

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**

---

**Routage avec qualité de service dans les réseaux FANETs**

---

Présenté par :  
**Kassa Assia**

**Sous la direction de : Pr S. Boulfekhar**

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

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

**Année Universitaire 2024 – 2025**

# Dédicaces

Je dédie ce travail  
À la mémoire de mon père,  
Que ce travail reflète tout ce qu'il m'a transmis  
et témoigne de l'héritage de ses valeurs, de sa sagesse et de sa force.

À ma mère,  
pour sa présence constante, sa patience et son soutien précieux.

À mes sœurs et à mon frère,  
pour leur soutien et leurs encouragements constants.  
Merci d'avoir toujours été là, dans les moments de doute comme dans ceux de joie.

À mes cousines et à mes amis,  
pour leur amitié sincère et leurs encouragements répétés.  
Vous avez rendu chaque moment, un souvenir précieux.

# Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements vont tout particulièrement au Professeur S. BOULFEKHAR, qui a accepté de diriger ce mémoire. Merci pour son accompagnement constant, la qualité de ses conseils, ses remarques pertinentes et son suivi rigoureux tout au long de cette recherche.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils m'accordent en évaluant ce travail, et pour l'attention qu'ils y porteront.

Merci à ma famille pour avoir toujours cru en moi, m'avoir soutenu et encouragé avec bienveillance tout au long de ces années d'études.

Enfin, un grand merci à mes amis pour leur soutien moral, leur écoute et leur présence motivante pendant la réalisation de ce mémoire.

# Table des matières

Dédicaces . . . . .	II
Remerciements . . . . .	III
Liste des figures . . . . .	VI
Liste des algorithmes . . . . .	VII
Liste des tables . . . . .	VIII
Liste des abréviations et notations . . . . .	X
<b>Introduction générale . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux FANETs . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Réseaux Ad hoc . . . . .	4
1.3 Réseaux FANETs . . . . .	4
1.3.1 Système d'aéronef sans pilote . . . . .	5
1.3.2 Caractéristiques des réseaux FANETs . . . . .	6
1.3.3 Architecture des réseaux FANETs . . . . .	7
1.3.4 Communication dans les réseaux FANETs . . . . .	8
1.3.5 Modèles de mobilité dans les réseaux FANETs . . . . .	9
1.3.6 Domaines d'Application des réseaux FANETs . . . . .	10
1.3.7 Principaux défis dans les réseaux FANETs . . . . .	11
1.4 Conclusion . . . . .	12
<b>2 Routage dans les réseaux FANETs . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1 Introduction . . . . .	13
2.2 Exigences du routage dans les réseaux FANETs . . . . .	14
2.3 Qualité de service dans les réseaux FANETs . . . . .	15
2.3.1 Définition de la qualité de service . . . . .	15
2.3.2 Paramètres de la qualité de service . . . . .	15
2.3.3 Métriques de la qualité de service . . . . .	16
2.4 Classification des protocoles de routage dans les réseaux FANETs . . . . .	18
2.4.1 Protocoles de routage basés sur la topologie . . . . .	18
2.4.2 Protocoles de routage basés sur la position (Routage géographique) . . . . .	22
2.4.3 Protocoles de routage Hiérarchique (Basés sur des Clusters) . . . . .	23
2.4.4 Protocoles de routage bio-inspirés . . . . .	24
2.5 Comparaison entre les protocoles étudiés . . . . .	25
2.6 Conclusion . . . . .	29

---

<b>3</b>	<b>Protocoles de routage hiérarchiques avec QoS dans les réseaux FANETs</b>	<b>30</b>
3.1	Introduction . . . . .	30
3.2	Travaux antérieurs . . . . .	31
3.3	Nouvelle classification des protocoles hiérarchiques . . . . .	32
3.3.1	Objectif du protocole . . . . .	33
3.3.2	Résilience des clusters . . . . .	35
3.3.3	Type d'acheminement de données . . . . .	38
3.4	Comparaison entre les protocoles de routage hiérarchiques étudiés . . . . .	42
3.5	Conclusion . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Amélioration du protocole EMASS</b>	<b>45</b>
4.1	Introduction . . . . .	45
4.2	Limites du protocole EMASS . . . . .	46
4.3	Objectifs du protocole amélioré EMASS-QoS . . . . .	46
4.4	Conception du protocole EMASS-QoS . . . . .	47
4.4.1	Intégration de la qualité du lien dans les décisions de clustering . . . . .	47
4.4.2	Mécanisme de rotaion des CHs . . . . .	48
4.4.3	Ajustement dynamique de l'intervalle des messages Hello . . . . .	49
4.5	Évaluation des performances du protocole EMASS-QoS . . . . .	50
4.5.1	Métriques d'évaluation de performances . . . . .	50
4.5.2	Résultats d'évaluation de performances . . . . .	51
4.6	Conclusion . . . . .	55
	<b>Conclusion générale</b>	<b>56</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>57</b>
	<b>Résumé</b>	<b>61</b>

# Table des figures

1.1	Réseau Ad hoc	4
1.2	Classification des réseaux ad hoc	5
1.3	Système d'aéronef sans pilote (UAS)	6
1.4	Architecture et Communication des FANETs.	9
1.5	Application des réseaux FANETs.	10
2.1	Routage de données d'une source vers une destination	14
2.2	Classification des protocoles de routages dans les réseaux FANETs	18
2.3	Selection du MPR dans le protocole OLSR	19
2.4	Protocole DSR	20
2.5	Transmission de données suivant le protocole ZRP	21
2.6	Protocole BeeAdhoc	25
3.1	Classification des protocoles de routage héirarchiques	32
4.1	Valeur de fitness du CH sélectinné a chaque cycle	51
4.2	Latence estimé par chaque cycle	52
4.3	Energie finale restante dans les deux approches	53
4.4	Durée de vie du réseau	53
4.5	Taux moyen de perte des paquets	53

# Liste des Algorithmes

1	Sélection de CH avec qualité du lien . . . . .	48
	Rotation des chefs de clusters . . . . .	49

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison des architectures de réseaux FANETs . . . . .	8
2.1	Comparaison entre les protocoles de routage des réseaux FANETs . . . . .	28
3.1	Comparaison entre les protocoles de routage hiérarchiques pour FANETs selon QoS . . . . .	43
4.1	Paramètres de simulation . . . . .	50

# Liste des abréviations et notations

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
MANET	Mobile Ad hoc Network
VANET	Vehicular Ad hoc Network
FANET	Flying Ad hoc Network
QoS	Quality of Service
WSN	Wireless Sensor Network
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aerial System
RPL	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
GCS	Ground Control Station
LOS	Line of Sight
BLOS	Beyond Line of Sight
GPS	Global Positioning System
SATCOM	Satellite Communication
QoS	Quality of Service
PDR	Packet Delivery Ratio
LF	Link Failure
ARRr	Average Routing Replay ratio
ARDt	Average Routing Discovery time
RReq	Route Request
RRep	Route Reply
OLSR	Optimized Link State Routing
DSR	Dynamic Source Routing
ZRP	Zone Routing Protocol
RGR	Reactive Greedy Reactive
P-OLSR	Predictive-Optimized Link State Routing
MPCA	Mobility Prediction Clustering Algorithm for UAV Networking
MPR	Multi Point Relay
TC	Topology Control
GGF	Greedy Geographic Forwarding
RLS	Reactive Localisation Service
GLS	Grille Localisation Service
CH	Cluster Head
CM	Cluster Member
CBRP	Cluster Based Routing Protocol
EMASS	Energy and Mobility Aware Stable and Safe Clustering

---

MLSC	Mobility and Location aware Stable Clusterin
IMRL	Improved Multi-hop Routing based on Localization
EALC	Energy Aware Lifetime Clustering
ICRP	Inter-Cluster Routing Protocol
EENFC-MRP	Energy Efficient Neuro-Fuzzy Cluster based Topology Construction with Metaheuristic Route Planning
URP	UAV Routing Protocol
ULSN	UAV-Based Linear Sensor Routing Protocol
BICSF	Bio-Inspired Clustering Scheme for FANETs
RSSI	Received Signal Strength Indication

# Introduction générale

Les réseaux de drones, également appelés FANETs (Flying Ad Hoc Networks), représentent une avancée majeure dans le domaine des communications sans fil. Ces réseaux communiquent de manière autonome sans infrastructure fixe, offrent une flexibilité et une adaptabilité pour des applications variées, allant de la surveillance militaire aux missions humanitaires en passant par la gestion agricole et la livraison de colis [8]. Cependant, leur nature hautement dynamique, marquée par une mobilité élevée des nœuds et une topologie en constante évolution, pose des défis significatifs en matière de routage et de qualité de service (QoS) [8] [15].

La QoS dans les FANETs est un enjeu critique, notamment pour les applications exigeantes en termes de fiabilité, de latence et de bande passante. Les protocoles de routage traditionnels, conçus pour des réseaux plus stables comme les MANETs ou les VANETs, ne sont pas toujours adaptés aux spécificités des FANETs. Ainsi, la conception de protocoles efficaces capables de garantir une QoS optimale dans ces environnements dynamiques et contraints est devenue un domaine de recherche actif [24]

La problématique centrale de ce mémoire consiste à déterminer comment concevoir un mécanisme de routage hiérarchique capable de garantir une QoS optimale dans les réseaux FANETs tout en s'adaptant à leurs contraintes spécifiques de mobilité, d'énergie et de stabilité.

Pour répondre à cette problématique complexe, ce travail propose trois contributions majeures :

Premièrement, un nouveau cadre de classification des protocoles hiérarchiques est introduit, constituant la première taxonomie multidimensionnelle intégrant à la fois les objectifs du protocole (énergie, sécurité, mobilité), la résilience des clusters, et les stratégies d'acheminement de données (directes, multi-sauts et hybrides).

Deuxièmement, une amélioration du protocole EMASS (Energy and Mobility Aware Stable and Safe Clustering) nommée EMASS-QoS est proposée, incorporant trois innovations clés : l'intégration de la qualité du lien dans la sélection des chefs de cluster pour une meilleure stabilité des liens (réduisant les pertes de paquets), un mécanisme de rotation des CHs basé sur un seuil énergétique adaptatif (augmentant la durée de vie du réseau), et une adaptation dynamique des messages Hello.

Troisièmement, une validation approfondie par simulation est menée, utilisant des scénarios réalistes et des métriques QoS complètes (latence, perte de paquets, consommation énergétique, etc).

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le chapitre 1 présente les généralités sur les FANETs, leurs caractéristiques, architectures, modèles de mobilité et domaines d'application.

Le chapitre 2 étudie les exigences du routage dans les réseaux FANETs et les paramètres de QoS, tout en analysant les différentes classes de protocoles de routage.

Le chapitre 3 propose une nouvelle classification des protocoles hiérarchiques et compare leurs performances selon les critères de QoS.

Le chapitre 4 introduit le protocole amélioré EMASS-QoS, conçu comme une évolution du protocole EMASS, visant à renforcer la QoS dans les réseaux FANETs. Une simulation menée sous Python permet d'analyser et de comparer les performances d'EMASS-QoS avec celles de la version originale d'EMASS, en mettant en évidence les améliorations en termes de stabilité des clusters, consommation d'énergie et continuité des communications.

La conclusion générale synthétise les résultats et ouvre des perspectives pour de futures recherches.

# 1

## Généralités sur les réseaux FANETs

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Réseaux Ad hoc</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Réseaux FANETs</b>	<b>4</b>
1.3.1	Système d'aéronef sans pilote	5
1.3.2	Caractéristiques des réseaux FANETs	6
1.3.3	Architecture des réseaux FANETs	7
1.3.4	Communication dans les réseaux FANETs	8
1.3.5	Modèles de mobilité dans les réseaux FANETs	9
1.3.6	Domaines d'Application des réseaux FANETs	10
1.3.7	Principaux défis dans les réseaux FANETs	11
<b>1.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>12</b>

---

### 1.1 Introduction

Les réseaux de drones aussi appelés FANET (Flying Ad hoc Networks), sont des réseaux sans fil décentralisés permettant la communication entre drones sans infrastructure fixe. Leur grande mobilité et leur flexibilité offrent des avantages dans des environnements complexes, mais posent également des défis en termes de mobilité des nœuds, routage des messages, connectivité et qualité de service.

Ce chapitre explore les principes fondamentaux des réseaux FANETs, en mettant en lumière leur architecture, leurs caractéristiques, leurs modèles de mobilité, les défis techniques rencontrés ainsi que les domaines d'application.

## 1.2 Réseaux Ad hoc

Un réseau Ad hoc, aussi appelé MANET (Mobile Ad hoc Network), est un réseau informatique dans lequel les dispositifs équipés d'interfaces sans fil communiquent directement entre eux, sans infrastructure fixe ni point d'accès centralisé. Ce réseau est composé de nœuds mobiles, qui jouent un double rôle : ils sont à la fois terminaux et routeurs, assurant le relais des données pour les autres nœuds [39]. Voir la figure 1.1.

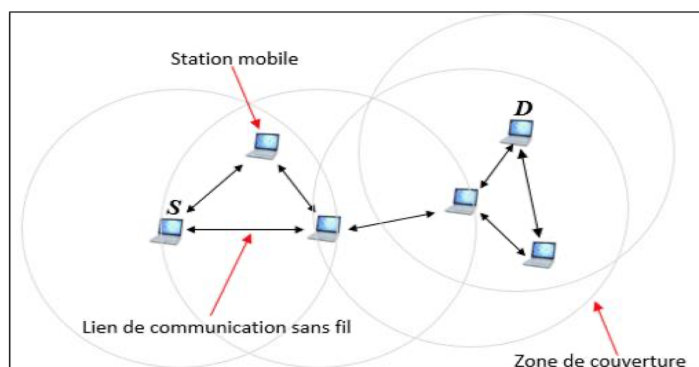


FIGURE 1.1 – Réseau Ad hoc

Les réseaux Ad hoc présentent plusieurs caractéristiques spécifiques [39] :

- **Topologie dynamique** : Les nœuds se déplacent de manière indépendante, entraînant des changements de la topologie du réseau.
- **Absence d'infrastructure centralisée** : Aucun élément fixe ne coordonne ou administre le réseau.
- **Contraintes énergétiques** : Les nœuds alimentés par des batteries, disposent de ressources énergétiques limitées.
- **Sécurité réduite** : La nature ouverte du canal de communication et la dynamique du réseau rendent ces systèmes particulièrement sensibles aux attaques malveillantes.
- **Problème des nœuds cachés** : Ce phénomène se produit lorsque deux nœuds ne peuvent pas détecter mutuellement leurs transmissions, en raison d'obstacles physiques ou d'une distance trop importante, ce qui peut engendrer des collisions de données.

## 1.3 Réseaux FANETs

Un réseau FANET, est un type de réseau Ad hoc, composé de véhicules aériens sans pilote (UAV - Unmanned Aerial Vehicle) qui communiquent entre eux de manière autonome, sans nécessiter d'infrastructure centrale comme des points d'accès ou des routeurs. Ce réseau est fondé sur les principes des réseaux Ad hoc, mais spécifiquement adapté aux drones ou autres dispositifs aériens mobiles.

La figure 1.2 illustre la position des réseaux FANETs par rapport aux différentes catégories de réseaux Ad hoc. En effet, les FANETs représentent un type particulier des VANETs (Vehicular Ad hoc Networks), eux mêmes issus des réseaux Ad hoc.

Les VANETs désignent des réseaux sans fil établis entre véhicules terrestres, permettant l'échange d'informations liées à la sécurité ou à la gestion du trafic.

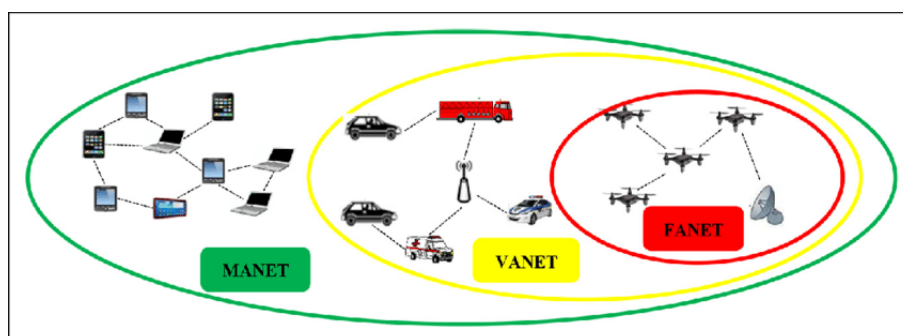


FIGURE 1.2 – Classification des réseaux ad hoc

### 1.3.1 Système d'aéronef sans pilote

Un Système Aérien Sans Pilote (UAS - Unmanned Aerial System) est un ensemble technologique composé d'un ou plusieurs UAVs, d'une station de contrôle au sol (GCS - Ground Control Station), de systèmes de communication et de transmission de données, ainsi que d'un système de lancement et de récupération.

Les éléments suivants sont les principaux composants du système d'aéronef sans pilote :

- **Véhicule Aérien Sans Pilote**

L'UAV, est un aéronef autonome qui peut fonctionner sans intervention humaine directe. Il intègre un système informatique embarqué, également appelé ordinateur de bord, qui lui permet d'exécuter des trajectoires définies à l'avance ou de s'adapter à son environnement de façon autonome. L'UAV est également équipé de différents capteurs, tels qu'un GPS assurant la localisation, de caméras et d'autres dispositifs de détection. L'ensemble de ces équipements permettent à l'appareil de localiser sa position avec précision et de recueillir des données sur la zone de mission [31].

- **Charge utile (Payload)**

Il s'agit des équipements embarqués par l'UAV pour exécuter sa mission : capteurs, émetteurs, caméras, armes, etc.

La charge utile est généralement intégrée à l'intérieur de l'appareil, bien que certains équipements puissent être montés à l'extérieur, ce qui peut affecter son aérodynamisme [31].

- **Centre de Commande et de Contrôle**

Ce centre inclut une GCS, permettant aux opérateurs d'interagir avec les UAVs en vol.

- **Système de Lancement**

Il permet de fournir à l'UAV la vitesse nécessaire pour son envol. Certains UAVs sont lancés à la main, tandis que les plus grands nécessitent une piste pour le décollage et l'atterrissage.

- **Liaisons de Communication et de Transmission des Données**

Ces liaisons permettent la transmission d'informations entre l'UAV et GCS. Lorsque

l'UAV est en ligne de vue directe (LOS- Line of Sight), la communication peut se faire par radio. En revanche, pour les opérations hors de la ligne de vue (BLOS- Beyond Line of Sight), il est nécessaire de faire appel à un relais comme un satellite ou un autre UAV [31].

La figure 1.3 représente les différents composants du système aérien sans pilote.

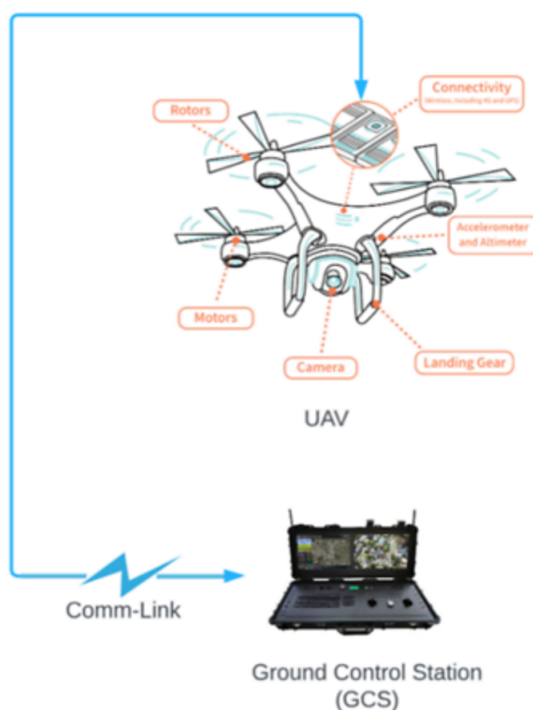


FIGURE 1.3 – Système d'aéronef sans pilote (UAS)

### 1.3.2 Caractéristiques des réseaux FANETs

Les réseaux FANETs reprennent certaines propriétés fondamentales des réseaux Ad hoc, mais se démarquent par des caractéristiques propres, liées à leur environnement et à la nature des nœuds mobiles. Dans ce qui suit nous présentons quelques propriétés des réseaux FANETs :

- **Changement de la topologie**

Dans un réseau FANET, la forte mobilité des nœuds entraîne des modifications fréquentes de la topologie du réseau. Les UAVs évoluent à grande vitesse dans un espace tridimensionnel, rendant la structure du réseau hautement dynamique et instable.

- **Densité de nœud**

La densité d'un réseau FANET correspond au nombre moyen d'UAVs présents dans une zone donnée. Cette densité varie en fonction de plusieurs critères, notamment l'objectif de la mission, la portée de transmission des drones, et la manière dont ils sont déployés dans l'espace aérien.

- **Localisation**

La localisation désigne la position de chaque UAV. En raison de leur vitesse élevée et des

déplacements fréquents, il est essentiel d'obtenir des informations de position précises à des intervalles très courts.

Les réseaux FANETs utilisent un GPS à faible latence pour suivre la position des UAVs, cela permet de gérer leur mobilité élevée et les fréquentes variations de la topologie du réseau [26].

- **Modèle de Propagation Radio**

Les différences entre les réseaux FANETs et les autres types de réseaux Ad hoc ont un impact sur la propagation des ondes radio. Les nœuds des réseaux MANETs et VANETs étant proches du sol, LOS entre l'émetteur et le récepteur est souvent obstruée (un obstacle physique peut bloquer ou perturber le signal radio entre deux nœuds). Par conséquent, la propagation des signaux radio est fortement influencée par la topographie du terrain.

En revanche, dans les réseaux FANETs les UAVs volent à une altitude plus élevée, cette hauteur permet généralement une LOS directe entre les UAVs, ce qui facilite la communication et favorise des conditions de propagation plus stables et efficaces [8].

- **Consommation Énergétique et Durée de Vie du Réseau**

La durée de vie d'un réseau FANET dépend de l'énergie des UAVs, qui fonctionnent sur batterie. La consommation énergétique varie en fonction du matériel de communication, des distances et des obstacles.

L'utilisation d'équipements à faible consommation permet de prolonger la durée de vie du réseau et d'éviter les pannes.

### 1.3.3 Architecture des réseaux FANETs

Il existe plusieurs architectures de communication utilisées en fonction des applications que les UAVs envisagent d'accomplir. Dans cette sous-section, nous analysons les organisations centralisée, multi-groupe et cellulaire, qui sont couramment utilisées dans la majorité des applications. De plus, nous mettons en évidence leurs avantages et inconvénients [25] :

1. **Architecture centralisée**

Dans cette architecture, un nœud central (comme GCS) est chargé de gérer le réseau et de diriger le trafic entre les UAVs. Ce nœud central agit comme point de contrôle pour organiser et optimiser les communications.

2. **Architecture multi-Groupe**

Dans cette organisation, les UAVs peuvent communiquer entre eux de manière Ad hoc tout en maintenant l'organisation centralisée. Des groupes sont formés, et certains UAVs jouent le rôle de passerelles pour relier les groupes aux GCS. Les communications au sein des groupes s'effectuent sans impliquer les GCSs, mais les communications intergroupes se font par l'intermédiaire des GCSs.

3. **Architecture cellulaire**

L'organisation cellulaire est une architecture où des GCSs forment des cellules de communication pour couvrir une zone spécifique. Chaque cellule utilise une fréquence unique pour éviter les interférences entre elles. Les UAVs peuvent communiquer directement entre eux ou via les GCSs.

Le tableau 1.1 met en parallèle les avantages et les inconvénients propres à chaque type d'architecture.

<b>Architecture</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Centralisée</b>	- Gestion centralisée simple - Bonne tolérance aux pannes	- Dépendance aux GCS - Latence élevée - Bande passante limitée
<b>Multi groupe</b>	- Haute résilience - Communication directe UAV à UAV	- Coordination complexe - Moins de contrôle global
<b>Cellulaire</b>	- Combine les avantages des deux précédents - Bonne couverture	- Mise en œuvre complexe - Coût élevé

TABLE 1.1 – Comparaison des architectures de réseaux FANETs

### 1.3.4 Communication dans les réseaux FANETs

La communication dans les réseaux FANETs désigne l'échange d'informations entre les UAVs, les GCSs et les satellites, afin d'assurer la coordination, le contrôle et le transfert de données dans des environnements dynamiques [25].

#### 1. Communication UAV à UAV

Les UAVs communiquent directement entre eux en utilisant divers protocoles de routage. Cependant, la portée de transmission étant limitée, ils utilisent souvent une communication multi-saut via d'autres UAVs pour couvrir une plus grande zone.

#### 2. Communication UAV à GCS

Les GCSs sont également utilisées pour relier différents groupes d'UAV entre eux. Généralement, certains UAVs spécialement conçus sont capables de communiquer avec les GCSs afin de réduire la congestion du réseau et d'améliorer le débit et la connectivité.

#### 3. Communication par satellite

Les UAVs sont souvent utilisés dans des environnements complexes comme les océans ou les zones montagneuses, où l'installation de GCS est difficile. Pour garantir une connectivité continue dans un réseau FANET, il est nécessaire d'avoir une entité centralisée.

Les satellites offrent une bonne solution en jouant le rôle de relais pour contrôler les UAVs et assurer une large couverture.

La figure 1.4 illustre les trois architectures ainsi que les trois types de communication : les lignes vertes représentent les communications UAV à UAV, les lignes rouges indiquent les communications UAV à GCS, tandis que les lignes noires correspondent aux communications par satellite (SATCOM – Satellite Communication).

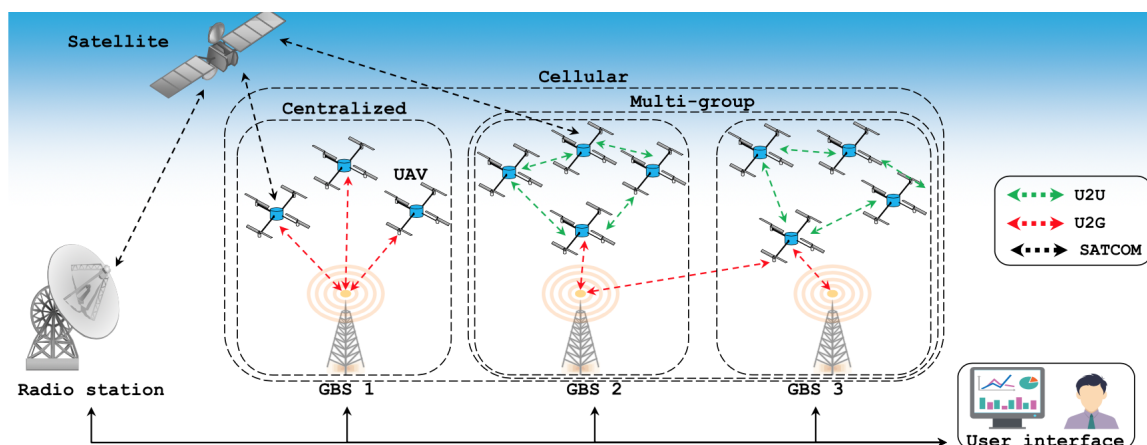


FIGURE 1.4 – Architecture et Communication des FANETs.

### 1.3.5 Modèles de mobilité dans les réseaux FANETs

Les modèles de mobilité sont essentiels pour simuler des scénarios réalistes dans les réseaux FANETs. Ils jouent un rôle crucial dans le développement de protocoles de routage efficaces et dans la mise en œuvre des communications entre UAVs selon différentes approches.

Les modèles de mobilité utilisés dans les réseaux FANETs sont présentés ci-dessous, chacun étant illustré par un exemple.

#### 1. Modèles de mobilité aléatoires

Les modèles de mobilité aléatoires sont mis en œuvre pour simuler des mouvements d'UAVs de manière complètement indépendante, sans tenir compte des positions précédentes. Ces modèles sont simples et largement utilisés pour tester les performances des réseaux dans des situations sans structure spécifique.

##### - Random Waypoint Model

Chaque UAV choisit un point de destination aléatoire, s'y déplace à une vitesse prédéterminée et fait une pause avant de commencer encore une fois le même processus [8].

#### 2. Modèles de mobilité temporels

Ces modèles prennent en compte la continuité dans les déplacements, ce qui les rend plus réalistes pour des simulations à long terme où l'inergie des UAVs doit être prise en compte.

##### - Modèle Gauss-Markov

Les déplacements futurs des UAVs dépendent de leur vitesse et direction précédentes, assurant une évolution des déplacements régulière et réaliste [36][29].

#### 3. Modèles de mobilité planifiés

Les modèles de mobilité planifiés sont utilisés lorsque l'UAV doit effectuer un mouvement sur une trajectoire prédéfinie. Ces modèles sont particulièrement adaptés aux scénarios où les UAVs sont déployés pour effectuer une mission spécifique avec un itinéraire connu à l'avance.

##### - Semi-Random Circular Movement

Les UAVs suivent une trajectoire circulaire autour d'un point central, dont le rayon varie aléatoirement d'un cycle à un autre [25].

#### 4. Modèles de mobilité en groupe

Les modèles de mobilité en groupe sont utilisés pour simuler des formations ou des mouvements coordonnés d'UAVs. Ces modèles sont essentiels pour les missions de coopération entre UAVs, comme les missions de recherche et sauvetage, ou les formations militaires.

##### - Exponential Correlated Random

Les UAVs se déplacent de manière coordonnée selon une fonction de mouvement commune, assurant une mobilité groupée efficace [25].

### 1.3.6 Domaines d'Application des réseaux FANETs

Les réseaux FANETs sont utilisés dans divers domaines grâce à leur capacité à évoluer dans des environnements complexes et difficiles d'accès. Leurs applications couvrent les secteurs militaire, humanitaire, scientifique, personnel et commercial, ainsi que des missions spécifiques de surveillance et d'exploration.

La figure 1.5 montre les différents domaines d'application des réseaux FANETs [32].

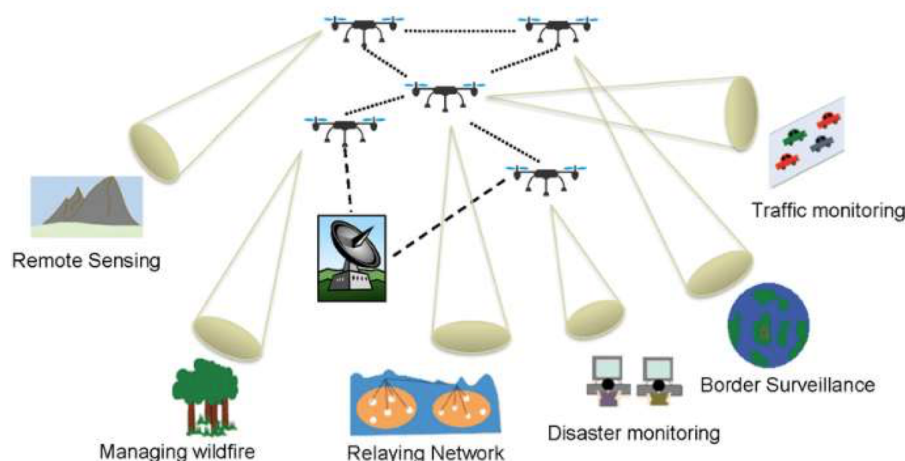


FIGURE 1.5 – Application des réseaux FANETs.

- **Applications militaires**

- Surveillance et observation des mouvements ennemis.
- Identification et suivi des cibles.
- Détection et neutralisation des explosifs non détonés.

- **Applications humanitaires**

- Surveillance et intervention en cas de catastrophes naturelles (incendies, inondations, tremblements de terre).

- **Applications scientifiques**
  - Études de l'environnement (climat, pollution, océans, sols).
  - Prévisions météorologiques.
  - Détection des incendies.
  
- **Applications civiles et de surveillance**
  - Surveillance agricole (suivi des cultures, épandage)
  - Contrôle maritime (routes maritimes, trafic illégal)
  - Sécurité urbaine, contrôle des manifestations et surveillance des frontières.
  
- **Applications commerciales et industrielles**
  - Livraison de colis et de marchandises.
  - Photographie et vidéos pour le marketing et le cinéma.
  - Cartographie et exploration aérienne.

### 1.3.7 Principaux défis dans les réseaux FANETs

Malgré leurs avantages, les réseaux FANETs font face à plusieurs défis majeurs qu'il est essentiel de surmonter.

Les principaux défis dans les réseaux FANETs sont les suivants :

- **Gestion de la connectivité**

La forte mobilité des UAVs rend difficile le maintien d'une communication stable et continue entre les différents nœuds du réseau.
- **Contraintes énergétiques**

Les UAVs fonctionnent principalement sur batterie, dont l'autonomie est limitée et influence leur temps de vol et leurs opérations. Bien qu'il soit possible d'augmenter la capacité des batteries, cela finit par dégrader les performances des UAVs en raison du rapport énergie/poids. Une gestion efficace de la batterie et du rechargement représente donc un défi clé pour les réseaux FANETs.
- **Sécurité**

En raison de l'importance des données transmises par les UAVs, la sécurité des communications dans les réseaux FANETs ne se limite pas aux objectifs classiques de la cybersécurité. Elle doit également intégrer d'autres exigences et contraintes spécifiques afin de prévenir les vulnérabilités potentielles et les diverses formes d'attaques.
- **Garantir la qualité de service**

Dans les réseaux FANETs, la qualité de service (QoS) doit être assurée malgré des contraintes importantes telles que la mobilité élevée, les ressources limitées et la dynamique du réseau.

La QoS dépend fortement des performances des protocoles de communication, notamment au niveau MAC et au niveau routage.

Les protocoles de communication, en particulier aux niveaux MAC et routage, jouent un rôle central dans l'assurance de la QoS.

Le protocole MAC doit gérer efficacement l'accès au canal radio, en limitant les collisions et en assurant un partage équitable des ressources, ce qui est important dans des

environnements à forte mobilité.

En ce qui concerne le routage, les défis sont encore plus importants en raison des fréquents changements de topologie et des contraintes énergétiques. Les protocoles classiques des réseaux MANETs ou VANETs ne sont pas toujours adaptés ; les FANETs nécessitent des solutions plus réactives, flexibles et capables de s'adapter en temps réel. Une analyse détaillée des approches de routage sera développée dans le chapitre suivant.

## 1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principes fondamentaux des réseaux FANETs, en introduisant le systèmes d'aéronefs sans pilote, puis en détaillant les caractéristiques propres aux réseaux FANETs, leurs architectures, leurs modèles de communication et de mobilité, ainsi que leurs principaux domaines d'application.

Ces réseaux doivent relever plusieurs défis, notamment en matière de gestion énergétique, de connectivité, de sécurité et surtout de QoS.

Les applications des réseax FANETs imposent des exigences strictes en matière de QoS, ce qui necessite des protocoles de routage capables de répondre à ces contraintes. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des différentes approches de routage basées sur la QoS, spécifiquement conçues pour les réseaux FANETs.

# 2

## Routage dans les réseaux FANETs

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Exigences du routage dans les réseaux FANETs</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Qualité de service dans les réseaux FANETs</b>	<b>15</b>
2.3.1	Définition de la qualité de service	15
2.3.2	Paramètres de la qualité de service	15
2.3.3	Métriques de la qualité de service	16
<b>2.4</b>	<b>Classification des protocoles de routage dans les réseaux FANETs</b>	<b>18</b>
2.4.1	Protocoles de routage basés sur la topologie	18
2.4.2	Protocoles de routage basés sur la position (Routage géographique)	22
2.4.3	Protocoles de routage Hiérarchique (Basés sur des Clusters)	23
2.4.4	Protocoles de routage bio-inspirés	24
<b>2.5</b>	<b>Comparaison entre les protocoles étudiés</b>	<b>25</b>
<b>2.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>29</b>

---

### 2.1 Introduction

Les réseaux FANETs sont caractérisés par une mobilité élevée et une topologie dynamique. Ces particularités rendent la gestion efficace des communications particulièrement complexe, notamment lorsque les applications exigent un haut niveau de fiabilité et de performance.

Dans ce contexte, le routage ne se limite pas à acheminer les données d'un point à un autre : il représente un élément clé dans la satisfaction des exigences de QoS.

Ce chapitre vise à explorer les principales approches de routage mises en œuvre dans les réseaux FANETs, en mettant en lumière celles qui intègrent explicitement les contraintes liées à QoS.

Nous commencerons par identifier les exigences spécifiques du routage dans ce type de réseau,

avant de définir les notions clés de la QoS. Une classification des principales catégories de protocoles de routage sera ensuite présentée, couvrant les approches topologiques, géographiques, hiérarchiques et bio-inspirées, suivie d'une évaluation comparative de leur capacité à assurer un service fiable et efficace dans des contextes de haute mobilité.

## 2.2 Exigences du routage dans les réseaux FANETs

Le routage est le processus de sélection d'un chemin dans un réseau, dans lequel on fait transiter une information donnée depuis un émetteur vers un récepteur (Voir la figure 2.1).

Dans les environnements hautement dynamiques tels que les réseaux FANETs, ce processus doit être capable de s'adapter aux variations fréquentes de la topologie.

Le choix des routes vise ainsi à garantir une communication efficace et fiable, condition essentielle pour répondre aux exigences spécifiques du réseau, notamment en termes de QoS.

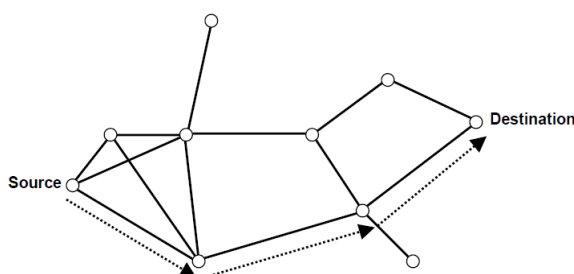


FIGURE 2.1 – Routage de données d'une source vers une destination

Le routage dans les réseaux FANETs doit répondre aux exigences suivantes :

- **Adaptabilité élevée**

Les réseaux FANETs sont caractérisés par une topologie hautement dynamique. Cette caractéristique impose aux protocoles de routage de garantir une découverte dynamique et flexible des routes, afin de s'adapter en temps réel aux changements fréquents de la structure du réseau.

Pour assurer la fiabilité du routage, il est essentiel que les mécanismes de découverte et de maintenance des routes soient suffisamment flexibles. Cela nécessite une mise à jour continue de la table de routage et une identification permanente des itinéraires optimaux, permettant ainsi de compenser les risques de déconnexion.

- **Grande scalabilité**

Les UAVs doivent être capables de gérer des applications à grande échelle impliquant un grand nombre d'appareils, quel que soit le niveau de densité du réseau. La collaboration et la coordination entre les UAVs sont essentielles pour optimiser la découverte et la gestion des routes, garantissant ainsi une meilleure évolutivité du réseau.

- **Autonomie énergétique optimisée**

Comme les UAVs fonctionnent sur batterie, ils doivent privilégier des routes où l'énergie résiduelle des nœuds est suffisante. Cela permet de minimiser les interruptions de liaison

et les pannes réseau dues aux défaillances des nœuds, prolongeant ainsi la durée de vie des routes établies.

- **Qualité de service**

Le routage dans les réseaux FANETs doit être capable de garantir différents paramètres de performance ; le protocole de routage doit intégrer des mécanismes de prise de décision intelligents permettant d'évaluer la qualité des liens et de choisir des routes en fonction des exigences QoS spécifiques à chaque application. Cette exigence sera détaillée dans la section suivante 2.3.

## 2.3 Qualité de service dans les réseaux FANETs

La QoS est essentielle pour garantir des communications fiables et performantes dans les réseaux, en particulier dans des environnements dynamiques et contraints tels que les FANETs.

### 2.3.1 Définition de la qualité de service

La QoS désigne la capacité d'un réseau à assurer un transport optimal des données, en garantissant des performances adaptées à un type de trafic spécifique. Elle se mesure à travers plusieurs critères, notamment la distance, le débit, les délais de transmission et le taux de perte de paquets.

### 2.3.2 Paramètres de la qualité de service

La conception d'un protocole de routage adapté aux réseaux FANETs nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres de QoS, parmi ces paramètres on distingue [9] :

- **Délai**

Le délai est généralement reconnu comme le paramètre clé dans les protocoles de routage. Il représente :

- **Le délai d'accès** appelé délai de mise en file d'attente, correspond au temps moyen écoulé entre la tentative d'envoi d'un paquet et sa transmission effective.
- **Le délai de transmission** correspond au temps nécessaire à la mise en ligne d'un paquet.
- **Le délai de propagation** correspond au temps de transport moyen entre l'envoi et la réception d'un paquet.
- **Le délai de traitement** Correspond au temps pendant lequel un message reste en attente dans la file de destination, jusqu'à ce qu'il soit vérifié puis finalement délivré au destinataire.

- **Distance**

Il s'agit de la distance géographique entre l'UAV actuel et l'UAV voisin.

- **Fiabilité des liaisons**

Il s'agit de la stabilité et de la qualité des connexions sans fil entre les UAVs.

Le protocole doit être capable de maintenir des routes robustes même en cas d'instabilité des liens ou de pertes de paquets, afin de garantir la continuité des communications.

- **Nombre de sauts**

Le nombre de sauts représente le nombre de liens sur lesquels des ressources sont allouées sur le chemin entre les UAVs source et destination.

- **Sécurité**

Les attaques de sécurité posent des défis importants en termes de routage sécurisé, la QoS du réseau pourrait être dégradée par une attaque sur le processus de routage et la manipulation des messages de contrôle. Pour cette raison, la sécurité doit être prise en compte dans l'optimisation du routage.

- **Énergie**

Ce paramètre représente l'énergie de l'UAV au début du déploiement du réseau. L'objectif des protocoles de routage économes en énergie est de maximiser la durée de vie du réseau.

- **Nœuds voisins**

Un UAV possède un ensemble d'UAVs à un saut dans sa portée de transmission. Ces UAVs à un saut sont appelés nœuds voisins. Ils mettent à jour leurs informations, telle que la position, en échangeant les messages Hello.

- **Mobilité**

La grande mobilité des UAVs dans les réseaux FANETs génère de fréquents changements de topologie et une fragmentation du réseau. De ce fait, le routage des paquets devient une tâche complexe. Toutefois, les performances de routage peuvent être améliorées de manière efficace en prenant en compte les caractéristiques de mobilité.

### 2.3.3 Métriques de la qualité de service

Les protocoles de routage dans les réseaux FANETs sont évalués à travers plusieurs métriques essentielles permettant de mesurer les performances et la fiabilité de la transmission des données, parmi ces métriques on distingue [9], [4] :

- **Perte de Paquets**

La perte de paquets correspond au pourcentage de paquets envoyés qui ne parviennent pas à destination. Elle est causée par des erreurs de transmission de données ou par la congestion du réseau.

- **Bande Passante**

La bande passante représente la capacité maximale du réseau à transmettre des données, généralement mesurée en bits par seconde (bps). Une bonne gestion de la bande passante est essentielle pour garantir une transmission fluide et efficace des données.

- **Délai de Bout en Bout**

Le délai de bout en bout appelé aussi la latence, correspond au temps total nécessaire pour qu'un paquet atteigne sa destination après son envoi.

- **Taux de livraison de paquets**

Taux de livraison de paquets (PDR - Packet Delivery Ratio), correspond au rapport entre le nombre de paquets de données livrés avec succès à la destination et le nombre de paquets transmis par la source.

- **Gigue**

La gigue est la variation dans le délai de réception des paquets de données, affectant la fluidité et la qualité des applications en temps réel comme la voix et la vidéo.

- **Surcharge**

Les paquets de routage et les paquets de données partagent la même bande passante réseau, ce qui conduit souvent à considérer les paquets de routage comme une surcharge pour le réseau.

- **Défaillance de lien**

La défaillance de lien (LF - Link Failure), correspond au nombre moyen de défaillances de lien survenant lors du processus de routage. Cette métrique permet d'évaluer l'efficacité du protocole de routage à éviter les ruptures de lien.

- **Taux moyen de réponse de routage**

Le taux moyen de réponse de routage (ARRr - Average Routing Replay ratio ), est le rapport entre le nombre moyen de paquets de réponse envoyés par tous les UAVs destinataires aux demandes de route, et le nombre total de demandes de route émises par tous les UAVs sources dans le réseau.

Autrement dit, c'est une mesure de la capacité du réseau à fournir des réponses aux requêtes de découverte de chemin entre les nœuds.

- **Temps moyen de découverte de route**

Le temps moyen de découverte de route (ARDt - Average Routing Discovery time), représente le temps moyen écoulé entre l'envoi d'une demande de route vers une destination spécifique et la réception d'une réponse de route en provenance de cette destination.

- **Taux de demande de routage**

Taux de demande de routage (RReq - Routing Request ratio), est le rapport entre le nombre total de demandes de routage transmises et le nombre total de paquets de routage reçus avec succès par l'UAV de destination.

Ces métriques sont fondamentales pour garantir une transmission stable et performante des données dans les réseaux FANETs, en optimisant le routage et la gestion des ressources réseau.

## 2.4 Classification des protocoles de routage dans les réseaux FANETs

Les protocoles de routage dans les réseaux FANETs se classent en différentes catégories, notamment ceux basés sur la topologie, la position, les clusters ou des modèles bio-inspirés, chacun étant conçu pour répondre à des exigences spécifiques en matière de QoS.

La figure 2.2 représente les différentes classes de protocoles de routage dans les réseaux FANETs [6].

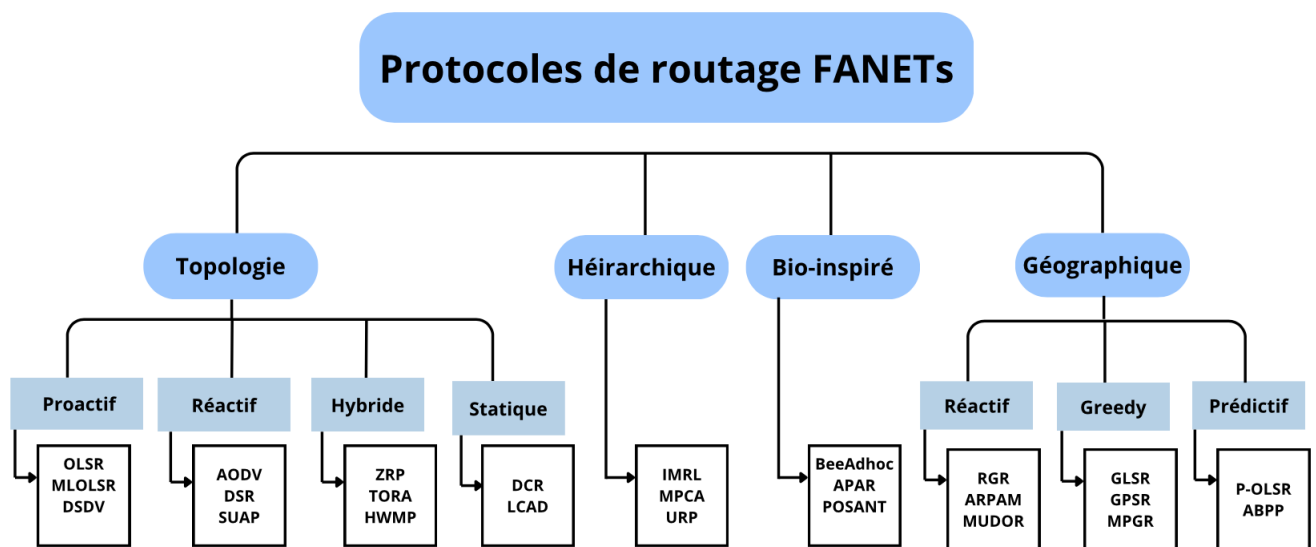


FIGURE 2.2 – Classification des protocoles de routages dans les réseaux FANETs

### 2.4.1 Protocoles de routage basés sur la topologie

La mobilité des UAVs entraîne des changements dans la topologie du réseau. Des modifications dynamiques des caractéristiques topologiques peuvent provoquer des perturbations du réseau. Par conséquent, de nombreux protocoles de routage ont été proposés pour résoudre ce problème. Leur objectif est d'améliorer le routage en y intégrant davantage d'informations (vitesse, direction...), notamment celles issues de l'analyse des schémas de mouvement des UAVs, afin d'anticiper et de s'adapter aux variations topologiques [2].

Ces protocoles se basent sur les informations des liens en exploitant les adresses IP des noeuds mobiles pour la transmission des données [25].

On distingue généralement quatre catégories de protocoles de routage basés sur la topologie dans les réseaux FANETs :

### 2.4.1.1 Protocoles de routage Proactifs

Les protocoles de routage proactifs (PRP) sont également appelés protocoles de routage actifs ou protocoles de routage pilotés par table. Dans ce type de protocole, la table de routage est régulièrement mise à jour et stockée sur chaque UAV, indiquant la topologie complète du réseau.

Le principal avantage de ces protocoles réside dans leur faible délai d'envoi ; le chemin étant connu à l'avance. Cependant, la mise à jour périodique des tables de routage consomme énormément de bande passante et d'énergie.

Par conséquent, les protocoles de routage proactif ne sont pas adaptés aux réseaux à forte mobilité et de grande taille. De plus, en cas de panne de connexion ou de changement topologique, les PRP réagissent lentement [14]. Le protocole OLSR est un exemple représentatif des protocoles de routage proactifs.

#### • Protocole OLSR

Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) [11], est basé sur une stratégie de routage d'état de lien afin d'établir une connaissance globale de tous les liens existants entre les UAVs. OLSR utilise un paquet unique, composé de plusieurs messages, pour établir une communication entre les UAVs d'un réseau. Ce paquet peut transporter trois types de messages différents, chacun dédié à une tâche spécifique [41] :

- Un message HELLO, utilisé pour transmettre périodiquement afin de trouver les UAVs voisins.
- Un message de contrôle de topologie (TC), annoncé pour maintenir les informations topologiques.
- Un message de déclaration d'interface multiple (MID), qui effectue la déclaration d'interface multiple sur un UAV.

Le protocole OLSR sélectionne les UAVs MultiPoint Relay (MPR) pour couvrir les voisins à deux sauts, pour générer des informations d'état de lien et pour transmettre des paquets de données à d'autres MPR, réduisant ainsi la surcharge.

La figure 2.3 illustre la sélection du MPR par l'UAV source.

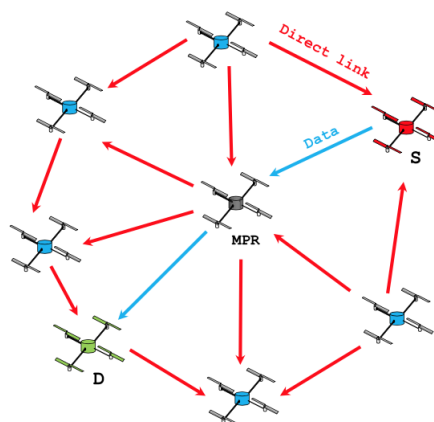


FIGURE 2.3 – Sélection du MPR dans le protocole OLSR

### 2.4.1.2 Protocoles de routage réactifs

Les protocoles de routage réactif (RRP), également appelés protocoles de routage à la demande, établissent une route uniquement lorsque cela est nécessaire, et mettent à jour la table de routage uniquement lorsque des données doivent être transmises ce qui les rend plus efficaces en termes de bande passante. Cependant, leur principal inconvénient réside dans la latence introduite lors de la phase de découverte d'itinéraire, qui peut retarder l'envoi initial des données [14]. Un protocole réactif largement reconnu est le protocole DSR.

#### • Protocole DSR

Le protocole DSR (Dynamic Source Routing) [17], permet au réseau de s'auto-organiser et de s'auto-configurer sans dépendre d'infrastructures. Grâce à sa nature réactive, un processus de découverte est déployé uniquement lorsqu'une communication est nécessaire. De plus, un mécanisme de maintenance des routes est adopté pour gérer les éventuelles défaillances de route.

Dans l'exemple de la figure 2.4, le drone S génère un paquet RREQ (Route Request) et le diffuse sur tous les UAVs constituant le réseau. Au fur et à mesure de sa progression, le paquet RREQ enregistre dans son en-tête tous les identifiants des UAVs traversés jusqu'à atteindre le nœud de destination D. Le routage est décidé en fonction du nombre de sauts, le chemin le plus court étant sélectionné. Une fois le chemin sélectionné, les adresses des UAVs qui le composent sont intégrées dans le paquet RREP (Route Reply) et dans les paquets de données afin de transmettre correctement les paquets entre les UAVs.

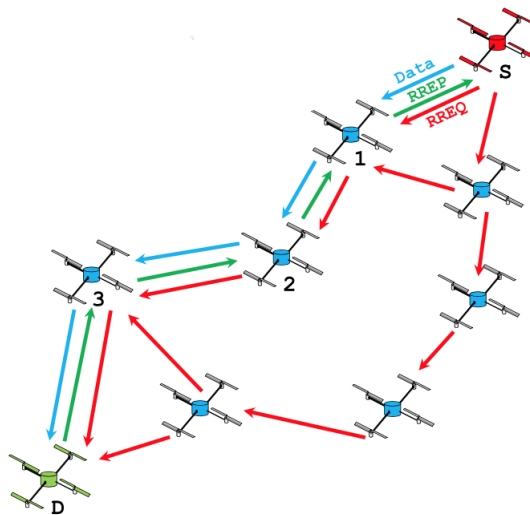


FIGURE 2.4 – Protocole DSR

### 2.4.1.3 Protocoles de routage hybrides

Pour remédier aux limitations des protocoles proactifs et réactifs, les protocoles hybrides combinent les avantages des deux.

Les protocoles proactifs et réactifs nécessitent respectivement une surcharge importante pour

maintenir l'ensemble du réseau et un temps suffisant pour établir les meilleures routes. En tant que solution classique, les protocoles hybrides adoptent une technique de routage qui repose sur le concept de zones ; le routage à l'intérieur d'une zone est réalisé à l'aide du routage proactif, tandis que le routage entre les zones est géré par le routage réactif [25]. Parmi les protocoles hybride on peut citer le protocole ZRP.

#### • Protocole ZRP

Le ZRP (Zone Routing Protocol) [20], est un protocole de routage hybride combinant deux types de routage : réactif et proactif.

ZRP repose sur le concept de zones, où chaque zone contient un ensemble de nœuds. Lorsque les UAVs se trouvent au sein d'une même zone, ils peuvent démarrer immédiatement la transmission de données. En revanche si un UAV doit envoyer un paquet de données vers une destination située hors de la zone, un processus de découverte doit être appliqué pour établir un chemin de routage vers la destination cible [25], (voir la figure 2.5) .

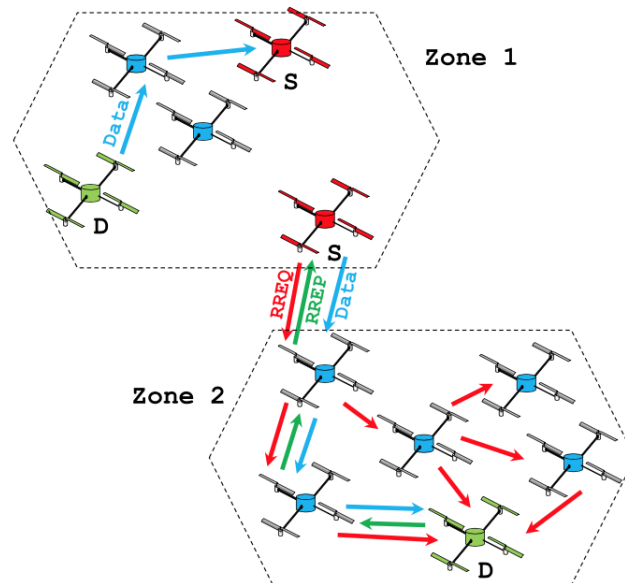


FIGURE 2.5 – Transmission de données suivant le protocole ZRP

#### 2.4.1.4 Protocoles de routage statique

Les protocoles de routage statique utilisent des itinéraires fixes. Avant le décollage, une table de routage est calculée puis téléchargée dans les UAVs, ces itinéraires ne peuvent pas être modifiés ou mis à jour durant leur fonctionnement. Ce type de protocole n'est donc pas dynamique et présente une faible tolérance aux pannes, car il ne s'adapte pas aux changements de la topologie ou aux défaillances du réseau [6].

#### • Routage DCR

Le routage DCR (Data-Centric), s'appuie directement sur les données. Il est particulièrement

efficace lorsque plusieurs nœuds demandent simultanément des informations, facilitant ainsi les transmissions de type un-vers-plusieurs. Ce protocole est surtout performant dans les topologies en clusters, où les nœuds sont regroupés en groupes pour améliorer la diffusion des données [6].

### 2.4.2 Protocoles de routage basés sur la position (Routage géographique)

Les protocoles de routage basés sur la position exploitent la localisation géographique des nœuds pour optimiser l'acheminement des données. Ils sont particulièrement adaptés aux réseaux FANETs caractérisés par une forte mobilité [14].

Chaque UAV peut diffuser des informations géographiques sur sa vitesse et sa position à ses voisins grâce au GPS. L'UAV peut s'appuyer sur un service de localisation, tel que le service de localisation réactive (RLS) ou le service de localisation de grille (GLS), pour déterminer la position de la destination (service de localisation hiérarchique) [3]. L'avantage est d'éliminer le problème des déconnexions fréquentes des nœuds du réseau causées par l'imprévisibilité de la mobilité des nœuds.

Ces protocoles se répartissent en trois catégories principales :

#### 2.4.2.1 Protocoles de routage réactifs

Ces types de protocoles reposent sur une technique réactive, et utilisent la position des UAVs pour optimiser les performances. Parmi les protocoles réactifs on retrouve le protocole RGR.

- **Protocole RGR**

Le RGR (Reactive Greedy Reactive) [34], est un protocole de routage dédié aux réseaux FANET combinant deux modes : le mode réactif et le mode géographique. Lorsque le réseau subit un nombre réduit de déconnexions, le mode réactif s'appuie sur le protocole AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector).

Cependant, lorsque la topologie du réseau change fréquemment en raison de la forte mobilité et du nombre réduit d'UAVs, le mode GGF (Greedy Geographic Forwarding) est utilisé pour continuer à transférer les paquets de données.

Par hypothèse, chaque UAV connaît la position de ses voisins grâce au processus de découverte de voisins. La position de la destination est supposée connue afin de pouvoir transmettre les paquets de données vers l'UAV le plus proche de cette destination, notamment en cas de défaillance du protocole AODV.

#### 2.4.2.2 Protocoles de routage gloutons

Ce type de protocoles recherche le chemin présentant le moins de sauts entre les UAVs grâce à l'approche Greedy Forwarding [13], minimisant ainsi le délai de transmission des messages. Cependant, la connectivité du réseau FANET n'est pas stable en permanence, en raison de la forte mobilité des UAVs. Cela rend la transmission basée sur cette approche moins fiable en cas d'utilisation excessive, pouvant entraîner d'importantes pertes de paquets.

Parmi les protocoles gourmands couramment employés, on retrouve le protocole GPSR.

- **Protocole GPSR**

Le GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [18], est un protocole de routage basé sur une

approche gloutonne (greedy), qui fonctionne selon deux modes : le routage glouton (Greedy Forwarding), et le routage par périmètre (Perimeter Forwarding).

Dans le premier mode, le protocole suppose que la position de l'UAV destination est connue. Le prochain saut est alors choisi parmi les voisins les plus proches de cette destination. Cependant, en raison de la mobilité du réseau, il peut arriver qu'aucun UAV voisin ne permette d'approcher davantage la destination. Dans ce cas, le second mode peut prendre le relais et transmettre les paquets selon la règle de la main droite jusqu'à ce que le réseau soit progressivement connecté et revienne en mode glouton [25]. Ce protocole est particulièrement adapté aux réseaux FANETs à forte densité.

### 2.4.2.3 Protocoles de routage prédictifs

Il existe plusieurs formes et techniques de prédiction pour le transport de données utilisées dans les réseaux FANETs. Le plus populaire est la prédiction basée sur l'emplacement géographique, la direction et la vitesse, pour prédire la position future d'un UAV donné. Tous ces paramètres peuvent donner une information précise sur le prochain emplacement de l'UAV de relais, ce qui diminue les pertes de paquets, et réduit parfois le délai de bout en bout entre deux UAVs communicants [33].

Parmi les protocoles intégrant ces mécanismes de prédiction on distingue le protocole P-OLSR.

#### • Protocole P-OLSR

Le P-OLSR (Predictive-Optimized Link State Routing) [30], est un protocole de type prédictif, ou la version originale d'OLSR est modifiée pour partager les positions géographiques via les paquets Hello. Pour ce faire, les messages Hello échangés n'incluent pas seulement les informations sur l'état des liens, mais aussi les informations sur la mobilité des UAVs (c'est-à-dire les positions et les vitesses). Cela permet d'estimer une métrique appelée Expected Transmission Count (ETX) pour définir à la fois combien de temps l'UAV reste à portée et comment les liens évoluent, réduisant ainsi la connectivité intermittente.

### 2.4.3 Protocoles de routage Hiérarchique (Basés sur des Clusters)

Dans cette catégorie, les UAVs sont regroupés en clusters, de manière hiérarchique. Au sein de chaque cluster se trouve le cluster head (CH) qui permet la communication inter-clusters via d'autres CHs.

Le clustering permet un routage hiérarchique en enregistrant les chemins entre les clusters plutôt qu'entre les nœuds. Il améliore l'évolutivité du réseau, augmente la durée de vie des routes, améliore le débit, réduit la surcharge de routage et économise l'énergie des UAVs. Une étude approfondie de cette classe de protocole sera présentée dans le chapitre suivant.

Le protocole MPCA figure parmi les protocoles hiérarchiques les plus utilisés.

#### • Protocole MPCA

Le MPCA (Mobility Prediction Clustering Algorithm for UAV Networking) [42], est un protocole de routage hiérarchique qui vise à former des clusters en se basant sur la prédiction des mouvements des UAVs. Cette prédiction repose sur deux paramètres clés :

- Le temps d'expiration de la liaison.
- La structure du dictionnaire.

Le premier paramètre est calculé entre chaque paire d'UAVs en utilisant leurs positions et leur vitesse. Le second paramètre est la probabilité qu'un UAV reste dans le cluster.

Par conséquent, ces deux paramètres sont essentiels pour former des clusters plus stables et améliorer les performances du réseau. La formation de clusters peut être facilement réalisée en fonction des vitesses, et des positions des UAVs [25].

#### 2.4.4 Protocoles de routage bio-inspirés

L'étude des comportements biologiques d'insectes tels que les abeilles, les fourmis ou les essaims de particules a inspiré de nombreuses approches dans le domaine des réseaux FANETs, notamment pour l'établissement de communications efficaces entre UAVs. Cette source d'inspiration naturelle a donné lieu à la conception de plusieurs protocoles de routage bio-inspirés, visant à résoudre diverses problématiques liées au routage dans ces réseaux à forte mobilité, parmi ces protocoles on retrouve le protocole BeeAdhoc.

- **Protocole BeeAdhoc**

BeeAdhoc [23], est un protocole de routage bio-inspiré pour les réseaux FANETs, fondé sur le comportement des abeilles au sein de la ruche, où les rôles sont clairement répartis entre différents types d'individus. Il distingue deux catégories principales : les abeilles éclaireuses et les abeilles butineuses.

Le fonctionnement du protocole repose sur deux étapes essentielles : l'exploration du réseau et la transmission des données.

Lors de la première étape, des abeilles éclaireuses sont diffusées à travers le réseau. Ces messages contiennent des informations telles que l'identifiant de la source, le nombre de sauts effectués et le niveau minimal d'énergie résiduelle rencontré sur le chemin. Cette phase permet d'explorer plusieurs routes potentielles entre la source et la destination.

Dans la seconde étape, une fois les chemins possibles établis, des abeilles butineuses sont utilisées pour acheminer les paquets de données. Le protocole sélectionne alors le meilleur itinéraire composé d'UAVs disposant d'un haut niveau d'énergie pour assurer la communication.

À titre illustratif, la figure 2.6 montre un scénario dans lequel un UAV source S souhaite établir une liaison avec un UAV destination D. Une éclaireuse est diffusée dans le réseau en prenant en compte à chaque saut la quantité d'énergie restante des drones rencontrés. Une éclaireuse de retour emprunte ensuite les différents chemins explorés pour revenir à la source. Le chemin le plus adapté est alors utilisé par les butineuses pour transmettre les données.

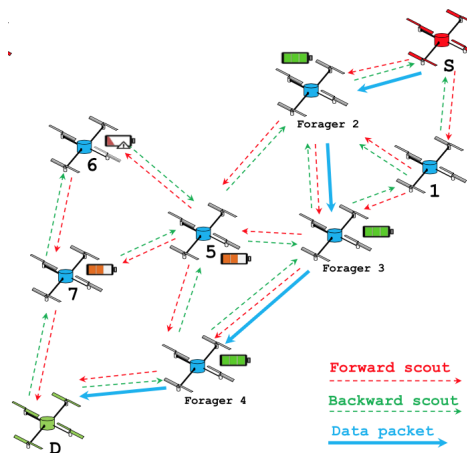


FIGURE 2.6 – Protocole BeeAdhoc

## 2.5 Comparaison entre les protocoles étudiés

Les protocoles de routage dans les réseaux FANETs présentent une grande diversité afin de répondre aux défis posés par la mobilité élevée, la topologie dynamique, et les contraintes énergétiques.

Le tableau 2.1 représente une analyse comparative des protocoles de routage étudiés, en mettant l'accent sur leurs paramètres de QoS, les métriques principales, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Les protocoles de routage conçus pour les réseaux FANETs présentent des caractéristiques diverses selon leur classe (proactive, réactive, hybride, géographique, prédictive, hiérarchique ou bio-inspirée), chacun visant à répondre aux exigences spécifiques de QoS.

Nous observons que les protocoles proactifs, tels que OLSR, offrent une faible latence grâce à la mise à jour régulière des tables de routage, ce qui est utile dans des environnements où la topologie change modérément. Toutefois, nous constatons qu'ils deviennent moins efficaces dans des contextes très dynamiques, en raison d'une forte consommation de bande passante et d'énergie.

À l'inverse, les protocoles réactifs tels que DSR ou RGR ne construisent les routes qu'en cas de besoin, ce qui réduit l'utilisation des ressources, mais engendre une latence plus élevée.

Les approches hybrides comme ZRP cherchent à combiner les approches proactive et réactive; routage proactif au sein de zones locales et réactif entre zones, en limitant les délais inter-zones. Les protocoles statiques, comme le DCR, sont peu adaptés aux réseaux FANETs en raison de leur rigidité face aux changements de topologie, bien qu'ils conviennent à des scénarios prévisibles.

En ce qui concerne les protocoles géographiques, RGR est particulièrement bien adapté aux environnements très dynamiques, mais dépend fortement d'un système de localisation fiable (comme le GPS), ce qui peut représenter une consommation énergétique élevée.

Les approches plus récentes, comme P-OLSR (prédictif), MPCA (hiérarchique) et BeeAdhoc (bio-inspiré), visent à répondre plus spécifiquement aux contraintes des réseaux FANETs. Le protocole P-OLSR introduit une dimension prédictive pour gérer efficacement la mobilité ra-

pide des UAVs. MPCA stabilise les connexions grâce à une prédiction des mouvements, ce qui renforce la fiabilité, tandis que BeeAdhoc, inspiré du comportement des abeilles, propose une forte résilience aux environnements dynamiques, mais au prix d'une mise en œuvre complexe. Dans l'ensemble, nous remarquons qu'aucun protocole n'offre une solution universelle. Il apparaît clairement qu'aucun protocole ne peut assurer simultanément tous les critères de QoS. Par exemple, un protocole peut garantir un débit élevé, mais souffrir d'une latence importante, ou bien offrir une faible latence au prix d'une consommation accrue d'énergie. Ainsi, le choix optimale du protocole dépend fortement du scénario d'application, des caractéristiques de l'environnement, des contraintes du réseau et des objectifs de performance.

En somme, parmi les différentes classes de protocoles de routage adaptées aux réseaux FANETs, les protocoles hiérarchiques apparaissent comme un compromis optimal entre performance, robustesse et efficacité énergétique, tout en répondant aux contraintes spécifiques de ces réseaux. Leur organisation en clusters permet non seulement de gérer efficacement la mobilité élevée et d'optimiser les ressources, mais aussi d'améliorer la QoS en garantissant une meilleure fiabilité et stabilité des communications.

Cette structure hiérarchique favorise ainsi une plus grande stabilité des routes et une meilleure tolérance aux pannes, grâce à la gestion locale des communications au sein des clusters.

C'est pourquoi, dans la suite de notre travail, le troisième chapitre sera consacré à une étude approfondie des protocoles hiérarchiques.

Protocole	Année	Classe	Paramètres de QoS	Métriques de QoS	Avantages	Inconvénients
GPSR	2000	Géographique	-Faible consommation d'énergie -Bonne fiabilité des liaisons	-Faible surcharge -Latence faible -PDR élevé	-Bonne adaptation à des réseaux denses. -Scalabilité élevée.	-Nécessite un système de positionnement fiable (GPS).
OLSR	2003	Proactif	Consommation d'énergie élevée	-Latence faible -Surcharge élevée	-Réduction de la redondance des messages de contrôle (Utilisation de MPRs).	-Consommation élevée de bande passante et d'énergie. -Non optimal dans des topologies très variables.
DSR	2007	Réactif	- Consommation d'énergie élevée -Mobilité élevée	Bande passante optimale -Surcharge faible -Latence moyenne	-Capacité de maintenir les chemins en cas de défaillance d'un lien. -Possibilité de sélectionner plusieurs chemins vers une destination donnée.	-Moins adapté aux réseaux de grande taille. -Faible performance en environnement très mobile.
MPCA	2011	Hiérarchique	Fiabilité des liaisons	Perte de paquets faible	-Stabilité des connexions grâce à la prédiction des mouvements.	-Complexité des calculs de réduction des mouvements

Protocole	Année	Classe	Paramètres de QoS	Métriques de QoS	Avantages	Inconvénients
RGR	2012	Géographique Réactif	Mobilité élevée	-Latence faible -PDR élevé -Fiabilité des liens	-Résilience élevée aux coupures de lien. -Adapté aux environnements fortement dynamiques.	-Dépendance au système de localisation (GPS). -consommation énergétique élevée.
P-OLSR	2013	Prédictif	Latence faible -Mobilité moyenne -PDR très élevé	-Perte de paquets faible - Surcharge réduite -Bande passante optimale	-Adapté à la mobilité rapide des FANETs. -Réduction des interruptions.	-Dépendance aux capteurs GPS. -Complexité de mise en œuvre.
BeeAdhoc	2016	Bio-inspiré	Latence faible à modérée	Mobilité élevée	-Haute tolérance aux pannes. -Résilience aux environnements dynamiques.	-Complexité de mise en œuvre. -Découverte inter-zone coûteuse.
ZRP	2017	Hybride	Mobilité moyenne	-Latence modérée -PDR élevé -Surcharge faible - Consommation d'énergie moyenne	-Combine les avantages des approches réactive et proactive. -Réduction des délais intra-zone	-Complexité de gestion des zones. -Découverte inter-zone coûteuse.

TABLE 2.1: Comparaison entre les protocoles de routage des réseaux FANETs

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre mis en lumière les défis spécifiques liés à QoS dans les réseaux FANETs, en analysant les principales critères de performance ainsi que les facteurs qui les influencent, tels que la mobilité rapide des UAVs, la topologie hautement dynamique et les contraintes énergétiques. À travers une étude comparative des différentes classes de protocoles de routage nous avons pu constater que chaque approche présente des forces particulières, adaptées à des scénarios et exigences spécifiques.

Dans la suite de notre travail, nous nous concentrerons particulièrement sur les protocoles de routage hiérarchique, qui présentent un fort potentiel en matière de scalabilité et d'optimisation des ressources dans les réseaux FANETs.

Ce choix se justifie par la capacité des protocoles hiérarchiques à structurer le réseau en clusters, ce qui contribue à réduire la complexité du routage, à limiter le trafic de signalisation, et à renforcer la stabilité des connexions, notamment dans des environnements caractérisés par une forte mobilité. Ces protocoles constituent ainsi un compromis pertinent entre efficacité énergétique, résilience aux changements topologiques et fiabilité des communications, répondant pleinement aux exigences de QoS dans les réseaux FANETs.

# 3

## Protocoles de routage hiérarchiques avec QoS dans les réseaux FANETs

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Travaux antérieurs</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Nouvelle classification des protocoles hiérarchiques</b>	<b>32</b>
3.3.1	Objectif du protocole	33
3.3.2	Résilience des clusters	35
3.3.3	Type d'acheminement de données	38
<b>3.4</b>	<b>Comparaison entre les protocoles de routage hiérarchiques étudiés</b>	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>

---

### 3.1 Introduction

La nature hautement dynamique des UAVs dans les réseaux FANETs, associée à des contraintes strictes en matière de mobilité, de consommation d'énergie et de bande passante, rend le routage particulièrement complexe dans ce type de réseau. Pour surmonter ces défis, les protocoles de routage hiérarchiques se présentent comme une solution efficace. En structurant les nœuds en clusters, ils permettent une meilleure gestion des ressources, une réduction de la surcharge de routage et une amélioration de la performance globale du réseau.

Ce chapitre étudie les protocoles de routage hiérarchiques conçus pour les réseaux FANETs, en se focalisant sur les critères de QoS. Il présente d'abord un aperçu des travaux antérieurs sur les protocoles de routage hiérarchiques, suivi d'une nouvelle classification basée sur la résilience des clusters, l'objectif du protocole et le type d'acheminement de données. Enfin, une analyse comparative des protocoles est réalisée selon plusieurs critères de QoS.

## 3.2 Travaux antérieurs

Le domaine des protocoles de routage hiérarchique pour les réseaux FANETs a été relativement peu exploré dans la littérature. Dans cette section nous examinons les différents surveys qui étudient les classes des protocoles de routage hiérarchiques.

- Dans le survey de ARAFAT et SANGMAN [7], les auteurs ont identifié deux catégories de protocoles hiérarchiques dans les réseaux FANETs : les protocoles basés sur le clustering probabiliste et les protocoles basés sur le clustering déterministe. Une analyse comparative de 18 protocoles existants a été réalisée, mettant en lumière leurs caractéristiques, avantages et limitations. Cette étude souligne l'importance du clustering pour assurer la scalabilité et l'efficacité des réseaux FANETs face aux défis posés par leur mobilité. L'article aborde également les problèmes de conception des protocoles de routage FANETs, notamment la topologie dynamique, la formation du réseau, la mobilité, la latence et les liaisons de communication.
- Dans le survey de Oubbati et al [25], les auteurs présentent une étude complète de l'architecture, des contraintes, des modèles de mobilité, des techniques de routage et des outils de simulation dédiés aux réseaux FANETs.  
L'article offre une classification et une comparaison des protocoles de routage existants pour ces réseaux, et met en lumière les défis et les perspectives de recherche futures dans ce domaine. L'article propose une analyse détaillée d'un nombre important de protocoles de routage dédiés aux réseaux FANETs.  
Une partie de l'article est consacrée aux protocoles de routage hiérarchiques où chaque protocole est décrit à l'aide d'un exemple concret illustré par une figure explicative.
- Dans le survey de ABDULHAE et al [3], les auteurs ont proposé une analyse complète des protocoles de routage basés sur les clusters (CBRP).  
Cette étude a comparé 21 CBRP en termes de topologie, défis, évolutivité, caractéristiques, stratégie de clustering, fonctionnalités exceptionnelles, sélection des CH, métriques de routage et mesures de performance.
- Dans le survey de Dhall et Dhongdi [12], les auteurs mettent en lumière le rôle essentiel des réseaux FANETs dans la gestion des catastrophes, en particulier pour assurer une couverture rapide et efficace des zones affectées grâce aux UAVs interconnectés.  
L'étude présente une analyse détaillée des protocoles proposés pour les différentes couches de la pile de protocoles des FANETs, y compris la couche physique, liaison de données, réseau, transport et application, ainsi que les protocoles de clustering, de synchronisation temporelle et de localisation. L'article présente un aperçu des plateformes de simulation logicielle et des bancs d'essai, permettant d'évaluer les performances des réseaux FANETs dans des contextes réels.

Les protocoles de routage hiérarchiques dans les réseaux FANETs sont souvent classés en deux types : déterministes, où les chefs de cluster sont choisis selon des critères fixes, et probabilistes, qui utilisent des choix basés sur des probabilités. Cependant, cette classification classique ne suffit pas toujours à saisir la complexité et la diversité des protocoles existants, surtout dans des environnements dynamiques comme les réseaux FANETs. C'est pourquoi une nouvelle classification, basée sur l'objectif du protocole, la résilience de clusters et le type d'acheminement de données, est proposée dans la section suivante 3.3 pour mieux structurer et analyser ces protocoles.

### 3.3 Nouvelle classification des protocoles hiérarchiques

La nouvelle classification proposée pour les protocoles de routage hiérarchique dans les réseaux FANETs se distingue des approches traditionnelles par son caractère multifonctionnel, mieux adaptée aux particularités des réseaux FANETs. Contrairement aux classifications traditionnelles, qui se limitent à des critères strictement techniques (structure du cluster, méthode de sélection du cluster head (CH), ou type de mobilité), cette nouvelle classification met en lumière les objectifs principaux que cherchent à atteindre les protocoles.

En effet, un même protocole peut simultanément optimiser l'énergie, s'adapter à la mobilité des UAVs, et garantir la sécurité des communications.

De plus, cette classification introduit un critère essentiel souvent négligé qui est la résilience des clusters. Dans les environnements dynamiques, la capacité d'un protocole à maintenir la stabilité des clusters malgré les perturbations constitue un facteur clé de performance. L'inclusion de la résilience en tant qu'axe d'analyse renforce donc la portée de cette classification. Par ailleurs, l'ajout du type d'acheminement de données (saut direct, multi-saut ou hybride) permet d'identifier le comportement réel du protocole dans la transmission des informations. Cette dimension pratique est particulièrement utile pour les applications concrètes, car elle lie directement le protocole à sa capacité opérationnelle sur le terrain.

La structure globale de cette classification est illustrée dans la Figure 3.1, qui présente les différentes catégories de protocoles selon leurs objectifs, leur résilience et leur type d'acheminement.

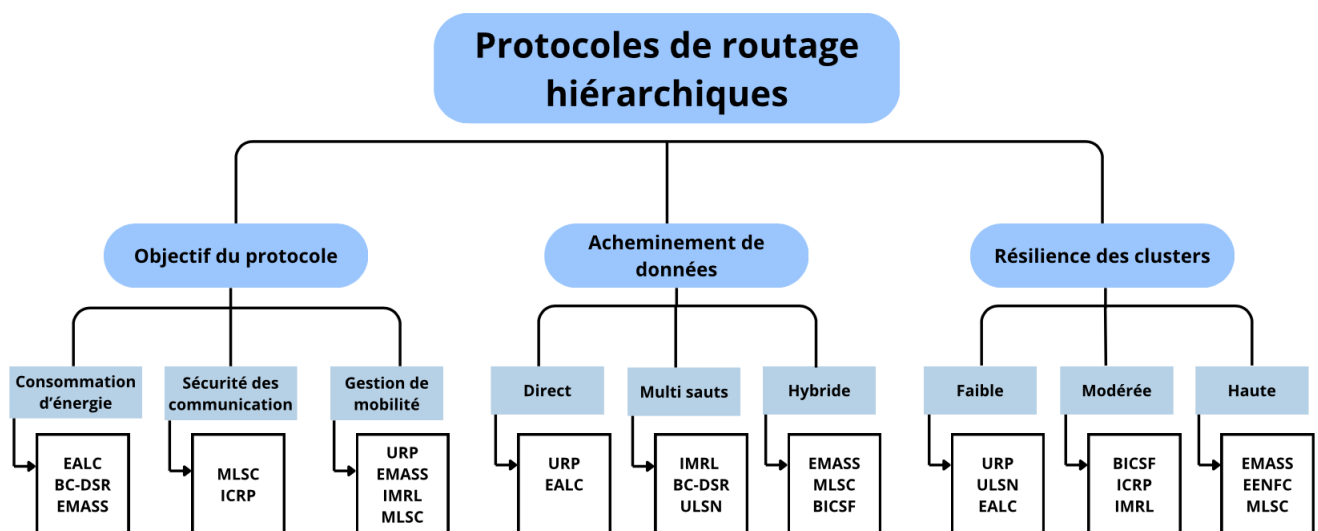


FIGURE 3.1 – Classification des protocoles de routage hiérarchiques

Il est important de souligner que les protocoles de routage hiérarchiques dans les réseaux FANETs présentent souvent des caractéristiques multifonctionnelles. Un même protocole peut répondre simultanément à plusieurs objectifs, tels que l'optimisation de l'énergie, la gestion de

la mobilité et l'amélioration de la sécurité. Par ailleurs, la résilience des clusters constitue un aspect important à considérer pour assurer la robustesse du réseau. De même, selon la dynamique du réseau, un protocole peut adopter des stratégies de routage différentes (direct, multi-saut ou hybride).

Par conséquent, la classification proposée vise avant tout à offrir une vue structurée des principales fonctionnalités des protocoles, tout en reconnaissant leur polyvalence et leur capacité d'adaptation aux contextes variés d'utilisation dans les réseaux FANETs.

### 3.3.1 Objectif du protocole

Dans cette classe les protocoles sont classés selon l'objectif principal qu'ils cherchent à atteindre, comme l'optimisation de l'énergie, la sécurité des communications ou la gestion de la mobilité.

#### 1. Optimisation de l'énergie

Les protocoles de cette catégorie visent à réduire la consommation d'énergie des UAVs dans les réseaux FANETs, prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

Les protocoles d'optimisation d'énergie intègrent des mécanismes de clustering et d'ajustement de la portée de transmission pour limiter la consommation énergétique tout en maintenant la performance du réseau.

**Exemples :**

- **Protocole EMASS**

Le protocole EMASS (Energy and Mobility Aware Stable and Safe Clustering) [5] a été conçu pour les réseaux FANETs afin d'améliorer la stabilité, la sécurité et la durée de vie du réseau, en prenant en compte l'énergie résiduelle, la mobilité et les distances inter-UAVs. Le fonctionnement d'EMASS se divise en deux phases principales :

- (a) Élection du CH : Chaque UAV calcule une fonction de fitness basée sur trois paramètres pondérés : énergie résiduelle, mobilité et distance moyenne avec les voisins. Le nœud ayant la plus grande valeur de fitness dans son voisinage devient CH.
- (b) Gestion de cluster : Pour maintenir la stabilité du réseau face aux changements topologiques, un CH de secours (BCH) est présélectionné parmi les membres. En cas de défaillance du CH, le BCH prend automatiquement le relais. EMASS assure ainsi un équilibre de charge, prolonge la durée de vie des clusters et garantit des distances sûres entre UAVs pour éviter les collisions.

**\*Avantages du protocole EMASS**

- Meilleure résilience et robustesse du réseau en conditions dynamiques.
- Prise en compte de l'énergie et de la mobilité dans l'élection des CHs.

**\*Limitations du protocole EMASS**

- Complexité computationnelle plus élevée due au calcul de la fitness.
- Moins adapté aux réseaux très denses ou à forte hétérogénéité.
- Absence de prise en compte de la qualité du lien

- Le changement du CH n'est déclenché qu'après une chute significative de son énergie.
- Intervalle fixe des messages Hello.

## 2. Sécurité des communications

La sécurité dans les réseaux FANETs vise à protéger le réseau contre les menaces potentielles et à assurer les différents services de sécurité à savoir : l'intégrité, la confidentialité, l'authentification, la disponibilité, le contrôle d'accès et la non-répudiation.

Les protocoles de sécurité doivent prévenir les intrusions, détecter les comportements anormaux et garantir une résilience face aux pannes. Ces mécanismes incluent le chiffrement des communications, l'authentification des nœuds et la détection d'intrusions, etc.

### Exemple :

#### • Protocole MLSC

Le protocole MLSC (Mobility and Location aware Stable Clustering) [10] a été développé pour améliorer la stabilité des clusters dans les réseaux d'UAVs à topologie dynamique. Il vise à maintenir des liens stables entre UAVs mobiles tout en optimisant la couverture du réseau et la consommation énergétique.

MLSC repose sur une stratégie de clustering basée sur la position et la mobilité relative des UAVs. La sélection des CHs s'effectue à l'aide de l'algorithme K-Means et d'un indice combinant la distance moyenne aux voisins et la vitesse relative. Un backbone inter-cluster est ensuite formé pour une coordination efficace.

#### \*Avantages du protocole MLSC

- Haute stabilité des clusters en environnement mobile.
- Intégration de mécanismes de sécurité adaptés aux applications sensibles (surveillance, militaire, etc.).

#### \*Limitations du protocole MLSC

- Dépendance aux capteurs GPS et à la synchronisation temporelle.
- Consommation accrue de ressources due aux modules intégrés (mobilité, sécurité, etc.).
- Moins performant dans des environnements hétérogènes.

## 3. Gestion de la mobilité

La gestion de la mobilité est essentielle dans les réseaux FANETs en raison de la nature dynamique des UAVs.

Les protocoles de cette catégorie permettent d'adapter la topologie du réseau en temps réel afin de maintenir des connexions stables et efficaces. Cela inclut la prédiction de trajectoires, le réajustement dynamique des clusters et l'optimisation des routes.

### Exemple :

#### • Protocole IMRL

Le protocole IMRL (Improved Multi-hop Routing based on Localization) [22] repose sur une approche de routage hiérarchique basée sur la localisation floue afin d'améliorer l'efficacité énergétique, la précision de la localisation et la fiabilité de la transmission dans les FANETs.

Il utilise une localisation sans portée (range-free) basée sur le RSSI (Received Signal Strength Indicator) et la logique floue, avant de former des clusters avec des CHs

choisis en fonction de l'énergie résiduelle. Les données sont transmises de manière hiérarchique via des relais dynamiques (multi-hop).

**\*Avantages du protocole IMRL**

- Haute précision de localisation sans GPS.
- Efficacité énergétique accrue.
- Robustesse aux défaillances GPS.
- Équilibrage de charge entre UAVs.

**\*Limitations du protocole IMRL**

- Latence élevée due au traitement flou et au routage multi-saut.
- Coût élevé lié aux infrastructures (nœuds d'ancrage, satellites).
- Sensibilité aux variations du signal RSSI.

### 3.3.2 Résilience des clusters

La résilience des clusters dans les réseaux FANETs désigne la capacité des clusters à rester stables et fonctionnels malgré les changements dans la topologie du réseau, tels que la mobilité des UAVs, la panne des nœuds, ou les variations des conditions de communication.

#### 1. Faible Résilience des Clusters

Les clusters se déstabilisent facilement face à la mobilité des UAVs, aux pannes de nœuds ou aux changements de topologie, ce qui provoque des interruptions de communication et une consommation d'énergie élevée à cause de la reformation fréquente des clusters.

**Exemples :**

- **Protocole EALC**

Le modèle de communication EALC (Energy Aware Lifetime Clustering) [1] a été conçu pour les réseaux FANETs. Son objectif principal est de prolonger la durée de vie du réseau tout en réduisant la complexité de calcul et la consommation d'énergie. Il propose un mécanisme de clustering simplifié et cherche à optimiser la portée de transmission des UAVs en fonction des besoins du réseau. Les nœuds sont initialement regroupés en clusters à l'aide de l'algorithme K-Means Sorted Fitness, et la communication se fait via les CHs.

- (a) Calcul de la fonction de fitness : Chaque UAV calcule sa valeur de fitness en fonction de sa position, son énergie résiduelle et la distance moyenne aux voisins.
- (b) Formation des clusters : Les nœuds sont regroupés à l'aide de K-Means. L'UAV avec la meilleure fitness devient CH.
- (c) Mobilité et communication : Les UAVs communiquent avec leurs CHs, qui transmettent les données vers la destination.

**\*Avantages du protocole EALC**

- Sélection dynamique des CHs basée sur l'énergie et la portée de transmission.
- Économie d'énergie par optimisation de la portée de transmission et un regroupement efficace.

### ※Limitations du protocole EALC

- Moins adapté aux nœuds à mobilité très élevée.
- Complexité de calcul accrue par rapport aux protocoles simples.
- Faible résilience des clusters : les clusters formés sont sensibles aux changements de topologie rapide, ce qui peut entraîner une instabilité et des pertes de communication fréquentes.

## 2. Résilience Modérée des Clusters

Les clusters restent relativement stables, mais peuvent se fragmenter en cas de mobilité rapide des UAVs ou de baisse d'énergie des CHs. Ils sont adaptés aux environnements à mobilité modérée, mais les perturbations inattendues peuvent entraîner des interruptions temporaires de la communication.

### Exemples :

#### • Protocole ICRP

Le protocole ICRP (Inter-Cluster Routing Protocol) [37], Conçu pour améliorer l'efficacité du routage inter-cluster dans des environnements à haute mobilité, ICRP s'appuie sur une approche hybride inspirée des comportements biologiques.

Ce protocole vise principalement à :

- Réduire la charge sur les CHs en évitant de les inclure systématiquement dans les chemins de routage.
- Améliorer la stabilité des routes en utilisant des modèles bio-inspirés.
- Optimiser la qualité de communication, la consommation d'énergie, et le temps de transmission.
- Gérer les changements dynamiques de topologie via des mécanismes proactifs.

Le protocole ICRP se déroule selon un enchaînement d'étapes, organisées en deux grandes phases principales :

- (a) Établissement de la route : Chaque nœud envoie périodiquement des messages HELLO afin d'évaluer l'état de ses voisins. Lorsqu'un nœud source souhaite initier une transmission, il diffuse un message Fant (Forward Ant) dans le réseau pour explorer les chemins possibles. Les nœuds intermédiaires mettent alors à jour localement leur taux de phéromones et le nombre de sauts, facilitant ainsi la prise de décision. Une fois les Fant reçus par le nœud de destination, ce dernier renvoie un message Bant (Backward Ant) vers la source en suivant le chemin le plus prometteur, établissant ainsi une route optimale.
- (b) Maintenance et ajustement de la route : Dans la seconde phase, dédiée à la maintenance, ICRP intègre un mécanisme de réparation prédictive qui repose sur la surveillance continue du trafic virtuel entre les nœuds. En cas de risque de rupture de lien, un processus de recherche de nœuds coopératifs est déclenché pour préserver la connexion. Par ailleurs, un mécanisme de contraction (shrink) permet d'éliminer les relais superflus, grâce aux messages Sant et SantACK, optimisant ainsi la longueur et la stabilité du chemin. Enfin, une mise à jour dynamique des phéromones est réalisée, prenant en compte la charge des nœuds, la stabilité des liens et leur poids topologique.

dans le réseau, assurant une adaptation constante aux conditions des réseaux FANETs.

**\*Avantages du protocole ICRP**

- Grande adaptabilité aux environnements dynamiques.
- Amélioration du taux de livraison des paquets.
- Réduction des délais de transmission et augmentation de la fiabilité.

**\*Limitations du protocole ICRP**

- Complexité algorithmique.
- La latence initiale lors de l'établissement de la route (temps de propagation des messages Fant et Bant) peut être significative, surtout dans les environnements denses ou très dynamiques.
- Les mécanismes de réparation prédictive et de contraction, peuvent augmenter le nombre de sauts ou détourner les chemins, ce qui affecte la performance globale en matière de consommation énergétique ou de délai.
- Résilience modérée des clusters : bien que le protocole s'adapte efficacement aux variations de topologie, la stabilité des clusters reste modérée face aux changements rapides ou fréquents du réseau.

### 3. Haute Résilience des Clusters

Les clusters restent stables et opérationnels même en présence de mouvements rapides des UAVs, de changements fréquents de topologie ou de pannes de certains nœuds. Grâce à des mécanismes intelligents et proactifs, les clusters maintiennent une communication continue et une longévité accrue dans des environnements dynamiques.

**Exemples :**

• **Protocole EENFC-MRP**

Le protocole EENFC-MRP (Energy Efficient Neuro-Fuzzy Cluster based Topology Construction with Metaheuristic Route Plannin) [28] a été proposé pour répondre aux défis majeurs rencontrés dans les FANETs, tels que la mobilité rapide, la limitation énergétique des drones, et la nature instable et dynamique de la topologie du réseau.

Le protocole repose sur deux modules principaux :

- EENFC (Energy Efficient Neuro-Fuzzy Cluster) : Effectue un clustering adaptatif des UAVs basé sur trois caractéristiques clés ; énergie résiduelle (RE), degré de connectivité (nombre de voisins directs) et distance moyenne aux voisins.
- MRP (Metaheuristic Route Planning) : Utilise l'algorithme QALO (Quantum Ant Lion Optimization) pour établir des routes optimisées entre les clusters.

**\*Avantages du protocole EENFC-MRP**

- Efficacité énergétique accrue : grâce à la sélection de CHs en fonction de leur énergie disponible, ce qui permet d'équilibrer la charge et de prolonger la durée de vie du réseau.
- Routage intelligent : la planification basée sur QALO permet d'éviter les chemins coûteux et instables.
- Scalabilité : le protocole peut s'adapter à des réseaux de grande taille avec une topologie évolutive.

- Haute résilience des clusters : la combinaison de clustering intelligent et de planification adaptative assure une forte stabilité structurelle même en cas de topologie très variable.

#### ※Limitations du protocole EENFC-MRP

- Complexité computationnelle : l'intégration de l'apprentissage supervisé et des métaheuristiques peut entraîner un coût élevé en calcul, difficile à supporter sur des UAVs à ressources limitées.
- Dépendance à la qualité des données d'entrée : une mauvaise estimation de la position ou de l'énergie résiduelle peut affecter les décisions de clustering.

### 3.3.3 Type d'acheminement de données

Le type d'acheminement de données désigne la manière dont les informations sont transmises d'un nœud source à un nœud de destination dans un réseau.

Les protocoles de routage hiérarchiques dans les réseaux FANETs peuvent être classés en trois catégories selon leur type d'acheminement de données.

#### 1. Routage à saut direct

Dans cette approche, les UAVs communiquent directement entre eux sans avoir besoin de relais intermédiaires. Cela permet de simplifier les transmissions, mais peut réduire la portée du réseau si les UAVs ne sont pas suffisamment proches.

##### Exemples :

- **Protocole URP**

Le protocole URP (UAV Routing Protocol) [35] est un protocole de routage dynamique conçu pour optimiser la collecte de données dans des réseaux de capteurs sans fil déployés dans des environnements de surveillance, comme les systèmes de gestion de l'agriculture intelligente ou les réseaux environnementaux.

Ce protocole utilise des UAVs comme nœuds de puits mobiles pour collecter des données provenant de nœuds de capteurs distribués. L'URP fonctionne selon un schéma de clustering dynamique, où la topologie du réseau et l'élection des CHs sont ajustées en fonction des paramètres réseau et environnementaux.

Le fonctionnement de l'URP suit un processus en plusieurs étapes clés :

- (a) Initialisation et Activation des Nœuds : Lors de son déplacement dans la zone de surveillance, l'UAV envoie un message beacon à ses nœuds voisins pour les activer. Ce message permet à tous les nœuds de capteurs dans la portée de l'UAV de commencer à participer au processus de clustering.
- (b) Clustering Dynamique : L'UAV organise les nœuds activés en clusters de manière dynamique. Une fois les CHs désignés, ils prennent en charge la collecte des données des CMs et assurent leur transmission à l'UAV.
- (c) Transmission des Données : Les CHs collectent les données des CMs de leur cluster et les transmettent directement au UAV, qui centralise les informations pour le traitement et la prise de décision.
- (d) Mise à Jour Dynamique des Clusters : Le processus de formation des clusters et de sélection des CHs est dynamique, permettant une réorganisation régulière

en fonction de la mobilité d'UAV, des changements dans l'énergie des nœuds, ou de toute autre variation dans la topologie du réseau.

#### \*Avantages du Protocole URP

- Durée de Vie Optimisée du Réseau : L'URP permet d'allonger la durée de vie du réseau en équilibrant la charge entre les nœuds et en réduisant la consommation d'énergie des nœuds.
- Adaptabilité : Le protocole est dynamique et peut s'adapter aux variations du réseau, notamment en cas de mobilité des nœuds, ou en fonction de la consommation énergétique des capteurs.
- Scalabilité : Le protocole URP est conçu pour fonctionner dans des environnements de grande échelle, où de nombreux nœuds de capteurs sont déployés et où la mobilité des UAVs doit être prise en compte.

#### \*Limitations du protocole URP

- Infrastructure spécifique : Le protocole est principalement conçu pour des réseaux utilisant des UAVs comme nœuds de puits mobiles, et pourrait ne pas être aussi efficace dans des environnements ne nécessitant pas de UAVs.
- Utilisation d'un seul UAV : Le protocole URP peut être amélioré en introduisant plusieurs UAVs qui opèrent de manière coordonnée pour améliorer la couverture et la redondance.

## 2. Routage multi-sauts

Les protocoles à routage multi-sauts utilisent plusieurs relais pour transmettre les données d'un UAV à un autre. Ce type de routage permet d'augmenter la portée du réseau et de garantir une communication stable, même lorsque les UAVs sont éloignés les uns des autres.

### Exemples :

#### • Protocole ULSN

Le protocole ULSN (UAV-Based Linear Sensor Routing Protocol) [16] a été proposé pour améliorer l'efficacité énergétique et étendre la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil (WSN) tout en utilisant des UAVs.

Ce protocole est basé sur une architecture de routage en clusters linéaires, où les nœuds de capteurs communiquent de manière multi-saut vers des nœuds relais, et l'UAV joue un rôle important dans la collecte des données.

Le protocole ULSN utilise quatre types de nœuds principaux : Nœuds de capteurs (SN), nœuds relais (RN), UAV et sinks (stations de collecte des données).

Le protocole ULSN fonctionne de manière coordonnée entre les différents types de nœuds. Le processus est présenté ci-dessous :

- (a) Communication Multi-sauts : Les SNs transmettent leurs données à des RNs voisins via un routage multi-saut. Les RNs, à leur tour, agissent comme des CHs pour leurs voisins et transmettent les données collectées au UAV.
- (b) Déplacement du UAV : L'UAV se déplace dans une direction pour collecter les données des RNs et envoie les données collectées au sink secondaire dans la direction opposée.

- (c) Synchronisation et Localisation avec GPS : L'UAV est équipé d'un GPS pour localiser et synchroniser les positions des RNs et des SNs. Cela permet une gestion précise de la collecte des données et de la communication entre les nœuds.
- (d) Collecte des Données et Délai de Transmission : Lorsque l'UAV entre dans la portée de communication d'un RN, il peut échanger des données avec ce nœud avant de quitter la zone de communication.
- (e) L'UAV envoie un message de contrôle au RN pour interroger la taille de son tampon. Si la taille du tampon est suffisante pour stocker toutes les données, l'UAV ajuste sa vitesse pour permettre une collecte complète des données.

#### \*Avantages du Protocole ULSN

- Réduction de la Consommation d'Énergie : ULSN réduit la consommation d'énergie nécessaire pour la transmission des données en utilisant des relais intermédiaires (les RNs) et en minimisant les transmissions directes à longue distance.
- Tolérance aux Pannes : En cas de panne d'un SN, d'un RN, ou même de l'UAV, les autres segments du réseau continuent de fonctionner normalement, assurant ainsi une tolérance aux pannes.
- Réduction des Besoins en Mémoire et Traitement : Le protocole permet de réduire les exigences en termes de mémoire tampon, de traitement, et de fiabilité des transmissions, en optimisant le routage et la collecte des données.

#### \*Limitations du Protocole ULSN

- Routage à Saut Unique (Single-hop) : Le protocole ULSN est conçu pour un routage à un seul saut entre l'UAV et les RNs, ce qui peut entraîner des retards et une inefficacité dans les réseaux de grande taille où des communications multi-sauts seraient nécessaires.
- Délais de Transmission Élevés : Étant donné que l'UAV se déplace à une vitesse constante et ne collecte des données que lorsqu'il est dans la portée des RNs, des délais de transmission peuvent survenir, notamment lorsque l'UAV se trouve à l'extérieur de la zone de communication des nœuds de capteurs.

### 3. Routage hybride (Direct et Multi-sauts)

Les protocoles hybrides combinent à la fois des éléments de routage direct et multi-saut en fonction des conditions du réseau. Cela permet de bénéficier des avantages des deux stratégies, en choisissant le type de routage le plus adapté en fonction de la situation.

#### Exemples :

- **Protocole BICSF**

Le protocole BICSF (Bio-Inspired Clustering Scheme for FANETs) [19] est une méthode de clustering bio-inspirée pour les FANETs, conçue pour améliorer la gestion de la topologie et faciliter la communication entre UAVs. Il combine deux algorithmes d'optimisation biologiques : Krill Herd (KH) et Glowworm Swarm Optimization (GSO).

BICSF repose sur une approche d'acheminement hybride, intégrant à la fois des mécanismes proactifs (grâce à la structure en clusters) et réactifs (via l'adaptation dynamique des chemins de communication en fonction des conditions réseau).

Le protocole BICSF repose sur une sélection CHs inspirée du comportement des vers luisants, où chaque UAV évalue son niveau de luciférine, un indicateur calculé à partir de sa position, de son environnement, et d'une fonction d'aptitude (fitness). Le drone présentant la valeur de fitness la plus élevée est désigné comme CH. La communication entre les membres du cluster et leur CH s'effectue selon une fonction de détection de chemin qui intègre plusieurs critères : l'énergie résiduelle, le nombre de voisins, et la distance entre les UAVs. Enfin, un mécanisme de maintenance des clusters surveille l'état énergétique de chaque membre, en comparant son énergie résiduelle à un seuil défini afin de déterminer s'il est encore apte à fonctionner dans le cluster.

**\*Avantages du protocole BCSF**

- Sélection efficace des CHs basée sur l'énergie, la position et le voisinage.
- Économie d'énergie grâce à une gestion adaptative des clusters.
- Détection des nœuds défaillants via un seuil énergétique.

**\*Limitations du protocole BCSF**

- Complexité élevée des algorithmes.
- Forte consommation de ressources pour les calculs.
- Sensibilité au réglage des paramètres.
- Moins réactif en cas de forte mobilité.

## 3.4 Comparaison entre les protocoles de routage hiérarchiques étudiés

Les protocoles de routage hiérarchiques jouent un rôle essentiel dans l'organisation efficace des réseaux FANETs, en structurant les communications à travers des clusters. Cette architecture permet de mieux gérer la mobilité, de réduire la surcharge de signalisation et d'optimiser les ressources. Cependant, selon leurs conceptions, ces protocoles présentent des performances variées en matière de QoS.

Le tableau 3.1 représente une analyse comparative de plusieurs protocoles de routage hiérarchiques, en mettant l'accent sur les paramètres et les métriques de QoS (vu dans le chapitre 2).

Le protocole EALC utilise des informations de localisation pour optimiser la consommation d'énergie, nous remarquons que sa complexité de calcul et sa latence moyenne peuvent limiter son efficacité dans des réseaux très dynamiques, où les changements de topologie sont fréquents. D'autres protocoles comme l'URP et l'ICRP privilégient une faible latence et une faible consommation d'énergie, nous constatons qu'ils peuvent souffrir de limitations en bande passante ou en gestion de la mobilité, ce qui rend leur déploiement plus adapté à des environnements relativement stables.

Des protocoles comme l'ULSN ou l'EMASS mettent l'accent sur la prolongation de la durée de vie des réseaux avec une consommation énergétique extrêmement faible, mais leur latence élevée et leur bande passante restreinte les rendent inadaptés à des applications nécessitant une transmission rapide de données.

Le MLSC et le EENFC-MRP se distinguent par leur capacité à s'adapter à des environnements à haute mobilité, mais leur complexité et les ressources nécessaires pour leur mise en œuvre peuvent les rendre difficiles à déployer à grande échelle.

Enfin, le BC-DSR se distingue par son approche dynamique de gestion de l'énergie en tenant compte de l'état des batteries des nœuds, optimisant ainsi la durée de vie du réseau dans des environnements mobiles. Cependant, sa complexité et la latence supplémentaire due à la surveillance continue de l'énergie peuvent limiter son efficacité.

En somme, nous constatons qu'aucun protocole n'est capable de satisfaire l'ensemble des critères de QoS simultanément. Chaque approche présente des avantages mais aussi des compromis en fonction des propriétés spécifiques du réseau, qu'il s'agit de minimiser la consommation d'énergie, de maximiser la stabilité des routes, d'optimiser la bande passante ou de réduire la latence. Cela souligne l'importance de choisir le protocole en fonction du contexte d'application, ou encore de développer de nouvelles solutions hybrides capables d'équilibrer ces différents critères.

<b>Protocole \ QoS</b>	<b>Énergie</b>	<b>Mobilité</b>	<b>Stabilité</b>	<b>Scalabilité</b>	<b>Latence</b>	<b>Fiabilité</b>	<b>Bande pas-sante</b>
EALC	Haute	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
URP	Bonne	Élevée	Moyenne	Élevée	Faible	Élevée	Élevée
ULSN	Élevée	Moyenne	Élevée	Faible	Élevée	Bonne	Faible
MLSC	Bonne	Élevée	Élevée	Moyenne	Moyenne	Bonne	Moyenne
BICSF	Très bonne	Faible à Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne à Élevée
EMASS	Très bonne	Élevée	Très élevée	Moyenne	Moyenne	Très bonne	Élevée
EENFC-MRP	Excellente	Très élevée	Élevée	Très élevée	Moyenne	Très bonne	Très élevée
IMRL	Bonne	Élevée	Élevée	Moyenne	Élevée	Très bonne	Moyenne
ICRP	Bonne	Élevée	Très élevée	Bonne	Moyenne	Bonne	Élevée

TABLE 3.1: Comparaison entre les protocoles de routage hiérarchiques pour FANETs selon QoS

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur les protocoles de routage hiérarchiques conçus pour les réseaux FANETs, en mettant en évidence leur capacité à répondre aux défis spécifiques de ces environnements dynamiques, tels que la mobilité élevée, les contraintes énergétiques et la gestion de la bande passante.

L'analyse comparative des protocoles étudiés dans chaque classe menée selon les caractéristiques de QoS a permis d'identifier les points forts et les limitations de chaque approche. Il en ressort qu'aucun protocole n'est universellement optimal, et que le choix de la solution la plus adaptée dépend fortement des exigences spécifiques de l'application ciblée.

Par ailleurs, une nouvelle classification des protocoles est proposée, basée sur trois critères fondamentaux : la résilience des clusters, l'objectif principal du protocole, et le type d'acheminement des données. Cette classification vise à faciliter l'orientation des futurs travaux de recherche vers le développement de protocoles plus intelligents, adaptatifs et résilients, capables de garantir une meilleure QoS dans des environnements FANETs.

À partir de cette étude, nous avons retenu le protocole EMASS comme base d'amélioration. Ce choix repose sur sa capacité à intégrer à la fois des critères de mobilité et d'énergie dans un cadre hiérarchique relativement stable. Toutefois, ses insuffisances en matière de prise en compte de la qualité des liens et de flexibilité adaptative soulignent la nécessité d'une amélioration adaptée. Le chapitre suivant est donc consacré à la présentation de notre protocole amélioré, EMASS-QoS, conçu pour répondre aux insuffisances identifiées et mieux satisfaire aux exigences de QoS dans les réseaux FANETs.

# 4

## Amélioration du protocole EMASS

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Limites du protocole EMASS</b>	<b>46</b>
<b>4.3</b>	<b>Objectifs du protocole amélioré EMASS-QoS</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>Conception du protocole EMASS-QoS</b>	<b>47</b>
4.4.1	Intégration de la qualité du lien dans les décisions de clustering	47
4.4.2	Mécanisme de rotation des CHs	48
4.4.3	Ajustement dynamique de l'intervalle des messages Hello	49
<b>4.5</b>	<b>Évaluation des performances du protocole EMASS-QoS</b>	<b>50</b>
4.5.1	Métriques d'évaluation de performances	50
4.5.2	Résultats d'évaluation de performances	51
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>55</b>

---

### 4.1 Introduction

Dans les réseaux FANETs, la formation et la gestion de clusters jouent un rôle déterminant dans la performance globale du réseau, en particulier en termes de stabilité, d'efficacité énergétique et de robustesse face à la mobilité. Le protocole EMASS, déjà présenté dans le chapitre précédent, offre une approche de clustering prenant en compte la mobilité et la consommation d'énergie. Toutefois, le protocole présente encore plusieurs limitations, notamment l'absence de prise en compte explicite de la qualité du lien lors de la sélection des CHs, un changement des CHs déclenché uniquement lorsque leur niveau d'énergie devient critique et une faible capacité d'adaptation aux environnements très dynamiques, due à l'utilisation d'un intervalle fixe pour l'envoi des messages Hello.

Dans ce chapitre, nous proposons une version améliorée du protocole EMASS, nommée EMASS-QoS (An Enhanced EMASS Protocol for Quality of Service), conçue pour mieux répondre aux exigences des réseaux FANETs. L'objectif principal est d'améliorer la résilience des clusters, de prolonger la durée de vie du réseau et d'adapter le comportement du protocole aux conditions réelles telles que la mobilité, la variabilité de la densité et la qualité des liens de communication. Trois axes d'amélioration sont proposés :

- L'intégration de la qualité du lien comme facteur de décision.
- Une rotation des CHs déclenchée avant l'atteinte du seuil critique d'énergie.
- Un ajustement intelligent de l'intervalle des messages Hello.

Dans le reste du chapitre nous identifions les limites du protocole original EMASS, et détaillons les objectifs visés par cette amélioration, avant de décrire la conception de EMASS-QoS et de procéder à son évaluation par simulation. Les résultats obtenus démontrent une amélioration notable en matière de QoS.

## 4.2 Limites du protocole EMASS

Bien que le protocole EMASS permette une formation de clusters relativement stable, il souffre de plusieurs insuffisances lorsqu'il est confronté à des conditions de mobilité élevée et à des contraintes énergétiques strictes. Parmi ces limites nous citons :

1. **Absence de prise en compte de la qualité du lien** : Les décisions de formation de clusters et de sélection des CHs ne considèrent pas la qualité des liens radio entre les UAVs. Il en résulte des clusters potentiellement instables, reposant sur des connexions faibles ou fluctuantes.
2. **Changement de CH basé sur seuil critique d'énergie** : Le changement du CH n'est déclenché qu'après une chute significative de son énergie. Cette approche ne permet pas de prévenir les défaillances imminentes, ce qui peut entraîner des ruptures de cluster et une perte temporaire de données en cas d'indisponibilité soudaine du CH.
3. **Intervalle fixe des messages Hello** : EMASS utilise un intervalle prédéfini et constant pour l'envoi des messages Hello, sans tenir compte de la dynamique du réseau. Cela peut provoquer une surcharge inutile du canal de communication en période de stabilité (trop de messages inutiles), ou à l'inverse un manque de réactivité en cas de changement rapide de topologie (intervalle trop espacé pour détecter les variations).

Ces limitations montrent que, malgré son efficacité dans des scénarios simples, le protocole EMASS doit être amélioré afin de répondre aux exigences des environnements FANETs plus complexes et dynamiques.

## 4.3 Objectifs du protocole amélioré EMASS-QoS

L'objectif du protocole EMASS-QoS est de renforcer les performances du protocole EMASS original, en particulier en matière QoS dans les réseaux FANETs. Les améliorations proposées visent à :

1. Intégrer la qualité du lien dans le processus de sélection des CHs, garantissant ainsi des liaisons plus fiables et une réduction des pertes de paquets.
2. Anticiper la dégradation des CHs grâce à un seuil dynamique basé sur la densité, la mobilité et le taux de consommation d'énergie, ce qui permet une stabilité accrue des clusters et évite les coupures soudaines.
3. Adapter dynamiquement l'intervalle des messages Hello, afin de limiter la surcharge de signalisation tout en assurant une détection rapide des changements de topologie ; ce qui améliore la réactivité du réseau.
4. Optimiser l'usage de l'énergie sur l'ensemble du réseau, prolongeant ainsi sa durée de vie tout en maintenant une continuité de service essentielle pour les applications sensibles à QoS.

## 4.4 Conception du protocole EMASS-QoS

Dans cette section, nous détaillons la conception du protocole EMASS-QoS, développé pour surmonter les limitations identifiées dans le protocole EMASS. L'objectif est d'améliorer la QoS en tenant compte des contraintes spécifiques aux réseaux FANETs, telles que la mobilité élevée, la variabilité de la topologie, et la consommation énergétique.

EMASS-QoS repose sur l'intégration de trois mécanismes :

### 4.4.1 Intégration de la qualité du lien dans les décisions de clustering

Dans un réseau FANET, les liens de communication entre les nœuds sont particulièrement sensibles aux variations de distance, d'obstacles et de mobilité. Dans le protocole EMASS, les décisions de sélection des CHs reposent principalement sur des critères d'énergie résiduelle, de distance et de mobilité. Toutefois, cette approche ignore un facteur essentiel pour assurer une bonne QoS : la qualité du lien entre les UAVs, généralement évaluée à l'aide de l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI - Received Signal Strength Indicator). L'absence de ce critère dans le processus de sélection peut entraîner la désignation de CHs faiblement connectés à leurs membres, ce qui augmente le risque de pertes de paquets, de retransmissions fréquentes, et nuit globalement à la performance du réseau. Pour remédier à cette limitation, le protocole EMASS-QoS introduit la qualité du lien dans sa fonction de fitness lors du processus de sélection des CHs.

#### • Méthodologie proposée

Afin d'améliorer la pertinence des décisions de clustering, nous proposons une fonction de sélection des CHs améliorée par l'intégration d'un critère supplémentaire : la qualité du lien, mesurée à l'aide du RSSI. Ce nouveau facteur vient s'ajouter aux critères déjà pris en compte dans EMASS, à savoir l'énergie résiduelle, la distance et la mobilité.

La fonction de fitness intégrant la qualité du lien est définie comme suit :

$$\text{fitness}_i = w_1 E_i + w_2 (1 - M_i) + w_3 Q_i + w_4 (1 - D_i)$$

Où :

—  $E_i$  : énergie résiduelle de l'UAV  $i$ ,

- $M_i$  : indice de mobilité de l'UAV  $i$ ,
- $Q_i$  : qualité du lien, basée sur le RSSI, normalisée dans  $[0, 1]$ ,
- $D_i$  : distance normalisée entre l'UAV  $i$  et ses voisins,
- $w_1, w_2, w_3, w_4$  : poids associés à chaque paramètre, tels que  $\sum_{j=1}^4 w_j = 1$ .

Le noeud possédant la valeur maximale du fitness sera élu comme CH.

---

**Algorithme 1** : Sélection de CH avec qualité du lien
 

---

**Entrées** :  $N$  : nombre de noeuds (UAVs),  $T$  : nombre de cycles de simulation,  
 $w_1, w_2, w_3, w_4, E_i, M_i, Q_i, D_i$

**1 Sortie** : Fitness des CHs

**2 Début** ;

**3 pour** chaque cycle  $t \in [1, T]$  **faire**

**4** Calculer :  $Fitness(i) = w_1 E_i + w_2(1 - M_i) + w_3 Q_i + w_4(1 - D_i)$ ;

**5** Sélectionner le CH optimal :

**6**  $CH \leftarrow \arg \max(Fitness(i))$ ;

**7** Enregistrer le score de fitness ;

**8 fin**

**9 Fin** ;

---

#### 4.4.2 Mécanisme de rotaion des CHs

Dans le protocole EMASS, le changement de CH est déclenché uniquement lorsque l'énergie résiduelle du CH actuel devient critique. Cette approche peut engendrer une perte de stabilité et une période de non-couverture temporaire si le CH tombe en panne avant d'être remplacé. Pour pallier cette limite, nous proposons un mécanisme de rotation des CHs. L'idée est de prévoir le remplacement d'un CH dès que son énergie descend en dessous d'un seuil dynamique, calculé en fonction de l'état d'énergie récent, de la densité locale des UAVs (nombre de voisins), et de l'indice de mobilité du réseau.

Ce mécanisme permet d'anticiper les défaillances et d'assurer une continuité de service, en évitant les ruptures brutales de cluster.

- **Méthodologie proposée**

Dans le but de renforcer la résilience énergétique et structurelle du protocole EMASS, nous avons intégré une nouvelle stratégie de rotation des CHs. Cette méthodologie repose sur une prise de décision anticipée, permettant de remplacer un CH avant sa défaillance. Contrairement à la version originale où le changement intervient uniquement lorsque le CH est presque épuisé. Notre approche vise à maintenir la stabilité des clusters et à prolonger la durée de vie du réseau.

On définit un seuil d'énergie dynamique  $S_i$  afin de déterminer le moment de remplacement du CH avant sa défaillance. Ce seuil est calculé selon l'équation suivante :

$$S_i = \alpha D_i + \beta C_i + \gamma M_i$$

Où :

- $D_i$  : densité locale normalisée.

- $C_i$  : taux de consommation d'énergie récente du CH.
- $M_i$  : indice de mobilité du cluster.
- $\alpha, \beta, \gamma$  : coefficients de pondération, avec  $\alpha + \beta + \gamma = 1$

Ce seuil est utilisé comme critère de décision : dès que l'énergie résiduelle du CH devient inférieure à  $S_i$ , une réélection est déclenchée pour anticiper sa défaillance. La sélection privilégie les UAVs présentant :

- Une énergie résiduelle plus élevée.
- Une bonne stabilité (trajectoire prévisible).
- Une forte connectivité avec les membres du cluster.

---

**Algorithme** : Rotation des chefs de clusters

---

**Entrée** :  $E_i, D_i, C_i, M_i, \alpha, \beta, \gamma$   
**Sortie** : CH remplacé si  $E_i < S_i$

```

1 Début;
2 pour chaque cycle de communication faire
3   Calculer :  $S_i \leftarrow \alpha D_i + \beta C_i + \gamma M_i$ ;
4   si  $E_i < S_i$  alors
5     Identifier les candidats au sein du cluster;
6     pour chaque candidat faire
7       Évaluer un score basé sur : énergie, stabilité, connectivité;
8     fin
9     Élire le candidat avec le meilleur score comme nouveau CH;
10    Mettre à jour les rôles et les identifiants de cluster;
11  fin
12 fin
13 Fin;

```

---

### 4.4.3 Ajustement dynamique de l'intervalle des messages Hello

Les intervalles de messages Hello dans les réseaux FANETs constitue un défi majeur nécessitant un compromis entre la réactivité aux changements topologiques et l'efficacité énergétique. Dans le protocole EMASS, l'intervalle entre ces messages est fixe, ce qui peut poser problème dans un environnement à topologie variable. Un intervalle *trop court* provoque une surcharge de signalisation, tandis qu'un intervalle *trop long* peut retarder la détection des changements de topologie.

Pour remédier à cette limitation, nous proposons dans notre version améliorée EMASS-QoS un mécanisme d'ajustement de l'intervalle des messages Hello, capable de s'adapter dynamiquement à la mobilité du réseau. L'objectif est de réduire la fréquence des messages en période de stabilité (mobilité faible) et de l'augmenter en cas de mobilité élevée, afin d'améliorer la réactivité tout en réduisant la surcharge du réseau.

## 4.5 Évaluation des performances du protocole EMASS-QoS

Dans cette section, nous présentons une évaluation comparative des performances du protocole EMASS-QoS par rapport à EMASS.

L'objectif est de démontrer l'impact des améliorations proposées sur les métriques de QoS dans les réseaux FANETs.

Cette comparaison a été réalisée sous Python, en s'appuyant sur les paramètres présentés dans le tableau suivant.

Paramètre	Valeur
Nombre total d'UAVs $N$	25
Nombre de cycles	40
Énergie initiale	[0.8, 1.0]
Poids énergie $w_1$	0.4
Poids mobilité $w_2$	0.2
Poids RSSI $w_3$	0.2
Poids distance $w_4$	0.2
RSSI	[-100, -50]
Consommation CH	0.08
Consommation CM	0.02
Poids densité $\alpha$	0.1
Poids consommation $\beta$	0.5
Poids mobilité $\gamma$	0.4

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

### 4.5.1 Métriques d'évaluation de performances

L'évaluation du protocole EMASS-QoS repose sur plusieurs métriques permettant d'analyser l'impact du protocole sur la QoS :

- **Énergie résiduelle**

L'énergie résiduelle totale représente la somme de l'énergie restante dans tous les UAVs du réseau à la fin de la simulation. Elle évalue la capacité du protocole à économiser l'énergie et à répartir équitablement la charge entre les UAVs.

- **Pertes de paquets**

La perte de paquets correspond au nombre de paquets envoyés par un UAV source qui n'atteignent pas la destination, en raison d'erreurs de transmission, de ruptures de lien ou de délais excessifs dans la découverte de routes viables.

- **Latence**

La latence est estimée à partir de la stabilité topologique du réseau. Un protocole capable de préserver une connectivité stable entre les UAVs réduit significativement les interruptions de liens, limitant ainsi les délais associés à la reconstruction des routes. Cette stabilité contribue indirectement à diminuer le temps global de transmission des paquets, améliorant par conséquent la QoS.

- **Durée de vie du réseau**

Elle correspond au nombre de cycles durant lesquels le réseau reste opérationnel, avant qu'un nombre critique de nœuds ne soient épuisés.

- **Fiabilité des liaisons**

L'intégration de la qualité du lien dans le calcul de la fonction de décision de CH permet de sélectionner des UAVs mieux connectés, ce qui favorise la fiabilité de transmission.

## 4.5.2 Résultats d'évaluation de performances

### \*Intégration de la qualité du lien

Pour évaluer l'impact de l'intégration de la qualité du lien sur la QoS, une simulation Python a été menée en comparant le protocole EMASS et EMASS-QoS.

Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 4.1 ,4.2.

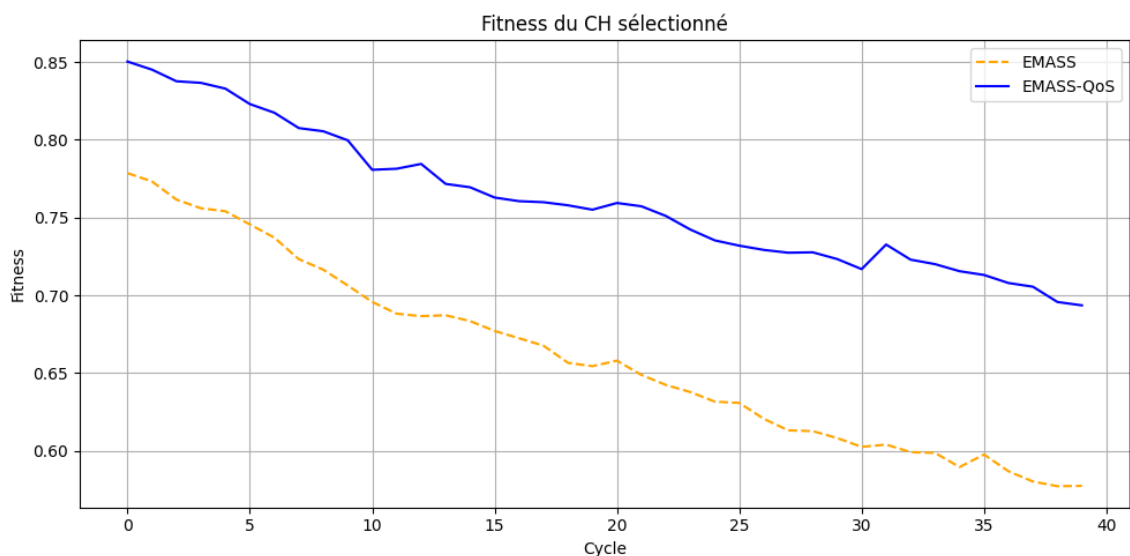


FIGURE 4.1 – Valeur de fitness du CH sélectionné à chaque cycle

La figure 4.1 illustre l'évolution du score de fitness des CHs sélectionnés à chaque cycle, pour deux stratégies différentes.

On observe que EMASS est au-dessus d'EMASS-QoS ce qui signifie que l'amélioration d'EMASS en rajoutant le critère de la qualité du lien dans la sélection des CHs permet d'éviter de désigner des UAVs mal connectés ou à la portée limitée. Cela garantit une meilleure sélection des CHs, contribuant ainsi à une amélioration significative de la Qualité de Service (QoS) assurée par le réseau.

La figure 4.2 illustre l'évolution de la latence estimée par cycle pour les deux protocoles. On observe que EMASS-QoS présente une latence plus faible et plus stable tout au long de la simulation, comparée à la version originale EMASS.

Cette réduction de latence s'explique par l'introduction de la qualité du lien dans la fonction de sélection du CH. En effet, en tenant compte de la qualité du lien radio, EMASS-QoS privilégie les CH mieux connectés et plus proches en termes de communication, ce qui réduit

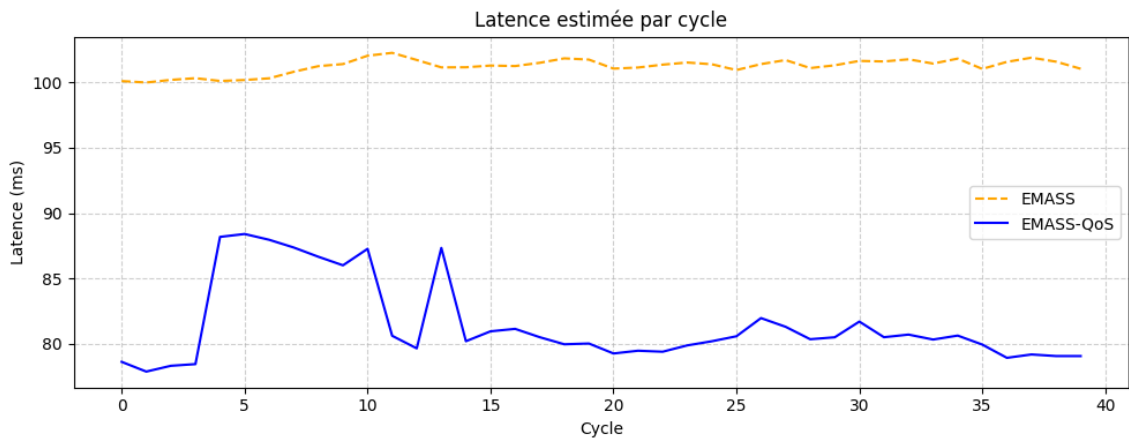


FIGURE 4.2 – Latence estimée par chaque cycle

le temps de transmission des données.

Plus précisément, cette amélioration offre :

- **Fiabilité des communications** : La sélection de CHs avec un RSSI élevé garantit des liaisons plus stables et une meilleure qualité de transmission, réduisant ainsi les pertes de paquets et les retransmissions inutiles.
- **Latence réduite** : En privilégiant les UAVs proches, les trajets des données sont plus courts, ce qui diminue la latence des transmissions.
- **Efficacité énergétique** : Un meilleur RSSI et une proximité accrue réduisent la puissance nécessaire pour transmettre les données, prolongeant ainsi la durée de vie des nœuds et du réseau.
- **Stabilité de la topologie** : Une sélection plus robuste des CHs minimise les interruptions de clusters, assurant une QoS continue même dans un environnement mobile.

En résumé, l'intégration de la qualité du lien dans la sélection des CHs renforce plusieurs paramètres clés de QoS dans les réseaux FANETs, notamment la fiabilité, la latence, et la consommation d'énergie.

#### \*Mécanisme de rotation des CHs

Pour évaluer l'impact de rotation des CHs sur la QoS, une simulation Python a été menée en comparant le protocole EMASS et EMASS-QoS.

Les figures 4.3, 4.4 et 4.5 présentent les résultats obtenus à partir de simulations réalisées sous Python, comparant la stratégie classique de rotation des CHs adoptée par le protocole EMASS, et la stratégie proposée dans EMASS-QoS. Trois indicateurs principaux sont analysés : l'énergie finale restante dans le réseau, la durée de vie du réseau et le taux moyen de perte des paquets.

La figure 4.3 représente l'évolution de l'énergie totale finale, où l'on constate que la stratégie EMASS-QoS entraîne une énergie résiduelle supérieure à celle de la version EMASS. Cela s'explique par le fait que les changements de CH sont anticipés avant l'épuisement critique, ce qui permet une répartition plus équilibrée de la consommation énergétique entre les différents UAVs

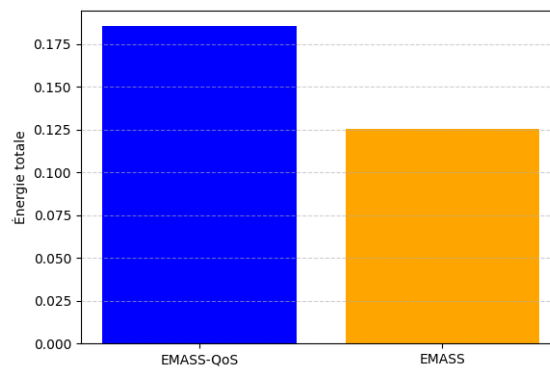


FIGURE 4.3 – Energie finale restante dans les deux approches

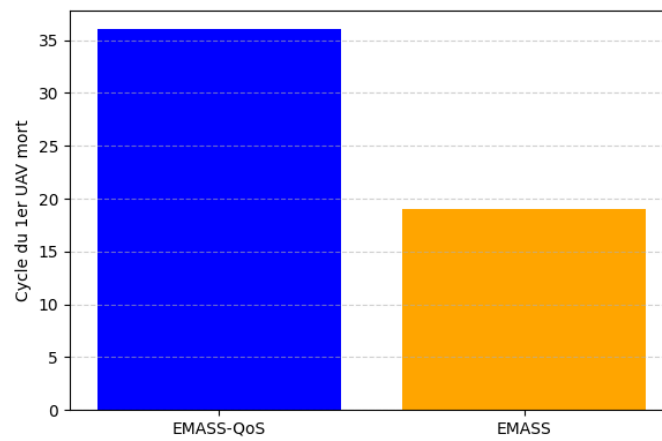


FIGURE 4.4 – Durée de vie du réseau

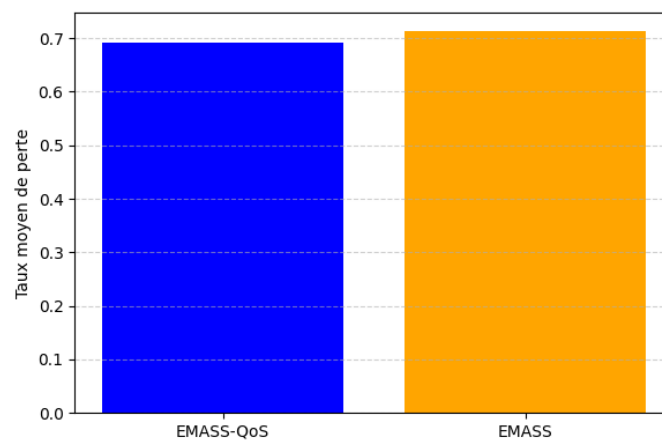


FIGURE 4.5 – Taux moyen de perte des paquets

du réseau. À l'inverse, dans la version EMASS, certains CHs continuent de fonctionner jusqu'à

presque épuisement, ce qui engendre un déséquilibre énergétique.

Dans la figure 4.4 on observe que la durée de vie du réseau, définie ici comme le nombre de cycles avant la défaillance du premier UAV (c'est-à-dire l'épuisement de son énergie), est améliorée dans le protocole EMASS-QoS. Cette amélioration s'explique par la mise en œuvre d'un mécanisme de rotation anticipée du CH, basé sur plusieurs paramètres dynamiques comme la mobilité des UAVs et la densité locale.

La figure 4.5, montre que le protocole EMASS-QoS présente également une perte moyenne de paquets ségnifigativement plus faible par rapport à la version originale EMASS. Ce résultat s'explique par une sélection de CH plus pertinente, fondée notamment sur la qualité du lien radio (RSSI) et la mobilité réduite des UAV sélectionnés.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact positif de l'amélioration EMASS-QoS sur la QoS globale du réseau FANET. Plusieurs dimensions fondamentales de la QoS sont améliorées :

- **Fiabilité et continuité du service** : La stratégie d'EMASS-QoS anticipe les situations de défaillance énergétique des CHs en déclenchant une réélection avant que le niveau d'énergie ne devienne critique. Ce mécanisme préventif réduit considérablement les risques de coupures soudaines, de pertes de paquets ou de rupture de cluster. Le maintien d'un CH actif et fiable dans chaque cluster assure ainsi une meilleure stabilité topologique, essentielle pour garantir la continuité du service de routage.
- **Efficacité énergétique** : L'analyse de l'énergie totale restante montre une meilleure préservation de l'énergie dans le réseau avec la stratégie d'EMASS-QoS. La charge énergétique est répartie plus équitablement entre les UAVs, évitant l'épuisement prématuré de certains UAVs critiques. Cela prolonge la durée de vie globale du réseau, un facteur clé de la QoS dans les systèmes embarqués contraints en énergie comme les FANETs.
- **Adaptabilité et robustesse** : Le recours à un seuil dynamique de rotation, tenant compte de la densité du voisinage, de la mobilité du réseau et du taux de consommation, confère au protocole une capacité d'adaptation contextuelle en temps réel. Cette approche améliore la résilience du réseau, en maintenant des conditions de service acceptables même dans des contextes de mobilité élevée.
- **Surcharge de contrôle maîtrisée** : Il est vrai que la version EMASS-QoS entraîne un nombre plus élevé de changements de CH, ce qui pourrait engendrer une légère augmentation du trafic de contrôle. Toutefois, cette surcharge reste modérée, et elle se justifie par les bénéfices observés en termes de disponibilité du réseau, économie d'énergie et amélioration de la robustesse du routage. En anticipant les défaillances, le protocole contribue à une gestion plus stable et résiliente du cluster.

L'approche EMASS-QoS permet une amélioration significative de plusieurs indicateurs clés de QoS dans les réseaux FANETs. En intégrant un critère énergétique contextuel pour anticiper la dégradation des CHs, elle favorise une meilleure stabilité du réseau, une gestion énergétique optimisée, ainsi qu'une fiabilité de communication.

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et évalué plusieurs améliorations apportées au protocole EMASS, dans le but d'en renforcer la QoS au sein des réseaux FANETs. Trois axes principaux ont été explorés :

L'intégration de la qualité du lien dans la sélection des CHs, en s'appuyant notamment sur le RSSI, la distance, l'énergie et la mobilité, afin d'assurer des communications plus fiables entre les UAVs.

La rotation des CHs, déclenchée par un seuil énergétique dynamique tenant compte de la densité, du taux de consommation et de la mobilité, visant à anticiper les ruptures et à préserver l'équilibre énergétique du réseau.

L'ajustement dynamique de l'intervalle des messages Hello, permettant de réduire la surcharge de contrôle tout en assurant une bonne réactivité aux variations topologiques.

Les simulations réalisées sous Python ont mis en évidence les bénéfices concrets de ces mécanismes en termes de stabilité des clusters, réduction de la latence, meilleure exploitation de l'énergie, et maintien de la connectivité. Ainsi, le protocole EMASS-QoS, résultant de ces améliorations, offre une meilleure adéquation aux exigences de la QoS dans les environnements dynamiques et contraints des réseaux FANETs. Cependant, en raison de contraintes de temps, et de complexité d'intégration dans le simulateur existant, la simulation de l'ajustement dynamique de l'intervalle des messages Hello n'a pas pu être réalisée dans le cadre de ce mémoire. L'idée reste néanmoins prometteuse pour de futurs travaux, notamment en matière de réduction du trafic de contrôle et d'amélioration de la stabilité des tables de voisinage, avec un impact direct sur QoS.

# Conclusion générale

Ce mémoire a exploré les défis et les solutions liés au routage avec QoS dans les réseaux FANETs, en mettant l'accent sur les protocoles hiérarchiques. Les réseaux FANETs, caractérisés par leur mobilité élevée, leur topologie dynamique et leurs contraintes énergétiques, nécessitent des mécanismes de routage adaptatifs et efficaces pour garantir des communications fiables et performantes.

Une étude approfondie des protocoles existants a permis de mettre en évidence leurs forces et leurs limites. Les protocoles hiérarchiques ont été identifiés comme particulièrement pertinents pour les FANETs, en raison de leur capacité à structurer le réseau en clusters, améliorant ainsi la QoS.

Cependant, les classifications traditionnelles de ces protocoles, basées uniquement sur des aspects techniques tels que la méthode de sélection des CHs, s'avèrent insuffisantes pour rendre compte de la diversité des approches existantes. C'est pourquoi une nouvelle classification a été proposée, qui se distingue par son caractère multifonctionnel et sa meilleure adéquation avec les exigences spécifiques des réseaux FANETs, en prenant en compte non seulement les objectifs du protocole, mais aussi la résilience des clusters et les stratégies d'acheminement. Cette classification repose sur trois axes :

- L'objectif du protocole (optimisation énergétique, sécurité, gestion de la mobilité).
- La résilience des clusters (faible, modérée, élevée).
- Le type d'acheminement des données (direct, multi-sauts, hybride). Cette classification offre une vision claire des différentes approches et facilite le choix du protocole en fonction des besoins spécifiques du réseau.

Dans ce cadre, le protocole EMASS a été choisi comme protocole de référence en raison de sa structure hiérarchique efficace et de l'intégration de critères pertinents tels que la mobilité, la distance et l'énergie résiduelle dans le processus de sélection des CHs. Bien que performant, EMASS présente certaines limites face à des environnements fortement dynamiques, justifiant ainsi les améliorations proposées dans ce mémoire :

- Intégration de la qualité du lien dans la sélection des CHs, améliorant la fiabilité des communications.
- Rotation des CHs pour anticiper les défaillances et maintenir la stabilité des clusters.
- Ajustement dynamique des messages Hello pour réduire la surcharge tout en maintenant une réactivité élevée.

Les résultats de simulations ont confirmé que ces améliorations proposées permettent à EMASS-QoS d'offrir une meilleure QoS.

Ces résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives prometteuses pour les recherches futures :

- Évaluation de l'ajustement dynamique de l'intervalle des messages Hello.
- Renforcer la sécurité avec des mécanismes de chiffrement et d'authentification adaptés.
- L'intégration de l'intelligence artificielle, particulièrement l'apprentissage automatique pour ajuster les paramètres en temps réel.
- Réaliser une validation expérimentale sur une plateforme UAV réelle.

# Bibliographie

- [1] AADIL, F., RAZA, A., KHAN, M. F., MAQSOOD, M., MEHMOOD, I., AND RHO, S. Energy aware cluster-based routing in flying ad-hoc networks. *Sensors* 18, 5, 1413. 2018.
- [2] ABDULHAE, O. T., MANDEEP, J. S., AND ISLAM, M. T. Cluster-based routing protocols for flying ad hoc networks (fanets). *IEEE*. 2020.
- [3] ABDULHAE, O. T., MANDEEP, J. S., AND ISLAM, M. T. Cluster-based routing protocols for flying ad hoc networks (fanets). *IEEE Access* 10, 32981–33004. 2022.
- [4] ACHOUAK, H., AND RAYANE, K. Routage avec qualité de service dans les réseaux fanet. Master's thesis, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, 2023.
- [5] AISSA, M., ABDELHAFIDH, M., AND BEN MNAOUER, A. Emass : A novel energy, safety and mobility aware-based clustering algorithm for fanets. *IEEE Access* 9, 105506–105520. 2021.
- [6] ALMANSOR, M. J., MD DIN, N., BAHARUDDIN, M. Z., MA, M., ALSAYEDNOOR, H. M., AL-SHAREEDA, M. A., AND AL-ASADI, A. J. Routing protocols strategies for flying ad-hoc network (fanet) : Review, taxonomy, and open research issues. *Alexandria Engineering Journal* 109, 553–577. 2024.
- [7] ARAFAT, M. Y., AND MOH, S. A survey on cluster-based routing protocols for unmanned aerial vehicle networks. *IEEE Access* 7, 1, 498–516. 2019.
- [8] BEKMEZCI, I., SAHINGOZ, O. K., AND TEMEL, Flying ad-hoc networks (fanets) : A survey. *Ad Hoc Networks* 11, 3, 1254–1270. 2013.
- [9] BELAMRI, F., BOULFEKHAR, S., AND AISSANI, D. A survey on qos routing protocols in vehicular ad hoc network (vanet). *Telecommunication Systems* 78, 1, 117–153. 2021.
- [10] BHANDARI, S., WANG, X., AND LEE, R. Mobility and location-aware stable clustering scheme for uav networks. *IEEE Access* 8, 106364–106372. 2020.
- [11] CLAUSEN, T., AND JACQUET, P. Optimized link state routing protocol (olsr). Tech. rep., IETF. 2003.
- [12] 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, 1, 37–68. 2022.
- [13] DORA, D., KUMAR, S., AND KAIWARTYA, O. Efficient dynamic caching for geocast routing in vanets. In *Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. 2015.
- [14] GUILLEN-PEREZ, A., MONTOYA, A.-M., SANCHEZ-AARNOUTSE, J.-C., AND CANO, M.-D. A comparative performance evaluation of routing protocols for flying ad-hoc networks in real conditions. *Applied Sciences* 11, 10, 4363. 2021.

- [15] GUPTA, L., JAIN, R., AND VASZKUN, G. Survey of important issues in uav communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, 2, 1123–1152. 2016.
- [16] JAWHAR, I., MOHAMED, N., AL-JAROUDI, J., AND ZHANG, S. A framework for using unmanned aerial vehicles for data collection in linear wireless sensor networks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 74, 1–2, 437–453. 2013.
- [17] JOHNSON, D., HU, Y., AND MALTZ, D. The dynamic source routing protocol (dsr) for mobile ad hoc networks for ipv4. Tech. rep., IETF. 2007.
- [18] KARP, B., AND KUNG, H. Gpsr : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*. 2000.
- [19] KHAN, A., AFTAB, F., AND ZHANG, Z. Bicsf : Bio-inspired clustering scheme for fanets. *IEEE Access* 7, 31446–31456. 2019.
- [20] KHAN, M. A., KHAN, I. U., SAFI, A., AND QUERSHI, I. M. Dynamic routing in flying ad-hoc networks using topology-based routing protocols. *Drones* 2, 3. 2018.
- [21] KHAN, M. F., YAU, K. A., NOOR, R., AND IMRAN, M. A. Routing schemes in fanets : A survey. *Sensors* 20, 1, 38. 2019.
- [22] KHELIFI, F., BRADAI, A., SINGH, K., AND ATRI, M. Localization and energy-efficient data routing for unmanned aerial vehicles : Fuzzy-logic-based approach. *IEEE Communications Magazine* 56, 4, 129–133. 2018.
- [23] LEONOV, A. V. Application of bee colony algorithm for fanet routing. In *Proc. IEEE Int. Conf. Young Spec. Micro/Nanotechnol. Electron Devices (EDM)*. 2016.
- [24] NEKOVEE, M. Autonomous drone swarms : A new frontier in wireless communication and ai. *IEEE*. 2021.
- [25] OUBBATI, O. S., ATIQUZZAMAN, M., LORENZ, P., TAREQUE, M. H., AND HOSSAIN, M. S. Routing in flying ad hoc networks : Survey, constraints, and future challenge perspectives. *IEEE Access* 7, 81057–81105. 2019.
- [26] PASANDIDEH, F., DA COSTA, J. P. J., KUNST, R., ISLAM, N., HARDJAWANA, W., AND PIGNATON DE FREITAS, E. A review of flying ad hoc networks : Key characteristics, applications, and wireless technologies. *Remote Sensing* 14, 18, 4459. 2022.
- [27] PERKINS, C., BELDING-ROYER, E., AND DAS, S. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Rfc, IETF. 2003.
- [28] PUSTOKHINA, I. V., PUSTOKHIN, D. A., LYDIA, E. L., ELHOSENY, M., AND SHANKAR, K. Energy efficient neuro-fuzzy cluster-based topology construction with metaheuristic route planning algorithm for unmanned aerial vehicles. *Computer Networks* 196, 108214. 2021.
- [29] QAZI, S., SIDDIQUI, A. S., AND WAGAN, A. I. UAV based real time video surveillance over 4G LTE. In *Proceedings of the International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)*, pp. 141–145. 2015.
- [30] ROSATI, S., KRUŻELECKI, K., AND TRAYNARD, L. Speed-aware routing for uav ad-hoc networks. In *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. 2013.
- [31] SAHINGOZ, O. K. Networking models in flying ad-hoc networks (fanets) : Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 74, 1–2, 513–527. 2014.

- [32] SAIDANI, L. Routage sécurisé dans les réseaux fanets : L'attaque wormhole. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, 2022.
- [33] SHARMA, S. P-olsr : Position-based optimized link state routing for mobile ad hoc networks. In *2009 IEEE 34th Conference on Local Computer Networks*. 2009.
- [34] SHIRANI, R., ST-HILAIRE, M., KUNZ, T., ZHOU, Y., LI, J., AND LAMONT, L. On the delay of reactive-greedy-reactive routing in unmanned aeronautical ad-hoc networks. *Procedia Computer Science* 10, 535–542. 2012.
- [35] UDDIN, M. A., MANSOUR, A., LE JEUNE, D., AYAZ, M., AND AGGOUNE, E. M. Uav-assisted dynamic clustering of wireless sensor networks for crop health monitoring. *Sensors* 18, 2, 555. 2018.
- [36] VASILIEV, D. S., ABILOV, A., AND KHVORENKOV, V. Peer selection algorithm in flying ad hoc networks. In *Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, pp. 1–4. 2016.
- [37] YANG, S., WANG, S., LI, T., HU, T., XU, Z., HE, R., AND ZHANG, B. Hybrid ant colony-based inter-cluster routing protocol for fanet. *Scientific Reports* 14, 15632. 2024.
- [38] YANG, S., ZHAO, W., WANG, C.-M., DONG, W.-Y., AND JU, X. Betweenness centrality based dynamic source routing for flying ad hoc networks in marching formation. *arXiv preprint abs/2503.16834*. 2025.
- [39] YUCEF, M., AND KHALIL, D. B. Étude des réseaux ad hoc par la théorie des jeux. Master's thesis, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2019.
- [40] YU, H., MEIER, K., ARGYLE, M., AND BEARD, R. W. Cooperative path planning for target tracking in urban environments using unmanned air and ground vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20, 3, 541–552. 2015.
- [41] ZABALLOS, A., VALLEJO, A., CORRAL, G., AND ABELLA, J. Ad-hoc routing performance study using opnet modeler. In *Proceedings of the OPNETWORK*. 2006.
- [42] ZANG, C., AND ZANG, S. Mobility prediction clustering algorithm for uav networking. In *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC Workshops)*. 2011.

# Résumé

Les réseaux FANETs (Flying Ad hoc Networks), constitués de drones (UAVs) interconnectés sans infrastructure fixe, sont de plus en plus utilisés dans des applications militaires, humanitaires, et civiles. Leur nature hautement dynamique, marquée par une mobilité élevée et une topologie changeante, pose des défis majeurs en matière de routage et de qualité de service (QoS).

Dans ce contexte, ce mémoire se concentre sur le routage hiérarchique avec prise en compte de la QoS dans les réseaux FANETs. Nous proposons pour cela une nouvelle classification des protocoles de routage hiérarchiques, fondée sur leurs objectifs, leur résilience, et leurs types d'acheminement de données. Sur cette base, nous introduisons une amélioration du protocole hiérarchique EMASS (Energy and Mobility Aware Stable and Safe Clustering), nommée EMASS-QoS, qui introduit plusieurs mécanismes : la prise en compte de la qualité du lien pour la sélection des chefs de cluster (CHs), une rotation des CHs afin d'anticiper les défaillances potentielles, et un ajustement dynamique de la fréquence des messages Hello pour réduire la surcharge du réseau.

Les résultats des simulations réalisées sous Python démontrent que le protocole EMASS-QoS offre de meilleures performances en termes de QoS, comparé à la version originale EMASS.

**Mots clés :** FANETs, routage, routage hiérarchique, QoS, EMASS.

# Abstract

Flying Ad hoc Networks (FANETs), composed of unmanned aerial vehicles (UAVs) communicating without fixed infrastructure, are increasingly used in military, humanitarian, and civilian applications. However, their highly dynamic nature characterized by high mobility and frequently changing topology presents major challenges in terms of routing and Quality of Service (QoS).

In this context, This thesis focuses on QoS aware hierarchical routing in FANETs. To this end, we propose a new classification of hierarchical routing protocols based on their objectives, their resilience, and their types of data forwarding. Building on this foundation, we introduce an enhanced version of the hierarchical protocol EMASS (Energy and Mobility Aware Stable and Safe Clustering), named EMASS-QoS. which incorporates several mechanisms : Incorporating link quality into cluster head (CH) selection, CH rotation to anticipate potential failures, and dynamic adjustment of Hello message frequency to reduce network overhead.

Simulation results conducted using Python demonstrate that EMASS-QoS provides significantly improved QoS performance compared to the original EMASS protocol.

**Keywords :** FANETs, routing, hierarchical routing, QoS, EMASS.