

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Borj Bou Arréridj
Faculté des Mathématiques et d'Informatique
Département d'informatique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en informatique

Spécialité: Réseaux et Multimédia

THEME

Routage de données avec QOS dans les réseaux de drones

Présenté par:

Chelbab Manal

Benkhelfallah kaouthar

Soutenu publiquement le : 14/06/2025

Devant le jury composé de:

Président: Dr Sennouci oussama

Examineur: Dr Saha Adel

Encadreur: Dr Moussaoui Ali

Promotion: 2024/2025

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions et louons Allah, qui nous a accordé la patience, la force et la capacité pour mener à bien ce travail.

Nous remercions ensuite notre encadreur, Dr. Moussaoui Ali, pour ses conseils, son suivi et son soutien durant la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tous les professeurs qui nous ont enseigné durant notre parcours universitaire pour leurs efforts et leurs enseignements

Nous remercions les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives.

Nous remercions également notre famille ainsi que toutes les personnes qui nous ont encouragés de près ou de loin.

Dédicaces

À nos chers parents,

À nous-mêmes,

À nos sœurs et frères,

À tous nos amis. Merci.

Résumé

FANET est l'un des réseaux mobiles ad hoc sans infrastructure, représentant un ensemble de véhicules aériens sans pilote communiquant entre eux. Ces réseaux sont connus par leur forte mobilité, des changements rapides de topologie et des contraintes de ressources qui rendent le routage un grand défi. Dans notre travail, nous proposons un nouveau mécanisme pour améliorer la qualité des chemins sélectionnés, Dans le mécanisme propose, la sélection des chemins est base sur trois critères : la vitesse relative entre les nœuds, l'énergie et le degré d'accessibilité. Nous avons appliqué ce mécanisme au protocole OLSR (Optimized Link State Routing) en modifiant la sélection des MPRs (Multipoint Relays), Notre protocole amélioré est baptisé RS-OLSR, Les résultats de simulation ont montré que RS-OLSR augmente le nombre total de paquets reçus par rapport à OLSR standard, ce qui reflète une amélioration du taux de livraison des paquets.

Mots clés : FANET (Réseau de drones), QOS (qualité de service), OLSR, MPR.

Abstract

FANET is one of the infrastructure-less mobile ad hoc networks, consisting of a set of unmanned aerial vehicles (UAVs) communicating with each other. These networks are characterized by high mobility, rapid topology changes, and resource constraints, which make routing a major challenge. In our work, we propose a new mechanism to improve the quality of the selected paths. In the proposed mechanism, path selection is based on three criteria: the relative speed between nodes, energy, and reachability. We applied this mechanism to the OLSR (Optimized Link State Routing) protocol by modifying the selection of MPRs (Multipoint Relays). Our enhanced protocol is named RS-OLSR. Simulation results showed that RS-OLSR increases the total number of received packets compared to the standard OLSR, reflecting an improvement in the packet delivery ratio.

Keywords: FANET (Flying Ad hoc Network), QOS (Quality of Service), OLSR, MPR.

ملخص

شبكة الطيران المخصصة (FANET) هي واحدة من الشبكات المحمولة المؤقتة التي لا تعتمد على بنية تحتية، وتمثل مجموعة من الطائرات المسيّرة التي تتواصل مع بعضها البعض. تتميز هذه الشبكات بارتفاع حركتها، وتغيرات الطوبولوجيا السريعة، والقيود على الموارد، مما يجعل عملية التوجيه تحدياً رئيسياً. في عملنا، نقترح آلية جديدة لتحقيق التوجيه مع جودة الخدمة (QoS) قمنا بتطبيق هذه الآلية على بروتوكول OLSR (Optimized Link State Routing) من خلال تعديل اختيار MPRs (Multipoint Relays) ، وذلك بالاعتماد على السرعة النسبية بين العقد، والطاقة، وقابلية الوصول. يتيح بروتوكولنا المحسن RS-OLSR اختيار أفضل المحطات لضمان موثوقية التوجيه. وتضمن نتائج المحاكاة أن RS-OLSR يزيد العدد الإجمالي للحزم المستلمة مقارنة بـ OLSR القياسي، مما يعكس تحسناً في نسبة تسليم الحزمة

الكلمات المفتاحية: شبكة الطيران المخصصة (FANET)، جودة الخدمة (QoS)، OLSR، MPR.

Table des matières

Table des matières

Remerciement.....	I
Dédicaces	II
Résumé.....	III
Abstract	III
ملخص.....	III
Liste des abréviations	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	1
CHAPITRE 01: Généralités sur les réseaux mobiles et les réseaux FANETs	
1.1 Introduction	3
1.2 Les réseaux mobiles	3
1.2.1 Les types des réseaux mobiles	3
1.3 Les réseaux de drones	8
1.3.1 C'est quoi les drones	8
1.3.2 Les catégories des drones	9
1.3.3 De l'utilisation individuelle des drones aux réseaux collaboratifs (FANETs)	9
1.3.4 Caractéristiques spécifiques des FANET	10
1.3.5 Modèles de mobilité utilisés dans les FANET	11
1.3.6 Modèles de communication dans FANET	15
1.4 Étude comparative des réseaux ad hoc.....	16
1.5 Conclusion.....	17
CHAPITRE 02: Routage et qualité de service dans les réseaux FANETs	
2.1 Introduction	19
2.2 Le routage dans les réseaux FANETs.....	19
2.2.1 Les protocoles de routage spécifique au réseau FANETs	19
2.2.2 Le protocole de routage Optimized Link State Routing	22
2.3 Qualité de service dans les réseaux de drones	26
2.3.1 Métriques de qualité de service.....	26
2.3.2 Limites et défis des protocoles de routage avec QoS dans les FANETs	27
2.3.3 Travaux antérieurs basé sur le protocole OLSR	28
2.4 Conclusion.....	29
CHAPITRE 03: Contribution et Validation	
3.1 Introduction	31

3.2 Notre contribution	31
3.3 Fonction objective	31
3.4 Les principes de notre proposition	31
3.5 Étapes de réalisation dans NS3	32
3.6 Rappel sur le mécanisme de sélection des MPR dans OLSR standard	33
3.7 Le mécanisme de sélection des MPR dans RS-OLSR	35
3.8 Exemple d'application de la sélection des MPR	36
3.9 La simulation	37
3.10 Résultats de simulation	38
3.11 Conclusion	42
Conclusion générale	43
Bibliographie	44

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
ACO	Ant Colony Optimization
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
BC-DSR	Betweenness Centrality - Dynamic Source Routing
DSR	Dynamic Source Routing
DSDV	Destination Sequenced Distance Vector
FANET	Flying Adhoc Network
GMG	Groupe Gaussien-Markovien
ICRP	Inter-Cluster Routing Protocol
MANET	Mobile Adhoc Network
MID	Multiple Interface Declaration
MPR	Multipoint relay
OLSR	Optimized Link State Routing
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
RS-OLSR	Relative Speed-OLSR
SFA-OLSR	Smart Filtering-based Adaptive Optimized Link State Routing
SSA	Sparrow Search Algorithm
SSIM	Structural Similarity Index
TC	Topology Control
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANET	Vehicule Adhoc Network
V2V	Vehicule to Vehicule
V2I	Vehicule to Infrastructure
VQM	Mesure de la qualité vidéo

Liste des figures

- Figure 1.1 Réseau cellulaire**
- Figure 1.2 Réseau de télécommunications par satellite**
- Figure 1.3 Réseau maillé**
- Figure 1.4 Réseau MANET**
- Figure 1.5 Réseau VANET**
- Figure 1.6 Réseau FANET**
- Figure 1.7 Drone DJI Mini 2 : drone léger avec caméra 4K**
- Figure 1.8 Random Waypoint**
- Figure 1.9 Modèle de Mobilité base sur le Plan de Mission**
- Figure 1.10 Semi Random Circular Movement**
- Figure 1.11 Modèle de Mobilité Structuré en Grille**
- Figure 1.12 Gauss Markov 3D**
- Figure 1.13 Modèles de communication dans FANET**
- Figure 2.1 Format de message Hello standard**
- Figure 2.1 Format de message Tc standard**
- Figure 3.1 : Nouveaux format de message Hello**
- Figure 3.2 Variation des poids – RS-OLSR (vitesse entre 0 et 15 m/s)**
- Figure 3.3 Variation de vitesse**
- Figure 3.4 Variation du l'énergie**

Liste des tableaux

- Tableau 1.1** Étude comparative entre MANET, VANET et FANET
- Tableau 3.1** Les valeurs des critères de chaque nœud dans l'exemple
- Tableau 3.2** Calcul du coût pour chaque voisin
- Tableau 3.3** Les paramètres de simulation

Introduction générale

Au fil du temps, de nouveaux types de réseaux sans fil sont apparus, tels que les réseaux de drones appelés FANET (Flying Ad hoc NETWORKS). Ces réseaux sont composés de véhicules aériens sans pilote UAVs, (Unmanned Aerial Vehicle) ou drones qui communiquent entre eux sans infrastructure fixe. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines tels que la surveillance, les missions de secours et les opérations militaires en raison de leur flexibilité et de leur capacité de déplacement rapide.

Les FANET sont des cas particuliers des MANET (Mobile Ad hoc Network). Dans les MANETs, des protocoles de routage classiques tel qu'OLSR (Optimized Link State Routing), AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) et DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) ont été proposés. Chaque protocole utilise sa propre technique pour trouver les meilleures routes entre les nœuds dans un environnement mobile et dynamique.

Les FANETs présentent plusieurs défis qui rendent les protocoles de routage classiques peu efficaces, notamment dans le maintien de chemins stables et fiables, à cause de leur forte mobilité, de la variation rapide de la topologie et des ressources limitées des nœuds, telles que la batterie, la bande passante, etc.

Plusieurs recherches et travaux ont été proposés pour optimiser les protocoles classiques tels qu'OLSR afin de résoudre ces problèmes. C'est dans ce cadre que notre travail s'inscrit pour proposer des améliorations au protocole OLSR en intégrant des critères de qualité de service (QoS, Quality of service) dans le processus de sélection des relais multipoints (MPR).

Ce mémoire est structuré comme suite :

Le premier chapitre donne une introduction générale aux réseaux mobiles, avec un focus particulier sur les réseaux FANET

Le deuxième chapitre traite des techniques de routage intégrant la qualité de service (QoS) dans les réseaux FANET

Le troisième chapitre est dédié aux simulations effectuées pour évaluer les performances de notre solution proposée.

Il y a plusieurs perspectives futures dans ce domaine tel que l'intégration de l'intelligence artificielle pour un routage adaptatif, la prise en compte de la sécurité dans les décisions de routage, ainsi que l'application de ces solutions dans des environnements hybrides (air-sol ou air-mer) constituent des pistes intéressantes pour améliorer davantage la robustesse et l'efficacité des réseaux FANET.

CHAPITRE 01

Généralités sur les réseaux mobiles et les réseaux FANETs

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les réseaux mobiles. Nous commençons par leurs principales catégories, avec et sans infrastructure. Ensuite, nous mettons l'accent sur les réseaux FANETs, nous définissons tout d'abord les drones ainsi que leurs différentes catégories, puis les caractéristiques spécifiques de ces réseaux, leurs modèles de communication, ainsi que les modèles de mobilité qui leur sont associés. Enfin, nous faisons une étude comparative entre les types réseaux ad hoc.

1.2 Les réseaux mobiles

Les réseaux mobiles sont des systèmes sans fil qui reposent sur des infrastructures de communication sans fil. Ils permettent l'échange de données et l'accès à plusieurs services pour les utilisateurs et les appareils connectés, même en situation de mobilité. Contrairement aux réseaux filaires, qui exigent une connexion physique fixe, ces réseaux sont basés sur la transmission de signaux radio entre les terminaux et les équipements réseaux. Les composants essentiels des réseaux mobiles sont généralement des points d'accès, des antennes, des stations de base et des protocoles spécifiques pour la gestion des communications [1].

1.2.1 Les types des réseaux mobiles

Les réseaux mobiles permettent la communication sans fil entre des appareils, tout en offrant une mobilité continue. En fonction de leur architecture et de la présence ou non d'une structure fixe, ils se divisent en deux grandes catégories : réseaux avec infrastructure et réseaux sans infrastructure.

1.2.1.1 Réseaux avec infrastructure

Ce type de réseau fonctionne par l'utilisation des stations de base, qui représentent des points d'accès au réseau. Dans chaque station, il y a un système de communication sans fil permettant de communiquer directement avec les unités mobiles ou les sites. Chaque station est couverte par une région géographique particulière, appelée portée. À tout moment, une unité mobile est liée à une unique station de base, qui lui fournit les services nécessaires tant qu'elle reste dans cette zone. Elle assure aussi la liaison entre le réseau sans fil et l'infrastructure câblée, rendant ainsi la connexion entre une unité mobile et un dispositif installé sur un site fixe plus aisée [2].

Parmi les réseaux avec infrastructure :

A. Réseau cellulaire

Le réseau cellulaire est un système de communication sans fil formé de cellules, chaque cellule étant couverte par un transmetteur-récepteur immobile. La figure 1.1 illustre ce réseau. La gestion et l'interconnexion de ces cellules sont assurées par un réseau centralisé pour transmettre efficacement les communications. Les cellules adjacentes utilisent des fréquences différentes pour éviter le bruit et les interférences. L'ensemble de ces cellules garantit la continuité de la couverture, facilitant aux utilisateurs le maintien de la connexion même en déplacement [3].

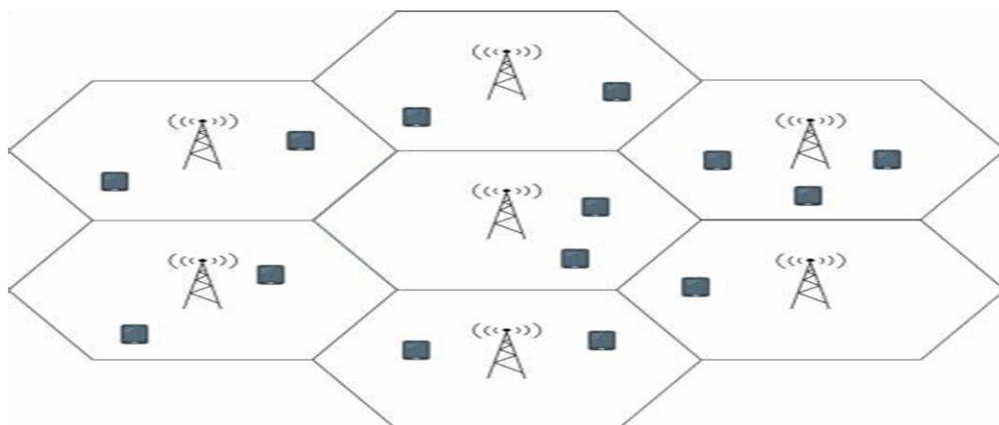


Figure1.1 : Réseau cellulaire [4]

B. Réseau satellitaire

Un système de télécommunications par satellite fonctionne grâce à un réseau de plusieurs satellites interconnectés, appelés une constellation, des stations au sol et des récepteurs. Prenons l'exemple du service Internet par satellite. À travers le monde, de grandes antennes, souvent de plusieurs mètres de diamètre, sont connectées à l'infrastructure Internet terrestre. Ces antennes captent et envoient les données aux satellites en orbite autour de la Terre via des signaux électromagnétiques. Lorsque les satellites reçoivent le signal, ils l'amplifient et le renvoient vers la Terre. Pour capter ce signal, une petite antenne, comme une parabole, doit être installée chez soi, accompagnée d'un modem satellite. Cela permet d'accéder à Internet partout, sans nécessiter de connexion à la fibre optique [5], comme illustré dans la figure 1.2 représentant ce réseau.

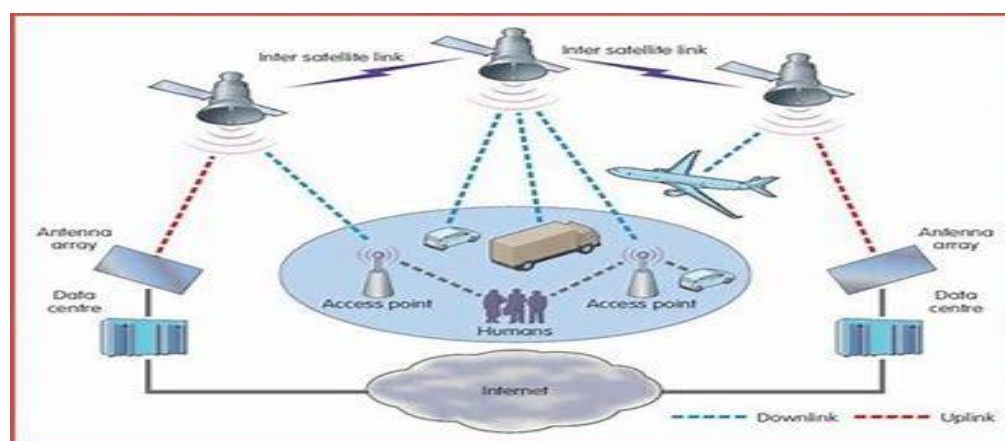


Figure1.2 : Réseau de télécommunications par satellite [6]

C. Réseau maillé

Un réseau maillé est un réseau sans fil qui interconnecte plusieurs points d'accès, appelés « nœuds ». Il est possible de relier ces appareils aux nœuds pour permettre une meilleure connexion et améliorer également la couverture Wi-Fi sur toute la zone, au lieu de se connecter uniquement au routeur principal. Ce système peut dépasser les limitations causées par la distance ou les contraintes physiques entre le routeur et les dispositifs. L'architecture d'un réseau maillé est basée sur une structure maillée où chaque nœud échange des données avec les autres, assurant une redondance et une meilleure stabilité du réseau, même en cas de défaillance d'un point d'accès [7], comme illustré dans la figure 1.3 représentant ce réseau.

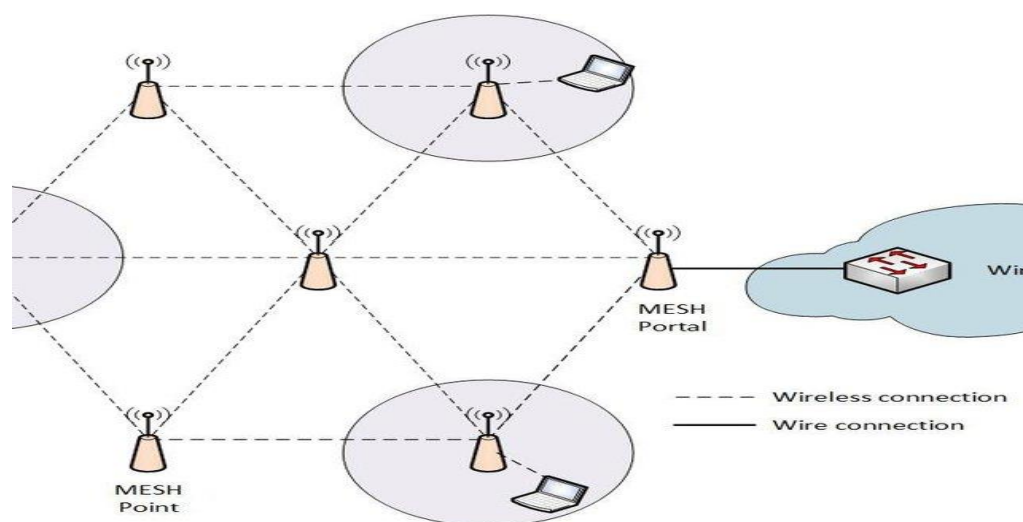


Figure1.3 : Réseau maillé [8]

1.2.1.2 Réseaux sans infrastructure

Parmi les caractéristiques de ce type de réseau, on trouve la complétude de la mobilité et l'autonomie de ses nœuds, qui peuvent communiquer entre eux sans nécessiter une infrastructure préalable. En l'absence de celle-ci, chaque nœud prend en charge le rôle de routeur, ce qui permet ainsi la transmission des informations pour le compte des autres nœuds [2].

A. MANETs

Un MANET est un réseau sans fil auto-organisé qui est formé de nœuds mobiles communiquant directement entre eux sans infrastructure fixe (comme un routeur ou une station de base). Ces réseaux se caractérisent par leur topologie dynamique qui leur donne une grande flexibilité, où les liaisons entre les nœuds se renouvellent continuellement en raison de leur mobilité. Chaque nœud doit coopérer avec les autres pour assurer le bon fonctionnement du

réseau. On utilise les MANETs dans plusieurs domaines tels que les interventions d'urgence, les environnements militaires et les communications.

Mais ces réseaux présentent plusieurs défis, tels que la limitation des ressources, car les appareils mobiles disposent d'une capacité énergétique, d'une puissance de traitement et d'une capacité de stockage restreintes, ce qui peut affecter leur performance. Aussi, le partage de la bande passante disponible entre tous les nœuds peut affecter la vitesse et la fiabilité des transmissions de données.

Pour un fonctionnement efficace, ces réseaux reposent sur une auto-organisation, nécessitant des protocoles et algorithmes distribués afin de garantir la connectivité et la transmission des données. Enfin, la mobilité continue des nœuds rend la gestion des tables de routage et la stabilité des communications plus complexes [9], comme illustré dans la figure 1.4 représentant ce réseau.

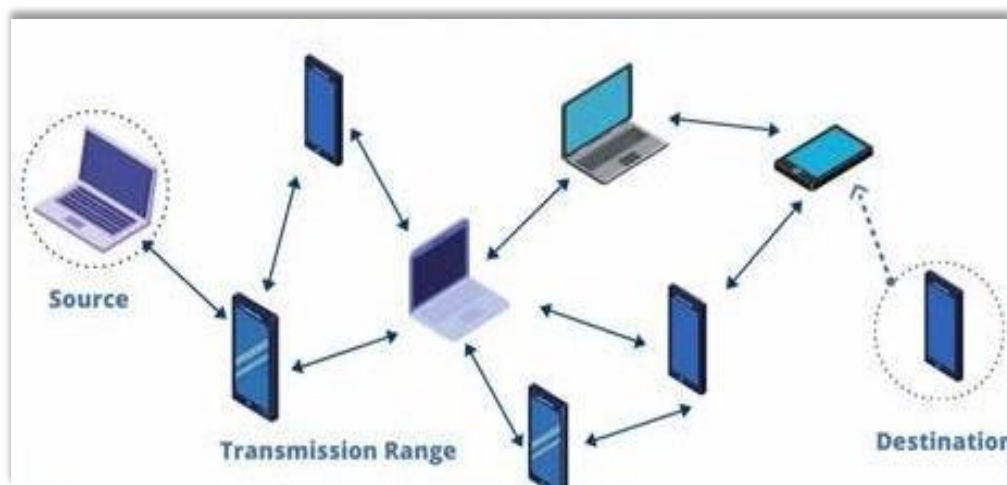


Figure1.4 : Réseau MANET[10]

B. VANETs

Un VANET appelé (Vehicular Ad hoc Network) est un type de réseau mobile sans fil. Il s'agit d'un réseau particulier de MANETs où les nœuds sont les véhicules, qui communiquent de deux façons : soit entre eux (V2V), soit avec des infrastructures routières (V2I), pour améliorer la sécurité et l'efficacité du transport, comme illustré dans la figure 1.5 représentant ce réseau. . Ce type de réseau fonctionne sans infrastructure fixe et est basé sur une collaboration réactive et dynamique entre les véhicules et les unités routières (RSU), qui facilitent l'échange d'informations avec les systèmes intelligents de gestion du trafic. La mobilité élevée des véhicules entraîne une topologie dynamique, ce qui rend le routage et la gestion du réseau plus difficiles. Les véhicules partagent constamment des données nécessaires telles que la position, la vitesse et la direction, etc. Cette opération permet la configuration de réseaux de communication toujours instantanés et adaptatifs .

Les VANETs sont largement utilisés dans la gestion du trafic, la prévention des accidents, la navigation intelligente, ainsi que pour des services de paiement automatique et de

divertissement embarqué. Grâce à ces fonctionnalités, ils jouent un rôle clé dans la modernisation des transports, en rendant les routes plus sûres et les déplacements plus efficaces, où les véhicules peuvent détecter les menaces et les gérer [11].

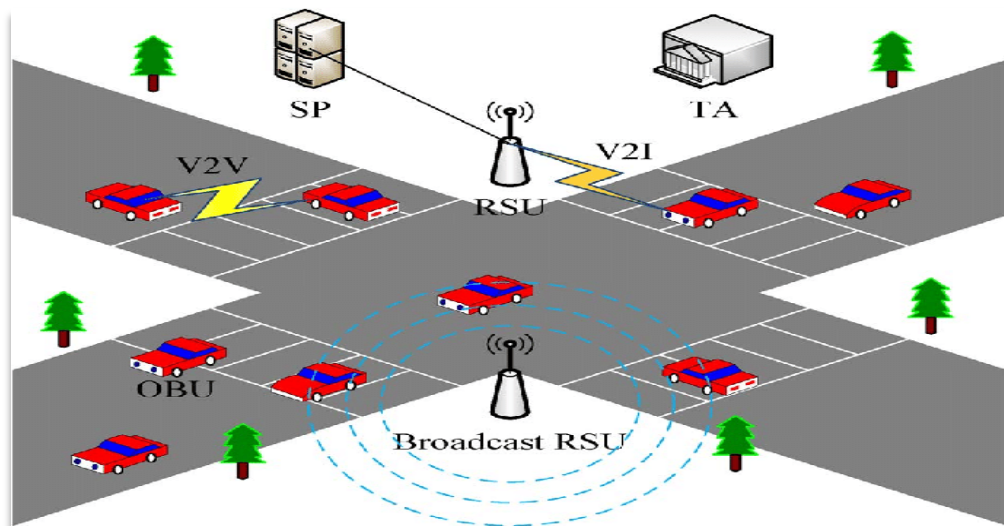


Figure 1.5 : Réseau VANET [12]

C. FANETs

FANET, appelé Flying Ad hoc Networks, est une extension des réseaux ad hoc MANET, car ils partagent différentes propriétés telles que le mouvement des nœuds, le manque d'infrastructure. Mais il a des caractéristiques spécifiques telles que la rapidité de la vitesse de déplacement des nœuds, une topologie hautement dynamique. Il est apparu pour garantir la communication entre les drones, connus sous le nom d'UAV. FANET est une collection de drones autonomes reliés entre eux par des technologies de communication sans fil comme le Wi-Fi, le LTE, etc. Ces appareils communiquent entre eux ou avec une base pour réaliser des buts partagés et exécuter des missions complexes. La figure 1.6 représente ce réseau.

Ce réseau est utilisé dans différents domaines, militaires ou civil. Il garantit la protection civile, la réalisation d'opérations de recherche, de sauvetage et de reconnaissance, l'analyse des conditions environnementales : le vent et la gestion du trafic [13-14-15].

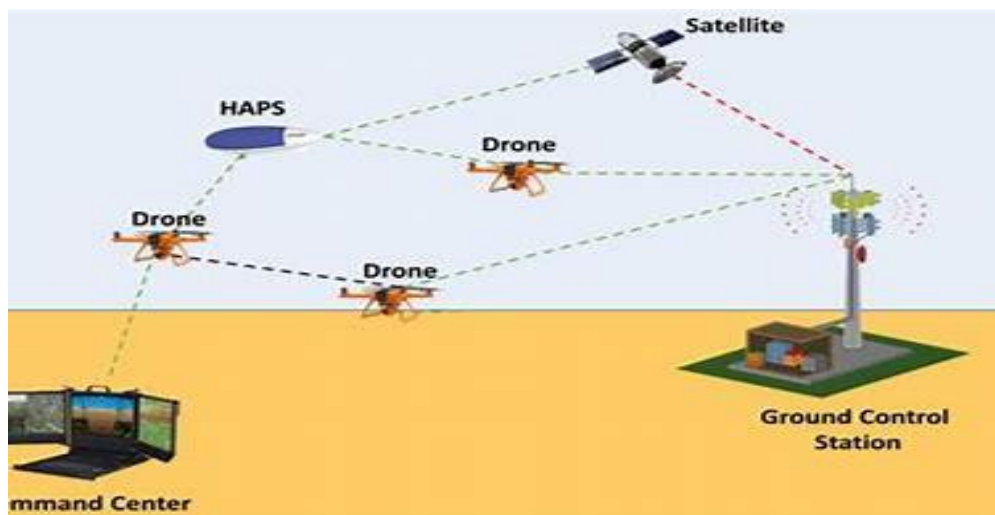


Figure 1.6 : Réseau FANET [16].

1.3 Les réseaux de drones

1.3.1 C'est quoi les drones

Les drones, ou véhicules aériens sans pilote (UAV), sont des appareils qui peuvent voler et travailler sans la présence d'un humain. Ils peuvent être contrôlés à distance ou fonctionner de manière autonome selon un itinéraire prédéfini. Ils ont différentes tailles et types de propulsion. Ils sont généralement équipés d'accessoires de surveillance et de contrôle, comme représenté dans la Figure 1.7. Ces appareils effectuent des missions sans besoin d'infrastructures supplémentaires. Parmi leurs avantages, la rapidité lors du démarrage et de la préparation de vol. Initialement, ils ont été utilisés dans le domaine militaire. Aujourd'hui, ils sont largement employés dans des domaines civils variés tels que l'agriculture, la protection de l'environnement, la sécurité publique et la gestion du trafic [17-18].



Figure 1.7: Drone DJI Mini 2 : drone léger avec caméra 4K [19].

1.3.2 Les catégories des drones

On divise les drones en différentes catégories selon leur environnement et leur utilisation : les drones terrestres, maritimes et aériens, chacun ayant des missions spécifiques. Avec l'avancement technologique, certains de ces drones sont désormais autonomes, capables d'effectuer des tâches complexes sans nécessiter de pilote, ce qui ouvre de nouvelles possibilités dans de nombreux domaines.

- Drones terrestres

Ces drones effectuent plusieurs missions au sol telles que le déminage, l'exploration de terrains, le transport de marchandises, la prévention des risques chimiques, la lutte contre les incendies, ainsi que le désherbage dans le domaine agricole [20].

- Drones maritimes

Ils sont essentiellement utilisés pour différentes missions telles que le déminage, la recherche sous-marine, la cartographie des fonds marins, l'intervention sur des installations sous-marines (comme les pipelines, les forages et les câbles sous-marins), ainsi que pour assurer la sécurité des côtes [20].

- Drones aériens

Ces drones sont les plus populaires et les plus utilisés, dans les secteurs civil et militaire. Ils couvrent une gamme très large de missions, telles que la surveillance, la destruction d'objectifs terrestres, la prise de vidéos et de photos, la création de modèles en 3D, ou encore l'inspection des relevés de terrain. Ils présentent une grande diversité de caractéristiques, allant de modèles compacts de 50 centimètres de large, télécommandés à distance, à des drones furtifs entièrement autonomes, avec des envergures dépassant parfois les dix mètres [20].

1.3.3 De l'utilisation individuelle des drones aux réseaux collaboratifs (FANETs)

Originellement, les drones sont utilisés de manière individuelle, soit contrôlés par un utilisateur à distance, soit programmés pour effectuer des tâches autonomes limitées. Au fil du temps, ces appareils se sont développés par l'intégration de capteurs avancés, de systèmes de navigation sophistiqués et de technologies de communication, ce qui permet de communiquer avec d'autres appareils. Ce développement a ouvert la voie à des systèmes multi-UAV.

Ces systèmes coopérants fournissent plusieurs avantages par rapport à l'utilisation individuelle : l'accomplissement des tâches en un temps réduit, couverture étendue, meilleure fiabilité et adaptabilité malgré les changements de l'environnement. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines comme l'agriculture, la surveillance des incendies, les opérations militaires ou la surveillance des frontières. Cette fonctionnalité, basée sur une communication directe entre drones sans infrastructure fixe, est appelée FANET (Flying Ad Hoc Network)[21].

1.3.4 Caractéristiques spécifiques des FANET

Les FANETs se distinguent par plusieurs caractéristiques uniques qui les différencient des autres types de réseaux ad hoc, tels que les MANETs et les VANETs. Voici les principales spécificités :

- Mobilité élevée et dynamique

Les drones dans une FANET se déplacent à une vitesse plus grande, de 30 à 460 km/h, et de façon inattendue, ce qui entraîne des changements fréquents de topologie du réseau. Cette forte mobilité provoque des problèmes de communication [13].

- La densité des nœuds

On définit la densité des nœuds, qui est le nombre moyen de nœuds par unité de surface. Dans les réseaux FANET, les drones sont répartis dans l'espace aérien, et la distance entre eux peut atteindre plusieurs kilomètres, même lorsqu'il s'agit de petits systèmes multi-UAV. En conséquence, la densité des nœuds dans les FANET est nettement inférieure à celle qu'on observe dans les MANET ou les VANET, où les dispositifs sont bien plus rapprochés [22].

- Changements fréquents de topologie

La structure du réseau est hautement dynamique en raison de la mobilité rapide des drones, la topologie de ce réseau change fréquemment par rapport aux autres réseaux ad hoc. La perte d'un drone conduit à la perte des liens partagés avec ce drone, ce qui entraîne une mise à jour de la topologie. Il y a aussi les coupures de connexion à cause des horaires d'UAV et les variations, ce qui affecte la topologie de FANET [22].

- Énergie suffisante

En fonction de leur taille et de leur type, les nœuds dans les réseaux FANET sont généralement considérés comme disposant de plus de Ressources énergétiques et puissance de calcul que ceux des MANETs. Cela s'explique par le fait que l'énergie demandée pour déplacer un UAV est bien plus importante que celle nécessaire au traitement des données [22].

- Modèle de propagation radio

Les réseaux FANET, ainsi que d'autres réseaux ad hoc, influencent les caractéristiques de propagation radio. Contrairement aux nœuds MANET et VANET, qui se trouvent généralement proches du sol et où la ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur est souvent obstruée, les nœuds FANET, étant éloignés du sol, peuvent être contrôlés à distance. Dans ce cas, une ligne de vue directe est généralement possible entre les véhicules aériens sans pilote [22].

- Localisation

Comme mentionné précédemment, les drones peuvent parfois se déplacer à grande vitesse et leur trajectoire peut être difficile à prévoir. En raison de leur vitesse et des changements

fréquents dans leur position, il est nécessaire de les localiser régulièrement. Cela permet de connaître leur emplacement sur le réseau pour échanger des données et prendre en compte leur altitude [23].

- Bande de fréquences

Les drones utilisent souvent des bandes de fréquences sans licence, comme celles de 0,9 GHz et 2,4 GHz, pour communiquer. Mais comme ces bandes sont partagées avec beaucoup d'autres appareils, elles peuvent vite devenir encombrées. Pour avoir une meilleure qualité de communication entre le drone et le sol dans un réseau FANET, la bande de 5 GHz avec la norme IEEE 802.11a donne de bons résultats. En plus, pour réduire les interférences, utiliser la fréquence de 5,9 GHz peut être encore plus efficace dans certains cas [23].

- Modèles de mobilité

Les modèles de mobilité pour les réseaux aériens (FANET) doivent être dynamiques, car le plan de vol prédéfini n'est pas toujours fiable. À chaque étape, il y a une transformation, ce qui implique un recalcul de l'itinéraire à chaque niveau de communication. De plus, différents modèles de mobilité sont utilisés en fonction de la nature et de l'application du routage. Chaque modèle présente des avantages et des inconvénients, ce qui permet de mieux comprendre la transmission des messages [23].

1.3.5 Modèles de mobilité utilisés dans les FANET

Il existe plusieurs modèles de mobilité couramment utilisés pour simuler les réseaux FANET. Ces modèles permettent de représenter différents types de déplacements des drones en fonction des scénarios étudiés. Voici quelques-uns des modèles de mobilité les plus utilisés :

- Modèle Random Waypoint

Dans les modèles de mobilité aléatoire, les drones peuvent se déplacer librement dans n'importe quelle direction à l'intérieur de la zone de simulation. Chaque drone sélectionne de manière indépendante sa destination, sa vitesse et sa direction en fonction de probabilités prédéfinies. Le modèle de points de cheminement aléatoires Random Waypoint est l'un des plus couramment utilisés pour représenter la mobilité dans diverses simulations. Cependant, ce modèle n'est pas adapté aux avions, car ceux-ci ne peuvent pas modifier brusquement leur trajectoire ni rester immobiles pendant une période prolongée. Contrairement aux mouvements réalistes des drones, ce modèle repose sur trois types de déplacements : avancer en ligne droite, tourner à gauche ou tourner à droite [24-25]. Comme illustré dans la figure 1.9 représentant ce modèle.

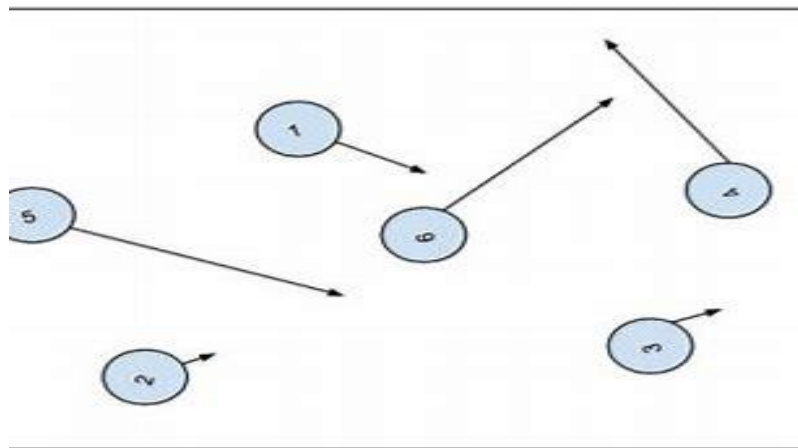


Figure 1.8 : Random Waypoint [26]

- Modèle de Mobilité basé sur le Plan de Mission

Le modèle MPB est basé sur une structuration préalable des trajectoires des nœuds, où les drones ont déjà les informations nécessaires de trajectoire pour leur déplacement. Cela signifie qu'ils sont guidés par un itinéraire défini de manière cohérente, en tenant compte des données disponibles sur les emplacements cibles potentiels. Comme illustré dans la figure, les aéronefs atteignent ainsi la zone de mission. Dans ce cadre, les fichiers de mobilité sont générés et mis à jour à intervalles réguliers après une certaine durée. Ce modèle de mobilité établit un schéma de déplacement spécifique pour les aéronefs se dirigeant vers ou s'éloignant de leur destination. Les points de départ et d'arrivée sont choisis de manière aléatoire pour chaque aéronef, tandis que la vitesse et la durée du vol sont définies à l'avance. Si l'aéronef atteint son point d'arrivée avant l'expiration du temps de vol prévu, il rebrousse chemin vers son point de départ et poursuit son déplacement sous forme de trajet aller-retour [27]. Comme illustré dans la figure 1.10 représentant ce modèle.

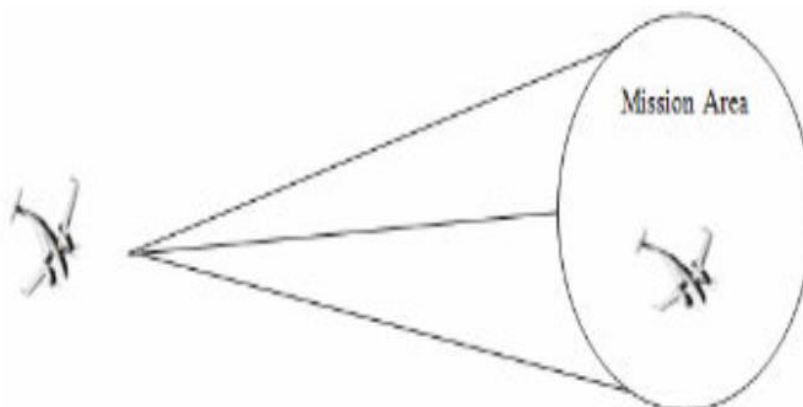


Figure 1.9 : Modèle de Mobilité base sur le Plan de Mission[28]

- Le modèle de Semi Random Circular Movement

Le modèle SRCM a été pensé pour représenter comment les drones se déplacent autour d'un point fixe dans le but de récolter des données. Contrairement à un drone qui reste sur place, ici, il est toujours en mouvement, en train de tourner autour d'une cible. En général, on définit à chaque drone un point de passage en fonction de ce qu'on attend de lui dans la mission. Ensuite, il suit un chemin bien défini, sans mouvements au hasard, pour que la zone à couvrir soit bien explorée [25-29]. La Figure 1.11 représente ce modèle.

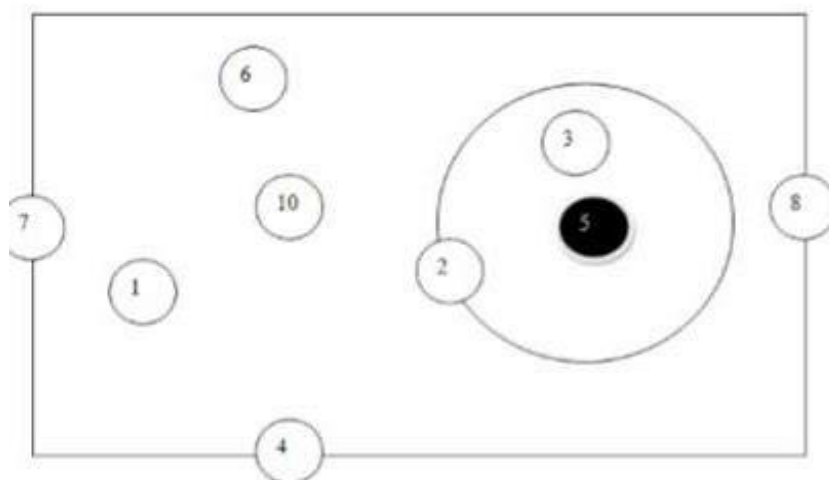


Figure 1.10 : Semi Random Circular Movement [30]

- Modèle de Mobilité Structuré en Grille

Le modèle de mobilité Manhattan Grid (MG) s'appuie sur une topologie en grille, semblable à un réseau de rues perpendiculaires, comme dans certaines grandes villes. Les drones y circulent en suivant des routes rectilignes, horizontales ou verticales. À chaque intersection, un drone peut soit continuer tout droit, soit changer de direction. Même si les trajectoires peuvent être ajustées, ce type de configuration limite tout de même la liberté de mouvement des nœuds dans l'espace géographique [13]. La Figure 1.12 représente ce modèle.

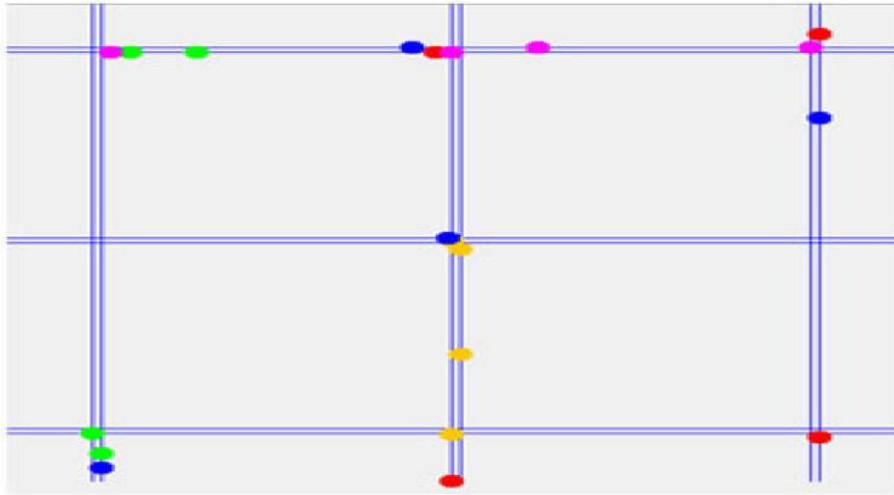


Figure 1.11 : Modèle de Mobilité Structuré en Grille [31].

- Modèle de mobilité de Gauss Markov 3D

Le modèle de mobilité Gauss-Markov (GMMM) est largement utilisé en raison de sa capacité à conserver une mémoire, ce qui permet un déplacement fluide des nœuds [32]. Ce modèle repose sur un paramètre de réglage qui influe sur le degré d'aléatoire du déplacement [14], offrant ainsi un équilibre entre mouvement prévisible et variations aléatoires.

Au départ, tout UAV se voit attribuer une direction et une vitesse précises. Ces valeurs initiales définissent le comportement de déplacement des nœuds dans l'environnement de simulation. Par la suite, à chaque intervalle de temps, la direction et la vitesse sont ajustées de manière probabiliste en fonction des valeurs précédentes [14], garantissant une évolution dynamique et cohérente des trajectoires. Comme illustré dans la figure 1.13 représentant ce modèle.

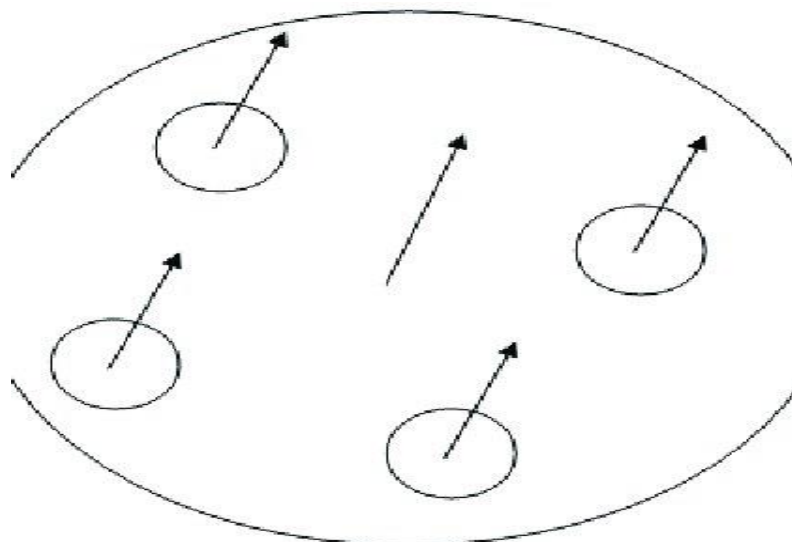


Figure 1.12 : Gauss Markov [33]

1.3.6 Modèles de communication dans FANET

Parmi les modèles de communication dans les réseaux des drones :

- UAV to UAV

Dans les réseaux de drones, la transmission des données s'effectue généralement de manière directe entre les UAV, sans passer par une infrastructure fixe, à l'aide de divers algorithmes de routage. Étant donné que la topologie de ces réseaux évolue fréquemment en raison de l'ajout ou du retrait d'UAV, assurer une communication stable nécessite d'explorer plusieurs trajectoires possibles. Pour y parvenir, on utilise des protocoles de routage adaptatifs, permettant aux UAV d'identifier dynamiquement les chemins de communication disponibles et de les ajuster en temps réel en fonction des modifications de la structure du réseau [13], comme illustré dans la figure 1.14.

- UAV to Infrastructure

La communication entre les drones et l'infrastructure nécessite un groupe de drones chargés d'interagir avec celle-ci, qu'il s'agisse d'une station terrestre ou d'un satellite. Dans ce mode de transmission, l'envoi d'instructions relatives aux missions à grande échelle est facile et implique un échange de données plus volumineux [13], comme illustré dans la figure 1.14.

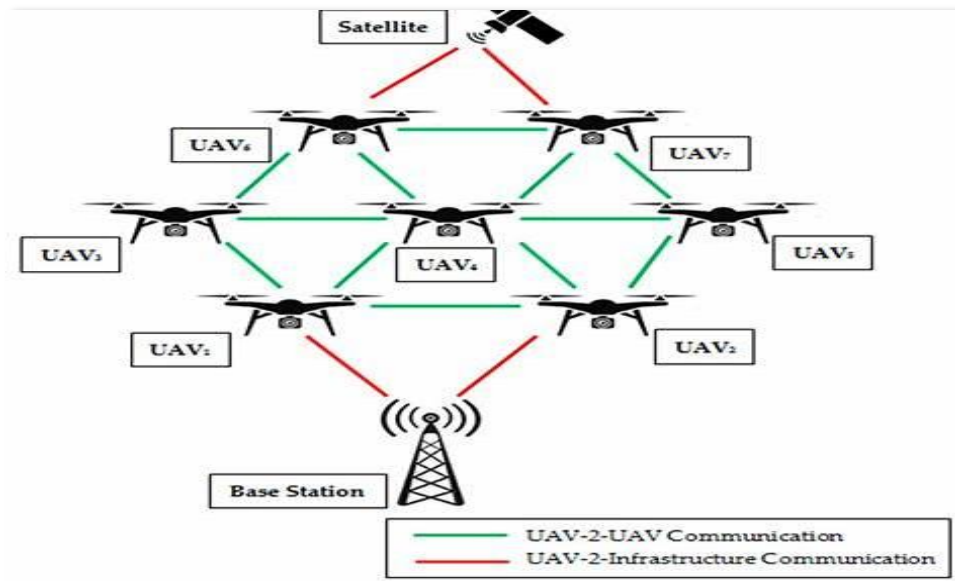


Figure 1.13 : Modèles de communication dans FANET [34]

1.4 Étude comparative des réseaux ad hoc

Le tableau 1.1 récapitule les principales caractéristiques et différences entre les réseaux MANET, VANET et FANET

Tableau1.1 : Étude comparative entre MANET, VANET et FANET [35]

Caractéristiques	MANET	VANET	FANET
Mobilité	Moyenne	Élevée (sur axe routier)	Très élevée (3D, rapide, imprévisible)
Topologie	Dynamique modérée	Très dynamique	Hautement dynamique
Énergie	Limitée (batteries portables)	Non contrainte (véhicule)	Très contrainte (drones)
Modèle de déplacement	Libre (piétons, mobiles divers)	Structuré (routes, intersections)	Complexe (vol 3D, libre)
Applications	Militaire, secours, capteurs	Sécurité routière, trafic	Surveillance, missions critiques
Défis	Routage, énergie	Sécurité, latence	Mobilité 3D, énergie, stabilité

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de réseaux mobiles, qu'ils soient avec ou sans infrastructure. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux réseaux FANETs, en examinant les drones qui les composent, leurs spécificités, ainsi que les modes de communication et de mouvement qu'ils utilisent. Enfin, nous avons présenté une comparaison entre les différents types de réseaux Ad hoc.

CHAPITRE 02

Routage et qualité de service dans les réseaux FANETs

2.1 Introduction

Assurer une communication efficace et fiable entre les nœuds des réseaux ad hoc, notamment les réseaux basés sur des drones (FANET), constitue un défi majeur. Il est donc impératif de concevoir et de mettre en œuvre des protocoles de routage spécifiquement conçus pour ces réseaux dynamiques. Par ailleurs la qualité de service (QoS) de ces réseaux est essentielle pour répondre aux besoins spécifiques des applications sensibles aux délais et aux performances. Ce chapitre inclut les détails des protocoles de routage conçus pour les réseaux FANETs, avec une attention particulière portée au protocole OLSR. Nous présenterons également les principaux enjeux liés à la qualité de service (QoS) ainsi que les métriques utilisées pour l'évaluer dans ce contexte.

2.2 Le routage dans les réseaux FANETs

Les réseaux ad hoc aériens de drones, communément appelés FANETs, est une technologie innovante permettant l'échange d'informations entre véhicules aériens sans pilote utilisé dans les villes intelligentes et pour les domaines de sécurité. Ces réseaux se distinguent par leur forte mobilité, leur nature dynamique, ainsi que des contraintes spécifiques en termes de ressources et de qualité de service.

Les protocoles de routage classiques ont été conçus à l'origine pour des réseaux où les appareils bougent lentement, comme les téléphones ou les voitures sur terre. Mais dans un réseau de drones (FANET), les choses vont beaucoup plus vite : les drones changent rapidement de position, les connexions entre eux se coupent souvent, et il faut aussi faire attention à ne pas consommer trop d'énergie. Ces protocoles classiques ne prennent pas bien en compte ces particularités, et ils ne garantissent pas non plus une bonne qualité de service (comme la rapidité ou la fiabilité de la communication), ce qui les rend peu efficaces dans ce type d'environnement.

C'est pourquoi des protocoles spécifiques, adaptés aux particularités des FANETs, sont nécessaires pour garantir des communications fiables et efficaces.

2.2.1 Les protocoles de routage spécifique au réseau FANETs

- Le protocole ICRP

Le protocole ICRP (Inter-Cluster Routing Protocol) est un protocole de routage conçu pour les réseaux FANETs, basé sur les colonies de fourmis et les fonctions de phéromone pour le routage inter-cluster [43].

Fonctionnement

Le protocole est basé sur deux mécanismes complémentaires :

La formation de clusters : qui désigne le regroupement des drones en sous-ensembles pour permettre de diminuer la complexité du réseau, dans laquelle chaque groupe est géré par un chef. Cela améliore la scalabilité et limite le nombre de messages de contrôle, ce qui évite la surcharge du réseau.

L'optimisation par colonie de fourmis (Ant Colony Optimization - ACO) : l'idée vient du comportement des fourmis dans la nature. Cet algorithme détecte différents chemins entre clusters en utilisant des agents virtuels qui jouent le rôle des fourmis. Ces agents déposent des traces de phéromones virtuelles qui permettent au protocole de choisir progressivement les routes optimales selon des critères spécifiques tels que la distance, la qualité du lien et la consommation énergétique.

Pour la mise à jour dynamique et adaptative des valeurs de phéromone, le protocole intègre un mécanisme similaire à celui de *Physarum polycephalum*, dans le but d'assurer un routage inter-cluster plus stable et fiable dans des conditions de mobilité élevée [43].

Avantages

Ce protocole de routage est :

- Efficace et fiable, améliore la scalabilité.
- Réduit la consommation d'énergie, ce qui est crucial pour la durée de vie limitée des drones.
- Consomme moins de ressources grâce à la division du réseau en groupes, ce qui diminue la quantité globale de messages de contrôle.
- Ce protocole repose sur la coopération distribuée des drones et l'usage de mécanismes d'intelligence collective pour assurer un routage efficace dans un environnement instable et exigeant [43].

Inconvénients

Ce protocole de routage présente néanmoins certaines limites :

- Complexité élevée, en raison de la combinaison de plusieurs techniques (clustering, ACO, mécanisme de *Physarum*).
- Surcharge possible des chefs de clusters, responsables de la gestion locale et de la coordination inter-cluster.
- Temps de convergence potentiellement plus long, à cause des mises à jour fréquentes et adaptatives des valeurs de phéromone.
- Trafic de contrôle non négligeable, notamment lors des échanges entre clusters.
- Forte dépendance aux paramètres de configuration (taux d'évaporation, poids des métriques, etc.), nécessitant un réglage précis.
- Scalabilité limitée dans les réseaux très denses, où la gestion des clusters devient plus complexe [43].

- Le protocole BC-DSR

Le protocole BC-DSR (Betweenness Centrality - Dynamic Source Routing) est spécifiquement conçu pour les FANETs organisés en formation de drones, regroupés et coordonnés vers un objectif commun. Ce protocole est basé sur deux approches principales :

- a) L'intégration d'un modèle de mouvement de type groupe gaussien-markovien (GMG), qui simule des déplacements réalistes où les drones gardent une certaine cohésion tout en se déplaçant librement.
- b) Il exploite la centralité d'interconnexion pour créer des trajectoires robustes et efficaces.

Le modèle de groupe gaussien-markovien est basé sur le regroupement des nœuds en sous-ensembles. Chaque groupe a un leader choisi et changé périodiquement selon des critères. Les autres nœuds sont des nœuds ordinaires et se déplacent autour de ce leader dans un rayon donné [36].

Avantages

Parmi les avantages de ce protocole, qu'il est conçu pour répondre aux contraintes spécifiques des réseaux FANETs : la mobilité 3D, la variabilité topologique, et les besoins de qualité de service. Il réduit la surcharge du réseau en utilisant les drones les plus importants comme relais. De plus, il est adapté aux réseaux dynamiques où les drones bougent rapidement [36].

Inconvénients

Le protocole BC-DSR, bien qu'efficace pour améliorer la fiabilité du routage dans les FANETs en formation structurée, présente plusieurs limites. Il nécessite des calculs locaux complexes de centralité d'intermédierité, ce qui peut alourdir la charge sur les drones. Son fonctionnement repose sur un modèle de mobilité spécifique (Gauss-Markov groupé), ce qui le rend moins adapté aux scénarios non structurés. Enfin, son approche de routage à source entraîne une augmentation de la taille des paquets, ce qui peut nuire aux performances dans les réseaux très dynamiques ou de grande taille [36].

Fonctionnement de protocole

Comme l'indique son nom, le protocole BC-DSR, il utilise l'information de centralité d'intermédierité pour l'évaluation de l'importance de chaque drone dans le réseau. La centralité est calculée localement par chaque nœud, dans le but de mesurer à quel point le nœud se trouve sur les chemins entre d'autres drones. Lors de la construction d'un chemin, les chemins passent principalement par des nœuds présentant une centralité d'intermédierité élevée, à l'aide d'un graphe pondéré dont les poids des liens sont inversement proportionnels à la somme des centralités d'intermédierité des deux nœuds connectés. Cela améliore la fiabilité des communications, notamment dans les topologies dynamiques.

Le routage se fait selon la position des drones :

- a) Si la source et la destination sont dans le même groupe, le protocole utilise un algorithme classique (Dijkstra) pour détecter le plus court chemin parmi les membres de ce groupe.
- b) Si la source et la destination sont dans des groupes différents, il fait passer les paquets vers un leader de groupe, puis à un autre jusqu'au leader du groupe de destination. Ensuite, il utilise Dijkstra pour atteindre la destination.

Il utilise la centralité pour sélectionner les meilleurs nœuds centraux entre les groupes [36].

- Le protocole de routage SFA-OLSR

Le protocole SFA-OLSR (Smart Filtering-based Adaptive Optimized Link State Routing) est une amélioration du protocole OLSR classique, conçue spécifiquement pour les réseaux ad hoc volants (FANETs). Ce protocole utilise trois phases pour améliorer la fiabilité et la performance du routage [37].

Ajustement adaptatif de la période d'envoi des messages HELLO

Chaque nœud prédit sa prochaine position en utilisant sa vitesse et ses angles de déplacement (horizontaux et verticaux), puis il compare la position prédite à sa position réelle (obtenue par GPS) à l'aide de la similarité cosinus

$$CSim = \frac{x \sim x + y \sim y + z \sim z}{\|P\| \cdot \|P\|} \dots \dots \dots 2.1$$

Si la trajectoire est stable ($CSim \geq 0.75$), la période d'envoi Δt est conservée ou légèrement augmentée, donc le nombre de paquets HELLO est diminué pour réduire la surcharge réseau.

Sinon, Δt est réduite, ce qui augmente le nombre de paquets HELLO pour mettre à jour plus rapidement les voisins, mais cela peut entraîner une surcharge de trafic.

Les messages HELLO contiennent des champs supplémentaires : coordonnées 3D, vitesse, angles de déplacement et énergie résiduelle [37].

Filtrage intelligent des voisins directs et fiables

C'est-à-dire ceux qui ont une durée de liens élevés et une énergie résiduelle importante (extraite des messages HELLO), sont filtrés avant la sélection des relais Multi-Point Relays (MPRs) [37].

Sélection optimisée des MPRs avec l'algorithme SSA

Les relais MPRs sont finalement choisis à l'aide de l'algorithme SSA, qui s'inspire du comportement des moineaux lorsqu'ils cherchent de la nourriture en groupe.

Le protocole optimise les MPRs en utilisant une fonction de fitness multi-objectifs selon trois paramètres : l'énergie résiduelle, la durée de vie du lien, le degré de voisinage (nombre de nœuds couverts) [37].

Avantages

SFA-OLSR permet de s'adapter dynamiquement aux changements de topologie, tout en assurant une qualité de service élevée (débit, délai, ratio de livraison) [37].

Inconvénients

SFA-OLSR présente quelques limites : il génère une **surcharge** importante, consomme plus d'énergie en raison de sa complexité, et son implémentation est plus difficile. De plus, le temps de convergence peut être variable [37].

2.2.2 Le protocole de routage Optimized Link State Routing

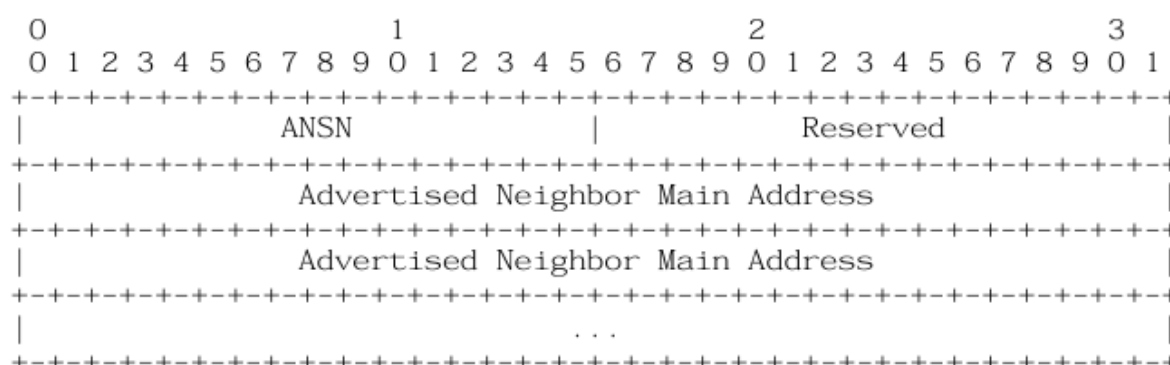


Figure 2.2: Format de paquet TC [39].

Les relais multipoints

Les MPR sont des sous-ensembles minimaux des voisins symétriques (liens vérifiés dans les deux sens) à un saut. Ils sont choisis périodiquement par chaque nœud grâce à l'échange périodique des messages Hello. La sélection des MPR se fait de manière à couvrir un maximum de voisins à deux sauts, afin de minimiser les transmissions inutiles et les redondances d'informations. Les MPR sont les seules nœuds qui ont le droit de générer et envoyer des messages [40].

Etat de lien

Il existe quatre types de lien dans le protocole OLSR :

- **Lien symétrique** : indique que le lien a été confirmé dans les deux sens, ce qui permet une communication bidirectionnelle fiable.
- **Lien asymétrique** : indique que le nœud reçoit les messages HELLO envoyés par ses voisins, mais ne peut pas encore envoyer de messages dans le sens inverse, ce qui signifie que le lien n'est pas encore valide.
- **Lien MPR** : Cela signifie que le nœud a choisi ce voisin comme relais multipoint et que le lien entre eux est symétrique.
- **Lien Perdu** : Indique que le lien concerné a été rompu et n'est plus utilisable.

Fonctionnement

Le fonctionnement de ce protocole peut-être résumé dans les phases suivantes :

a. Détection de voisinage

Chaque nœud doit détecter ses voisins directs ainsi que la nature de ses liens avec eux, et également identifier ses voisins à deux sauts afin de procéder à l'élection des MPRs.

Pour cela, des paquets HELLO sont envoyés périodiquement. Ces paquets contiennent des informations sur les voisins du nœud émetteur et sur le type de lien (symétrique ou asymétrique) avec chacun d'eux. Ils peuvent également inclure les voisins qui ont été sélectionnés comme MPRs.

Seuls les voisins directs (à un saut) reçoivent ces messages HELLO. Ainsi, lorsqu'un nœud reçoit un message HELLO, il peut en conclure que l'émetteur est l'un de ses voisins directs, et l'ajoute à sa liste de voisins à un saut. En même temps, il extrait les informations sur les autres voisins mentionnés dans le message HELLO, et les ajoute à sa liste de voisins à deux sauts.

Lorsqu'il envoie ensuite son propre message HELLO, l'émetteur initial reçoit ce message en retour et voit son propre identifiant dans la liste des voisins du récepteur. Il peut alors déduire que le lien est symétrique [40].

b. Election des MPR

Quand un nœud reçoit les messages HELLO de ses voisins, il découvre ses voisins directs et indirects (à deux sauts). Il utilise ces informations pour choisir un petit groupe de voisins capables de relayer ses messages à tous ses voisins à deux sauts : ce sont les MPRs.

Chaque nœud choisit ses MPRs tout seul. Une fois choisis, il les informe en les ajoutant dans ses messages HELLO.

Lorsque un nœud voit qu'il est mentionné comme MPR dans les HELLO qu'il reçoit, il met à jour une table spéciale qui lui dit qui l'a sélectionné et à quel moment (grâce à un numéro de séquence).

Ce système permet de faire circuler les messages dans tout le réseau sans trop de répétitions inutiles. [40]

c. Diffusion de topologie

Chaque nœud MPR diffuse le message TC périodiquement dans tous les réseaux. Les messages TC contiennent la liste des nœuds qui l'ont choisi comme MPR. Un nœud qui reçoit tous les MPR diffuse dans les réseaux peu construire la topologie des réseaux et ensuite construire la table de routage.

La diffusion de topologie passe par 3 étapes

d. La déclaration des interfaces multiples MID

Dans OLSR, lorsqu'un nœud possède plus d'une interface réseau, il informe les autres nœuds que ses différentes adresses IP sont liées à un même nœud physique, en diffusant périodiquement un message spécial appelé MID, qui contient toutes les adresses des interfaces rattachées au nœud ainsi que l'adresse principale associée.

Tous les nœuds du réseau reçoivent et stockent ces informations sous forme de triplets (adresse_interface, adresse_principale, durée_validité).

Cela permet de reconnaître que différentes adresses IP appartiennent à un seul nœud, ce qui est essentiel pour un routage précis dans les réseaux à interfaces multiples [40].

e. Le calcul de la table de routage

Pour calculer la table de routage, on utilise les informations provenant de la table des voisins et de la table de topologie. Ainsi, en cas de modification de l'une de ces deux tables, la table de routage doit être recalculée afin de mettre à jour les informations sur les chemins vers toutes les destinations du réseau [40].

f. Le calcul des routes

Chaque nœud maintient sa propre table de routage pour déterminer vers quel nœud relais acheminer un paquet afin d'atteindre une destination. Le calcul de la route fait étapes par étape au début toutes les tables sont vidées pour repartir sur une base propre. Après on insère les voisins directs (symétriques) dans la table de routage, on parcourt la table topologie pour chaque $h = 1$, on vérifie l'absence de destination dans table de routage, et que le dernier saut est connu, alors on ajoute une nouvelle entrée et on continue l'itération. Puis complété la table de routage en ajoutant les interfaces secondaires des nœuds, grâce aux messages MID. Enfin, on ajoute les routes spécifiques vers les hôtes ou sous-réseaux annoncés [40].

2.3 Qualité de service dans les réseaux de drones

La qualité est définie selon Deming et la norme ISO 9000:2015 comme la capacité à satisfaire les besoins des utilisateurs. Dans l'informatique des réseaux, la qualité de service (QoS), selon la RFC 2386, est l'assurance d'un ensemble de garanties pour permettre le transport efficace des données d'une source vers une destination, en respectant les exigences des utilisateurs comme le débit, le délai et la fiabilité.

L'importance de la Qualité de Service (QoS) est primordiale dans les réseaux de drones, car elle assure une communication optimale, même dans des environnements dynamiques et parfois perturbés. Dans le contexte des FANET, il est essentiel de prendre en considération divers critères de qualité de service afin de garantir une gestion efficace des ressources du réseau [38].

2.3.1 Métriques de qualité de service

Il existe plusieurs métriques permettant de mesurer la qualité de service et de répondre aux besoins des utilisateurs. Ces métriques peuvent être de différentes natures : additives, concaves ou multiplicatives

- **Additives** : ils sont calculé par l'addition des valeurs de chaque lien pour chaque saut, par exemple : pour le délai on fait la somme des délais de tous les liens.
- **Concave** : on prend la valeur minimale entre tous les valeurs, par exemple pour la bande passante on prend la valeur minimale entre les valeurs de tous les liens
- **Multiplicatives** : Ils sont calculé par la multiplication des probabilités sur tous les liens [38].

Parmi les métriques de qualité de services :

La bande passante

La bande passante est la capacité du réseau à transmettre des données dans une unité de temps, plus elle est grande plus il est possible de transmettre de grandes quantités des données simultanément. La bande passante est une métrique concave importante pour garantir la qualité de service.

Délai de bout en bout

Le délai de bout en bout est le temps nécessaire pour la transmission des données allant du nœud source jusqu'au nœud de destination. Ce délai se compose de trois composants :

-Le délai de propagation: C'est le temps de parcours sur le lien physique. Il dépend de la topologie du réseau, tel que la densité a un impact sur le routage des paquets. Une densité élevée ou une topologie complexe peut allonger le chemin et, par conséquent, augmenter ce délai. Par ailleurs, l'étendue du réseau et la distance entre l'émetteur et le récepteur influencent également ce délai.

- Délai de traitement : Le délai de traitement est le temps requis par un nœud du réseau pour analyser et gérer un paquet. Il dépend de la capacité des routeurs à gérer les files d'attente et les politiques de priorité mises en place.

-Le délai de transmission : est le temps nécessaire pour envoyer toutes les données. Il dépend du volume de l'information transmise, de la charge du réseau et du partage de la bande passante.

Afin de garantir un bon délai de bout en bout, il faut utiliser des mécanismes pour améliorer le traitement et la transmission des données en prenant en compte les trois composants de délai mentionnés (propagation, traitement, transmission).

La gigue

Les performances des équipements du réseau qui traitent les paquets diffèrent les uns des autres (certains sont plus rapides, d'autres plus chargés). Cette différence peut entraîner des variations du délai de transmission bout en bout cette variation est appelée « gigue », ce qui affecte la qualité de service. Pour y remédier, il est nécessaire d'utiliser des mécanismes d'ordonnancement.

La perte des paquets

Parfois, quand le réseau est surchargé ou que des erreurs surviennent dans les données, certains paquets envoyés par l'émetteur n'arrivent pas à destination. Pour mesurer la perte de ces paquets, une métrique spécifique appelée « taux de perte » permet de le faire.

2.3.2 Limites et défis des protocoles de routage avec QoS dans les FANETs

Haute mobilité des UAVs

La mobilité et la nature dynamique des UAVs, peut entraîner des changements fréquents de topologie. Les protocoles de routage classique ne peuvent pas gérer cette mobilité élevée, ce qui affecte la stabilité des routes [42].

Délai de transmission

Quelque protocole génère une latence supplémentaire due à la découverte de routes à la demande et des autres protocoles comme OLSR sont plus rapides mais introduisent un surcoût (overhead) dû aux mises à jour fréquentes, ce qui peut affecter la QoS [42].

Taux de livraison de paquets instable

La mobilité élevée entraine une perte fréquente de paquets. Le taux de livraison de paquets est très important pour mesurer la performance du protocole [42].

Consommation énergétique

La consommation d'énergie du réseau de drones est élevée en raison de l'échange continu de messages de contrôle et des mises à jour régulières des tables de routage, ce qui affecte la durabilité du réseau et la qualité du service fourni [42].

Scalabilité limitée

Certains protocoles réactifs montrent des limites d'adaptabilité aux réseaux de grande taille, en raison du coût élevé, en temps et en bande passante, associé à la découverte de routes [43].

Qualité de l'expérience (QoE) pour le multimédia

Quand on transmet de la vidéo dans le réseau, les valeurs des mesures de qualité d'image PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) et SSIM (Structural Similarity Index) peuvent être bons. Mais, les valeurs de mesure VQM (Mesure de la qualité vidéo) montre que la qualité est dégradée, surtout avec DSDV. Cela signifie que même si la QoS (données techniques) est correcte, l'utilisateur peut avoir une mauvaise expérience (image saccadée, floue, etc.) [42].

2.3.3 Travaux antérieurs basé sur le protocole OLSR

Plusieurs recherche existants concerne au l'amélioration du protocole OLSR dans les réseaux FANETs, notamment autour de la sélection des MPRs grâce auxquels la qualité de service est améliorée, ou la mobilité et l'énergie sont adaptées.

OLSR amélioré avec la mobilité

Des version modifiée de l'OLSR pour les FANET a été proposée qui prenant en compte la mobilité élevée. P-OLSR, proposé par Jacquet et al. [45] les informations de position GPS pour anticiper les changements de topologie et améliorer la stabilité des liens. Un autre protocole proposé par Li et al [46] Trajectory-OLSR utilise les trajectoires prédictives des drones pour guider la sélection des routes optimale dans un environnement dynamique. Cependant, Ces méthodes comptent beaucoup sur la justesse des données GPS, mais elles

peuvent vite perdre en efficacité si les drones changent brusquement de direction ou si le signal GPS devient instable.

OLSR basé sur l'énergie

Des travaux proposés comme EEM-OLSR par Safa Laqtib et al dans [47] qui basé sur l'intégration du critère énergétique dans le choix des MPRs. Les nœuds qui ont une énergie faible ne seront pas choisis comme MPR. Parmi les problèmes de ce protocole la non considération de la mobilité des nœuds et la durabilité des liens.

OLSR avec critères multiples

Certaines propositions on introduit des extensions QoS-aware dans OLSR, en prenant en compte des facteurs tels que la bande passante, la latence ou encore la congestion du réseau. À ce titre, LD-OLSR, proposé par Jain et Kashyap [48] et Cruz [49], ont proposé des architectures de routage s'appuyant sur l'utilisation de métriques multiples pour la sélection des routes les plus adaptées aux contraintes des FANET.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé un ensemble de protocoles de routage utilisés dans les réseaux FANETs, en insistant sur leurs points forts et leurs insuffisances face aux défis imposés par la mobilité élevée et les restrictions énergétiques propres à ces réseaux. Nous avons aussi concentrés sur les indicateurs de base de la qualité de service (QoS), ainsi que sur les défis essentiels et concrets liés au mouvement rapide des drones et à leurs besoins en énergie. C'est sur la base de ces analyses que nous allons construire notre nouvelle approche pour la sélection des meilleurs MPR dans les réseaux FANET.

CHAPITRE 03

Contribution et Validation

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre idée proposée autour de l'amélioration du protocole OLSR pour qu'il soit adaptable aux réseaux FANET. Puis, nous montrerons toutes les étapes de réalisation avec les résultats de simulation des deux protocoles : OLSR standard et OLSR modifié, en comparant les paquets reçus totaux.

3.2 Notre contribution

Afin d'améliorer les performances et d'assurer la qualité de service du protocole de routage OLSR dans des environnements dynamiques tels que les réseaux de drones, nous proposons une version optimisée appelée RS-OLSR (Relative Speed-OLSR). RS-OLSR introduit une nouvelle méthode de sélection des MPRs, en tenant compte de trois critères :

- La vitesse relative entre le nœud et ses voisins.
- L'énergie résiduelle des nœuds.
- Le degré d'accessibilité.

3.3 Fonction objective

L'objectif principal de notre proposition est de sélectionner les relais multipoints de manière efficace et d'assurer une meilleure stabilité des routes, une consommation énergétique équilibrée et une couverture efficace du réseau. Pour cela, nous introduisons une fonction qui repose sur les trois critères cités ci-dessus. Cette fonction a pour but de minimiser un coût global. Les trois critères sont réunis dans une seule fonction objective :

$$F = w1 * Vr + w2 * \frac{1}{E} + w3 * \frac{1}{r} \dots \dots \dots 3.1$$

$$w1+w2+w3=1 \quad \text{et} \quad \text{énergie} \geq 10$$

Où :

Vr : La vitesse relative pour privilégier les voisins stables et peu mobiles.

E : L'énergie résiduelle pour éviter les voisins ayant une faible énergie.

r : Le degré d'accessibilité pour minimiser le nombre de MPR choisis (Choisir les voisins qui couvrent le maximum de voisins à deux sauts).

3.4 Les principes de notre proposition

- Nous modifions le contenu des messages HELLO pour échanger, en plus des informations existantes, les valeurs de vitesse et d'énergie résiduelle de chaque nœud.
- Lors de la réception des messages HELLO, chaque nœud calcule la vitesse relative entre lui et son voisin.
- Chaque nœud calcule un coût pour chacun de ses voisins à l'aide la formule **3.1**.

- La sélection des MPRs se fait en privilégiant les voisins ayant le coût le plus faible, garantissant ainsi une couverture optimale avec une utilisation minimale des ressources.
- Dans notre proposition, nous modifions le paquet HELLO standard pour qu'il porte les informations suivantes : la vitesse (Speed) et l'énergie (Energy) pour chaque nœud voisin, comme illustré dans la figure 3.1.

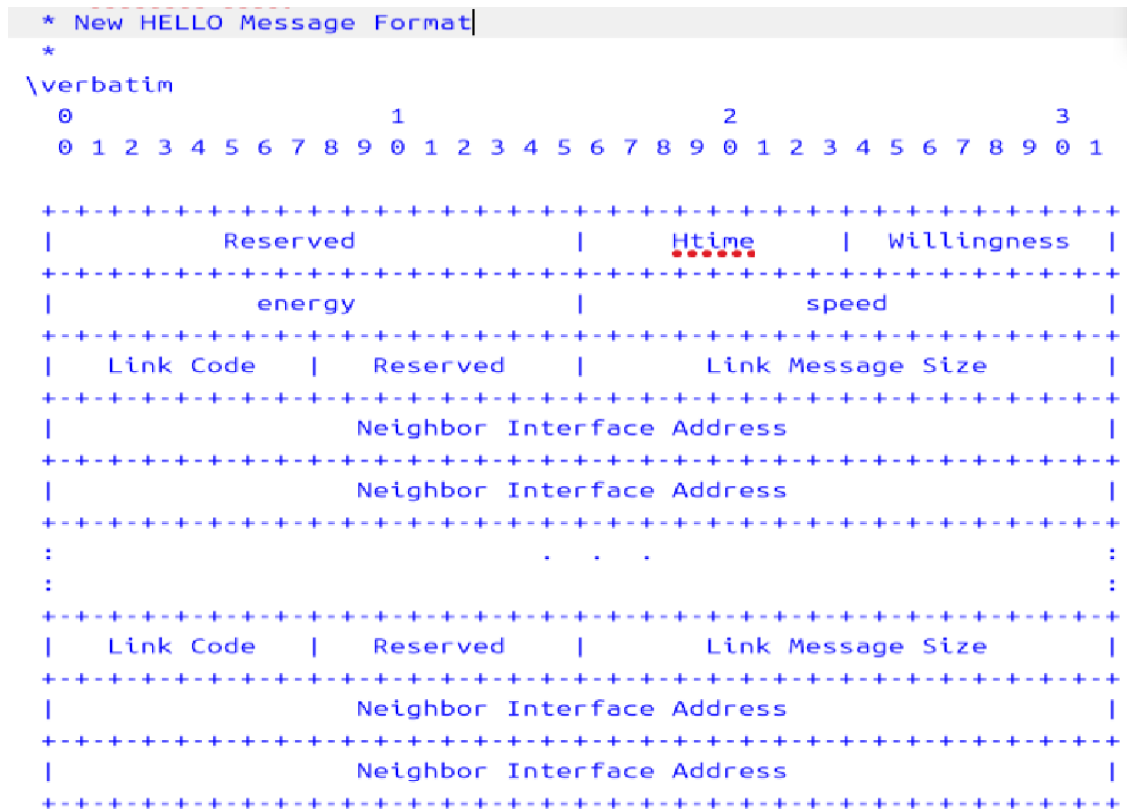


Figure 3.1 : Nouveaux format de message Hello

3.5 Étapes de réalisation dans NS3

a. Nous ajoutons deux champs énergie et speed dans les paquets HELLO :

Dans cette étape, nous nous reposons sur ces deux fichiers :

- olsr-header.h : pour la déclaration des champs
- olsr-header.cc : pour faire la sérialisation et la désérialisation des champs

b. Envoi des messages HELLO :

Dans cette étape, nous nous reposons sur les fichiers suivants :

- Fichier olsr-routing-protocol.cc
- Fichier olsr-routing-protocol.h

Dans la fonction `SendHello()` (fichier `olsr-routing-protocol.cc`), chaque nœud :

- Récupère son énergie actuelle (`BasicEnergySource`).
- Récupère sa vitesse via le modèle de mobilité.
- Ajoute ces informations au message HELLO.

c. Réception et traitement des messages HELLO :

Dans cette étape, nous nous repons sur les fichiers précédents de la 2^e étape et sur un autre fichier `olsr-repositories.h`.

- `olsr-repositories.h` : pour ajouter une variable coût dans struct `NeighborTuple` (la table de voisinage).

Dans la fonction `ProcessHello()`, le nœud :

- Calcule la vitesse relative par rapport au voisin.
- Récupère la valeur de l'énergie du voisin
- Calcule le coût

d. Sélection des MPR selon le coût calculé

Dans la fonction `MprComputation()` le nœud :

- Récupère les coûts des voisins.
- Choisit les MPRs ayant les plus faibles coûts.

e. Intégration du modèle d'énergie aléatoire et du modèle de mobilité 3D :

Fichier de simulation : `manet-routing-compare.cc` :

- Nous avons introduit le modèle `BasicEnergySourceHelper` avec énergie initiale aléatoire entre 300 et 180 J dans tout les nœud.
- Nous avons introduit le modèle de mobilité Gauss Markov .

f. Conditions supplémentaires :

- Si l'énergie d'un nœud est < 10 J, il n'envoie plus de paquets HELLO.
- Si l'énergie d'un nœud est < 10 J, il ne reçoit plus de paquets HELLO.

7. Modèle de communication : UAV to UAV et UAV to Base Station .

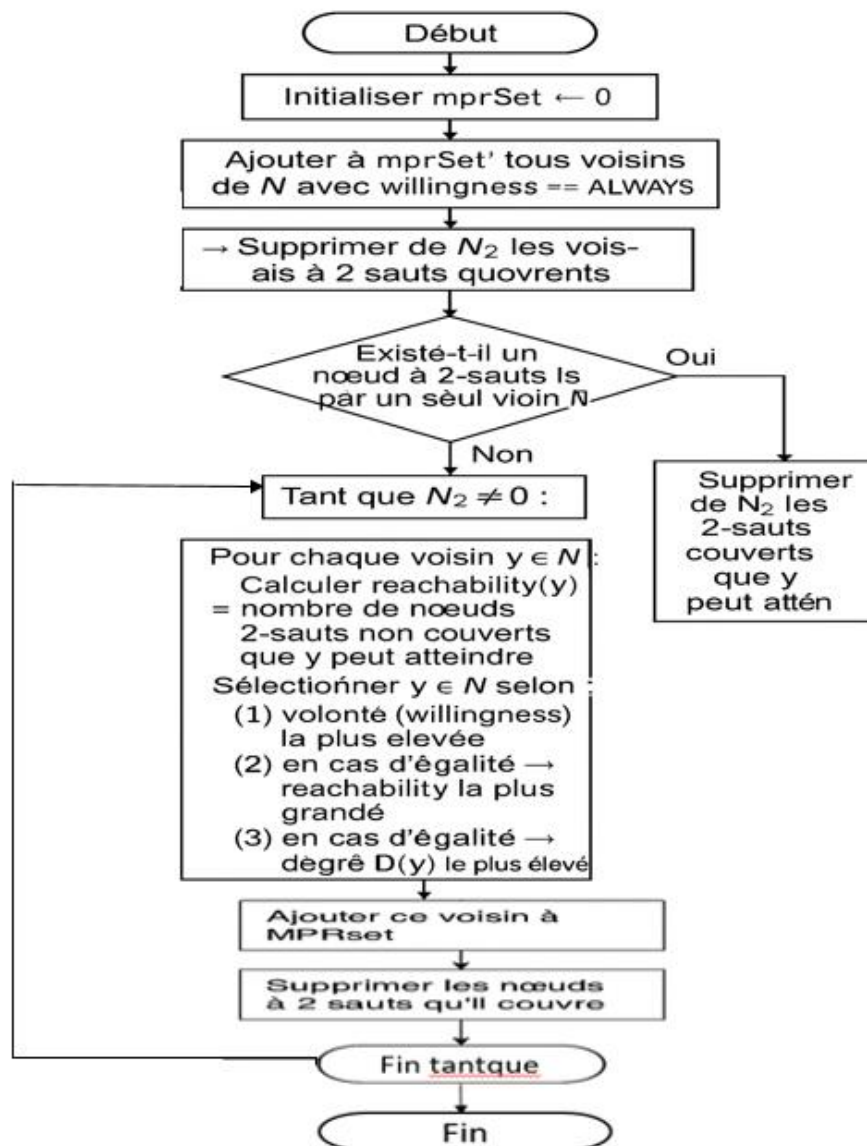
Nous modifions la partie responsable de l'échange des données dans le fichier de simulation `manet-routing-compare.cc`

3.6 Rappel sur le mécanisme de sélection des MPR dans OLSR standard

Comme indiqué dans le code source de NS-3, l'algorithme de sélection des MPR repose sur la stratégie de couverture minimale des voisins non couverts par le biais de la fonction

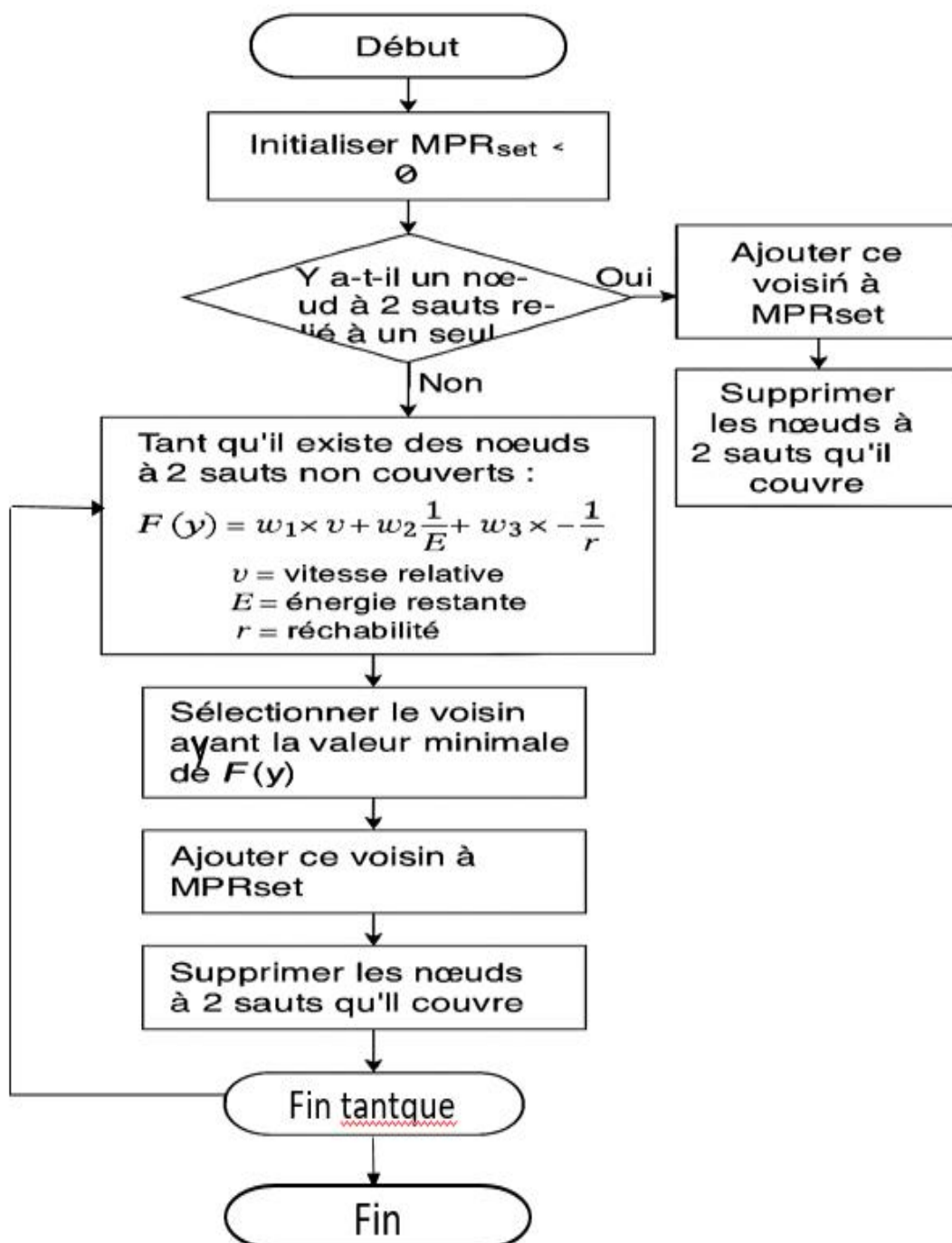
MprComputation(). L'algorithme suivant montre les étapes de sélection des MPR dans OLSR standard.

Algorithme 3.1 : Le mécanisme de sélection des MPR dans OLSR standard



3.7 Le mécanisme de sélection des MPR dans RS-OLSR

Algorithme 3.2 : Le mécanisme de sélection des MPR dans RS-OLSR



3.8 Exemple d'application de la sélection des MPR

Nous supposons que le nœud **A** possède quatre voisins : **B**, **C**, **D** et **E**.

Chacun de ces voisins est caractérisé par trois critères : la vitesse relative, l'énergie résiduelle et le degré d'accessibilité.

Les poids attribués à chaque critère sont les suivants :

- $W_1 = 0.3$ pour la vitesse relative,
- $W_2 = 0.3$ pour l'énergie,
- $W_3 = 0.4$ pour le degré d'accessibilité.

La vitesse du nœud **A** est de 14 m/s

Tableau 3.1 : Les valeurs des critères de chaque nœud dans l'exemple.

Voisin	Vitesse(m/s)	Énergie (J)	Le degré d'accessibilité
B	9	100	4
C	10	80	5
D	15	50	3
E	12	60	6

Nous effectuons la normalisation des critères énergie et le degré d'accessibilité dans l'intervalle [0, 15] à l'aide de la formule suivante :

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * 15 \dots \dots \dots 3.2$$

Les intervalles initiaux utilisés dans chaque critère sont :

- Énergie : [10, 300]
- Le degré d'accessibilité : [1, 31]
- Vitesse relative : [0, 15]

Tableau 3.2: Calcul du coût pour chaque voisin

Voisin	Vitesse relative(déjà normalisée)	1/Énergie (après normalisation)	1/ degré d'accessibilité (aprèsnormalisation)	Coût (F)
B	5	0.215	0.667	1.83
C	4	0.276	0.5	1.48
D	1	0.483	1.0	0.85
E	2	0.387	0.4	0.88

On remarque sur le tableau que le voisin **D** possède le plus faible coût (**0.85**), donc il sera sélectionné comme MPR.

3.9 La simulation

La simulation est une méthode de conception d'un modèle représentant un système réel, théorique ou physique, afin de le manipuler pour l'observer et analyser son comportement dans un cadre temporel ou spatial réduit. Cette approche permet d'étudier les interactions au sein du système tout en ignorant les détails non essentiels. Elle offre également la possibilité de reproduire les expériences de manière identique. En général, un modèle mathématique ou logique est évalué numériquement sur une période donnée, et les indicateurs de performance sont extraits à partir des données générées par ce modèle [44].

Les paramètres de simulation

Pour évaluer les performances de notre protocole, nous effectuons un ensemble de simulations sur l'outil NS-3.40. Ces simulations dépendent d'un ensemble de paramètres qui sont liés aux conditions et aux contraintes des réseaux FANET. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau3.3: Les paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Le modèle de mobilité	Gauss Markov 3D
La zone de simulation	1000 *1000*100 m
La vitesse maximale	[5-25] m/s
Temps de simulation	200s
L'énergie initiale	[180-350] J
La taille du paquet	64 octet
Le débit	3840 bps
La puissance de transmission	7.5 db
Le nombre de nœuds	50 drones

3.10 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus à partir des simulations effectuées à l'aide de l'outil NS-3, en comparant le protocole OLSR standard avec notre version améliorée RS-OLSR. L'objectif est d'évaluer les performances des deux protocoles dans différents scénarios de mobilité, tout en mettant en évidence l'impact de notre approche sur l'efficacité du routage.

Nombre total de paquets reçus :

Le nombre total de paquets reçus est utilisé comme métrique principale pour évaluer la fiabilité de la transmission des données. Cette métrique reflète directement la capacité du protocole à maintenir des routes stables et efficaces.

Un nombre élevé de paquets reçus indique que les messages sont correctement acheminés vers leur destination, ce qui traduit une meilleure performance du protocole.

Afin d'évaluer l'impact des différents poids attribués aux critères de sélection des MPRs dans notre protocole RS-OLSR, nous avons réalisé trois expériences :

- La première expérience : nous fixons les paramètres suivants : vitesse et énergie, et nous varions les poids de la fonction objectif.
- La deuxième expérience : nous fixons les paramètres suivants : l'énergie et les poids et nous varions la vitesse.

- La troisième expérience : nous fixons les paramètres suivants : la vitesse et les poids et nous variions l'énergie.

Résultats de la première expérience

La Figure 3.2 montre le nombre total de paquets reçus pour différentes combinaisons de poids (W1 pour la vitesse relative, W2 pour l'énergie résiduelle, W3 pour le degré d'accessibilité).

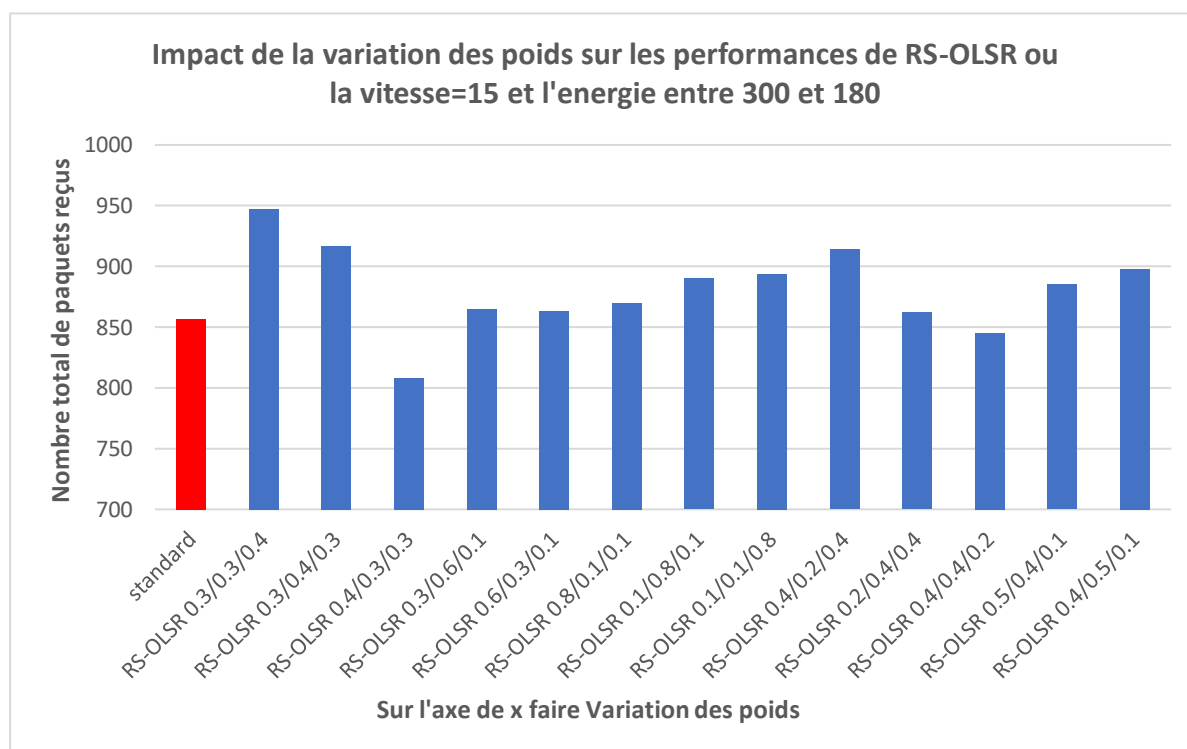


Figure 3.2 : Variation des poids – RS-OLSR (vitesse entre 0 et 15 m/s)

Nous pouvons remarquer que :

- La version standard d'OLSR a reçu environ 850 paquets
- Plusieurs combinaisons du protocole RS-OLSR dépassent largement cette performance :
 - RS-OLSR ($w_1=0.3$, $w_2=0.3$, $w_3=0.4$) atteint près de 950 paquets, ce qui représente une amélioration significative.

- RS-OLSR ($w_1=0.3$, $w_2=0.4$, $w_3=0.3$) et ($w_1=0.4$, $w_2=0.3$, $w_3=0.3$) obtiennent aussi de bons résultats, ce qui montre l'importance d'un équilibre entre les trois critères.
- À l'inverse, certaines combinaisons telles que ($w_1=0.3$, $w_2=0.6$, $w_3=0.1$) ou ($w_1=0.1$, $w_2=0.8$, $w_3=0.1$) donnent de moins bons résultats, indiquant que le choix des poids est très important pour avoir une fonction objective meilleure.

Analyse : Une pondération équilibrée ou légèrement orientée vers le degré d'accessibilité (W_3) et la vitesse relative (W_1) semble la plus bénéfique pour maintenir la stabilité des routes et garantir une bonne réception de paquets.

Résultats de la deuxième expérience

La Figure 3.3 illustre l'impact de la variation de la vitesse des nœuds sur les performances des protocoles OLSR standard et RS-OLSR, en maintenant constants les poids des critères à $w_1 = 0.3$ (vitesse relative), $w_2 = 0.3$ (énergie résiduelle) et $w_3 = 0.4$ (réachabilité), avec une énergie comprise entre 180 et 300.

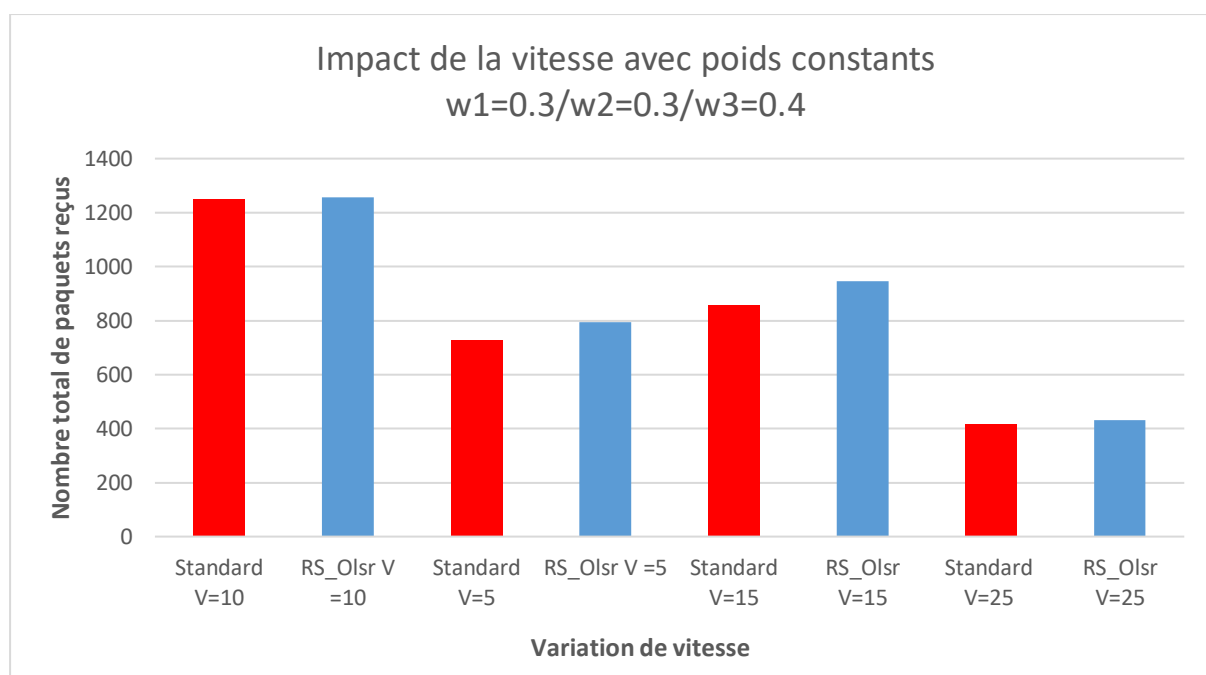


Figure 3.3 : Variation de vitesse

Nous pouvons remarquer de manière générale que : plus la vitesse des nœuds augmente plus le nombre total de paquets reçus diminue. Cela s'explique par la nature hautement dynamique du réseau, où les liens deviennent instables à grande vitesse, ce qui entraîne une perte de paquets.

Analyse : RS-OLSR montre des performances supérieures au protocole OLSR standard, ce qui explique que les MPRs sont sélectionnés selon un critère nécessaire.

Résultats de la troisième expérience :

La figure 3.4 illustre l'impact de la variation de l'énergie initiale des nœuds sur le nombre total de paquets reçus dans ce scénario.

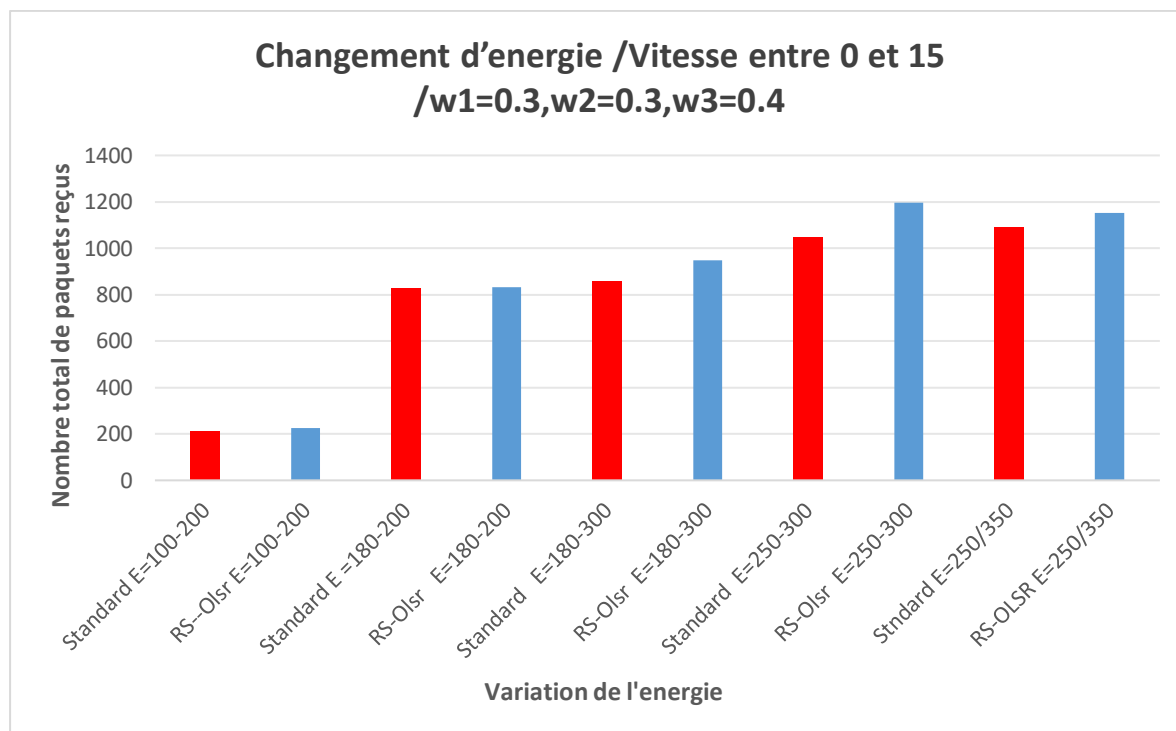


Figure 3.4 : Variation du l'énergie

Quel que soit le niveau d'énergie initiale considéré (100–200 J, 180–200 J, 180–300 J, 250–300 J, 250–350 J), le protocole RS-OLSR surpasse systématiquement OLSR standard.

Analyse : RS-OLSR améliore le routage de données selon l'énergie en fournissant des chemins plus stables et plus durables que ceux d'OLSR. Cela confirme que le mécanisme de sélection des MPR est efficace.

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle méthode de sélection des MPRs dans le contexte du protocole OLSR standard, basée sur une fonction de coût qui se compose trois critères essentiels à la qualité de service dans les réseaux FANET : la vitesse relative, l'énergie résiduelle et le degré d'accessibilité. Notre approche permet de choisir des MPRs plus adaptés aux conditions dynamiques du réseau. Cette méthode assure une meilleure stabilité des routes, réduit les pertes de paquets et augmente la durée de vie du réseau. Les résultats de simulation démontrent que notre mécanisme, fondé sur cette stratégie multicritère, surpasse le protocole OLSR standard, en particulier dans les scénarios à forte mobilité ou sous contraintes énergétiques.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail s'est inscrit dans le cadre de l'étude et de l'optimisation des protocoles de routage dans les réseaux FANET, caractérisés par leur mobilité élevée, leurs liens instables et leurs contraintes énergétiques. Après une analyse approfondie et détaillée des réseaux MANET et FANET ainsi que des protocoles de routage existants, nous avons proposé une version améliorée du protocole OLSR, nommée RS-OLSR (Relative Speed OLSR). RS-OLSR repose sur un nouveau mécanisme de sélection des relais multipoints en fonction des critères de la qualité de service tels que la vitesse relative, l'énergie résiduelle et le degré d'accessibilité, afin de choisir les MPRs adaptés aux contraintes des réseaux FANET, réduire la perte de paquets et favoriser les routes les plus stables. Les résultats obtenus sous le simulateur NS-3 montrent que RS-OLSR augmente significativement la réception des paquets par rapport au protocole OLSR standard. Cette amélioration met en évidence l'importance de prendre en compte des métriques adaptées au contexte hautement dynamique des FANETs pour améliorer la fiabilité de la transmission des données. Elle confirme la pertinence de l'approche proposée, qui combine plusieurs métriques de qualité de service pour répondre aux contraintes spécifiques de ces réseaux. Toutefois, certaines limites subsistent, notamment en ce qui concerne la surcharge de communication liée aux échanges fréquents d'informations, ou le choix statique des poids dans la fonction de coût. Notre protocole pourrait également être renforcé par des approches prédictives basées sur la mobilité, ou par l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour une adaptation dynamique aux variations de la topologie.

Ces éléments ouvrent la voie à de nombreuses perspectives de recherche et d'expérimentation. Dans la continuité de ce travail, nous envisageons de :

- Déterminer dynamiquement les poids adaptés dans la fonction de coût selon le contexte réseau (densité des nœuds, vitesse moyenne, type d'application, etc.) pour une meilleure adaptabilité.
- Ajouter d'autres critères de qualité de service tels que la latence, le débit ou la fiabilité des liaisons, afin de renforcer la prise de décision dans des environnements complexes.
- Implémenter et tester notre protocole sur des plateformes réelles de drones afin de valider son efficacité en conditions réelles et identifier les ajustements nécessaires.
- Intégrer des mécanismes de sécurité dans notre protocole pour se prémunir contre les attaques possibles (usurpation d'identité, modification de messages, etc.) et renforcer la résilience du réseau.

Ces perspectives ouvrent la voie à des solutions de routage intelligentes, sûres et adaptatives, capables de répondre aux exigences croissantes des applications modernes déployées sur les réseaux de drones.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] C. Attiogbé, "Réseaux mobiles – Cours Réseaux 1," Notes de cours de Réseaux, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Nantes, Jan. 2000, mise à jour en fév. 2004.
- [2] A. Moussaoui, "Routage QoS et Prédiction de Rupture de Route dans les Réseaux Ad Hoc," Mémoire de Magistère, Département d'Informatique, Université Abderahmane Mira de Béjaïa, Algérie, 2006.
- [3] R. van der Meer, "Réseau cellulaire - Définition," Simbase, 11 mai 2024.
- [4] R. Bonnefoi, "Utilisation de la radio intelligente pour un réseau mobile à faible consommation d'énergie," Thèse de doctorat, CentraleSupélec, France, 2018.
- [5] CNES, "Les télécommunications par satellite," Centre National d'Études Spatiales (CNES).
- [6] S. Fontaine, "Les constellations de satellites de télécommunications en orbite basse ou moyenne", Rêves d'Espace, 2019.
- [7] A. Mahery, "Qu'est-ce qu'un réseau Mesh ? Définition et fonctionnement," LeBigData.fr.
- [8] A. Paszkiewicz et P. Zapala, "The modified metric for self-organization wireless MESH networks ", ITM Web of Conferences, 2018.
- [9] Geekflare, "Mobile Ad Hoc Network (MANET): Basics, types, and applications."
- [10] Informatyk-egzamin.pl, "Egzamin pisemny EE.08 – Czerwiec 2023," Informatyk-egzamin.pl.
- [11] H. Guennouh et Y. Kirouani, "La vie privée dans les VANET : Amélioration de schéma SLOW", Mémoire de fin d'études, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, 2023-2024.
- [12] Liu, Yiliang, Liangmin Wang, and Hsiao-Hwa Chen. "Message authentication using proxy vehicles in vehicular ad hoc networks." IEEE Transactions on vehicular technology, 2014.
- [13] H. E. Ablaoui et N. O. Bentayeb, "Un nouveau protocole de routage à état de lien basé sur l'énergie et le débit pour les réseaux FANETs", Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj, 2024.
- [14] H. Achouak et R. Khoulofi, "Routage avec qualité de service dans les réseaux FANET", Mémoire de Master, Spécialité Réseaux & Multimédias, Université [nom de l'université], 2023.
- [15] Lansky, Jan, et al. "Reinforcement learning-based routing protocols in flying ad hoc networks (FANET): A review." Mathematics, 2022.

BIBLIOGRAPHIE

- [16] M. A. Khan, I. Ullah, M. Naeem, R. Anwar, H. S. Khattak, A. Ullah, and M. A. Aziz, "A Resource-Friendly Certificateless Proxy Signcryption Scheme for Drones in Networks beyond 5G", Drones, 2023.
- [17] Mohammed, Farhan, et al. "UAVs for smart cities: Opportunities and challenges." 2014 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS). IEEE, 2014.
- [18] Kardasz, Piotr, et al. "Drones and possibilities of their using." J. Civ. Environ, 2016.
- [19] K. Kübra, "Meraklısına Duyurulur! Sizi Adeta Bir Kuş Gibi Hissettirmeye Yemin Etmiş Drone Modelleri ", Onedio, 11 janv, 2023
- [20] W. Bey and A. Hammaz, "Collaboration entre drones pour une meilleure gestion du territoire", Thèse de doctorat, Univ. Ibn Khaldoun-Tiaret, 2021.
- [21] Guillen-Perez, Antonio, and Maria-Dolores Cano. "Flying ad hoc networks: A new domain for network communications." Sensors,2018.
- [22] N. Tahri, "Simulation de protocole de routage OLSR dans les réseaux FANET", Mémoire de Master, Université Amar Telidji Laghouat, Faculté des Sciences, Département d'Informatique, 2018.
- [23] I. Hadjou et S. Zaidi, "Evaluation and comparison study of transport layer protocols for data transmission in flying ad-hoc networks", 2021.
- [24] A. Ben Cheikh et al. "Étude comparative du protocole de routage basé sur la position pour les réseaux multi-UAV (FANET) (GPSR, DSDV)," Thèse de Doctorat, Univ. Kasdi Merbah Ouargla, 2024.
- [25] Kumari, Kanta, Basant Sah, and Sunil Maakar. "A survey: different mobility model for FANET." International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2015.
- [26] Kerdsri, Jiradett, and Tawiwat Veeraklaew. "Visualization of Spatial Distribution of Random Waypoint Mobility Models." J. Comput, 2017.
- [27] S. I. Djied et I. Halimi. " Évaluation des performances des différents protocoles de routage des réseaux Ad Hoc pour les réseaux multi-UAV (FANET) ", Mémoire de Master, Univ. Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [28] Nawaz, Haque, and Husnain Mansoor Ali. "A study of mobility models for UAV communication networks." 3c Tecnología: glosas de innovation aplicadas a la pyme 2019.
- [29] Wang, Wei, et al. "A novel mobility model based on semi-random circular movement in mobile ad hoc networks." Information Sciences ,2010.
- [30] Yassein, Muneer Bani, and Nour Alhuda. "Flying ad-hoc networks: Routing protocols, mobility models, issues." International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016.

BIBLIOGRAPHIE

- [31] L. Ghouti, "Mobility Prediction in Mobile Ad Hoc Networks Using Neural Learning Machines ", Simulation Modelling Practice and Theory, 2016.
- [32] M. J. F. Alenazi et C. Sahin, "Design Improvement and Implementation of 3D Gauss-Markov Mobility Model," Int. Telemetering Conf. Proc, Int. Found. Telemetering.
- [33] S. S. Patil, R. C. Thool, et M. R. Thool, "Implementation of Three Dimensional Model for Flying Ad Hoc Network ", International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), Tirunelveli, Inde, 2019.
- [34] M. Kaur, D. Prashar, M. Rashid, et A. Alghamdi, "A Novel Approach for Securing Nodes Using Two-Ray Model and Shadow Effects in Flying Ad-Hoc Network ", Electronics, 2021.
- [35] A. Ouardani, M. Boulmalf, A. Kobbane, et al., "Performance Analysis of MPR Selection Algorithms in OLSR Protocol over FANETs," Int. J. Wirel. Inf. Netw., 2023.
- [36] Yang, Shaoshi, et al. "Betweenness Centrality Based Dynamic Source Routing for Flying Ad Hoc Networks in Marching Formation." IEEE Transactions on Vehicular Technology ,2025.
- [37] Hosseinzadeh, Mehdi, et al. "A smart filtering-based adaptive optimized link state routing protocol in flying ad hoc networks for traffic monitoring." Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2024.
- [38] Belkhira, Sid Ahmed Hichame. "Optimisation de la QoS dans les réseaux adhoc mobiles". Diss. Université de Haute Alsace-Mulhouse; Université Djillali Liabès (Sidi Bel-Abbès, Algérie), 2020.
- [39] Clausen, Thomas, and Philippe Jacquet. "Optimized link state routing protocol (OLSR)". No. rfc3626. 2003.
- [40] Siham, Yahi, and Mallek Farida. "Sécurité et routage dans les réseaux Ad hoc". Diss. Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [41] Achouak, Hansali, and Khouloufi Rayane. "Routage avec qualité de service dans les réseaux FANET". Diss. UNIVERSITY BBA, 2023..
- [42] Azevedo, Miguel Itallo B., et al. "Wireless communications challenges to flying ad hoc networks (FANET)." Mobile Computing. IntechOpen, 2023.
- [43] Yang, Siwei, et al. "Hybrid ant colony-based inter-cluster routing protocol for FANET." Scientific Reports 14.1 2024.
- [44] M. Singh et M. Kaur, "A Study of Energy Efficient Routing Protocols for MANETs," Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng, 2013.
- [45] Rosati, Stefano, Karol Kruzelecki, Grégoire Heitz, Dario Floreano, et Bixio Rimoldi. "Dynamic Routing for Flying Ad Hoc Networks." IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016.

BIBLIOGRAPHIE

[46] Hou, Chen, Zhexin Xu, Wen-Kang Jia, Jianyong Cai, and Hui Li. "Improving Aerial Image Transmission Quality Using Trajectory-aided OLSR in Flying Ad Hoc Networks ". EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020.

[47] Laqtib, Safaa, et al. "A New Energy Efficient Mechanism to Enhance MPR Selection in OLSR: EEM-OLSR." Proc. International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2021.

[48] Jain, Rachna, and Indu Kashyap. "An QoS Aware Link Defined OLSR (LD-OLSR) Routing Protocol for MANETs." Wireless Personal Communications, 2019.

[49] E. Cruz, "A comprehensive survey in towards to future FANETs", IEEE Latin America Transactions, 2018.