai, collision réduite
FS-MAC	Assurer une transmission fiable et adaptative dans les FANETs en tolérant les pannes et les variations de conditions réseau	Implémente une sélection dynamique entre TDMA et CSMA/CA via Q-Learning distribué, avec synchronisation assurée par consensus PBFT	Débit, latence, délai	Débit, latence, délai, retransmission de paquets
MS-MAC	Améliorer les communications entre UAVs en s'adaptant aux scénarios tactiques, aux variations de trafic et aux interférences ennemies	Utilise une commutation entre CSMA et DTMA, gérée par le chef de cluster à partir des informations de trafic collectées et transmises par des messages de contrôle	Débit moyen	Débit moyen, taux moyen de livraison des paquets, efficacité de transmission du trafic
LDMAC	Optimiser la transmission longue portée entre UAVs en réduisant les collisions grâce aux délais de propagation	Combine accès aléatoire et allocation centralisée de créneaux pour organiser efficacement les transmissions UAV	Débit	Débit, équité
FM-MAC	Éviter les interruptions entre UAVs et à optimiser les transmissions dans les réseaux FANETs à haute mobilité	Utilise antennes directionnelles et multicanal avec prédiction de mobilité pour réserver sans conflit et synchroniser les transmissions	Débit, latence, délai	Débit, latence, délai, taux de livraison de paquets

TABLE 2.1 – Comparaison des protocoles MAC pour les FANETs centrés sur la QoS.

## 2.5 Conclusion

Les protocoles MAC jouent un rôle essentiel dans l'architecture de communication des réseaux FANETs en gérant l'accès au canal sans fil de manière efficace, tout en s'adaptant à la mobilité élevée, à la topologie dynamique et aux ressources limitées. Leur performance conditionne directement des paramètres essentiels comme le débit, le délai, la latence, la consommation énergétique et la fiabilité des communications entre UAVs.

Dans ce chapitre nous avons mis en avant l'importance des protocoles MAC dans les réseaux FANETs, en présentant les critères essentiels à considérer lors de leur conception, ainsi que leur classification selon les méthodes d'accès au canal : à contention, sans contention et hybrides. Chaque catégorie a été analysée selon son fonctionnement, ses avantages et ses limites.

Une analyse comparative détaillée des différents protocoles MAC étudiés pour les FANETs a été présentée et discutée, notamment dans le cas du protocole AMAC. Malgré son efficacité, il présente plusieurs inconvénients, notamment l'absence de gestion des priorités, ce qui peut fortement dégrader la QoS, surtout pour les applications critiques nécessitant une transmission rapide et fiable.

Pour remédier à cette limitation, une amélioration du protocole AMAC sera proposée, intégrant un mécanisme de gestion des priorités selon l'importance des paquets, afin d'optimiser la QoS. Le chapitre suivant sera donc dédié à une étude approfondie du protocole AMAC, ainsi qu'aux améliorations envisageables pour faire face à ses inconvénients.

# 3

## Protocole AMAC basé sur la priorité pour les réseaux FANETs

### Introduction

Avec l'évolution rapide des réseaux FANETs et l'augmentation des contraintes en matière d'efficacité, de fiabilité et d'équité, il devient essentiel de concevoir des mécanismes d'accès au canal plus performants, capables d'assurer une gestion efficace des ressources et une QoS différenciée selon les priorités des transmissions.

Parmi les solutions proposées dans la littérature, le protocole MAC adaptatif, qui se distingue par l'utilisation des antennes directionnelles et des informations de localisation pour optimiser les transmissions entre UAVs. Bien qu'efficace, il présente des limites dans les environnements à forte densité ou à trafic critique. Pour y remédier, ce chapitre propose une version améliorée intégrant un mécanisme de gestion des priorités, afin de mieux répondre aux besoins des applications critiques et sensibles au temps.

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation générale du protocole AMAC et de son fonctionnement, suivie d'une analyse critique mettant en avant ses performances ainsi que ses limites. Pour répondre à ces dernières, nous proposons une version améliorée du protocole AMAC, nommée P-AMAC (Priority Adaptive MAC). Ensuite, une modélisation du protocole, basée sur les chaînes de Markov, sera proposée afin d'évaluer cette amélioration. Enfin, cette modélisation permettra d'analyser plusieurs métriques de QoS.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1.1 Réseau ad-hoc mobile</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1.2 Réseaux FANATs</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.3 Architecture de communication dans les réseaux FANETs</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>1.4 Modèles de communication dans les réseaux FANETs</b> . . . . .	<b>9</b>

<b>1.5</b>	<b>Qualité de service</b>	<b>10</b>
<b>1.6</b>	<b>Défis des réseaux FANETs</b>	<b>12</b>
<b>1.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>

### 3.1 Protocole MAC adaptatif pour les réseaux FANATs

Dans les réseaux FANETs, le protocole MAC doit non seulement réguler l'accès au canal, mais aussi assurer des communications fiables, notamment pour les transmissions critiques. Les auteurs de [2] ont proposé un protocole MAC adaptatif pour FANETs, appelé AMAC (Adaptive MAC Protocol), conçu pour optimiser la communication entre UAVs tout en étendant la couverture du réseau. Ce protocole repose sur l'utilisation d'antennes directionnelles orientables dans toutes les directions, qui offrent une meilleure efficacité que les antennes omnidirectionnelles classiques. Cette approche permet d'augmenter la robustesse des liaisons, de réduire les interférences, d'améliorer le débit et de diminuer le délai de bout en bout, contribuant ainsi à de meilleures performances réseau.

Le protocole AMAC repose sur l'idée d'équiper chaque UAV de quatre antennes :

- Deux omnidirectionnelles, principalement utilisées pour les messages de contrôle et l'écoute du canal ;
- Deux directionnelles : l'antenne primaire, placée sur la partie supérieure du drone, et l'antenne secondaire, située sur la partie inférieure.

Lorsqu'un UAV souhaite transmettre un paquet, il choisit l'antenne la plus adaptée (directionnelle ou omnidirectionnelle) selon la situation.

Pour permettre une orientation précise du faisceau, chaque drone est équipé de deux dispositifs complémentaires de localisation : un GPS et une IMU. Le GPS offre une localisation précise en coordonnées géographiques, tandis que l'IMU permet d'estimer en temps réel les mouvements et l'attitude de l'UAV. La combinaison de ces deux dispositifs de localisation permet à chaque UAV de déterminer avec une grande précision la position des cibles avant toute transmission de données.

Le fonctionnement du protocole AMAC est décrit ci-dessous :

Avant la transmission, l'UAV effectue deux types d'écoute du canal :

- L'écoute physique, basée sur l'intensité du signal ;
- L'écoute virtuelle, à l'aide du NAV (Network Allocation Vector).

Si le canal est libre, l'UAV entre dans une phase de backoff. Une fois le délai écoulé,

- L'UAV envoie un RTS via son antenne omnidirectionnelle contenant ses paramètres de position et d'orientation ;
- Le destinataire, après vérification du canal pendant SIFS (Short Interframe Space), répond par un CTS contenant les mêmes informations.
- Tous les UAVs à portée de réception mettent à jour leur table d'information sur la cible.

Le protocole vérifie ensuite la distance avec le destinataire :

- Si la distance est inférieure à  $D_{max}$  (portée de l'antenne omnidirectionnelle), l'envoi se fait via l'antenne omnidirectionnelle ;
- Sinon, le choix entre l'antenne directionnelle primaire ou secondaire dépend de l'altitude relative :

- Si l'émetteur est à une altitude inférieure ou égale à celle du destinataire, l'antenne primaire est utilisée ;
- Sinon, l'antenne secondaire est utilisée.

Après réception, un ACK est envoyé par le destinataire à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle. En cas de changement d'altitude entre deux transmissions, une compensation est appliquée pour corriger le faisceau directionnel.

Si la transmission échoue, un compteur de retransmission est incrémenté :

- Après cinq tentatives infructueuses, le protocole bascule automatiquement en mode omnidirectionnel pour fiabiliser la communication.
- Si, après sept tentatives, la transmission échoue toujours, le paquet est abandonné.

En l'absence d'activité pendant une seconde, chaque UAV émet un message Heartbeat contenant sa position via une antenne omnidirectionnelle. Les nœuds récepteurs mettent alors à jour leur table de localisation et répondent avec un message similaire.

Enfin, le protocole intègre une extension du NAV appelée DNAV (Directional NAV), qui prend en compte l'orientation des UAVs pour une meilleure coordination des transmissions directionnelles, assurant ainsi une gestion plus efficace du canal dans un environnement fortement mobile.

Le schéma suivant (Figure 3.1) illustre l'ensemble du processus décrit :

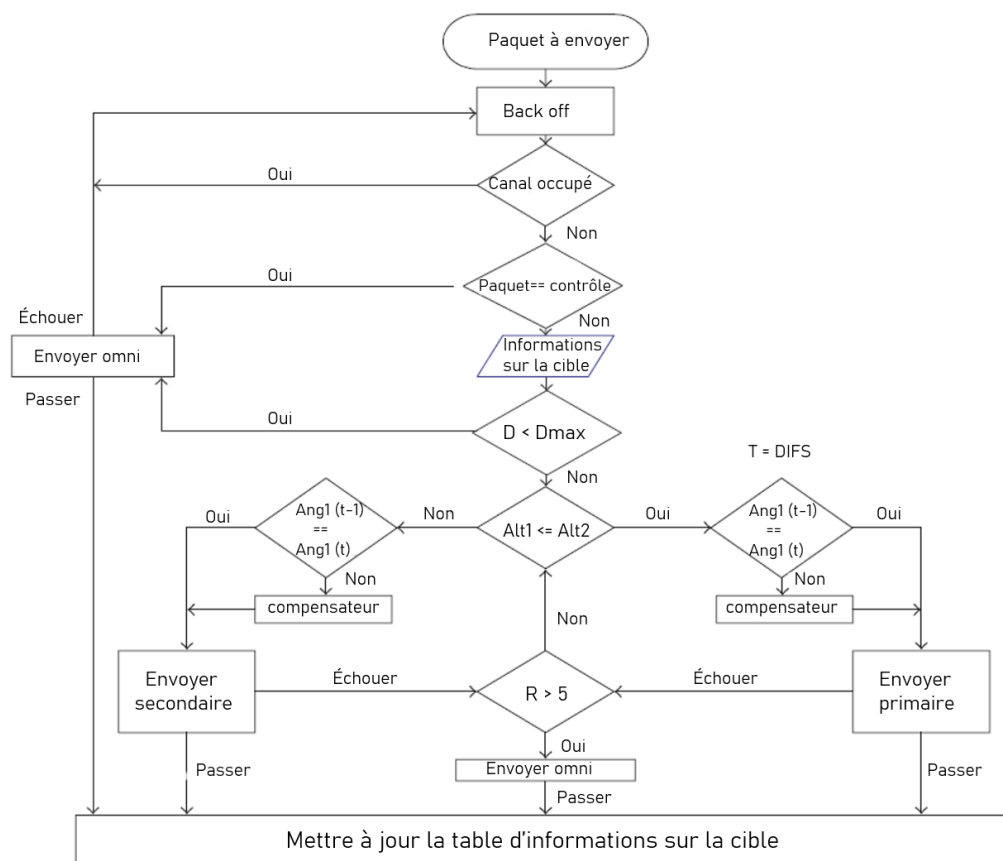


FIGURE 3.1 – Organigramme du protocole AMAC[2].

## 3.2 Analyse critique du protocole AMAC

Le protocole AMAC vise à répondre aux défis spécifiques des réseaux FANETs, où les déplacements rapides des drones, les variations de position et la taille réduite des équipements de communication, qui rendent la gestion des liaisons sans fil particulièrement complexe. En intégrant des antennes directionnelles, AMAC cherche à maximiser le débit et à minimiser le délai de bout en bout, tout en réduisant les interférences et en augmentant la portée de transmission par rapport aux antennes omnidirectionnelles. Parmi les points forts que le protocole AMAC présente, nous citons :

- L'utilisation combinée d'antennes directionnelles et omnidirectionnelles constitue une solution efficace pour améliorer la portée des communications, limiter les interférences et améliorer la qualité des liaisons entre UAVs ;
- AMAC intègre des mécanismes de localisation (GPS et IMU) pour orienter précisément les antennes directionnelles, augmentant ainsi l'efficacité des communications ;
- AMAC intègre les spécificités dynamiques des drones, telles que leur mobilité élevée et leurs variations d'attitude, et se distingue par sa capacité à répondre aux exigences spécifiques des contextes civils et militaires.

Cependant, il présente certaines limitations, on peut mentionner ce qui suit :

- AMAC nécessite un GPS et une IMU pour localiser les UAVs et ajuster les antennes, ce qui peut augmenter les coûts et la consommation d'énergie ;
- L'utilisation d'antennes directionnelles peut entraîner un problème de surdité, où un drone orienté dans une direction spécifique ne détecte pas les signaux provenant d'autres directions ;
- La mise en œuvre du protocole AMAC est complexe, car elle nécessite une coordination précise des antennes, un suivi continu de la position et de l'orientation des drones, ainsi qu'une gestion efficace de nombreux paramètres, ce qui devient particulièrement difficile dans les réseaux étendus ou instables.
- Le protocole AMAC ne prend pas en charge la gestion des priorités, traitant l'ensemble des paquets de manière équivalente, qu'ils soient urgents ou non. Cette absence de différenciation peut entraîner des retards dans la transmission de données critiques, telles que les commandes de vol ou les alertes de sécurité, en particulier en cas de congestion du réseau. Une telle limitation compromet la réactivité du système, ce qui pose problème dans les applications sensibles au temps réel. L'intégration d'un mécanisme de priorisation permettrait d'améliorer significativement les performances du protocole et de mieux répondre aux exigences des environnements opérationnels complexes.

Dans la section suivante, nous présentons une amélioration du protocole AMAC visant à répondre à cette dernière limitation.

## 3.3 Amélioration du protocole AMAC : Protocole MAC Adaptatif Basé sur la Priorité (P-AMAC)

Dans cette section, nous proposons une amélioration pour le protocole AMAC, appelée P-AMAC (Priority Adaptive Medium Access Control), intégrant une gestion de priorité des

paquets tout en héritant les mêmes étapes que le protocole original. Dans AMAC, l'absence de gestion de priorité des paquets entraîne le retard ou la perte de messages critiques dans des conditions de congestion. Cela compromet la fiabilité des communications dans les applications FANET critiques. Cette proposition, P-AMAC, vise à résoudre ce problème en priorisant les transmissions critiques, optimisant ainsi la fiabilité et la robustesse du réseau.

## Gestion de priorité des paquets

Pour répondre aux exigences des FANETs, où les messages critiques doivent être transmis sans retard, le protocole P-AMAC intègre un mécanisme de gestion des priorités afin d'assurer la rapidité et la fiabilité des échanges sensibles. À cette fin, trois catégories de priorité ont été établies (haute, normale et faible) permettant de différencier les types de paquets selon leur niveau d'importance. Les paquets qui arrivent sont ainsi classés dans trois files d'attente virtuelles distinctes en fonction de la priorité des services. Cette organisation garantit que les paquets de haute priorité bénéficient d'un accès plus rapide au canal, améliorant ainsi la QoS pour les communications critiques.

- **Haute priorité (HP)** : Heartbeat, commandes de vol, alertes critiques, ...
- **Priorité normale (NP)** : Données de capteurs, vidéos, ...
- **Faible priorité (LP)** : Informations périodiques non critiques, données redondantes, ...

## Gestion de la file d'attente au niveau de la couche MAC

Dans le protocole original, la gestion des paquets au niveau de la couche MAC repose sur une seule file d'attente, sans distinction de priorité entre les différents types de paquets. Cette amélioration introduit trois files d'attente virtuelles distinctes dans une même station, chacune correspondant à un niveau de priorité : l'une pour les paquets à haute priorité, une autre pour ceux à priorité normale, et une troisième pour les paquets à priorité faible. Lorsqu'un paquet arrive à la couche MAC, il est tout d'abord analysé à l'aide d'un champ spécifique intégré dans son en-tête, permettant d'identifier son niveau de priorité. Une fonction de classification interprète cette information et oriente le paquet vers la file d'attente appropriée. Ce mécanisme permet ainsi de différencier le traitement des paquets selon leur importance.

La gestion des priorités ne se limite pas à la classification des paquets dans des files d'attente virtuelles. Elle repose également sur l'ajustement de deux paramètres spécifiques au niveau de chaque file, afin de différencier les paquets.

### 1. Mécanisme DIFS différencié

Dans le protocole AMAC classique, lorsqu'un UAV détecte que le canal est libre, il doit attendre un intervalle de temps fixe, appelé DIFS (Distributed InterFrame Space), avant d'initier la phase de contention. Ce temps est essentiel dans le mécanisme CSMA/CA, car il garantit que le canal reste libre pendant une durée minimale avant toute tentative de transmission.

Afin de prioriser les transmissions critiques, nous modifions le mécanisme du CSMA/CA en introduisant des valeurs différenciées du DIFS. Cette approche consiste à attribuer des durées de DIFS variables en fonction de la priorité du paquet à transmettre, telle que :

$$DIFS_{HP} < DIFS_{NP} < DIFS_{LP}$$

Chaque paquet intègre un champ de priorité dans son en-tête, ce qui permet au protocole d'associer dynamiquement une valeur de DIFS adaptée lors du traitement. Par conséquent, le temps d'attente avant la phase de backoff dépend directement de l'importance du paquet.

Cette différenciation assure que les paquets les plus critiques disposent d'un accès plus rapide au canal, réduisant ainsi leur délai de transmission.

## 2. Adaptation du mécanisme de backoff

Le protocole AMAC repose sur le mécanisme classique CSMA/CA, dans lequel un nœud doit surveiller l'état du canal avant toute tentative de transmission. Si le canal est occupé, le nœud entre alors en phase de backoff, au cours de laquelle il attend un temps aléatoire tiré d'une fenêtre de contention (CW), avant de vérifier à nouveau si le canal est libre.

Dans cette amélioration, nous adaptons le mécanisme de backoff afin de favoriser les paquets de haute priorité, en introduisant des fenêtres de contention différenciées en fonction de la classe de service, telles que :  $CW_{HP} < CW_{NP} < CW_{LP}$ .

Cela permet aux paquets HP d'accéder plus rapidement au canal, minimisant ainsi leur délai de transmission, tandis que les paquets LP attendent plus longtemps en cas de congestion du réseau.

## 3.4 Modélisation du protocole P-AMAC avec des chaînes de Markov

Dans cette section, nous proposons une modélisation analytique du protocole P-AMAC, en prenant en compte une gestion de priorité des paquets. Notre objectif est d'évaluer l'impact de ce protocole sur les métriques de QoS.

Cette modélisation s'inspire directement du modèle de Bianchi [6], largement reconnu pour l'analyse du DCF. Elle permet d'estimer les probabilités stationnaires associées à chaque état du système, et ainsi d'évaluer les performances du protocole P-AMAC en termes de débit, délai, taux de livraison et taux de collision.

### 3.4.1 Modèle analytique

Dans notre modèle, le temps est découpé en slots, et chaque état représente une file d'attente priorité<sub>i</sub> (i=1,2,3) dans un slot de temps. À la fin de chaque slot, un événement déclenche une transition vers un autre état. Chaque priorité<sub>i</sub> au sein d'une station agit comme une station virtuelle et exécute individuellement sa propre procédure de backoff.

Nous supposons que pour une priorité donnée priorité<sub>i</sub> (i=1,2,3).

- $s(i, t)$  est défini comme le processus stochastique représentant l'étage de backoff  $j$ , où  $0 \leq j \leq m$  et  $m$  est l'étage maximal de backoff,
- $p(i, t)$  est défini comme le processus stochastique représentant l'état de la file d'attente d'accès priorité<sub>i</sub>.

—  $b(i, t)$  est défini comme le processus stochastique représentant la valeur du backoff à l'instant  $t$ .

La valeur du compteur de backoff est choisie de manière uniforme dans l'intervalle  $[0, W_{i,j}]$ , où  $W_{i,j}$  dépend du stade de retransmission et satisfait la relation  $W_{i,j+1} = 2W_{i,j} + 1$ . Ainsi, le processus  $(s(i, t), b(i, t), p(i, t))$  forme une chaîne de Markov à temps discret, en supposant que la probabilité de collision  $P_{coli}$  reste constante.

À chaque slot temporel, l'état de chaque priorité<sub>*i*</sub> est décrit par  $(d, i, j, k)$ , où :

- $d=B$  signifie que la priorité<sub>*i*</sub> décrémente son compteur de backoff,
- $d=T$  signifie que la priorité<sub>*i*</sub> transmet son paquet.

La figure ci-dessous illustre une chaîne de Markov à temps discret, qui modélise le protocole P-AMAC.

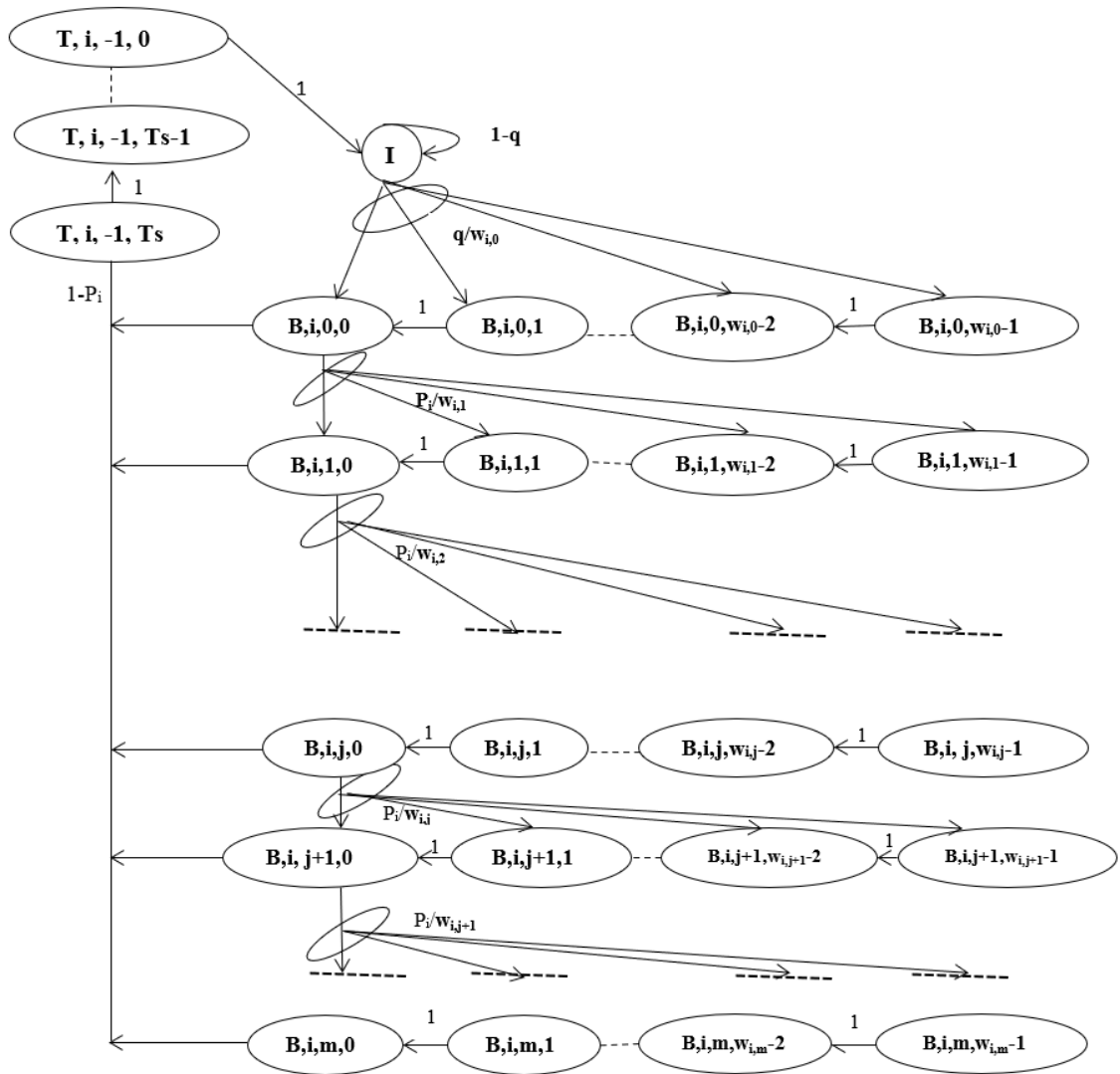


FIGURE 3.2 – Chaîne de Markov du protocole P-AMAC

Les probabilités de transition de cette chaîne de Markov, ainsi que leur signification, sont présentées ci-après :

### 3.4.2 Probabilités de transition

Les probabilités de transition associées à ce modèle sont décrites ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{ll} p\{B, i, j, k | B, i, j, (k+1)\} = 1, & 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq (w_{i,j} - 1) \\ p\{B, i, j+1, k | B, i, j, 0\} = P_i / w_{i,j}, & 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq (w_{i,0} - 1) \\ p\{T, i, -1, Ts | B, i, j, 0\} = (1 - P_i), & 0 \leq j \leq m, 0 \\ p\{T, i, -1, k | T, i, -1, k+1\} = 1, & 0 \leq k \leq Ts \\ p\{I | T, i, -1, 0\} = 1, & 0 \leq k \leq Ts \\ p\{B, i, 0, k | I\} = q / w_{i,0}, & 0 \leq k \leq (w_{i,0} - 1) \\ p\{I | I\} = 1 - q, & \end{array} \right. \quad (3.1)$$

- **Probabilités stationnaires**

On note  $b_{E,i,j,k}$  la probabilité stationnaire associée à l'état  $(E, i, j, k)$ .

$$b_{E,i,0,0} = \frac{2(1 - 2p_i)(1 - p_i)}{(1 - 2p_i)(W_{i,0} + 1) + p_i W_{i,0}(1 - (2p_i)^m)} \quad (3.2)$$

- **Probabilité de transmission  $\tau$  :**

La probabilité qu'une station accède au canal est donc :

$$\tau_i = \frac{b_{E,i,0,0}}{1 - p_i}, \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (3.3)$$

$$\tau = 1 - \prod_{i=0}^3 (1 - \tau_i) \quad (3.4)$$

- **Probabilité d'erreur  $P_e$  :**

$$P_e = 1 - (1 - BER)^{paquet}$$

- **Probabilité de collision  $P_{coli}$  :**

Une collision se produit lorsqu'une station transmet et qu'au moins une des  $(N - 1)$  autres stations tente aussi de transmettre en même temps.

La probabilité de collision  $P_{coli}$  s'exprime donc comme suit :

$$P_{coli} = 1 - (1 - \tau^{N-1}) \prod_{i>i'} (1 - \tau_{i'}) \quad (3.5)$$

- **Probabilité d'échec  $P_i$  :**

La probabilité d'échec de transmission est exprimée par :

$$P_i = 1 - (1 - p_{coli})(1 - P_e) \quad (3.6)$$

- **Probabilité qu'un paquet soit présent dans la file :**

$$q = 1 - e^{-\lambda T} \quad (3.7)$$

où  $\lambda$  est le taux d'arrivée des paquets dans la file d'attente.

### 3.4.3 Débit normalisé

Le débit normalisé d'une classe de priorité $_i$ , est calculé comme le rapport entre le temps occupé par l'information transmise et l'intervalle entre deux transmissions consécutives [6] Le débit pour chaque priorité  $i$ , noté  $S_i$  est défini comme suit :

$$S_i = \frac{P_{tr}P_{si}(1 - P_e)E[P]}{(1 - P_{tr})\delta + P_{tr} \sum_{i=0}^3 P_{si}(1 - P_e)T_s + P_{tr}(1 - \sum_{i=0}^3 P_{si})T_c + P_{tr} \sum_{i=0}^3 P_{si}P_eT_e} \quad (3.8)$$

- $E[P]$  représente la taille de la charge utile.
- $T_s$  est le temps moyen de transmission réussie.
- $T_c$  est le temps de collision.
- $T_e$  est le temps d'erreur.

En mode de base,  $T_s$ ,  $T_c$  et  $T_e$  peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{cases} T_s = DIFS + H + P + SIFS + ACK \\ T_c = H + P + SIFS \\ T_e = AIFS + SIFS + H + P + SIFS + ACK_{timeout} \end{cases} \quad (3.9)$$

- **Probabilité de transmission pour  $N$  stations :**

$P_{tr}$  représente la probabilité qu'au moins une station transmette durant un intervalle de temps, et s'obtient selon l'expression suivante :

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^N \quad (3.10)$$

- **Probabilité de transmission réussie :**

Un paquet de priorité  $i$  peut être transmis avec succès seulement si aucun autre AC de priorité supérieure dans la même station ni aucune autre station parmi les  $(N - 1)$  restantes ne transmettent.

La probabilité conditionnelle de succès  $P_{si}$  est donnée par :

$$P_{si} = \frac{N \cdot \tau_i \cdot (1 - \tau)^{N-1} \cdot \prod_{i' > i} (1 - \tau_{i'})}{P_{tr}} \quad (3.11)$$

### 3.4.4 Analyse du délai

Le délai de transmission d'une trame correspond au temps entre son envoi et sa réception, et il est défini par la formule suivante [6] :

$$E(D) = \frac{(1 - 2p_i)(W_i + 1) + p_i W_i (1 - (2p_i)^m)}{2(1 - 2p_i)(1 - p)} \quad (3.12)$$

## 3.5 Résultats et discussion

Dans cette section, nous présentons et analysons les résultats numériques issus de notre modèle analytique développé pour le protocole P-AMAC. Ce modèle, basé sur l'utilisation de chaînes de Markov, vise à évaluer théoriquement les performances du protocole selon différents classes de priorité (HP, NP, LP).

### 3.5.1 Paramètres de simulation

Les résultats analytiques suivants ont été obtenus sous Python, en supposant les paramètres indiqués dans le tableau 3.1.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Délai de propagation	64 $\mu s$	Durée d'un slot	20 $\mu s$
Taille des paquets	1024 bits	SIFS	60 $\times 10^{-6} s$
En-tête PHY	192 bits	DIFS[priorité1]	50 $\mu s$
En-tête MAC	272 bits	DIFS[priorité2]	500 $\mu s$
Trame RTS	En-tête PHY + 160 bits	DIFS[priorité3]	800 $\mu s$
Trame ACK	En-tête PHY + 112 bits	CW[priorité1]	{7}
Temporisation CTS	DIFS + CTS	CW[priorité2]	{31}
Temporisation ACK	DIFS + ACK	CW[priorité3]	{63}
Débit de données	11 Mbps	Débit de base	2 Mbps

TABLE 3.1 – Paramètres du système

### 3.5.2 Métriques de QoS utilisées

Pour montrer la gestion des priorités dans notre proposition, nous l'avons évaluée selon les métriques suivantes :

- **Débit normalisé**

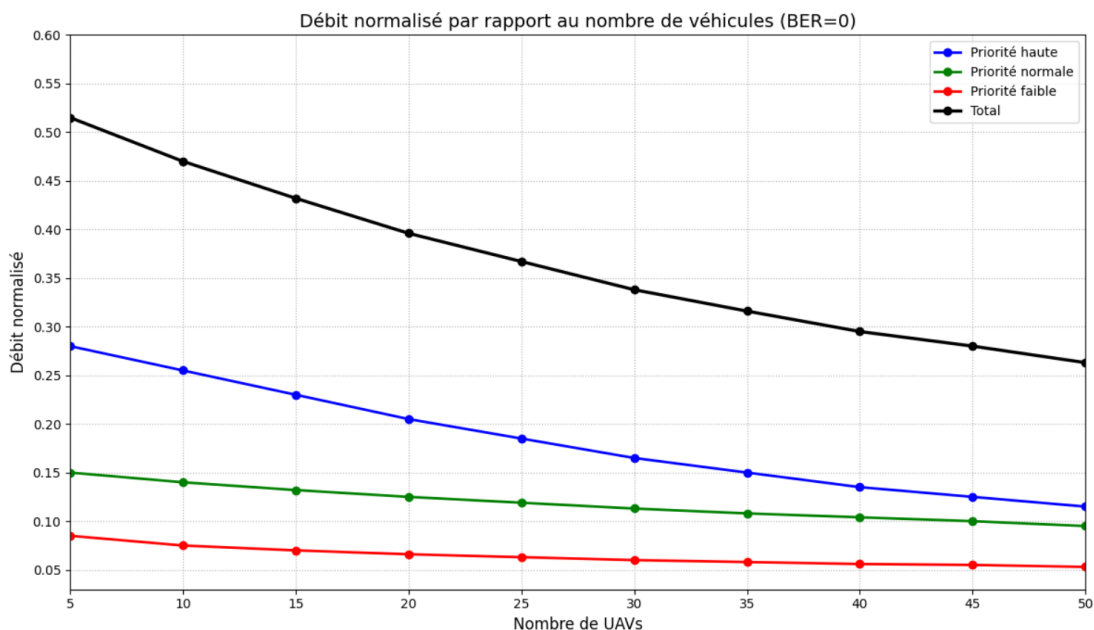


FIGURE 3.3 – Débit normalisé en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité (BER = 0)

La figure 3.3 montre l'évolution du débit normalisé du protocole P-AMAC en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité : haute, normale et faible, lorsque le canal sans fil est parfait (c'est à dire, BER=0).

On y distingue les performances pour trois classes de priorité ainsi que le débit total du réseau.

Comme le montre la figure, le débit total diminue à mesure que le nombre de véhicules augmente, en raison de la compétition accrue pour l'accès au canal. Toutefois, les paquets de haute priorité conservent un débit supérieur, confirmant l'efficacité du mécanisme de gestion de priorité mis en place dans le protocole, ce qui démontre une gestion efficace des transmissions critiques. Les paquets de priorité normale montrent un débit modéré et stable, tandis que les paquets de faible priorité diminuent de manière significative. Cela montre que le protocole P-AMAC permet d'assurer une QoS pour les applications critiques, en maintenant un débit élevé pour les paquets prioritaires, même dans des conditions de réseau surchargé.

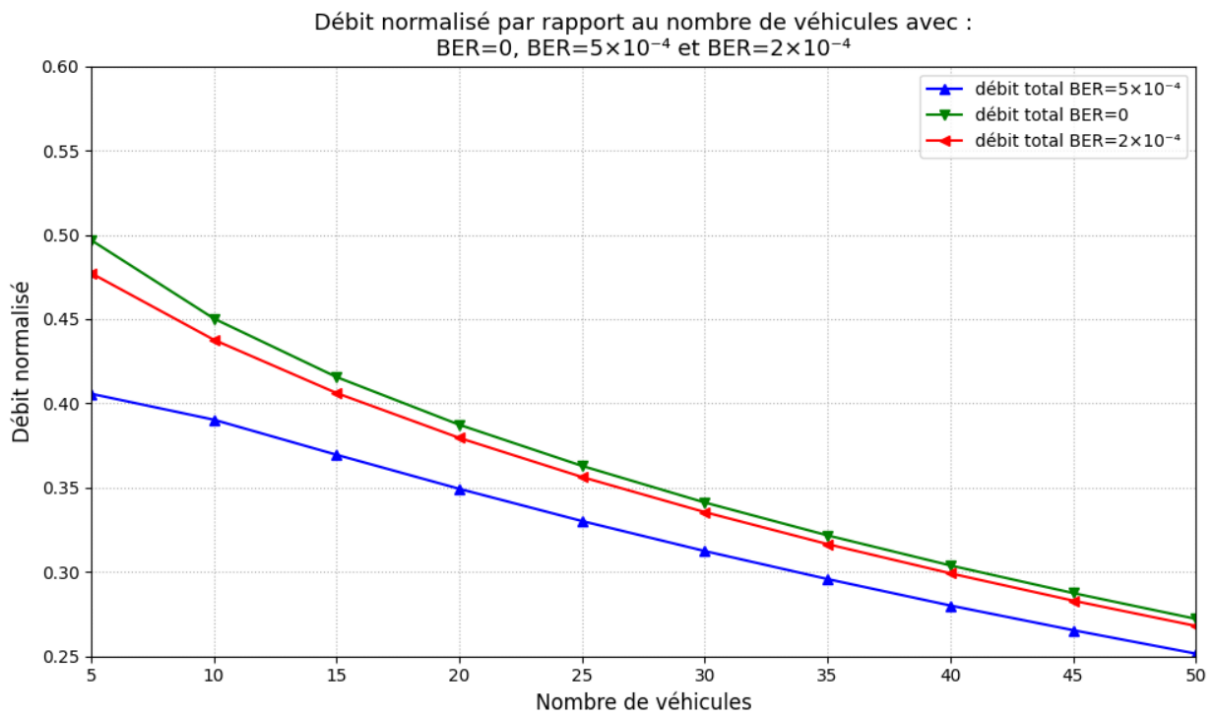


FIGURE 3.4 – Débit normalisé en fonction du nombre de véhicules avec BER = 0, BER =  $2 \times 10^{-4}$  et BER =  $5 \times 10^{-4}$ .

La figure 3.4 montre l'évolution du débit total normalisé du protocole P-AMAC en fonction du nombre de véhicules dans le réseau, pour trois valeurs différentes du taux d'erreur binaire (BER) : BER = 0, BER =  $2 \times 10^{-4}$  et BER =  $5 \times 10^{-4}$ .

De manière générale, on observe que le débit diminue progressivement à mesure que le nombre de véhicules augmente, quel que soit le BER. Cette baisse s'explique par une congestion croissante du canal due à la contention entre les nœuds, entraînant davantage de collisions, de retards et de retransmissions, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité du protocole.

Par ailleurs, une augmentation du BER entraîne une dégradation significative du débit, en raison des retransmissions nécessaires pour corriger les erreurs.

Les meilleures performances sont obtenues lorsque le BER est nul (BER = 0), tandis que le taux d'erreur BER =  $5 \times 10^{-4}$  donne les résultats les plus faibles. La variation de performance est plus importante lorsque le nombre d'UAVs dans le réseau est faible, ce qui signifie que les erreurs ont un impact plus fort sur le débit. Cela signifie que, les performances diminuent plus rapidement dans les réseaux peu chargés que dans ceux contenant un grand nombre d'UAVs.

En revanche, lorsque le nombre de nœuds atteint 50, toutes les courbes tendent à converger vers

un débit relativement bas, indiquant une saturation du protocole.

Ces résultats montrent que le débit normalisé dépend à la fois de la densité du réseau et de la qualité du canal, et que le protocole P-AMAC réagit fortement aux erreurs de transmission ainsi qu'à la densité des UAVs, ce qui souligne la nécessité de bien gérer ces deux aspects pour assurer un bon fonctionnement du réseau et garantir une communication fiable.

### • Délai moyen

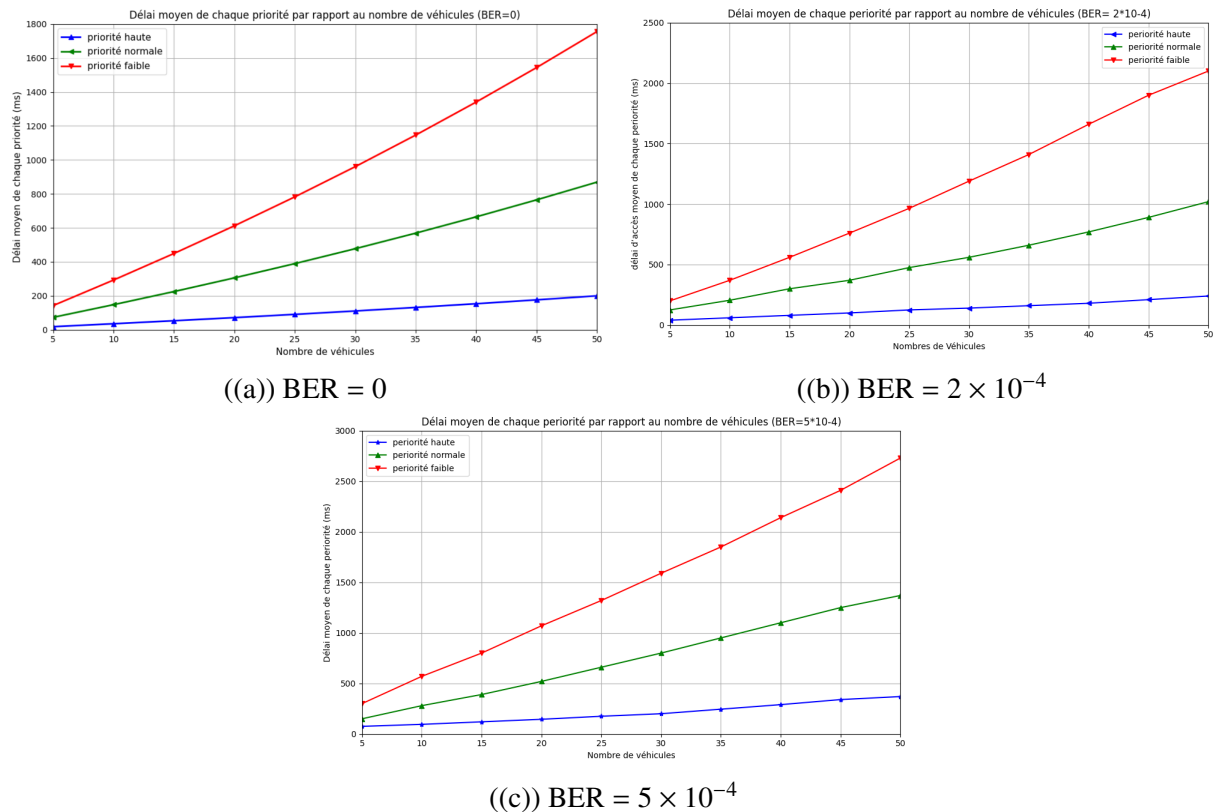


FIGURE 3.5 – Délai moyen par classe de priorité en fonction du nombre de véhicules pour différentes valeurs de BER

La figure 3.5 montre l'évolution du délai moyen de transmission pour chaque classe de priorité en fonction du nombre de véhicules dans le réseau, sous trois conditions différentes de qualité de canal : la figure 3.5.a correspond au cas sans erreur de canal ( $BER = 0$ ), la figure 3.5.b représente le cas où le canal sans fil est légèrement perturbé avec un taux d'erreur binaire de  $2 \times 10^{-4}$  et la figure 3.5.c représente le cas avec un taux d'erreur modéré  $BER = 5 \times 10^{-4}$ .

Dans les différents cas, on observe que le délai moyen de transmission augmente pour l'ensemble des priorités à mesure que le nombre de véhicules augmente, quelle que soit la priorité considérée, en raison de l'augmentation des collisions liées à la densité du réseau. Toutefois, cette dégradation n'affecte pas de manière équivalente les trois classes de priorité. Les paquets de haute priorité conservent un délai faible et presque stable, même lorsque la densité du réseau est élevée, bénéficiant d'un accès plus rapide au canal. Les paquets de priorité normale montrent une augmentation modérée du délai, tandis que les paquets de faible priorité enregistrent les

délais les plus élevés.

Cependant, une différence est observée entre les différents scénarios de BER. Dans le cas sans erreur de canal (figure 3.5.a), les délais sont plus faibles et mieux contrôlés pour toutes les classes de priorité. Lorsqu'un taux d'erreur modéré est introduit  $BER = 2 \times 10^{-4}$  (figure 3.5.b), les délais augmentent légèrement, surtout pour les priorités normales et faibles. En revanche, dans le scénario le plus dégradé  $BER = 5 \times 10^{-4}$  (figure 3.5.c), les délais deviennent très élevés, en particulier pour les classes de priorité normale et faible, en raison des retransmissions supplémentaires qui surchargent le canal. Cette augmentation est due aux retransmissions nécessaires pour corriger les erreurs, ce qui surcharge le canal et aggrave la latence. Ces résultats montrent l'efficacité du protocole P-AMAC pour garantir une différenciation des services, même dans des conditions de charge élevée et de canal perturbé, ce protocole garantit un traitement rapide pour les messages à haute priorité. Cette capacité à maintenir un faible délai pour les transmissions critiques est essentielle pour garantir une communication fiable et efficace dans des applications à temps réel.

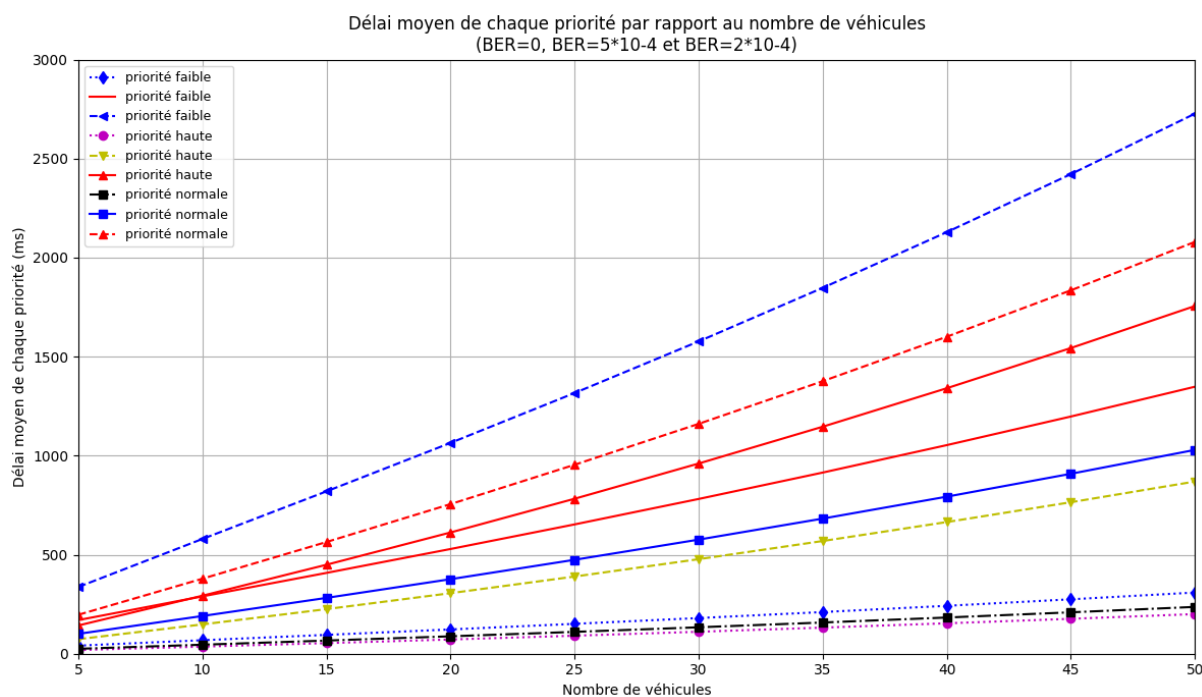


FIGURE 3.6 – Délai moyen par classe de priorité en fonction du nombre de véhicules pour différentes valeurs de BER

La figure 3.6 montre l'évolution délai moyen selon la priorité en fonction du nombre de véhicules, en tenant compte des différentes conditions de qualité de canal.

Le délai augmente avec la densité du réseau pour toutes les priorités, et cela concerne plus particulièrement les paquets à priorité normale et faible, surtout en présence d'un BER élevé, où les retransmissions deviennent plus fréquentes en raison des erreurs de transmission. En revanche, les paquets à haute priorité conservent des délais faibles et stables, ce qui montre que le protocole P-AMAC réussit à maintenir une QoS différenciée. Ainsi, même lorsque le canal est perturbé, P-AMAC garantit à donner la priorité aux flux critiques, tout en révélant que les paquets à faible priorité sont plus affectés par la dégradation du canal

- **Probabilité de collision**

On prend en considération que la probabilité d'erreur est nulle ( $BER = 0$ ).

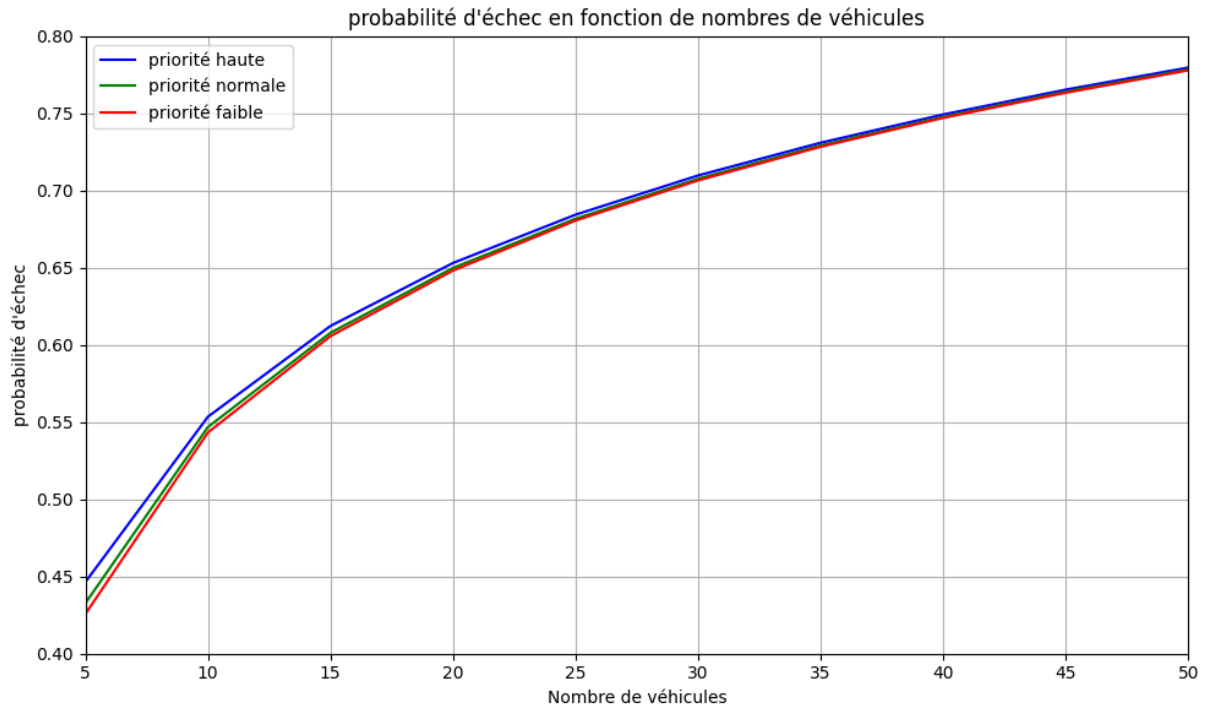


FIGURE 3.7 – Probabilité de collision en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité

La figure 3.7 montre l'évolution de la probabilité de collision pour chaque classe de priorité en fonction du nombre de véhicules dans le réseau.

On observe une augmentation progressive de la probabilité de collision pour toutes les priorités à mesure que le nombre de véhicules augmente. Cela s'explique par une congestion progressive du canal due à l'augmentation du nombre de nœuds : plus le réseau est dense, plus les tentatives de transmission simultanées augmente, ce qui entraîne une charge accrue sur le canal, une fréquence plus élevée de collisions, des délais excessifs, et par conséquent une diminution des chances de transmission réussie.

Comme le montre la figure, les paquets de haute priorité ont une probabilité de collision légèrement supérieure comparée à ceux de priorité normale et faible, pour un même nombre de véhicules. Cette observation peut s'expliquer par la manière dont le protocole gère les priorités. En effet, le protocole autorise de manière proactive et préférentielle la transmission des données critiques. Ainsi, les paquets à haute priorité bénéficient d'un accès plus fréquent au canal, mais cela les expose davantage ces paquets aux effets de la congestion, surtout lorsque plusieurs paquets critiques sont transmis presque simultanément u utilisent les mêmes ressources de communication.

- Taux de réussite d'accès au canal

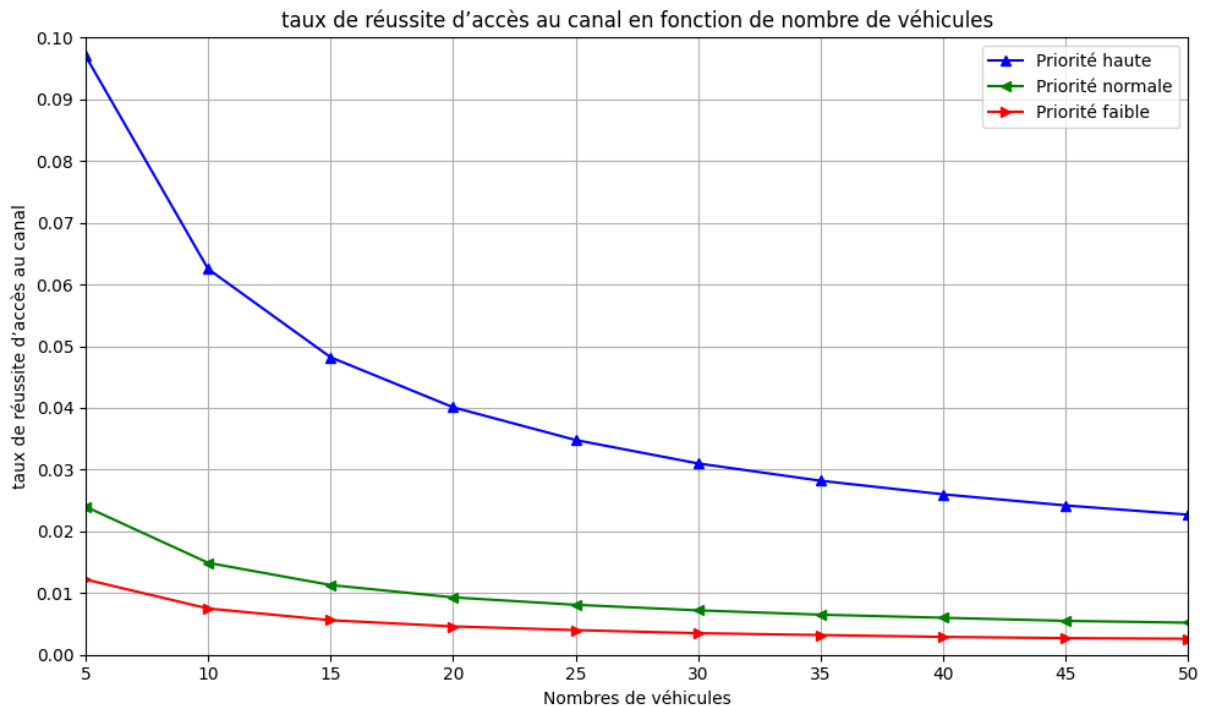


FIGURE 3.8 – Taux de réussite d'accès au canal de transmission en fonction du nombre de véhicules pour différentes classes de priorité

La figure 3.8 montre l'évolution du taux de réussite d'accès au canal pour les trois classes de priorité en fonction du nombre de véhicules dans le réseau.

Comme le montre la figure, le taux de réussite diminue à mesure que le nombre de véhicules augmente, quelle que soit la classe de priorité.

Cependant, cette dégradation varie selon le niveau de priorité, d'où, les paquets de priorité haute maintiennent un taux d'accès supérieur à ceux des autres classes, traduisant l'efficacité du mécanisme de différenciation du protocole P-AMAC, ce dernier leur garantit une meilleure accessibilité au canal, même en situation de forte contention. Les UAVs de priorité normale obtiennent un taux intermédiaire, qui diminue rapidement avec l'augmentation de la densité du réseau, tandis que ceux de faible priorité présentent un taux de réussite très faible. Ces résultats montrent que le protocole P-AMAC permet de préserver la fiabilité des transmissions critiques même en présence d'un trafic dense, ce qui est essentiel pour garantir la QoS dans les FANETs.

## 3.6 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'évaluation du protocole MAC adaptatif AMAC pour les réseaux FANETs. Son fonctionnement a été étudié en détail, mettant en évidence ses avantages, tels que l'augmentation du débit et la réduction des interférences, mais aussi ses limites, notamment la dépendance aux systèmes de localisation et l'absence de gestion des priorités des données.

Afin de répondre à cette dernière limitation, nous avons proposé une amélioration pour ce protocole, appelée P-AMAC. Ce protocole introduit un mécanisme de gestion des priorités permettant de hiérarchiser l'accès au canal selon l'importance des données, offrant ainsi un avantage notable pour les applications critiques en temps réel comme la surveillance ou le sauvetage.

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle analytique du protocole P-AMAC en nous appuyant sur une modélisation par chaînes de Markov, dans le but d'évaluer ses performances à travers différentes métriques de QoS. Ainsi, les résultats obtenus à partir de cette évaluation ont permis de vérifier l'efficacité du mécanisme de gestion des priorités dans des environnements denses ou instables.

En conclusion, ce chapitre a permis de mieux comprendre le protocole AMAC et d'analyser les apports de l'amélioration proposée à travers P-AMAC.

Le chapitre suivant proposera une évaluation comparative entre AMAC et P-AMAC, basée sur des simulations Python et OMNeT++, afin de valider le modèle analytique et de confirmer les gains en performance apportés par l'amélioration.

# 4

## Évaluation de performances de P-AMAC par simulation

### Introduction

Le déploiement d'un réseau FANET nécessite une phase d'évaluation avant sa mise en place afin de s'assurer du bon fonctionnement de tous les protocoles de communication qu'il utilise. Cette étape est essentielle pour identifier d'éventuels problèmes et optimiser les performances du réseau.

Après avoir présenté et modélisé le protocole amélioré P-AMAC dans le chapitre précédent, ce chapitre se concentre sur l'évaluation de ses performances à l'aide de simulations numériques. Les simulations ont été réalisées à l'aide de deux environnements complémentaires. D'une part, un modèle simplifié implémenté sous Python permet de mieux comprendre les principes de fonctionnement du protocole, notamment le mécanisme de priorisation des paquets, et de valider les résultats du modèle analytique basé sur les chaînes de Markov. D'autre part, le simulateur réseau OMNET++, plus complet et réaliste, permet de comparer les performances des protocoles AMAC et P-AMAC dans des scénarios plus réels.

Cette analyse nous permettra d'évaluer l'impact des améliorations introduites par P-AMAC et de valider son efficacité dans la gestion de la QoS dans un environnement FANETs.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>2.1 Protocoles MAC dans les réseaux FANETs</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>2.2 Critères de conception d'un protocole MAC pour les réseaux FANETs</b> . .	<b>15</b>
<b>2.3 Classification des protocoles MAC dans les FANETs</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>2.4 Comparaison des protocoles MAC pour les FANETs</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>2.5 Conclusion</b> . . . . .	<b>33</b>

---

## 4.1 Validation du modèle analytique par simulation

Après avoir proposé une amélioration du protocole AMAC nommée P-AMAC, un modèle analytique a été développé à l'aide de chaînes de Markov pour évaluer ses performances théoriques (voir chapitre 3).

Dans cette section, nous allons confirmer les résultats obtenus dans la section 3.5 du chapitre 3 par une série de simulations réalisées sous Python.

### 4.1.1 Paramètres de simulation

Le tableau 4.1 présente les paramètres utilisés pour la simulation réalisée sous Python.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Nombre d'UAVs	5 à 50	En-tête PHY	192 bits
Vitesse des UAVs	20 à 100 m/s	En-tête MAC	272 bits
Durée de simulation	3600 secondes	Trame RTS	En-tête PHY + 160 bits
Débit de données	11 Mbps	Trame ACK	En-tête PHY + 112 bits
Débit de base	2 Mbps	Temporisation ACK	DIFS + ACK
Taille de la charge utile	1024 octets	Temporisation CTS	DIFS + CTS
Taille des paquets	1024 bits	SIFS	$60 \times 10^{-6} s$
Durée d'un slot	$20 \mu s$	DIFS[Priorité1]	$50 \mu s$
CW[Priorité1]	{7}	DIFS[Priorité2]	$500 \mu s$
CW[Priorité2]	{31}	DIFS[Priorité3]	$800 \mu s$
CW[Priorité3]	{63}		

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

### 4.1.2 Métriques de QoS utilisées

Pour montrer l'efficacité de notre protocole P-AMAC, nous l'avons évalué par rapport aux métriques suivantes :

- Débit normalisé

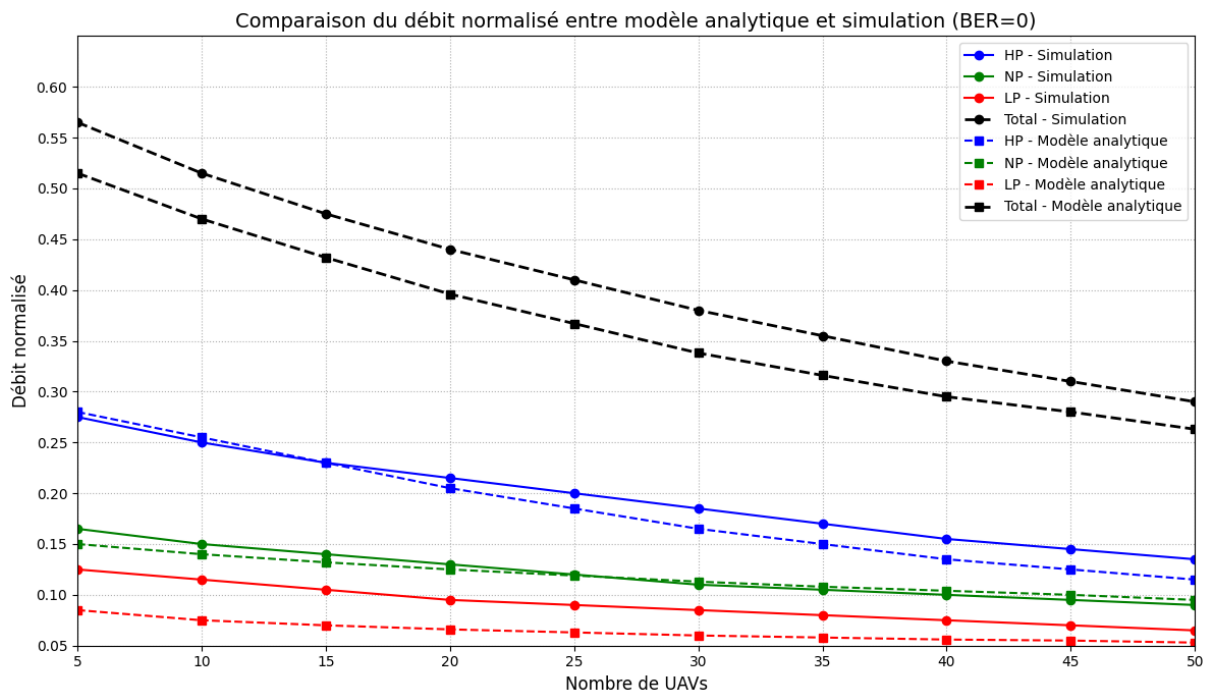


FIGURE 4.1 – Comparaison du débit normalisé entre les résultats analytique et la simulation sous Python

La figure 4.1 présente une comparaison du débit normalisé entre les résultats obtenus par simulation sous Python et ceux issus du modèle analytique, selon les trois classes de priorité, en fonction du nombre d'UAVs dans un scénario sans erreurs (BER = 0).

Les résultats de simulation montrent que le débit normalisé diminue progressivement avec l'augmentation du nombre d'UAVs, surtout pour les priorités NP et LP. Les paquets HP maintiennent des débits élevés, même lorsque la densité du réseau augmente. Cela montre que le protocole P-AMAC alloue efficacement le canal selon la priorité. Les paquets NP ont un débit inférieur aux HP, tandis que les paquets LP présentent un débit plus bas que celui des paquets HP et NP, ce qui montre qu'ils sont moins favorisés pour accéder au canal.

Le protocole P-AMAC gère le canal de manière efficace selon le niveau de priorité des transmissions. Il réussit à préserver un débit élevé pour les paquets les plus critiques, même lorsque la densité du réseau augmente. Cette capacité contribue à garantir une bonne QoS adaptée aux besoins des applications sensibles, tout en assurant une gestion stable et optimale des ressources dans les réseaux FANETs.

La comparaison entre les résultats analytiques et simulés permet de valider la cohérence des performances. Les deux approches montrent que le débit moyen diminue avec l'augmentation du nombre d'UAVs, en raison de la congestion. Le protocole P-AMAC assure une différenciation efficace selon les priorités (HP, NP, LP).

Les deux méthodes se complètent et confirment la capacité du P-AMAC à améliorer la gestion de la QoS en environnement dense.

- Délai moyen

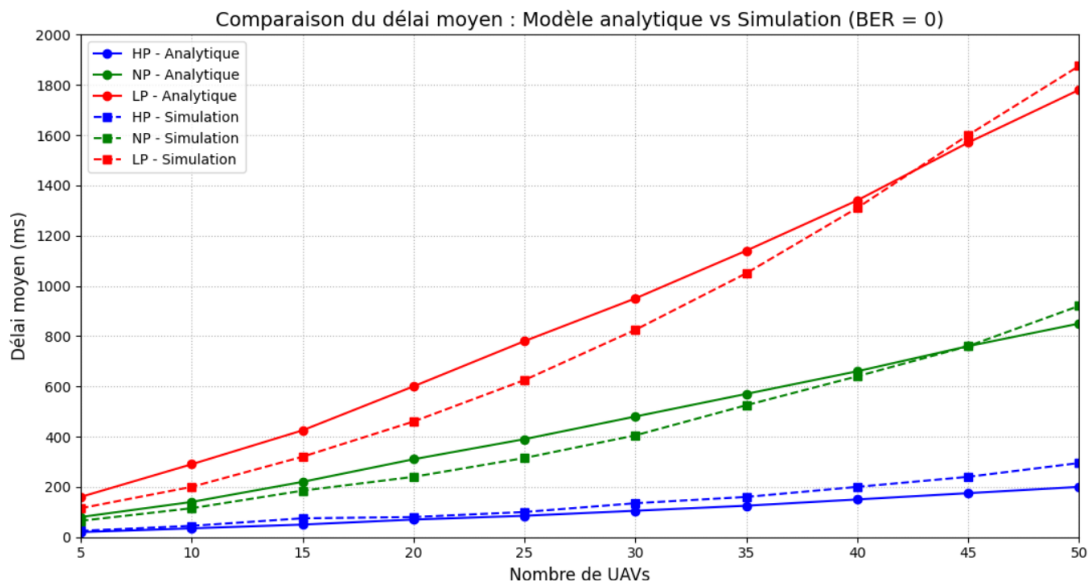


FIGURE 4.2 – Comparaison du délai moyen entre les résultats analytique et la simulation sous Python

La figure 4.2 présente une comparaison du délai moyen entre les résultats obtenus par simulation sous Python et les résultats issus du modèle analytique développé, selon les trois classes de priorité, en fonction du nombre d’UAVs, dans un scénario sans erreurs (BER = 0).

On observe dans les résultats de simulation que le délai moyen augmente progressivement avec l’augmentation du nombre d’UAVs pour tous les types de paquets, en particulier pour les paquets à priorité faible (LP) et normale (NP). Les paquets HP présentent les délais les plus faibles, même lorsque le nombre d’UAVs augmente ou en cas de congestion. Cela montre que le protocole P-AMAC favorise efficacement les paquets HP. Les paquets de priorité NP atteignent des délais moyens modérés. Les paquets LP ont des délais plus élevés en raison de la saturation progressive du canal.

En effet, l’augmentation du nombre d’UAVs augmente la contention pour l’accès au médium, ce qui provoque une congestion et rend les délais de transmission plus longs.

Le protocole P-AMAC gère efficacement les paquets en fonction de leur priorité, en maintenant de bonnes performances et de bons délais pour les paquets critiques, même en présence de congestion, ce qui reflète une capacité efficace à gérer la QoS dans des environnements dynamiques.

La comparaison entre les résultats analytiques et simulés valide la cohérence des performances observées. Les deux approches confirment que le protocole P-AMAC améliore significativement la gestion des délais selon la priorité, ce qui est essentiel pour garantir une bonne QoS dans un environnement dense.

## 4.2 Évaluation des performances de P-AMAC par simulation

Pour comparer les performances d'AMAC et P-AMAC, nous les avons implementés sous OMNeT++ en utilisant les paramètres indiqués dans le tableau 4.2

### 4.2.1 Paramètres de simulation

Les paramètres spécifiques de simulation sont indiqués dans le Tableau suivant.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Nombre d'UAVs	4 à 50	En-tête PHY	192 bits
Vitesse des UAVs	20 à 100 m/s	En-tête MAC	272 bits
Taille de la zone	1500 m × 1500 m × 1500 m	Trame RTS	En-tête PHY + 160 bits
Durée de simulation	3600 secondes	Trame ACK	En-tête PHY + 112 bits
Modèle de propagation	DSSS	Temporisation ACK	DIFS + ACK
Délai de propagation	64 $\mu$ s	Temporisation CTS	DIFS + CTS
Débit de données	11 Mbps	SIFS	60 × 10 <sup>-6</sup> s
Débit de base	2 Mbps	DIFS[Priorité1]	50 $\mu$ s
Temps inter-arrivée des paquets	Exponentiel	DIFS[Priorité2]	500 $\mu$ s
Taille de la charge utile	1024 octets	DIFS[Priorité3]	800 $\mu$ s
Taille des paquets	1024 bits	CW[Priorité1]	{7}
Durée d'un slot	20 $\mu$ s	CW[Priorité2]	{31}
Puissance de transmission	10 mW	CW[Priorité3]	{63}

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation

### 4.2.2 Métriques de QoS utilisées

P-AMAC et AMAC ont été évalués à travers les métriques de QoS suivantes :

- **Débit moyen**

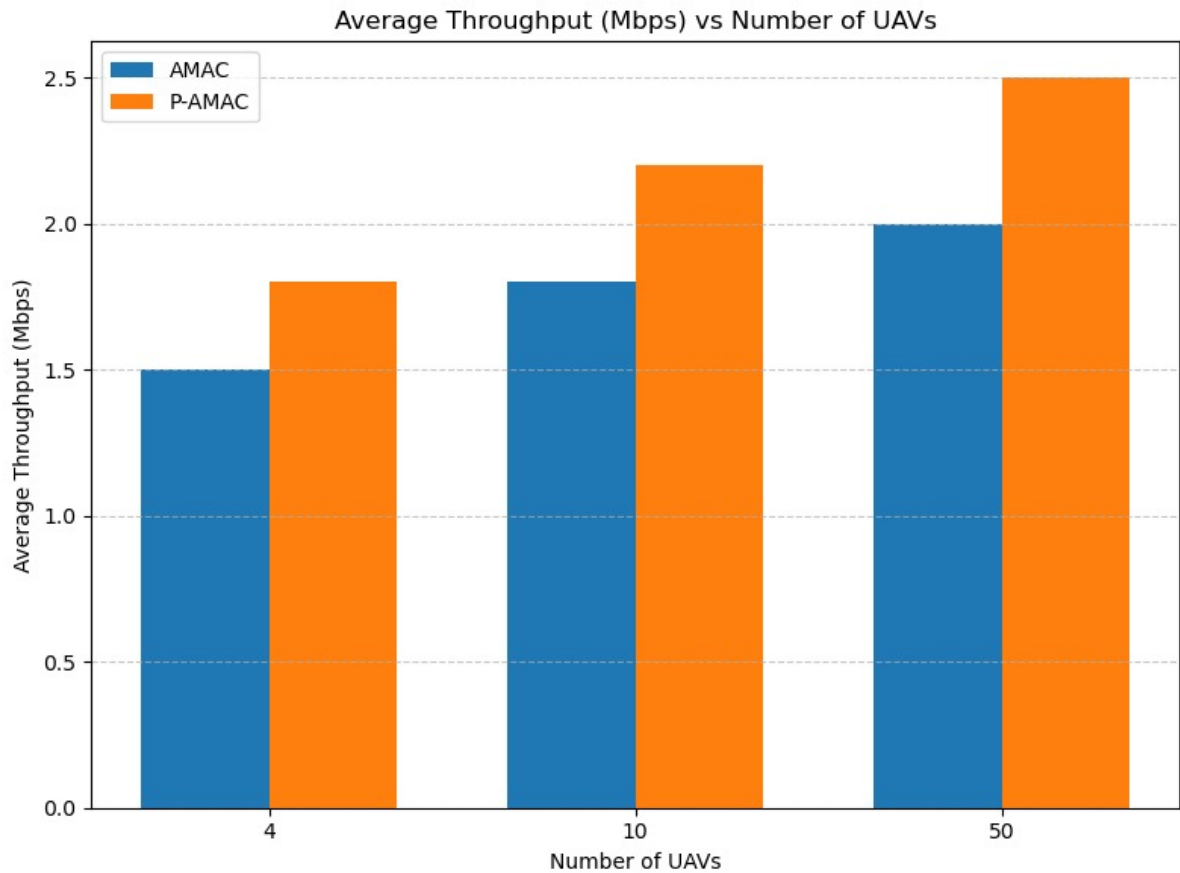


FIGURE 4.3 – Comparaison du débit moyen entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs

La figure 4.3 montre l'évolution du débit moyen pour les protocoles AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs (4, 10 et 50 UAVs).

On observe une amélioration significative du débit avec le protocole P-AMAC par rapport à AMAC, quelle que soit la densité du réseau.

Pour 4 UAVs, le débit est de 1,8 Mbps pour P-AMAC, contre 1,5 Mbps pour AMAC. Avec 10 UAVs, il augmente à 2,2 Mbps contre 1,8 Mbps, et atteint jusqu'à 2,5 Mbps avec P-AMAC lorsque le réseau comprend 50 UAVs, contre seulement 2 Mbps pour AMAC.

Ces résultats montrent que le protocole P-AMAC améliore les performances du réseau en comparaison avec AMAC. Par conséquent, le débit global du réseau est optimisé, ce qui est particulièrement essentiel dans les environnements à forte densité.

- Délai de bout en bout

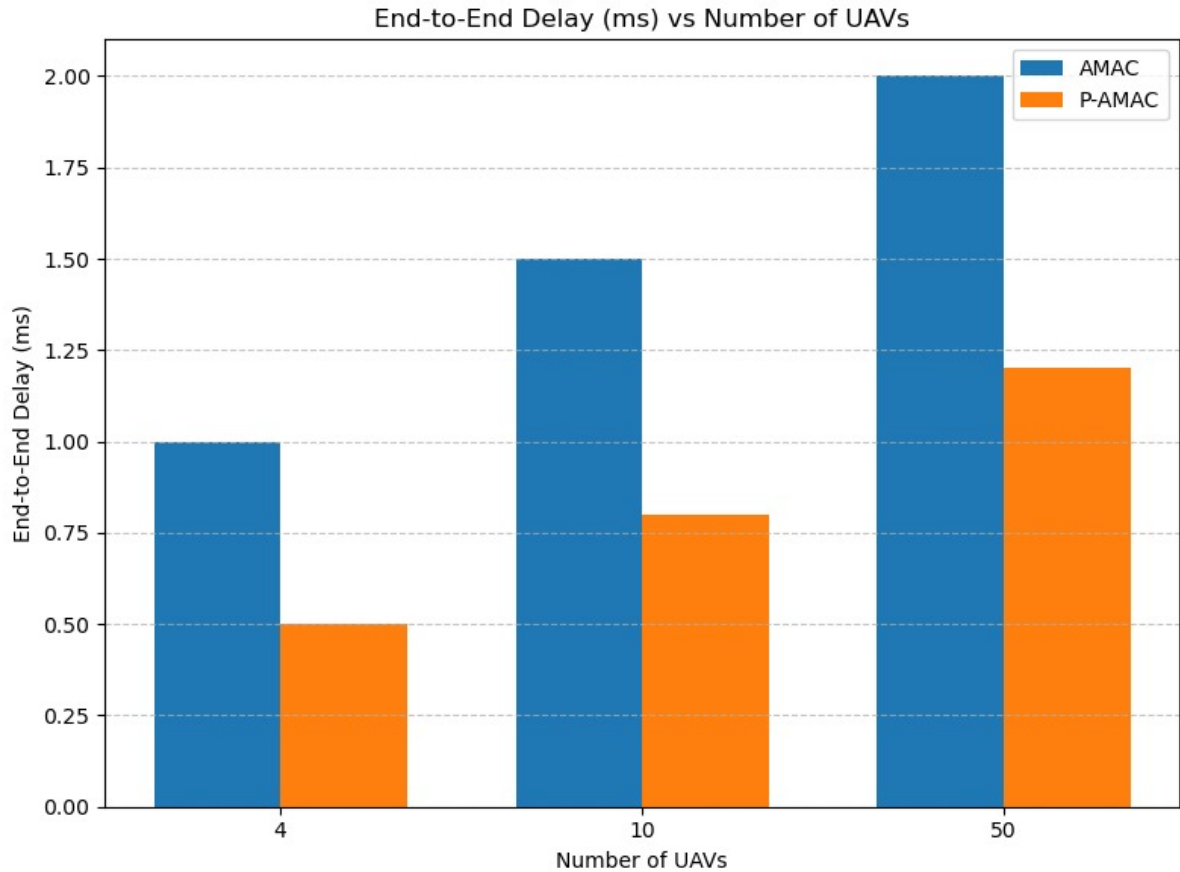


FIGURE 4.4 – Comparaison du délai moyen de bout-en-bout entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d’UAVs.

La figure 4.4 montre l’évolution du délai de bout en bout pour les protocoles AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d’UAVs (4, 10 et 50).

On observe que le délai de bout en bout augmente à mesure que le nombre d’UAVs augmente. Pour les deux protocoles, P-AMAC et AMAC, le délai de P-AMAC est inférieur à celui de AMAC. Pour 4 UAVs, le délai moyen observé est de 0,5ms avec P-AMAC, contre 1ms avec AMAC. Pour 10 UAVs, le délai passe à 0,8ms avec le protocole amélioré, tandis qu’AMAC atteint 1,5ms. Enfin, P-AMAC gère un délai acceptable de 1,2 ms avec 50 UAVs, tandis qu’AMAC enregistre 2 ms.

Cela s’explique par le mécanisme de gestion des priorités intégré dans P-AMAC, qui permet aux paquets urgents d’accéder plus rapidement au canal, réduisant ainsi la file d’attente et la congestion. À l’opposé, AMAC traite tous les paquets de la même manière, ce qui entraîne une augmentation des délais en cas de forte densité.

Ces résultats confirment l’efficacité du protocole P-AMAC à maintenir des performances acceptables en termes de latence, même dans des conditions de réseau dynamique et dense.

- Taux de collision

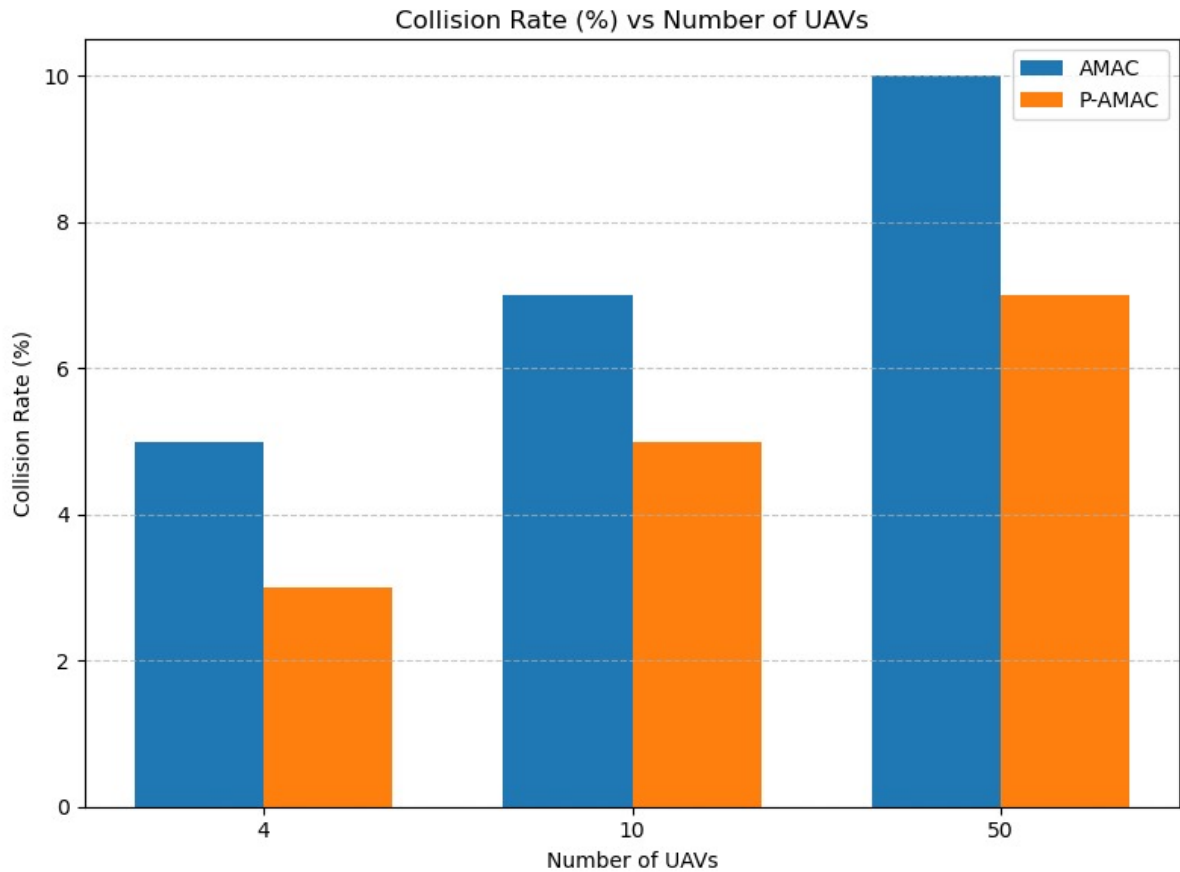


FIGURE 4.5 – Comparaison du taux de collision entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d’UAVs.

La figure 4.5 montre l’évolution du taux de collision pour les protocoles AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d’UAVs (4, 10 et 50 UAVs).

On observe que que le taux de collision augmente avec le nombre d’UAVs, ce qui est attendu dans les réseaux ad hoc à forte densité, en raison d’un plus grand nombre de tentatives d’accès simultané au canal. Dans les trois scénarios, le protocole P-AMAC présente un taux de collision toujours inférieur à celui d’AMAC, ce qui indique l’efficacité de la gestion des priorités dans ce protocole.

Avec 4 UAVs, P-AMAC affiche un taux d’environ 3 % contre 5 % pour AMAC. Avec 10 UAVs, P-AMAC affiche 5 % de collisions, tandis que AMAC atteint 7%. Enfin, dans le cas le plus dense (50 UAVs), AMAC atteint un taux de collision de 10%, alors que P-AMAC reste limité à 7%.

Ainsi, P-AMAC réduit efficacement la probabilité de collisions, surtout dans des environnements denses où les interférences sont plus fréquentes, ce qui améliore la fiabilité globale du réseau FANET. Cette performance confirme l’intérêt de la gestion de priorité introduite dans P-AMAC pour les environnements UAVs dynamiques et critiques.

- **Livraison des paquets**

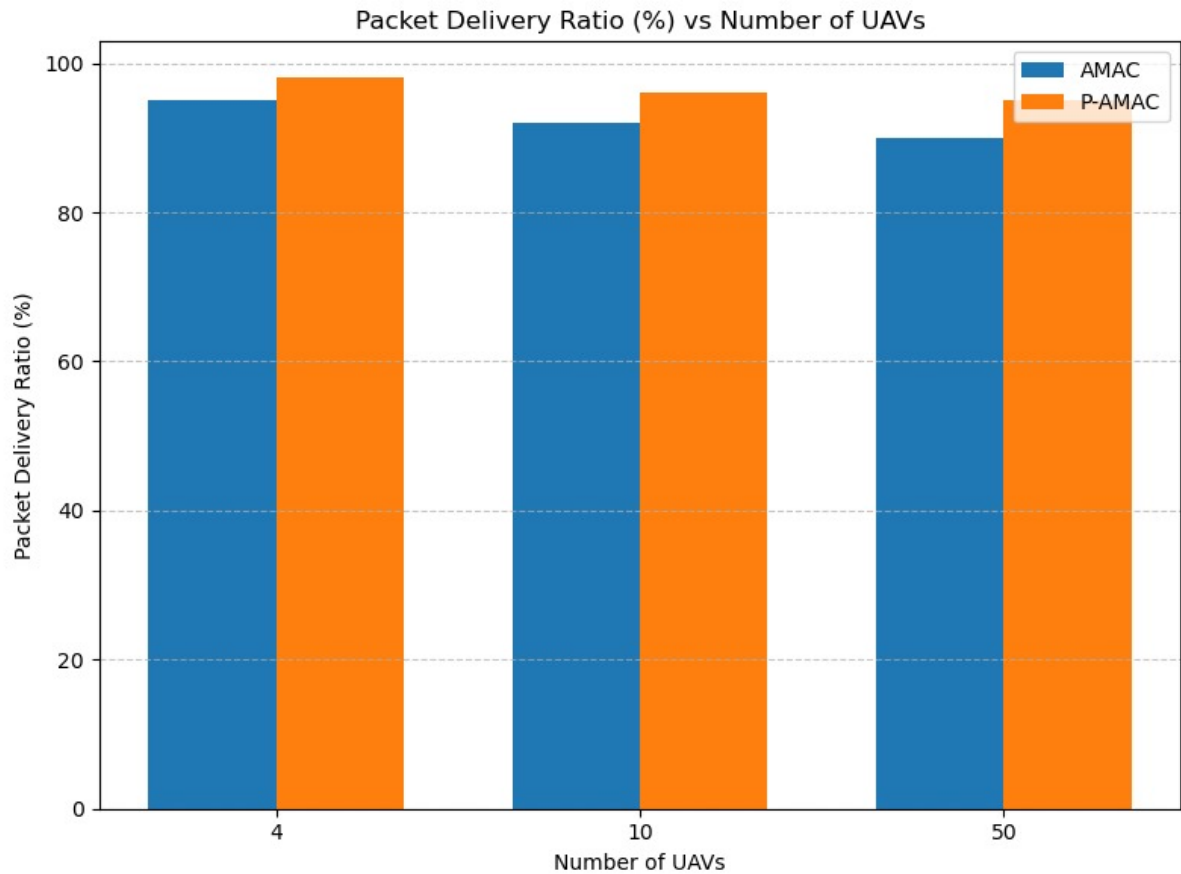


FIGURE 4.6 – Comparaison du taux de livraison des paquets entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d’UAVs.

La figure 4.6 montre le taux de livraison des paquets pour les protocoles AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d’UAVs (4, 10 et 50 UAVs).

On observe que P-AMAC présente un taux de livraison plus élevé que celui d’AMAC, et ce, quel que soit le nombre d’UAVs. Pour 4 UAVs les deux protocoles offrent un excellent taux de livraison, avec un léger avantage pour P-AMAC, qui atteint presque 98%, contre environ 95% pour AMAC.

Cet écart se maintient avec l’augmentation du nombre d’UAVs. Pour 10 UAVs le taux de livraison pour P-AMAC atteint environ 96%, tandis qu’AMAC descend à environ 92%. Pour 50 UAVs, le taux de livraison de P-AMAC est d’environ 94%, tandis que celui d’AMAC diminue à environ 90%.

P-AMAC offre de meilleures performances en matière de livraison des paquets, notamment dans les environnements denses, grâce à la robustesse de son mécanisme de priorisation des paquets critiques.

- **Consommation d'énergie**

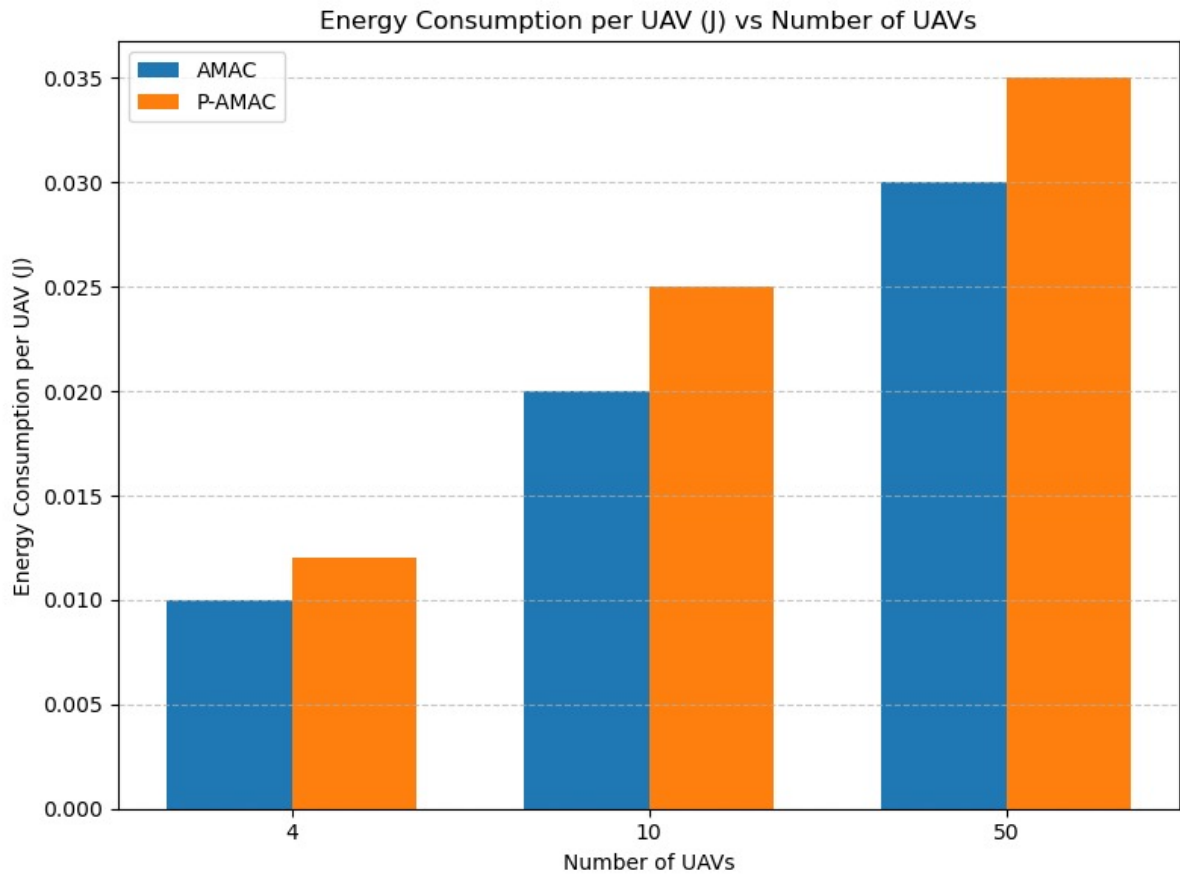


FIGURE 4.7 – Comparaison de la consommation énergétique entre AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs.

La figure 4.7 montre la consommation d'énergie pour les protocoles AMAC et P-AMAC en fonction du nombre d'UAVs (4, 10 et 50 UAVs).

On observe que dans les trois scénarios, la consommation énergétique augmente avec le nombre d'UAVs. De plus, P-AMAC consomme plus d'énergie qu'AMAC, quel que soit le nombre d'UAVs.

Pour 4 UAVs, la consommation est relativement faible : environ 0,012 J pour P-AMAC et 0,01 J pour AMAC. Pour 10 UAVs, elle augmente à 0,025 J pour P-AMAC et 0,02 J pour AMAC. Enfin, dans un scénario dense avec 50 UAVs, P-AMAC atteint 0,035 J, contre 0,03 J pour AMAC. Cependant, cette légère augmentation énergétique est justifiée par le débit supérieur offert par P-AMAC, qui permet la transmission d'un plus grand nombre de paquets tout en réduisant le taux de collisions. Par conséquent, les stations restent actives plus longtemps, ce qui augmente leur temps d'activité radio et, par effet direct, leur consommation énergétique.

## 4.3 conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer les performances du protocole P-AMAC à travers des simulations réalisées à la fois sous Python, pour valider le modèle analytique présenté dans le chapitre précédent, et dans l'environnement OMNeT++, dans le but d'évaluer l'efficacité de P-AMAC face au protocole AMAC dans des conditions plus réalistes.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité du mécanisme de gestion de priorités introduit dans P-AMAC. Ce dernier améliore les performances globales du réseau FANET en termes de débit moyen, de délai de bout en bout, de taux de livraison des paquets et de réduction du taux de collisions, en particulier lorsque la densité du réseau augmente. Ces performances confirment le mécanisme de différenciation par priorité introduit dans P-AMAC.

Bien que P-AMAC entraîne une légère augmentation de la consommation énergétique par rapport à AMAC, mais cette augmentation est justifiée par une meilleure exploitation du canal et une amélioration globale de la QoS.

En conclusion, cette évaluation confirme que P-AMAC offre de meilleures performances qu'AMAC, et que le protocole constitue une solution efficace pour les réseaux FANETs, notamment dans les environnements critiques où la priorisation des paquets est essentielle.

# Conclusion générale et travaux futurs

Les réseaux FANETs représentent une avancée significative dans le domaine des communications sans fil, grâce à leur capacité à répondre aux exigences d'applications critiques nécessitant autonomie, flexibilité et réactivité. Toutefois, leur nature hautement dynamique et leurs contraintes strictes en matière de QoS, pose des défis aux systèmes de communication modernes. Ces défis nécessitent la conception de mécanismes de communication capables de s'adapter aux conditions changeantes du réseau.

Notre travail s'est concentré sur la couche MAC, un élément clé dans le bon fonctionnement du réseau. Nous avons commencé par présenter les bases des FANETs, leurs architectures, leurs applications, ainsi que les protocoles MAC existants. Cette étude nous a permis d'identifier les limites des approches actuelles, en particulier en matière de gestion des priorités.

Dans cette étude, nous avons analysé le protocole AMAC, qui exploite les antennes directionnelles et la localisation GPS pour améliorer l'accès au canal. Pour répondre à ses limites, nous avons proposé P-AMAC, une version améliorée intégrant un mécanisme de gestion de priorité des paquets selon leur niveau de criticité. Cette différenciation repose sur des ajustements des paramètres d'accès au canal : mécanisme DIFS différencié et adaptation du mécanisme de backoff, favorisant ainsi la transmission rapide des informations critiques.

Afin de valider le comportement de P-AMAC, nous avons développé un modèle analytique basé sur les chaînes de Markov, permettant de modéliser avec précision les dynamiques d'accès au canal en fonction des niveaux de priorité des paquets. Ce modèle a été implémenté et résolu numériquement sous Python, les résultats analytiques obtenus ont mis en évidence l'efficacité de la gestion par priorité.

Nous avons ensuite développé une simulation sous Python reproduisant un environnement plus proche des conditions réelles. Cette simulation a permis de valider numériquement les résultats analytiques et de confirmer que les paquets critiques bénéficient d'un traitement prioritaire.

Enfin, une simulation réalisée sous OMNeT++ a permis de comparer les performances globales d'AMAC et de P-AMAC. Les résultats obtenus montrent que P-AMAC améliore significativement les performances du réseau par rapport à AMAC, notamment en termes de débit, de délai de transmission, de taux de collision et de taux de livraison des paquets, en particulier dans des contextes de forte densité.

Cependant, l'intégration de mécanismes de priorité a entraîné une consommation énergétique plus élevée dans P-AMAC, ce qui peut représenter une contrainte pour les UAVs à autonomie limitée. Néanmoins, ce protocole demeure particulièrement adapté aux applications critiques de courte durée, telles que les missions de secours.

Pour améliorer notre travail dans le futur, plusieurs points peuvent être envisagés :

- Réduire la consommation énergétique du protocole P-AMAC en intégrant des mécanismes efficaces d'économie d'énergie, adaptés aux contraintes des UAVs ;

- 
- Réaliser des tests dans des environnements plus réalistes, avec prise en compte des contraintes physiques et des interférences ;
  - Intégrer des techniques de l'intelligence artificielle comme l'apprentissage automatique, pour adapter dynamiquement les paramètres du protocole en fonction des conditions du réseau ;
  - Intégrer un mécanisme de retransmission pour les paquets critiques, afin de réduire la probabilité de perte en cas d'échec de transmission ;
  - Intégrer le mécanisme TXOP limite pour ajuster la durée d'occupation du canal en fonction de la priorité des paquets et des conditions du réseau, afin de réduire les collisions et garantir un accès prioritaire aux paquets critiques.

# Bibliographie

- [1] ALMALAG, M. S., WEIGLE, M. C., AND OLARIU, S. Mac protocols for vanet. 2011.
- [2] ALSHBATAT, A. I., AND DONG, L. Performance analysis of mobile ad hoc unmanned aerial vehicle communication networks with directional antennas. *International Journal of Aerospace Engineering 2010*, 1–14. 2010.
- [3] ARAFAT, M., POUDEL, S., AND MOH, S. Medium access control protocols for flying ad hoc networks : A review. *IEEE Sensors Journal 21*, 4, 5110–5130. 2021.
- [4] BEKMEZCI, I., SAHINGOZ, O. K., AND TEMEL, S. Flying ad-hoc networks (fanets) : A survey. *Ad Hoc Networks 11*, 3, 1254–1270. 2013.
- [5] BELKHIRA, S. A. H. *Optimisation de la QoS dans les réseaux adhoc mobiles*. Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace. 2020.
- [6] BIANCHI, G. Performance analysis of the ieee 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications 18*, 3, 535–547. 2000.
- [7] BORGONOVO, F., CAPONE, A., CESANA, M., AND FRATTA, L. Rr-aloHa, a reliable r-aloHa broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks. *Ad Hoc Networks 2*, 3, 329–344. 2004.
- [8] CAI, Y., YU, F. R., LI, J., ZHOU, Y., AND LAMONT, L. Mac performance improvement in uav ad-hoc networks with full-duplex radios and multipacket reception capability. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE. 2012.
- [9] CAI, Y., YU, F. R., LI, J., ZHOU, Y., AND LAMONT, L. Medium access control for unmanned aerial vehicle (uav) ad-hoc networks with full-duplex radios and multipacket reception capability. *IEEE Transactions on Vehicular Technology 62*, 1, 390–394. 2013.
- [10] CEVIZ, O., SEN, S., AND SADIOGLU, P. A survey of security in uavs and fanets : Issues, threats, analysis of attacks, and solutions. *WISE Lab, Department of Computer Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey*. 2023.
- [11] CHEN, J., WANG, J., AND BAI, L. DPCS-SDMA : An ISAC-Aided MAC Protocol for Flying Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology 74*, 3. 2025.
- [12] CHEN, X., HUANG, C., FAN, X., LIU, D., AND LI, P. Ldmac : A propagation delay-aware mac scheme for long-distance uav networks. *Computer Networks*. 2018.
- [13] CHRIKI, A., TOUATI, H., SNOUSSI, H., AND KAMOUN, F. Fanet : Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks 163*. 2019.
- [14] DHALL, R., AND DHONGDI, S. Review of protocol stack development of flying ad-hoc networks for disaster monitoring applications. *Archives of Computational Methods in Engineering 30*, 3, 37–68. 2022.

- [15] DJENIDI, N. Analyse de la sélection dynamique des chefs de cluster pour fanet. Master's thesis, Université Kasdi Merbah - Ouargla. 2022.
- [16] HILAIRE, G., HEITZ, M., RIMOLDI, B., ROSATI, S., AND KRUZELECKI, K. Dynamic routing for flying ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65, 3. 2014.
- [17] KHAN, M. A., QURESHI, I. M., KHAN, I. U., NASIM, A., JAVED, U., AND KHAN, W. On the performance of flying ad-hoc networks (fanets) with directional antennas. 2018.
- [18] KHAN, M. D., SHAIKH, A., AND KAZI, H. Performance evaluation of ad hoc multicast routing protocols to facilitate video streaming in vanets. *International Journal of Computer Applications* 34, 2, 1–6. 2011.
- [19] LI, A., WU, G., AND DONG, C. Cu-mac : A mac protocol for centralized uav networks with directional antennas. *IEICE Transactions on Communications*, 5, 537–545. 2020.
- [20] LI, J., ZHOU, Y., LAMONT, L., AND DÉZIEL, M. A token circulation scheme for code assignment and cooperative transmission scheduling in cdma-based uav ad hoc networks. *Wireless Networks* 19, 6, 1469–1484. 2013.
- [21] LIU, X., WEI, Z., FENG, Z., AND NING, F. Ud-mac : Delay tolerant multiple access control protocol for unmanned aerial vehicle networks. *IEEE Sensors Journal* 23, 19. 2017.
- [22] MAXA, J. *Architecture de communication sécurisée d'une flotte de drones*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier. 2017.
- [23] NOUASRI, A. *Contribution à la qualité de service et la sécurité dans un réseau dynamique et distribué*. Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara de Boumerdès. 2022.
- [24] OUBBATI, O., ATIQUZZAMAN, M., HOSSAIN, M. H., AND HOSSAIN, S. H. Routing in flying ad hoc networks : Survey, constraints, and future challenge perspectives. *IEEE Access* 7. 2019.
- [25] OUBBATI, O. S., LAKAS, A., ZHOU, F., GÜNEŞ, M., AND YAGOUBI, M. B. A survey on position-based routing protocols for flying ad hoc networks (fanets). *Vehicular Communications* 10, 29–56. 2017.
- [26] POUDEL, S., AND MOH, S. Medium access control protocols for unmanned aerial vehicle-aided wireless sensor networks : A survey. *IEEE Access* 7. 2019.
- [27] SAY, S., INATA, H., AND SHIMAMOTO, S. A hybrid collision coordination-based multiple access scheme for super dense aerial sensor networks. 1–6. 2016.
- [28] SUN, Q., ZHANG, L., ZHU, X., AND DONG, C. Switching mac protocols for uav networks in tactical scenario. 1–8. 2024.
- [29] TEMEL, S., AND BEKMEZCI, I. LODMAC : Location oriented directional mac protocol for FANETs. *Computer Networks* 83, 76–84. 2015.
- [30] VASHISHT, S., JAIN, S., AND AUJLA, G. S. Mac protocols for unmanned aerial vehicle ecosystems : Review and challenges. *Computer Communications* 160, 297–315. 2020.
- [31] WU, G., DONG, C., LI, A., ZHANG, L., AND WU, Q. Fm-mac : A multichannel mac protocol for fanets with directional antenna. 2018.
- [32] XIA, F. Qos challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks. *International Journal of Computer Science and Network Security* 8, 1, 1–8. 2008.

- 
- [33] YANG, S., LI, T., HU, T., AND ZHAO, W. Service priority-based dynamic tdma protocol for fanets. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*. 2024.
- [34] ZHANG, M., DONG, C., AND HUANG, Y. Fs-mac : An adaptive mac protocol with fault-tolerant synchronous switching for fanets. *IEEE Access* 7, 1–14. 2019.

## Modèle de Bianchi pour l'analyse du protocole IEEE 802.11 DCF

Le modèle de Bianchi (2000) constitue la première approche analytique fondamentale pour l'étude du protocole IEEE 802.11. Utilisant une modélisation par chaînes de Markov à temps discret, ce modèle permet d'analyser le comportement du protocole DCF (Distributed Coordination Function) en conditions de saturation, c'est-à-dire lorsque chaque station a toujours un paquet à transmettre. Il offre une évaluation précise de la probabilité de transmission, du taux de collision et du débit de saturation. Reposant sur des hypothèses simplificatrices (canal sans erreur, nombre fixe de stations, saturation permanente), il a servi de référence pour la majorité des travaux ultérieurs dans la littérature.

Le schéma suivant illustre la chaîne de Markov bidimensionnelle proposée dans ce modèle, décrivant les transitions possibles entre les états d'attente et de transmission d'une station.

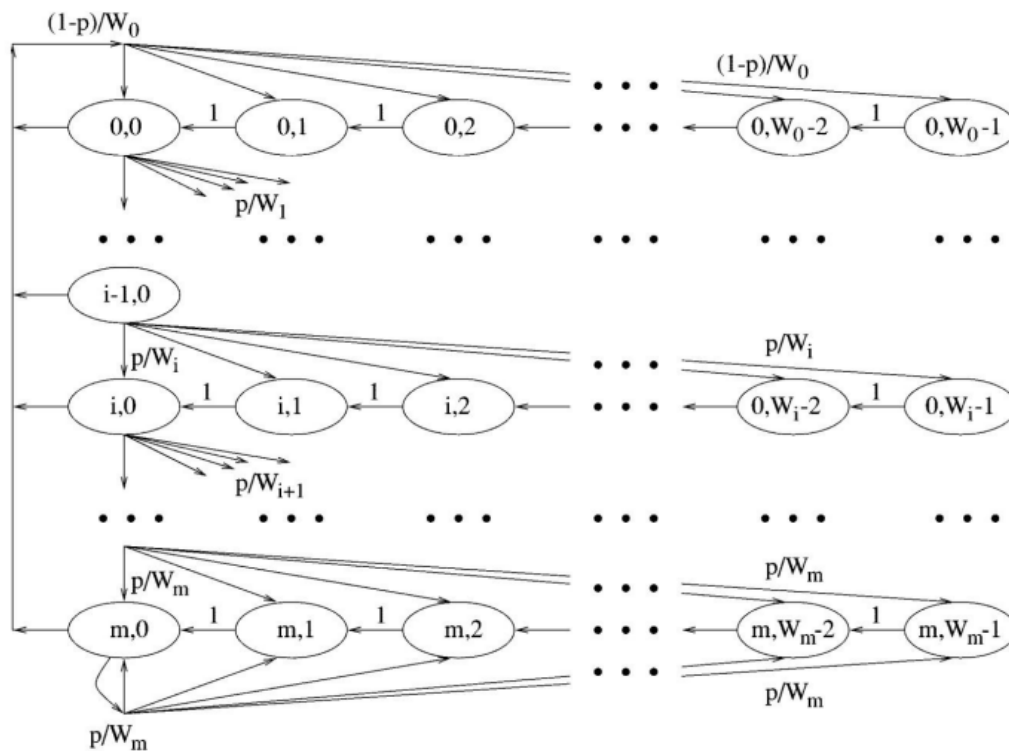


FIGURE 4.8 – Chaîne de Markov du DCF IEEE 802.11

Les probabilités de transition entre les états de la chaîne de Markov, qui modélisent le comportement du mécanisme de backoff dans le protocole DCF, sont données comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[i, k | i, k + 1] &= 1 & k \in [0, W_i - 2], \quad i \in [0, m] \\ \mathbb{P}[0, k | i, 0] &= \frac{1 - p}{W_0} & k \in [0, W_0 - 1], \quad i \in [0, m - 1] \\ \mathbb{P}[i, k | i - 1, 0] &= \frac{p}{W_i} & k \in [0, W_i - 1], \quad i \in [1, m] \\ \mathbb{P}[0, k | m, 0] &= \frac{1}{W_0} & k \in [0, W_0 - 1] \end{aligned}$$

Ce modèle constitue ainsi la base théorique sur laquelle repose notre propre modélisation analytique, développée dans le cadre de cette étude.

## Résumé

Les réseaux FANETs, composés de drones sans pilote, sont largement utilisés dans des applications critiques nécessitant une communication mobile, fiable et autonome. Cependant, leur forte mobilité et leur topologie dynamique compliquent la garantie d'une qualité de service (QoS) stable et efficace. Afin de garantir une bonne QoS dans les FANETs, il est important de bien coordonner et d'ajuster plusieurs éléments du réseau.

Ce mémoire s'intéresse à la couche MAC (Medium Access Control), responsable de l'accès au canal sans fil et joue un rôle essentiel dans la gestion de la QoS. Une gestion inefficace à ce niveau compromet l'efficacité globale des réseaux, ce qui rend nécessaire la conception de protocoles adaptés aux contraintes spécifiques des FANETs.

Pour répondre à ces exigences, ce travail propose un protocole MAC intégrant un mécanisme de gestion de priorité. Cette approche est modélisée analytiquement à l'aide de chaînes de Markov pour évaluer ces performances. Les résultats de simulation confirment que ce protocole améliore la QoS, notamment pour les paquets à haute priorité, ce qui est essentiel pour les applications FANETs.

**Mots clés :** FANETs, QoS, MAC, Priorité, AMAC, P-AMAC, Chaînes de Markov.

## Abstract

FANETs, composed of unmanned aerial vehicles (UAVs), are widely used in critical applications that require mobile, reliable, and autonomous communication. However, their high mobility and dynamic topology make it challenging to ensure stable and efficient Quality of Service (QoS). To achieve reliable QoS in FANETs, it is crucial to coordinate and adjust various components of the network.

This thesis focuses on the Medium Access Control (MAC) layer, which is responsible for wireless channel access and plays a crucial role in managing Quality of Service (QoS). Ineffective management at this level can compromise the overall efficiency of the networks, making it essential to design protocols tailored to the specific constraints of FANETs.

To address these challenges, this work proposes a MAC protocol that integrates a packet priority management mechanism. This approach is analytically modeled using Markov chains to assess its performance. Simulation results confirm that the proposed protocol enhances QoS, particularly for high-priority packets—an essential feature for FANET applications.

**Keywords :** FANETs, QoS, MAC, Priority, AMAC, P-AMAC, Markov Chains.