

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

**Un nouveau protocole de routage à état de
lien basé sur l'énergie et le débit pour les
réseaux FANETs**

Présenté par :

Ablaoui Housseem Eddine

Bentayeb Nadine Ouidiane

Soutenu publiquement le : 19/06/2024

Devant le jury composé de :

Président : Dr Senouci Oussama

Examineur : Dr Saad Saoud Manal

Encadreur : Dr Moussaoui Ali

2023/2024

Remerciement

Nous tenons à remercier :

Tout d'abord, Dieu le tout-puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour mener ce travail.

Nous remercions notre encadreur « **Dr MOUSSAOUI ALI** » pour son suivi et sa précieuse orientation.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'honorer par leur jugement notre travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements à nos respectés les professeurs de la faculté de mathématique et informatique.

Un grand merci pour nos familles, surtout nos parents, qui nous ont épaulés, soutenus et suivis tout au long de ce projet.

À mes chères amies qui ont toujours été présentes et fidèles pour leur aide et leur soutien.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci.

Dédicace

*À mes parents, mes étoiles dans la nuit et mes plus grands supporters
À ma mère, dont la patience et le soutien inconditionnel m'ont permis de sur-
monter les moments difficiles.*

*À mon père, dont la sagesse et les conseils avisés ont éclairé mon chemin.
Je dédie ce projet à vous deux, avec tout mon amour et ma reconnaissance.
Votre présence a été ma plus grande force, et je suis honoré de vous avoir à
mes côtés dans cette aventure.*

*À mes frères **Ahmed, Anis, Mohamed et Iyad.***

*À mes chers amis : **MEHDI, ALI, ANIS Z, ISSAM, ZAKARIA, ANIS K,
ABDSALEM, KARIM, AMINE, YAZID, RAHIM et AKREM***

*À ma binôme **NADINE** & sa famille*

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Et à tous les étudiants de la promotion Informatique.

Je dédie ce travail

Merci pour tout.

Dédicace

A ma chère mère

À ma chère mère, honorable, aimable Wafa, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études. Tu as beaucoup souffert pour nous grandir, et grâce à toi et à Dieu, aujourd'hui, je suis là. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Inchallah, grâce à Dieu, je peux te rendre tout ce que tu as fait pour nous.

Je t'aime maman.

A mon cher père

À mon père YAZID, tu n'étais pas toujours présente pour moi, mais je te remercie pour tout.

Je dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, longue vie et bonheur.

A mes chères Frères

À mes chères frères WANIS et ILYES, en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous remercie d'être l'épaule sur laquelle je peux toujours compter.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mes chères ami(e)s

Tous mes amis : Yacine, Wail, Wafa, Aya, Zahra, Fati

Ma copine Lina & sa famille

Ma meilleure amie Dina

Mon binôme Housseem & sa famille

À tous ceux qui ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin, dans la réalisation de cette tâche.

Et à toutes les personnes inscrites dans la promotion Informatique.

Abstract

Abstract

FANET is considered a subset of MANET. However, due to the high mobility and rapid topology changes in FANET, the application of routing protocols in FANET is a significant challenge. In this work, we propose a new mechanism to establish stable and high-throughput paths between communicators. We applied this mechanism to the OLSR protocol by modifying the selection of MPRs (Multi point Relay) based on the residual energy and throughput of the nodes. Our protocol, named DEOLSR (Throughput Energy OLSR), significantly reduces communication interruptions between communicators and decreases the packet loss rate of data. Simulation results clearly show that DEOLSR effectively improves established paths in terms of throughput and durability, and reduces data loss.

Keywords: FANET (Flying Ad-Hoc Network), QoS (Quality of Service), NS-3, Simulation.

Résumé

FANET est considéré comme un sous-ensemble de MANET, cependant, en raison de la grande mobilité et des changements rapides de topologie dans FANET, l'application de protocoles de routage dans FANET est un grand défi. Dans ce travail, nous proposons un nouveau mécanisme pour établir des chemins durables et de haut débit entre les communicants. Nous avons appliqué ce mécanisme au protocole OLSR en modifiant la sélection des MPRs (Multipoint Relay) en fonction de l'énergie et débit résiduelle des nœuds. Notre protocole baptisé DEOLSR (Débit Energy OLSR) réduit de manière significative les interruptions de communication entre les communicants et diminue le taux de perte de paquets de données. Les résultats de la simulation montrent clairement que DEOLSR améliore de manière efficace les chemins établis en termes de débit et de durabilité et réduit la perte des données.

Mots clés : FANET (Réseau Ad-Hoc volant), QOS (qualité de service), NS-3, Simulation.

يُعتبر FANET (شبكة Ad-Hoc الطائرة) مجموعة فرعية من MANET (شبكة Ad-Hoc المتنقلة). ومع ذلك، بسبب الحركة العالية والتغيرات السريعة في الطوبولوجيا في FANET، فإن تطبيق بروتوكولات التوجيه في FANET يمثل تحدياً كبيراً. في هذا العمل، نقترح آلية جديدة لإنشاء مسارات مستدامة وعالية الإنتاجية بين أجهزة الاتصال. قمنا بتطبيق هذه الآلية على بروتوكول OLSR (التوجيه المحسن القائم على حالة الارتباط) عن طريق تعديل اختيار MPRs (نقاط إعادة التوجيه المتعددة) بناءً على الطاقة المتبقية والإنتاجية للعقد. بروتوكولنا، الذي أطلقنا عليه اسم DEOLSR (DEOLSR OLSR) المستند إلى الطاقة والإنتاجية)، يقلل بشكل كبير من انقطاعات الاتصال بين أجهزة الاتصال ويقلل من معدل فقدان حزم البيانات. تُظهر نتائج المحاكاة بوضوح أن DEOLSR يحسن بشكل فعال المسارات المنشأة من حيث الإنتاجية والاستدامة ويقلل من فقدان البيانات.

الكلمات المفتاحية: FANET (شبكة Ad-Hoc الطائرة)، QoS (جودة الخدمة)، NS-3،

المحاكاة.

Table des matières

Titre	Page
Remerciement	I
Dédicace	III
Abstract	IV
Résumé	V
ملخص	VI
Table des matières	VII
Liste des abréviations	X
Liste des Figures	XIII
Liste des tables	XVI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre 01 : Les Réseaux FANETs	
1.1 Introduction	6
1.2 Réseau MANET	6
1.3 Réseau FANET	7
1.4 Les caractéristiques des réseaux FANETs	8
1.5 Modèles de mobilité dans FANET	10
1.6 Modèles de communication dans FANET	13
1.6.1 UAV to UAV	13
1.6.2 UAV to Infrastructure	14
1.7 Architecture des FANETs	14
1.8 Les composants des FANETs	15
1.9 Les applications des FANETs	16

Table des matières

1.10 Comparaison entre MANET, VANET et FANET	17
1.11 Conclusion	19
Chapitre 02 : Routage avec qualité du service dans les réseaux FANETs	
2.1 Introduction	21
2.2 Routage dans les réseaux MANETs	21
2.3 Classification des protocoles de routage dans les MANETs	22
2.3.1 Protocole de routage proactif	22
2.3.2 Protocole de routage réactif	23
2.3.3 Protocole de routage hybride	23
2.4 Description des protocoles de routage AODV, DSDV, OLSR et DSR	23
2.4.1 Protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)	23
2.4.2 Protocole DSDV (Destination Sequence Distance Vector)	26
2.4.3 Protocole DSR (Dynamic Source Routing)	27
2.4.4 Protocole OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)	28
2.5 Récapitulation	35
2.6 Routage dans les réseaux FANETs	37
2.7 Classification des protocoles de routage FANETs	38
2.7.1 Predictive OLSR (P-OLSR)	38
2.7.2 Mobility and Load-Aware OLSR (ML-OLSR)	39
2.7.3 Link-quality and Traffic-load aware OLSR (LTA-OLSR)	39
2.7.4 OLSR based on Mobility and Delay Prediction (OLSR-PMD)	40
2.7.5 Improved OLSR-ETX	41
2.8 La qualité de service (QOS)	41

Table des matières

2.9 Les métriques de la qualité de service	41
2.10 Choix du protocole de routage OLSR	42
2.11 Conclusion	43
Chapitre 03 : Contribution et Simulation	
3.1 Introduction	45
3.2 La simulation	45
3.3 L'environnement de développement	45
3.3.1 L'environnement matériel de notre simulation	46
3.3.2 L'environnement logiciel	46
3.4 Installation de NS-3	47
3.5 Notre proposition	48
3.5.1 Principe de notre amélioration	48
3.5.2 Avantages de l'algorithme DEOLSR	51
3.6 Modèle de réseau	52
3.7 Résultats de simulation	54
3.7.1 Le nombre total des paquets reçus	55
3.7.2 Taux de paquets	58
3.8 Conclusion	62
CONCLUSION GÉNÉRALE	63
Bibliographie	65

Liste des abréviations

AGPS	Assisted Global Positioning System
ARMA	Autoregressive Moving Average
AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
AP	Access Point
API	Application Programming Interfaces
BSS	Basic Service Set
CCITT	International Consultative Committee on Telephony and Telegraphy
DGPS	Differential Global Positioning System
DS	Distribution System
DSDV	Dynamic destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
ESS	Extended Service Set
ESSID	ESS Identifier
FANET	Flying Ad-Hoc Network
GBS	Global Business Services
GCS	Ground Control Station
GloMoSim	Global Mobile Simulator
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communication
HNA	Host and Network Association
HiperLAN2	High Performance Radio LAN 2.0
IOT	Internet of things
J-Sim	Java-based simulation system
LTA-OLSR	Link-quality and Traffic-loadaware OLSR
LTE	Long Term Evolution
MANET	Mobile Ad hoc Network

Liste des abréviations

ML-OLSR	Mobility and Load-Aware OLSR
MID	Multiple Interface Déclaration
MPR	Multipoint Relay
NetSim	Network Simulation
NS-2	Network Simulator 2
NS-3	Network Simulator 3
N1H	Neighbor One Hop
N2H	Neighbor Two Hop
OPNET	Optimum Network Performance
OMNET++	Objective Modular Network
OLSR	Optimized Link State Routing
OLSR-ETX	Improved
OLSR-PMD	OLSR based on Mobility and Delay Prediction
PDA	Personal Digital Assistant
P-OLSR	Predictive OLSR (P-OLSR)
QOS	Quality of Service
QualNet	Groupe Relyne
RDN	Node Reach Degree
RREP	Route REPLY
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SDN	Node Stability Degree
TC	Topology Control
TTL	Time To Live
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANET	Vehicular Ad hoc NETwork
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network

Liste des abréviations

WPAN Wireless Personal Area Network

WWAN Wireless Wide Area Network

Liste des Figures

- Figure 1.1** Réseau MANET
- Figure 1.2** Réseau FANET
- Figure 1.3** Le modèle de point de passage aléatoire
- Figure 1.4** Le modèle Manhattan Grid
- Figure 1.5** Le modèle Gauss Markov Mobility Model
- Figure 1.6** Semi Random Circular Movement
- Figure 1.7** Le modèle de Paparazzi
- Figure 1.8** Les modèles de communication dans FANET
- Figure 1.9** Comparaison entre MANET, VANET et FANET
- Figure 2.1** Protocoles de routage dans les réseaux MANETs
- Figure 2.2** Recherche, installation et maintenance d'itinéraire dans AODV
- Figure 2.3** Procédure de découverte de route dans DSDV
- Figure 2.4** Fonctionnement de protocole DSR
- Figure 2.5** Détection de voisinage par l'échange de message HELLO
- Figure 2.6** Format du message Hello
- Figure 2.7** Principes de l'inondation classique et par MPR
- Figure 2.8** Format d'un message TC
- Figure 2.9** Format de la table de routage du protocole OLSR
- Figure 2.10** Synthèse des protocoles de routage de MANETs
- Figure 2.11** Le protocole de routage proactifs dans les réseaux FANETs
- Figure 3.1** Processus d'archivage des messages reçus pour calculer l'énergie et le débit
- Figure 3.2** Le nouveau format de message Hello
- Figure 3.3** Visualisation de la simulation sur NetAnim

Liste des Figures

- Figure 3.4** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 20 drones et le critère nombre total des paquets reçus.
- Figure 3.5** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 40 drones et le critère nombre total des paquets reçus.
- Figure 3.6** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 60 drones et le critère nombre total des paquets reçus.
- Figure 3.7** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 80 drones et le critère nombre total des paquets reçus.
- Figure 3.8** Comparaison entre DEOLSR et OLSR par à port au nombre de nœud sur le critère nombre total des paquets reçus.
- Figure 3.9** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 20 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau
- Figure 3.10** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 40 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau
- Figure 3.11** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 60 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau
- Figure 3.12** Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 80 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau

Liste des Figures

Figure 3.13 Comparaison entre DEOLSR et OLSR par à port au nombre de nœud sur le critère taux de réception de paquets dans le réseau.

Liste des Tables

- Table 1.1** Comparaison entre MANET, VANET et FANET
- Table 2.1** Avantages et inconvénient des différentes catégories de protocoles de routage
- Table 3.1** Comparaison des caractéristiques importantes des simulateurs de réseau
- Table 3.2** Spécifications de l'appareil
- Table 3.4** Paramètres de simulation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les réseaux Ad hoc mobiles, ou MANET (Mobile Ad hoc Network), se distinguent par leur ingéniosité. Ces réseaux autoorganisés permettent aux appareils mobiles de communiquer entre eux sans infrastructure centrale, comme des tours cellulaires. Imaginez un groupe de randonneurs échangeant des photos ou des secours en pleine nature, sans couverture réseau ! C'est le pouvoir des MANET.

Le rôle essentiel de la gestion des itinéraires dans ces réseaux est assuré par des protocoles de routage tels que l'OLSR [1] (Optimized Link State Routing), l'AODV [2] (On Demand Distance Vector), le protocole DSDV [3] (Dynamic destination Sequenced Distance Vector) et le DSR [1] (Dynamic Source Routing). Chaque protocole utilise une méthode spécifique pour identifier les meilleures routes entre les nœuds, ce qui permet d'optimiser la communication dans un environnement en constante évolution.

Les réseaux Ad hoc de drones, ou FANETs (Flying Ad-Hoc Network), poussent le concept encore plus loin. En intégrant des drones comme nœuds mobiles, ces réseaux étendent leur portée et leurs capacités. Désormais, la communication et la coordination ne sont plus limitées par le terrain. Les FANET ouvrent un monde de possibilités dans des domaines comme la surveillance, l'exploration et les secours d'urgence.

Il est primordial de garantir la qualité de service QoS (Quality of Service) afin d'assurer des performances fiables et efficaces au sein de ces réseaux. Plus précisément, les systèmes de qualité de service axés sur la gestion de l'énergie jouent un rôle crucial dans la gestion efficace de la consommation limitée des nœuds, ce qui permet de prolonger la durée de vie du réseau.

Les protocoles de routage MANET ne sont pas adéquats au réseaux FANETs à cause de la haute mobilité et la consommation très élevé de l'énergie dans ce type de réseau. Plusieurs travaux de recherche ont proposé des solutions au routage avec QoS dans les FANETs, parmi des travaux on peut

INTRODUCTION GÉNÉRALE

citer : Improved OLSR-ETX [4], OLSR-PMD (OLSR based on Mobility and Delay Prediction) [5], LTA-OLSR (Link-quality and Traffic-load aware OLSR) [6], ML-OLSR (Mobility and Load-Aware OLSR) [7], P-OLSR (Predictive OLSR) [8].

Dans ce travail, nous suggérons une version améliorée d'OLSR, appelée DEOLSR (Data-rate Energy OLSR), qui intègre un mécanisme spécifique pour assurer une qualité de service optimale pour les réseaux FANETs. Ce mécanisme est basé sur l'énergie résiduelle des nœuds et sur la quantité du débit fournis.

Le simulateur NS3(Network Simulator 3) a été employé afin de mener des expériences et de mettre en évidence les bénéfices de DEOLSR en matière de performances et de qualité de service par rapport à l'OLSR classique. En ce qui concerne les performances et la qualité de service, DEOLSR est supérieur à l'OLSR standard.

Motivations et problématique

L'évolution et l'expansion des FANETs dans le monde ont ouvert la voie à l'émergence de plusieurs axes de recherche dans le domaine portant sur l'étude de la qualité de service dans ces réseaux, sans toutefois qu'aucune des solutions proposées ne puisse faire l'objet d'une normalisation. C'est dans la perspective de cette catégorie de recherche, que les travaux effectués dans ce mémoire s'inscrivent. Cependant, il est très difficile de garantir une quelconque qualité de service à une application temps réel dans un réseau Ad hoc comme FANETs, car il faut prendre en considération les spécificités de ces réseaux, notamment la bande passante limitée et l'énergie résiduelle des nœuds.

Contribution

Notre objectif est de proposer une extension du protocole OLSR de base en le rendant sensible à deux métriques de QoS, à savoir, l'énergie et le débit.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Cette extension aspire à une meilleure performance d'OLSR en termes de QoS et ce, en déterminant le chemin avec l'énergie la plus élevée et le débit le plus haut. Nos contributions peuvent être énumérées comme suit :

1. Conception et mise au point de notre proposition qui consiste à étendre la version standard d'OLSR avec QoS. Cette extension va permettre de sélectionner le meilleur ensemble de relais multipoints qui satisfont les exigences de QoS en termes de bande passante et d'énergie.
2. Implémentation de notre proposition en utilisant NS-3.
3. Prouver que le DEOLSR proposé offre une meilleure qualité de service en se basant sur l'énergie et le débit.

Organisation du mémoire

- Le premier chapitre fournit des informations générales sur le réseau FANET, ses caractéristiques, ainsi que leurs applications et la comparaison entre MANET, VANET et FANET.
- Le deuxième chapitre présente certains types de protocoles de routage avec qualité de service utilisés dans les réseaux Ad hoc de drones FANETs. Enfin, il présente une étude détaillée du protocole OLSR.
- Le dernier chapitre sera consacré à l'implémentation de DEOLSR ainsi qu'aux simulations et à la discussion des résultats obtenus. Les surcoûts engendrés par la solution proposée en comparaison avec les résultats de la version classique du protocole OLSR soumis aux mêmes scénarios et paramètres seront aussi présentés. Nous avons mis en œuvre et testé notre proposition (les résultats de simulation en comparant le protocole standard).

Une conclusion générale reprenant les points forts de ce travail, ponctuée de perspectives futures éventuelles, termine ce mémoire.

Chapitre 01

Les Réseaux FANETs

1.1 Introduction

Des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans la technologie des réseaux sans fils, en particulier les réseaux Adhoc. Pour étendre autant de terrain que possible et même dans l'espace. Les systèmes aériens sans pilote, notamment les systèmes aériens Ad hoc (FANET), ont pour but de surveiller, de collecter des informations et de communiquer dans des endroits extrêmement difficiles et même dans les pires conditions météorologiques. Cependant, des problèmes ont été soulevés en termes d'échange d'informations, de communication et de service. Des nouvelles architectures et protocoles sont donc apparues pour résoudre ce problème.

Ce chapitre donne un aperçu général de l'utilité et de l'importance des réseaux FANET. Nous avons commencé notre travail par une définition en décrivant les caractéristiques potentielles, les applications et l'environnement de déploiement.

1.2 Réseau MANET

Un réseau Ad hoc mobile (MANET : Mobile Ad Hoc Network) est un système autonome dynamique composé de nœuds mobiles connectés par des liens sans fil, sans infrastructure fixe et sans administration centralisée. Les nœuds ont la liberté de se déplacer et de s'organiser arbitrairement. En conséquence, la topologie du réseau peut fluctuer rapidement et, surtout, être imprévisible (figure 1.1) [36].

Les MANET ont de nombreux domaines d'application, notamment la communication, les réunions d'affaires urgentes, les secours en cas de catastrophe, etc. La portabilité ou la mobilité des MANET est leur principal avantage [23].

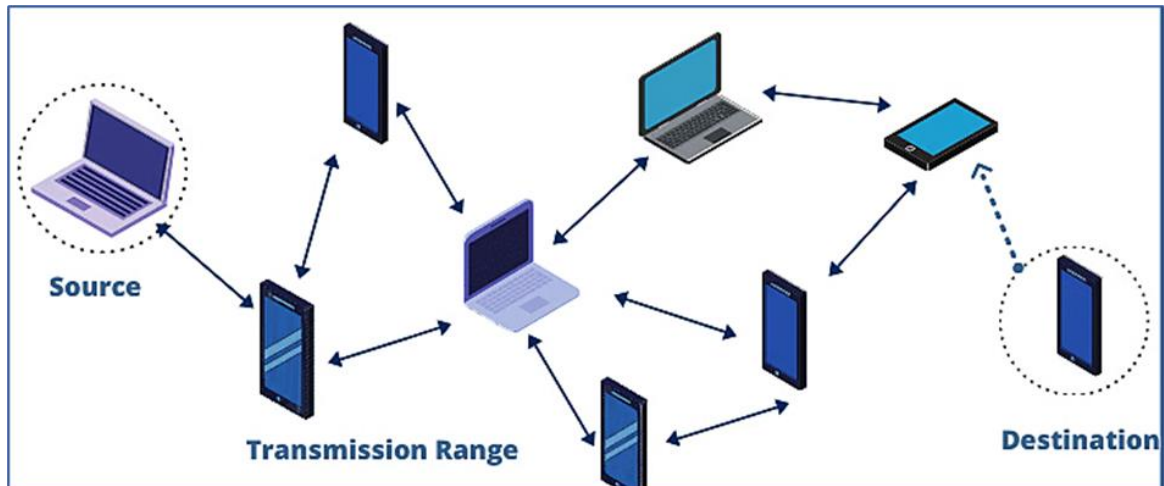


Figure 1.1 : Réseau MANET.

1.3 Réseau FANET

Une nouvelle forme de réseau Ad hoc mobile, appelée Flying Ad-Hoc Networks (FANET), émerge en combinant les principes des réseaux MANET avec la technologie des drones. FANET constitue un réseau de drones autonomes interconnectés via des technologies sans fil telles que Wi-Fi, ZigBee ou LTE (Long Term Evolution) [44]. Ces drones communiquent entre eux et avec une base pour atteindre des objectifs communs.

Les caractéristiques des réseaux FANET comprennent une grande mobilité, une évolutivité pour diverses applications et une résilience face aux pannes de communication, bien que des limites persistent telles que le temps de vol des drones et la gestion de la dynamique du réseau [37]. Des mécanismes et des protocoles spécifiques sont nécessaires pour assurer une transmission efficace et rapide des données au sein d'un réseau FANET (figure 1.2).

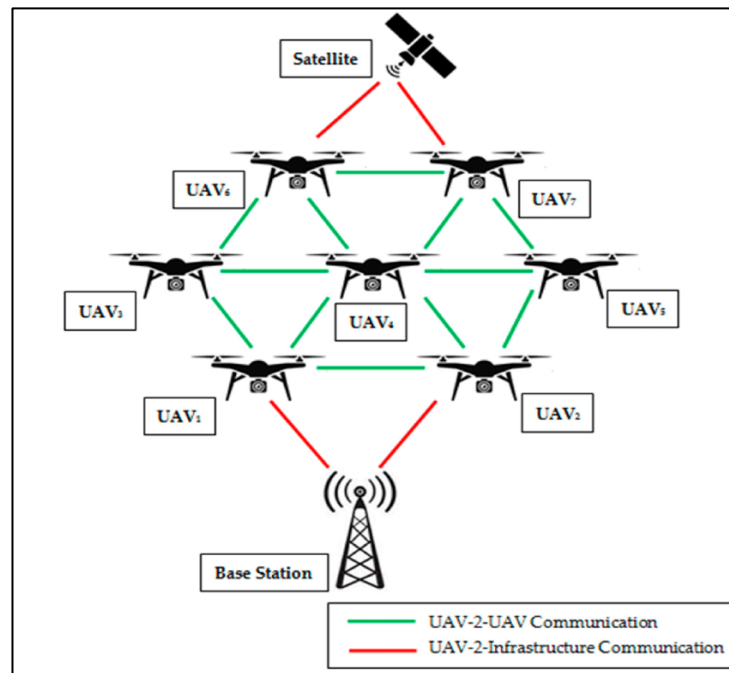


Figure 1.2 : Réseau FANET.

1.4 Les caractéristiques des réseaux FANET

Les caractéristiques des réseaux FANET se distinguent de celles des MANET par plusieurs aspects clés :

1- Mobilité des nœuds

La mobilité des nœuds des réseaux FANET les distingue des autres types de réseaux sans fil. Il est vrai qu'un aéronef volant peut atteindre des vitesses de 30 à 460 km/h [22]. Cependant, ces vitesses élevées peuvent provoquer de nombreux problèmes de communication tels que des pannes de liaison et d'autres problèmes.

2- Modèles de mobilité

Les modèles de mobilité des FANET varient, certains utilisant des plans de vol prédéterminés avec des changements de cap calculés à chaque étape, tandis que d'autres adoptent des vitesses et des directions aléatoires pour les UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

3- Densité de nœud

De nombreux modèles de mobilité ont un plan de vol préétabli, mais il est modifié à chaque étape, nécessitant un nouveau calcul de la carte [48]. D'autres modèles permettent aux UAV d'utiliser des vitesses et des directions aléatoires.

4- Topologie du réseau

FANET est un réseau distribué, peer-to-peer et à plusieurs connexions. Le principe « les uns avec les autres » permet aux nœuds de se connecter à la volée. La topologie permet d'élargir la zone d'achèvement des tâches en diffusant continuellement des données en remplaçant progressivement ou progressivement des UAV [48].

5- Modèle de propagation radio

Un plan de communication évolue en fonction du modèle de propagation radio qui tient compte des effets d'action, de la réflexion au sol et de la forte probabilité de connexion avec la station de base.

6- Consommation électrique et durée de vie du réseau

La durée de vie des réseaux, qui comprennent les dispositifs informatiques alimentés par batterie, est un problème majeur. Le matériel de communication utilisé dans les FANET est alimenté par la source d'énergie UAV elle-même. Dans ce cas, les conceptions FANET peuvent ne pas être sensibles à la puissance, contrairement aux applications MANET. Mais cela reste un problème dans les mini-UAV [22].

7- Localisation

La localisation signifie la localisation de chaque UAV. En raison de la vitesse élevée et des changements fréquents de lieu, il est nécessaire de disposer d'informations de localisation élevées avec de faibles intervalles de temps. En utilisant le GPS, les informations sur les nouveaux emplacements seront transmises au réseau toutes les secondes, ce qui est insuffisant. Par conséquent, chaque UAV doit contenir une unité de mesure initiale pour diffuser son emplacement à tous les UAV du réseau à tout moment [49].

1.5 Modèles de mobilité dans FANET

Les modèles de mobilité sont utilisés pour reproduire un environnement réaliste au sein des FANET et simuler les déplacements de nœuds mobiles réels, tels que les UAVs. Ils décrivent comment les positions, les accélérations et les vitesses des nœuds UAV ont changé au fil du temps. Ces modèles sont utilisés pour déterminer la pertinence d'un protocole spécifique (par exemple, un protocole de routage) dans un contexte spécifique. Dans ce domaine [45].

1- Random Way Point (RWP)

Ce modèle de mobilité intègre une pause temporelle entre les modifications de direction et de vitesse des nœuds. Les UAV de ce type évoluent de façon aléatoire dans une zone spécifique. Leur liberté de mouvement dans la simulation est totale.

Peu importe les autres UAV de la région. Ce modèle n'est pas adapté aux aéronefs, car les aéronefs ne peuvent pas changer de direction ni de vitesse rapidement et ne peuvent pas s'arrêter dans le ciel. Le RWP repose sur trois actions : direction droite, direction gauche et direction aller [38]. La figure 1.3 présente le modèle Random Way Point

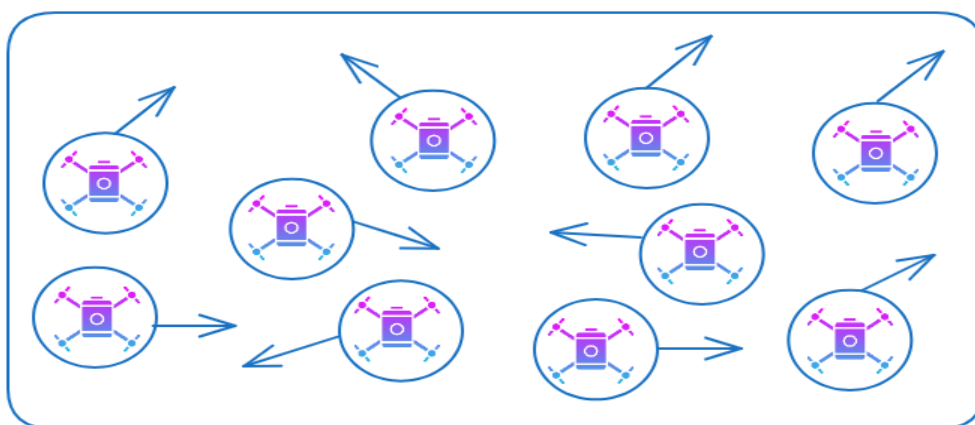


Figure 1.3 : Le modèle Random Way Point.

2- Manhattan Grid (MG) :

Le modèle de mobilité du réseau de Manhattan (MG) utilise une topologie de route quadrillée. Ce modèle fonctionne comme une route droite horizontale et verticale. À chaque intersection, un drone choisit soit d'avancer, soit de devoir tourner. Bien que les directions des nœuds puissent être modifiées, cela entrave la mobilité des nœuds dans le plan géographique [13]. La figure 1.4 présente le modèle Manhattan Grid

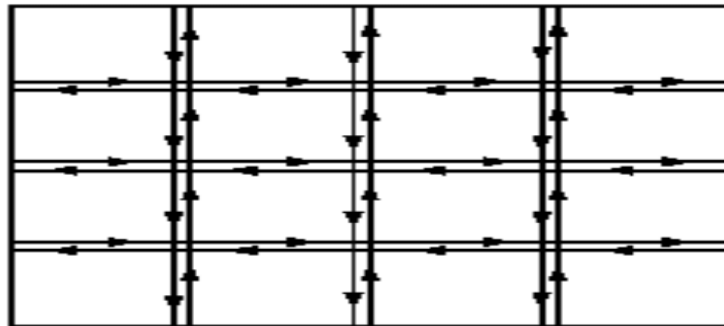


Figure 1.4 : Le modèle Manhattan Grid [13].

3- Gauss Markov Mobility Model (GMM)

Le modèle de mobilité Gauss-Markov (GMM) est un modèle largement utilisé dans les simulations de réseaux sans fil, y compris dans des environnements simulés avec NS-3. Il est souvent utilisé pour représenter le mouvement aléatoire des nœuds dans un réseau sans fil, en tenant compte de la vitesse moyenne des nœuds ainsi que de leur capacité à conserver une certaine direction pendant une période de temps.

Dans ce modèle, les vitesses des nœuds sont généralement supposées suivre une distribution gaussienne, ce qui signifie que les changements de direction des nœuds sont aléatoires mais peuvent également être influencés par leur direction précédente. Cela permet de modéliser des mouvements plus réalistes où les nœuds ont tendance à se déplacer dans une direction générale mais peuvent également changer de direction de manière imprévisible [9]. La (figure 1.5) présente le modèle GMM.

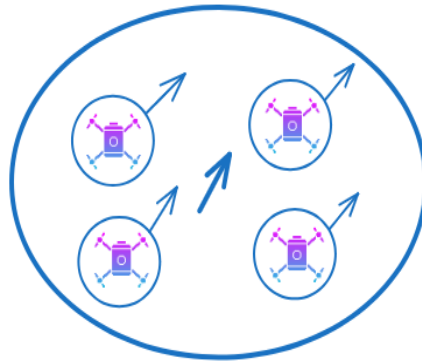


Figure 1.5 : Le modèle Gauss Markov Mobility Model.

4- Semi Random Circular Movement Model (SRCM)

Le modèle de mouvement circulaire semi-random a été développé pour les aéronefs volants avec des mouvements incurvés [10]. Cette méthode est utilisée pour simuler des UAV pour collecter des données sur certaines zones en effectuant une rotation autour d'une zone spécifique. Ainsi, chaque UAV surveille une zone spécifique de la zone où l'objet est recherché (figure 1.6).

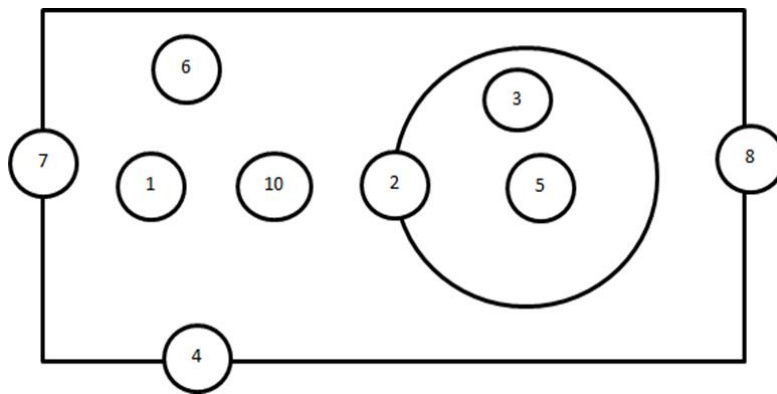


Figure 1.6: Semi Random Circular Movement.

5- Paparazzi Mobility model (PPRZM)

Est un modèle de mobilité stochastique qui a cinq mouvements possibles pour les nœuds. Ces mouvements incluent rester à (le nœud plane sur une position fixe), huit (le nœud an une trajectoire de forme 8 autour de deux zones fixées).

Le choix d'un modèle de mobilité approprié garantit généralement que les exigences et les caractéristiques mentionnées seront satisfaites. Les plans de parcours des modèles de mobilité tels que SRCM et PPRZM sont considérés comme les plus adaptés aux FANETs en raison de la nature de la mission de ce type de réseaux. La figure 1.7 présente le modèle de Paparazzi

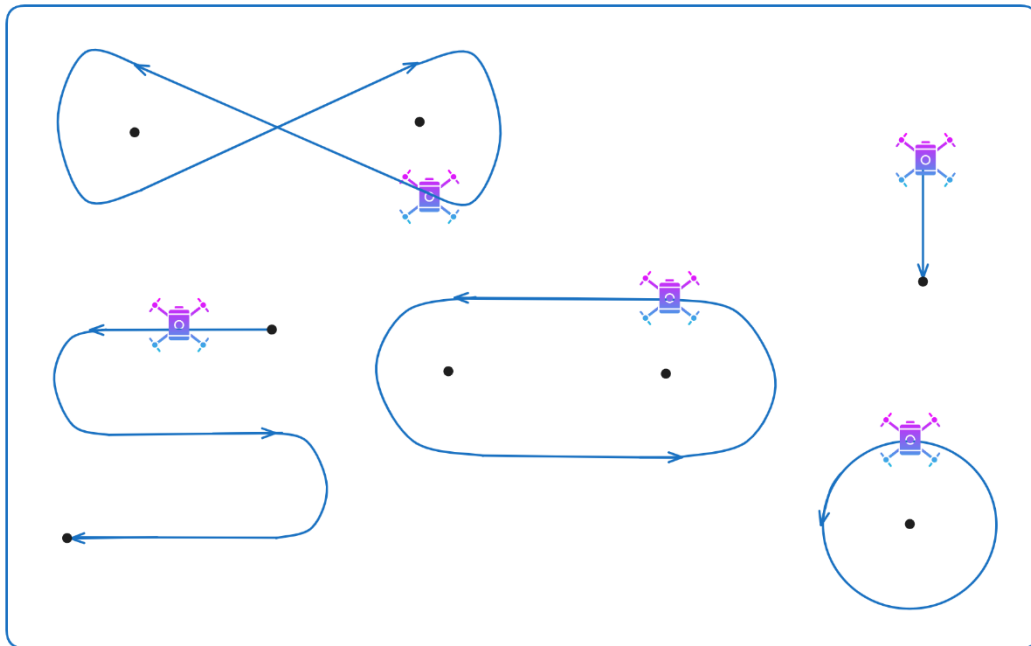


Figure 1.7 : Le modèle de Paparazzi.

1.6 Modèles de communication dans FANET

Il existe deux types de communication pour FANET :

1.6.1 UAV to UAV

Dans les réseaux de drones (FANETs), les données sont souvent transférées directement entre les UAV (Unmanned Aerial Vehicle) en utilisant divers algorithmes de routage. Comme la topologie de ces réseaux change fréquemment en raison de l'ajout ou de la suppression d'UAV, maintenir la communication entre les UAV nécessite souvent d'explorer plusieurs directions. Cela peut être réalisé en utilisant des protocoles de routage adaptatifs qui permettent aux UAV de découvrir dynamiquement les chemins de communication disponibles et de les mettre à jour en temps réel en fonction des changements dans la topologie du réseau [30].

1.6.2 UAV to Infrastructure

La communication entre les drones et l'infrastructure est établie grâce à un sous-groupe d'UAV qui interagit avec cette infrastructure, qu'il s'agisse d'une station satellite ou terrestre. Ce mode de communication permet de transmettre des informations concernant des tâches prévues à une échelle plus vaste et requiert l'échange de données plus importantes [31].

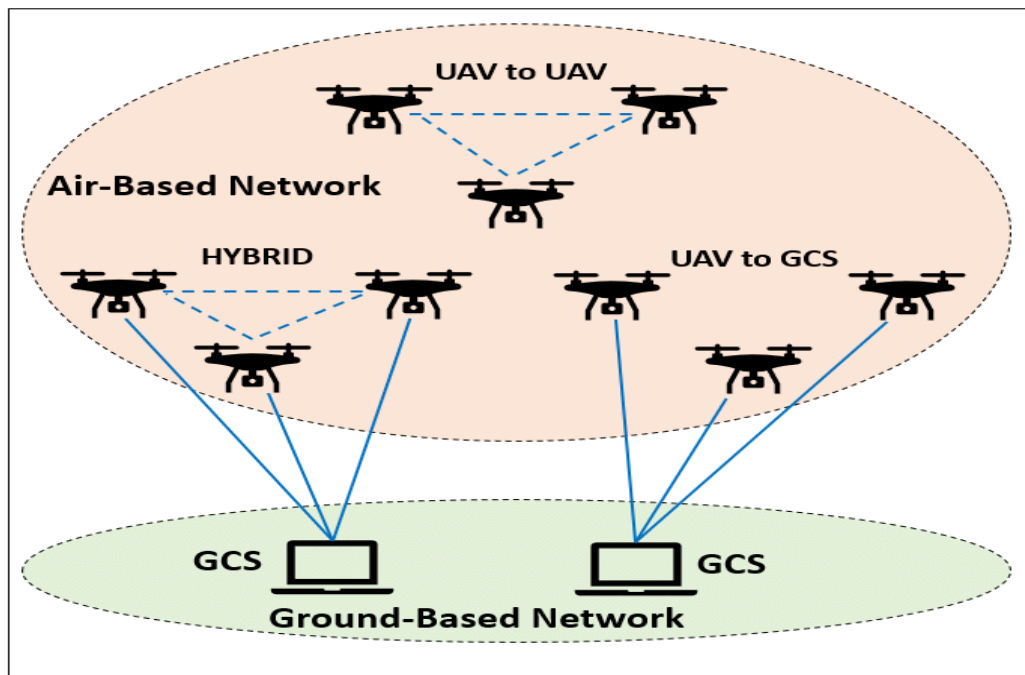


Figure 1.8 : les modèles de communication dans FANET.

1.7 Architecture des FANETs

Les UAV dans l'architecture FANET fournissent la communication en temps réel de manière Ad hoc, ce qui peut abolir la nécessité d'infrastructure et réduire la limitation de la portée de communication.

1- FANET Centralisé

Dans cette configuration, un nœud central tel qu'une station de base ou un concentrateur est chargé de gérer le réseau et de diriger le trafic entre les nœuds.

2- FANET décentralisé

Avec cette architecture, les nœuds peuvent interagir directement entre eux sans dépendre d'un nœud central. Les nœuds eux-mêmes sont responsables de la maintenance du réseau et du routage du trafic.

3- FANET hybride

Cette approche combine des aspects des architectures décentralisées et centralisées, où certains nœuds agissent comme des points centraux de communication tandis que d'autres communiquent directement entre eux.

4- FANET hiérarchique

Dans cette configuration, le réseau est organisé en plusieurs couches distinctes. Les couches inférieures sont responsables de la transmission et du routage des données, tandis que la couche supérieure agit comme un coordinateur.

5- FANET basé sur cluster

Le réseau dans cette architecture est divisé en clusters, avec un nœud principal pour chaque cluster qui gère la communication et le routage du trafic au sein de celui-ci.

Remarque : Chaque architecture offre des avantages et des inconvénients en fonction des besoins spécifiques de la mission et des conditions environnementales rencontrées.

1.8 Les composants des FANETs

Les FANET connectent les drones via des technologies sans fil telles que Wi-Fi, Zigbee ou LTE. L'architecture des FANET comprend généralement les composants suivants :

1- Les drones : sont des appareils mobiles du réseau qui peuvent se déplacer dans l'espace et interagir. Ils peuvent avoir une variété de capacités et de tâches, telles que la collecte de données, la surveillance, le relais, etc. Ils peuvent avoir des capteurs, des caméras, du GPS et des batteries.

2- La station de contrôle au sol : Le nœud fixe du réseau est la station de contrôle au sol, qui peut communiquer avec les drones et leur envoyer des commandes ou des informations. Elle peut être proche ou éloignée du réseau FANET. Elle est compatible avec Internet ou d'autres réseaux.

3- Les protocoles de routage : sont des algorithmes qui déterminent le chemin de transmission des données entre les nœuds.

4- Les modèles de mobilité : Les modèles mathématiques utilisés pour représenter le mouvement des drones dans le réseau FANET Ils doivent être réalistes et refléter les scénarios de mise en œuvre des FANET. Ils peuvent dépendre de variables telles que la vitesse, la direction et la destination. Ils peuvent être classés en modèles collectifs, aléatoires, déterministes, etc.

5- Gestion du réseau : mécanismes d'organisation et de maintenance du réseau, y compris la sécurité, la qualité de service et la gestion de l'énergie.

6- Couche de liaison de données : couche responsable de la transmission fiable des données entre les nœuds.

7- Couche physique : couche chargée de fournir un canal de communication entre les nœuds.

1.9 Les applications des FANETs

Les drones ont principalement pour but de remplir une mission militaire, scientifique, économique ou même commerciale. Le fait que les drones soient utilisés dans des environnements dangereux suscite l'intérêt pour leur contrôle et leur navigation. Et ils peuvent être divisés en cinq classes dans ce document:

1- Application militaire

- Observation des flottes ennemies
- Désignation et suivi des cibles.
- Élimination des bombes qui non pas explosées.
- Leurre de missiles par émission de signatures artificielles.

2- Application humanitaire

- Chercher et sauver les victimes.
- Surveillance.
- Créer des cartographies de crise.

3- Application scientifique

- Lutte contre l'incendie et détection d'incendie forestier.
- Études de pollution et surveillance.
- Recherche de pétrole et de gaz.
- Sauvetage en mer.

4- Application personnelle

- Prendre les photos et les vidéos.
- Jouer.
- Agriculture ...etc.

5- Application commerciale

- Livraison de colis et les commandes.
- Vidéos et photos marketing.

1.10 Comparaison entre MANET, VANET et FANET

En tant que réseaux Adhoc, les MANET, VANET et FANET sont similaires, mais ils diffèrent par leurs caractéristiques, leurs environnements de déploiement et leurs applications principales. Chaque catégorie a ses propres problèmes liés à la gestion de la connectivité, à la mobilité des nœuds et à la sécurité des communications.

Une comparaison entre MANET, VANET et FANET est présentée sur la figure 1.9 et le tableau 1.1.

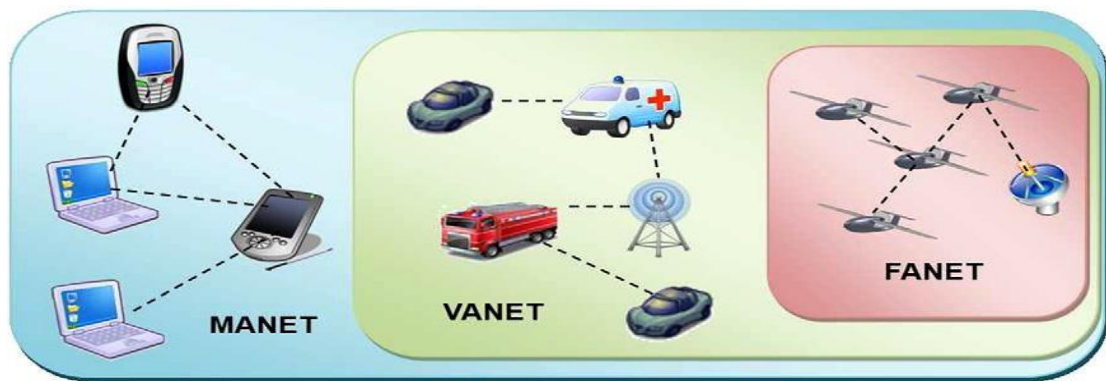


Figure 1.9 : Comparaison entre MANET, VANET et FANET [12].

Type / Critère	MANET	VANET	FANET
Mobilité des nœuds	Faible compacité	Moyenne compacité	Grande compacité
Modèle de mobilité	Arbitraire	Stable	Habituellement prédéterminé, mais spécial Modèles de mobilité pour indépendants systèmes multi-UAV
Densité de nœud	Faible épaisseur	Epaisseur Moyenne	Faible épaisseur
Changement de topologie	Lente et régulière	Vitesse moyenne	Rapide
Modèle de propagation radio	Très proche du sol, le LoS n'est pas accessible à tous les cas	Près du sol, le LoS n'est pas accessible pour tous les cas	Très au-dessus du sol, LoS est accessible pour La plupart des cas
Consommation électrique et réseau durée de vie	Besoin de protocoles éco énergétiques	Pas besoin	Nécessaire pour les mini-UAV, mais pas nécessaire pour les petits UAV
Localisation	GPS	GPS, AGPS, DGPS	GPS, AGPS, DGPS, IMU

Table 1.1 : Comparaison entre MANET, VANET et FANET [12].

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné le domaine des Flying Adhoc Networks (FANETs) en se concentrant sur leur définition, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application. De plus, nous avons fourni une description détaillée des différentes architectures FANET, mettant en évidence leurs composantes, ainsi que des modèles de mobilité qui existent dans la littérature, Le prochain chapitre sera consacré sur le routage avec qualité de service dans les réseaux FANETs.

Chapitre 02
Routage avec qualité
du service dans les
réseaux FANETs

2.1 Introduction

Le routage avec qualité de service (QoS) dans les réseaux de drones Ad hoc (FANETs) vise à garantir des performances de communication fiables et efficaces en sélectionnant des chemins de communication optimaux, malgré la mobilité des drones et les changements topologiques, en utilisant des métriques telles que la latence, le débit et la fiabilité.

Dans ce chapitre, nous explorons le routage avec QoS dans les FANETs, mettant en avant les critères et protocoles spécialement conçus pour ces réseaux. Une attention particulière est portée sur le protocole OLSR, pivot de l'étude, et une section est dédiée aux attaques réseau et à leurs défis pour le routage avec QoS dans ces environnements dynamiques.

2.2 Routage dans les réseaux MANETs

Dans les classifications citées par la suite, les classes de protocoles n'ont pas de structure sous forme d'arbre. Les protocoles de routage dans les réseaux ad hoc peuvent être classés en deux catégories principales : les protocoles proactifs et réactifs, en fonction de la création et de la maintenance des routes. Il est possible d'ajouter une troisième classe, celle des protocoles hybrides. La fusion des deux catégories. Les protocoles de routage proactifs assurent la continuité des routes vers toutes les destinations de manière permanente. L'avantage de ces protocoles réside dans la disponibilité immédiate des routes. Toutefois, il est essentiel d'avoir un trafic de contrôle élevé afin de mettre à jour ces routes. Les protocoles de routage réactifs ne créent des routes que sur demande "On-Demand". Ces protocoles ne nécessitent pas une grande quantité de bande passante dans le réseau [43]. Par contre, ils ont un délai supplémentaire en raison de la recherche d'itinéraire.

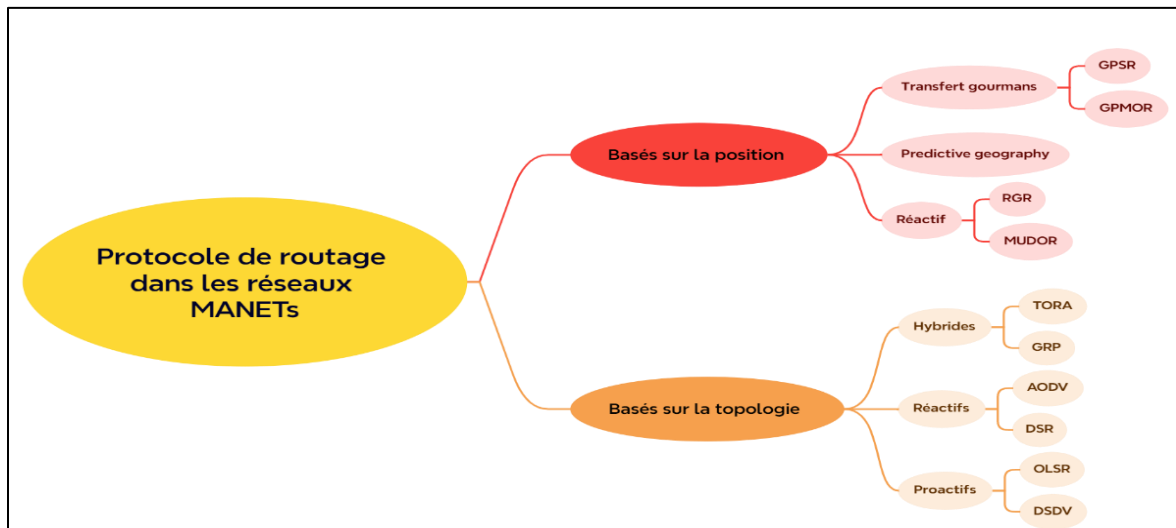


Figure 2.1 : Protocoles de routage dans les réseaux MANETs.

2.3 Classification des protocoles de routage dans les MANETs

Les protocoles de routage dans les réseaux FANETs peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur approche et de leurs caractéristiques [43].

2.3.1 Protocole de routage proactif

Dans les protocoles de routage proactifs, chaque nœud gère périodiquement une ou plusieurs tables indiquant la topologie complète du réseau. Ils ont l'avantage d'avoir un itinéraire immédiatement accessible en cas de besoin. Cependant, la productivité du réseau peut être influencée par l'envoi inutile de messages de contrôle. [17]. Parmi les protocoles de routage proactif, on peut mentionner :

- OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)
- DOLSR (Directional Optimized Link State Routing)
- GSR (Global State Routing)
- DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector)

2.3.2 Protocole de routage réactif

Le routage à la demande est un protocole de routage. Une connexion entre deux Pour les protocoles de routage réactifs - également appelés protocole de routage à la demande - la table de routage est mise à jour lorsqu'il y a des données à envoyer, sinon il n'est pas nécessaire de calculer une route entre les nœuds. Deux types de messages sont échangés qui sont Route Request et Route Reply. Les principaux inconvénients de ces protocoles sont un temps de latence élevé dans la recherche d'itinéraire et une inondation excessive peut entraîner un colmatage du réseau [17]. On peut mentionner parmi les protocoles de routage réactif :

- Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)
- Dynamic Source Routing (DSR)

2.3.3 Protocole de routage hybride

En prenant les meilleures fonctionnalités et en dépassant les limites des protocoles réactifs et proactifs, de ce principe est née l'idée de protocoles hybrides. Les protocoles hybrides sont particulièrement adaptés aux grands réseaux et sont basés sur les concepts de zones, où ils utilisent le routage proactif dans la même zone et le routage réactif est utilisé entre les zones [17]. On peut mentionner parmi les protocoles de routage hybrides :

- Temporarily Ordered Routing Algorithm (TORA)
- Zone Routing Protocol (ZRP)
- Reactive greedy reactive routing protocol (RGR)

2.4 Description des protocoles de routage AODV, DSDV, OLSR et DSR

2.4.1 Protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

L'algorithme distribué AODV (Adhoc On-Demand Distance Vector) est basé sur des algorithmes de vecteur de distance, comme l'algorithme de Bellman Ford. Lorsqu'une destination est inconnue, AODV élabore le paquet de

demande de route (RREQ) et le communique à ses voisins. Les champs suivants sont inclus dans les messages de demande d'itinéraire

L'adresse de la source (Adresse de la source), Le nombre d'ordre de source (Numéro de série de source), Broadcast ID : l'identification d'émission, L'adresse de destination (Adresse de destination) Le nombre d'ordre de destination (Nombre d'ordre de destination) et Le nombre de lancers (Hop numbers).

Le numéro de séquence de la source s'incrémente chaque fois qu'une nouvelle demande d'itinéraire est initiée. Chaque nœud intermédiaire recevant une demande d'itinéraire enregistre le nœud précédent qui lui a transmis le message, ce qui aide à créer un chemin de retour pour les paquets de réponse. AODV utilise le numéro de séquence de destination pour maintenir la fraîcheur des itinéraires. Le nœud destinataire ou tout nœud intermédiaire peut répondre à une demande d'itinéraire. Si un nœud intermédiaire connaît déjà le chemin vers la destination, il peut répondre à la demande seulement si le numéro de séquence de destination stocké localement est supérieur ou égal à celui dans le paquet de demande d'itinéraire.

AODV repose fortement sur les numéros de séquence pour éviter le problème du comptage à l'infini, typique des protocoles de vecteur de distance. La paire d'identification d'émission (broadcast ID) et d'identification de source (source ID) permet d'éliminer les demandes redondantes atteignant un nœud [43].

La destination ou les nœuds intermédiaires répondent à la source avec un message de réponse d'itinéraire RREP (Route REPLY). Les nœuds recevant un message RREP enregistrent l'identification du nœud émetteur comme le prochain saut vers la destination pour acheminer le futur trafic.

Lorsqu'un nœud émet une demande d'itinéraire ou une réponse d'itinéraire, il fixe le nombre de sauts TTL (Time To Live) à zéro. Ce nombre est incrémenté par chaque nœud intermédiaire avant la retransmission du paquet de demande d'itinéraire. Cette incrémentation aide les nœuds intermédiaires à déterminer le

nombre de sauts nécessaires pour atteindre la source ou la destination via le chemin actuel. La source, recevant plusieurs réponses d'itinéraire par différents chemins, utilise le nombre de sauts dans les messages de réponse pour choisir l'itinéraire le plus court, c'est-à-dire celui avec le plus petit nombre de sauts, vers la destination [2].

Fonctionnement de protocole

Une fois qu'un itinéraire est établi, il doit être maintenu aussi longtemps que nécessaire. Un itinéraire récemment utilisé pour la transmission des paquets de données est appelé un itinéraire actif. En raison de la mobilité des nœuds, les liens le long d'un chemin sont susceptibles de se rompre. Les ruptures de liens qui ne sont pas utilisés pour la transmission des paquets de données ne nécessitent aucune réparation. Cependant, les coupures dans les itinéraires actifs doivent être rapidement réparées afin que les paquets de données ne soient pas perdus.

Lorsqu'une coupure de lien se produit sur un chemin actif, le nœud en amont de la coupure (c'est-à-dire, le plus proche du nœud source) marque les itinéraires utilisant ce lien comme invalides dans sa table de routage. Il crée ensuite un message d'erreur d'itinéraire (RERR) dans lequel il énumère toutes les destinations devenues inaccessibles en raison de la perte du lien. Le nœud qui détecte la rupture envoie ce message RERR à ses voisins concernés, c'est-à-dire ceux utilisant le lien cassé. Les nœuds voisins marquent à leur tour les itinéraires cassés comme invalides et envoient leurs propres messages RERR à leurs voisins. Le message RERR suit ainsi le chemin inverse jusqu'au nœud source, comme illustré à la figure 2.2. Une fois que le nœud source reçoit le message RERR, il peut réparer l'itinéraire si celui-ci est toujours nécessaire [34].

Une optimisation proposée dans le protocole AODV est la réparation locale des coupures de lien dans les itinéraires actifs. Lorsqu'une coupure de lien se produit, au lieu d'envoyer un message RERR à la source, le nœud en amont

de la coupure peut essayer de réparer le lien localement. S'il réussit, peu de paquets de données sont perdus car l'itinéraire est réparé rapidement. Si la tentative de réparation locale échoue, un message RERR est envoyé au nœud source pour l'informer de l'invalidité de l'itinéraire [43].

Pour réparer localement l'itinéraire, le nœud responsable de la réparation augmente le numéro de séquence de destination et envoie un message RREQ à ses voisins. Le TTL doit être calculé de manière à limiter la portée de la réparation au réseau local. Le nœud réparateur attend les messages RREP en réponse à son message RREQ pendant une durée déterminée. Si un message RREP est reçu, le chemin est alors réparé localement [35].

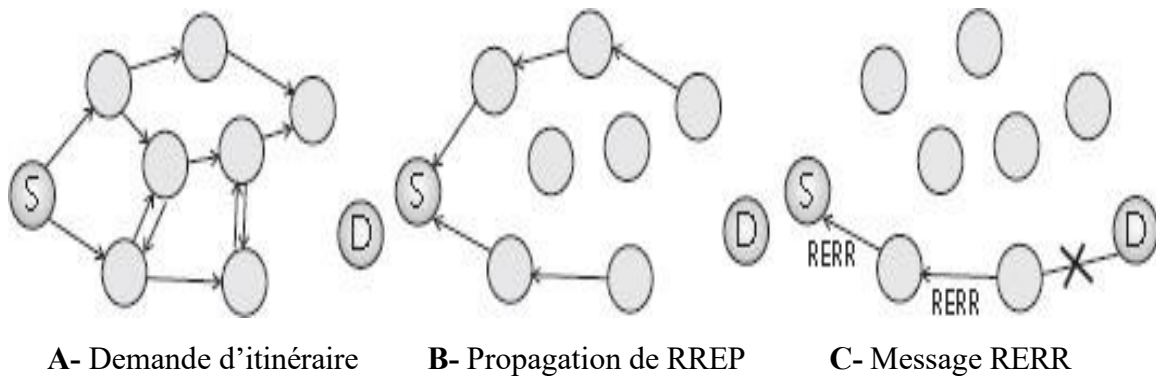


Figure 2.2 : Recherche, installation et maintenance d'itinéraire dans AODV [35].

2.4.2 Protocole DSDV (Destination Sequence Distance Vector)

Destination Sequence Distance Vector (DSDV) est un protocole proactif basé sur des tables de routage. Il utilise principalement l'algorithme de Bellman-Ford avec de petits ajustements pour être plus approprié pour les réseaux Ad hoc. En DSDV, chaque nœud maintient une table de routage (avec numéro de séquence) pour tous les autres nœuds, pas seulement pour les nœuds voisins. Chaque fois que la topologie du réseau change, ces changements sont diffusés par la mise à jour du protocole. Ces mises à jour peuvent entraîner des boucles de routage au sein du réseau. Pour résoudre ce problème et déterminer la fraîcheur d'une route, DSDV utilise les numéros de séquence, qui sont attribués par les nœuds de destination. Un itinéraire avec un numéro de

séquence supérieur est préférable à un itinéraire avec un numéro de séquence inférieur. Les principaux avantages de DSDV sont à la fois la simplicité de l'algorithme et l'utilisation de ces numéros de séquence. Cependant, il présente des inconvénients. Pour maintenir la table de routage à jour, chaque nœud diffuse périodiquement des tableaux de mise à jour de routage, ce qui entraîne une surcharge pour le réseau [3].

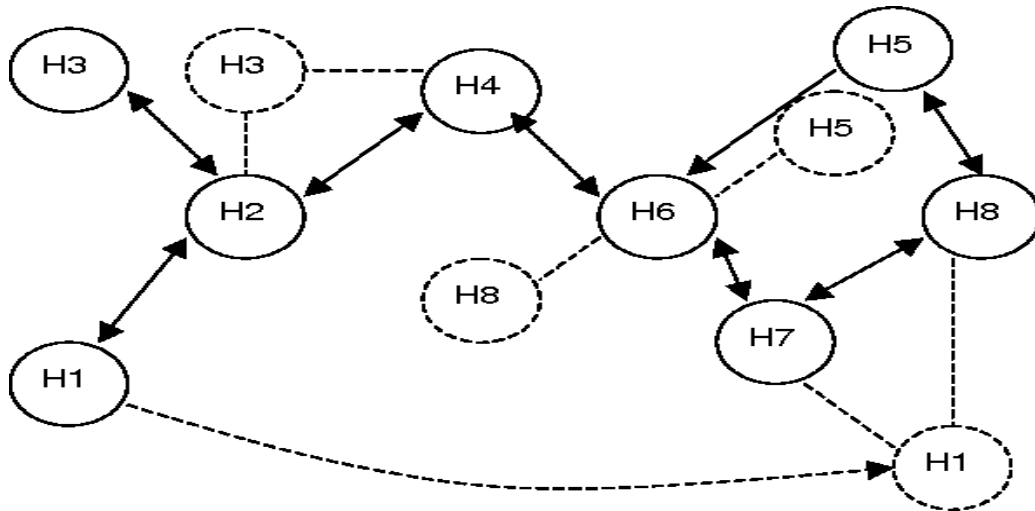


Figure 2.3 : Procédure de découverte de route dans DSDV [48].

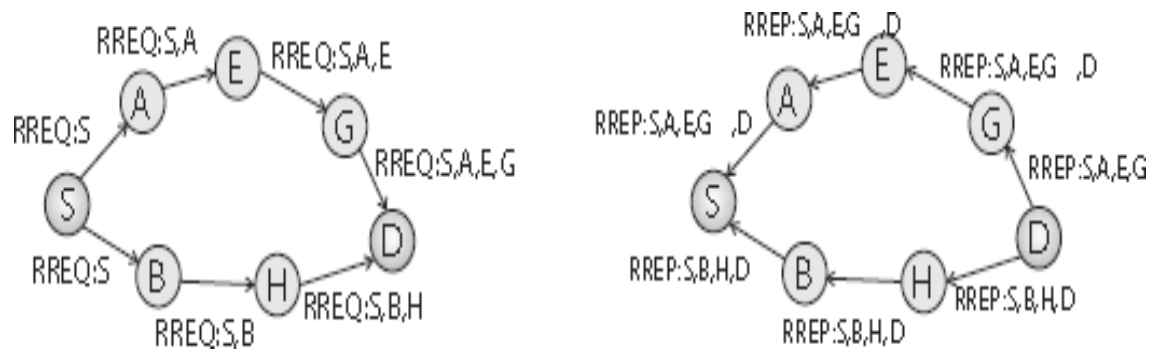
2.4.3 Protocole DSR (Dynamic Source Routing)

Ce protocole se distingue par l'utilisation du routage par la source, ce qui signifie que la source connaît l'itinéraire complet, saut par saut, jusqu'à la destination. Les paquets de données incluent cet itinéraire dans leur en-tête.

Lorsqu'un nœud dans le réseau ad hoc tente d'envoyer un paquet de données à une destination pour laquelle il ne connaît pas encore l'itinéraire, il initie une procédure de découverte de route pour déterminer dynamiquement cet itinéraire. La découverte d'itinéraire s'effectue en inondant le réseau de paquets de demandes d'itinéraire RREQ (Route REQuest). Chaque nœud recevant une demande RREQ la retransmet, sauf s'il est la destination ou s'il possède déjà un itinéraire vers la destination dans son cache. Dans ce cas, le nœud répond à la demande avec un paquet de réponse d'itinéraire RREP (Route

REPLY) qui est retourné à la source initiale.

Les paquets de demande et de réponse d'itinéraire sont routés de manière similaire, en incluant le chemin à suivre. La demande accumule le chemin parcouru jusqu'à la destination. La réponse utilise ce chemin pour revenir à la source. L'itinéraire porté par le paquet de réponse est stocké par la source pour un usage futur [1].



A- demande d'itinéraire (RREQ) **B-** installation d'itinéraire (RREP)

Figure 2.4: Fonctionnement de protocole DSR [1].

2.4.4 Protocole OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)

L'INRIA (National Institute for Research in Digital Science and Technology) a proposé le protocole OLSR Optimized Link State Protocol dans le cadre du projet HIPERCOM [24]. OLSR est un type de protocole à état de liens. L'utilisation de la topologie partielle est la particularité de ce dernier par rapport à sa famille d'origine. En d'autres termes, les nœuds diffusent un sous-ensemble de liens avec leurs voisins plutôt que toutes les connexions. Cela signifie que la taille des paquets de contrôle diffusés sur le réseau sera réduite.

Le protocole OLSR utilise le concept de relais multipoints (MPR) pour minimiser la duplication des paquets de contrôle lors de l'inondation du réseau. Chaque nœud maintient deux ensembles de nœuds : l'ensemble *MPRset* et l'ensemble *MPRselectorset*. L'ensemble *MPRset* comprend les nœuds MPR choisis par le nœud actuel, tandis que l'ensemble *MPRselectorset* se compose des nœuds qui ont choisi le nœud actuel comme nœud MPR. Les nœuds MPR

agissent comme des relais de diffusion lorsqu'ils reçoivent des données destinées aux nœuds de leur *MPRselectorset*. Le choix des nœuds MPR comme relais de diffusion réduit la quantité d'informations sur l'état des liens, car seule la connectivité du nœud MPR doit être incluse dans les paquets de contrôle d'état de lien. Ainsi, un nœud MPR représente efficacement les nœuds de son ensemble *MPRselector*.

Au départ, un nœud commence avec un *MPRset* et un *MPRselectorset* vides. Tous les nœuds voisins à un saut sont initialement considérés comme des nœuds MPR. Cet ensemble diminue en taille au fil du temps à mesure que les messages Hello sont reçus. Au bout d'un certain temps, le nœud connaîtra tous ses voisins à deux sauts et ses nœuds MPR. OLSR utilise trois éléments clés : un mécanisme de détection des voisins, un mécanisme efficace de diffusion de messages, et un mécanisme de diffusion de topologie.

OLSR emploie une méthode simple de détection des voisins pour déterminer l'état des liens avec les voisins. Un lien peut avoir trois états possibles : unidirectionnel, bidirectionnel et MPR. OLSR envoie périodiquement des messages Hello contenant une liste de voisins avec l'état de chaque lien. Lorsqu'un nœud reçoit un message Hello pour la première fois d'un voisin, il marque le lien comme unidirectionnel dans sa table des voisins locale et inclut l'identification de ce voisin dans son prochain message Hello. Le voisin, en recevant ce message Hello, trouvera son identification dans le message et marquera alors le lien comme bidirectionnel. Pour les messages Hello suivants de ce voisin, le lien restera marqué comme bidirectionnel.

Chaque nœud utilise un algorithme distribué d'approximation pour calculer son *MPRset* [25], marquant ainsi les liens correspondants comme MPR dans sa table des voisins locale. Un lien marqué MPR par un voisin indique que ce lien est bidirectionnel et que le voisin est un MPR pour le nœud actuel. Les messages Hello sont diffusés uniquement aux voisins à un saut et ne sont pas relayés plus loin. Chaque nœud apprend tous ses voisins à deux sauts grâce aux

messages Hello périodiques. De plus, les messages Hello diffusent l'ensemble MPR_{set} des nœuds. En recevant ces messages Hello, les nœuds peuvent déterminer s'ils ont été choisis comme MPR. Le cas échéant, ils ajoutent le nœud correspondant à leur $MPR_{selectorset}$ [2].

- **Détection de voisinage**

La détection de voisinage se fait à l'aide des paquets Hello. Les informations de voisinage sont maintenues dans des tables de voisinage.

- **Table de voisinage (Neighbor Set)**

Cette table contient les noms de tous les voisins à un saut. Elle enregistre les voisins avec des liens symétriques et asymétriques.

- **Table des voisins à deux sauts (2-hop Neighbor Set)**

Cette table est caractérisée par le stockage des adresses des nœuds accessibles à travers les chemins à un seul saut.

- **Ensemble des sélecteurs MPR (MPR Selector Set)**

Tous les nœuds qui ont choisis le nœud local comme MPR sont inclus dans cette structure.

Dans le protocole OLSR, les messages Hello remplissent trois fonctions. En fait, les messages Hello sont envoyés à tous les voisins à un seul saut pour la détection des liens, des voisins à deux sauts et des nœuds sélecteurs de relais (MPR selector sensing) [24].

- **La détection de l'état de liens**

Pour accomplir cette tâche, le protocole OLSR utilise des messages de bienvenue. A envoie un Hello vide à B, qui l'enregistre comme un voisin asymétrique, car il ne trouve pas sa propre adresse dans le message, La figure 2.5 présente un exemple de découverte de voisinage.

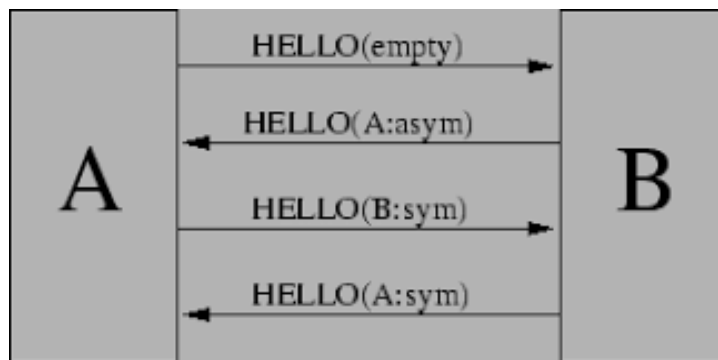


Figure 2.5 : Détection de voisinage par l’échange de message HELLO [32].

• **La déclaration des MPRs selector :**

Elle consiste à informer le nœud local qu’il a été choisi comme MPR. Un nœud met à jour l'ensemble des nœuds l'ayant sélectionné comme MPR après la réception du message Hello.

• **Format du message Hello :**

Le format des messages Hello est donné par la figure 2.6 [24]

0	7	8	15	16	23	24	31
Reserved			Htime		Willingness		
Link Code		Reserved		Link Message Size			
Neighbor Interface Address							
Neighbor Interface Address							
...							
Link Code		Reserved		Link Message Size			
Neighbor Interface Address							
Neighbor Interface Address							
...							
...							

Figure 2.6: Format du message Hello [24].

- **Reserved :** Pour répondre à cette spécification, ce champ doit être modifié à "00000000000000".
- **HTime :** Ce champ détermine la période d’émission des messages Hello utilisés par cette interface.
- **Willigness :** permet de forcer le passage d'un nœud en MPR.

- **Link Code** : code identifiant le type de lien entre l'expéditeur et les interfaces listées (« Neighbors Interface Address ») : symétrique, entendu (asymétrique), MPR (relais multipoint).
- **L'état symétrique** : indique que la vérification du lien a été effectuée dans les deux sens, ce qui permet d'envoyer des données en un seul tenant sur ce lien. Selon l'état entendu, le nœud reçoit des messages HELLO provenant de cette interface voisine, mais le lien n'est pas encore valide dans l'autre direction.
- **Selon l'état MPR** : ce nœud a sélectionné ce voisin comme relais multipoint, ce qui signifie que le lien est symétrique.
- **Link Message Size** : calculé en octets et mesuré à partir du début du champ Link Code jusqu'au champ Link Code suivant.
- **Neighbor Interface Address** : L'adresse de l'interface d'un nœud voisin.

- **La technique de relais multipoints :**

Les relais multipoints ont pour but de diminuer le nombre de retransmissions inutiles lors de la diffusion généralisée d'un message. Chaque nœud du réseau, indépendamment des autres nœuds, choisira son propre ensemble de relais multipoints en fonction de ses connaissances des deux nœuds de son voisinage. Dans un environnement mobile avec une topologie instable, comme c'est le cas des réseaux. Ad hoc, cet ensemble de MPR doit être recalculé à chaque fois que l'on détecte une modification dans le voisinage à deux sauts.

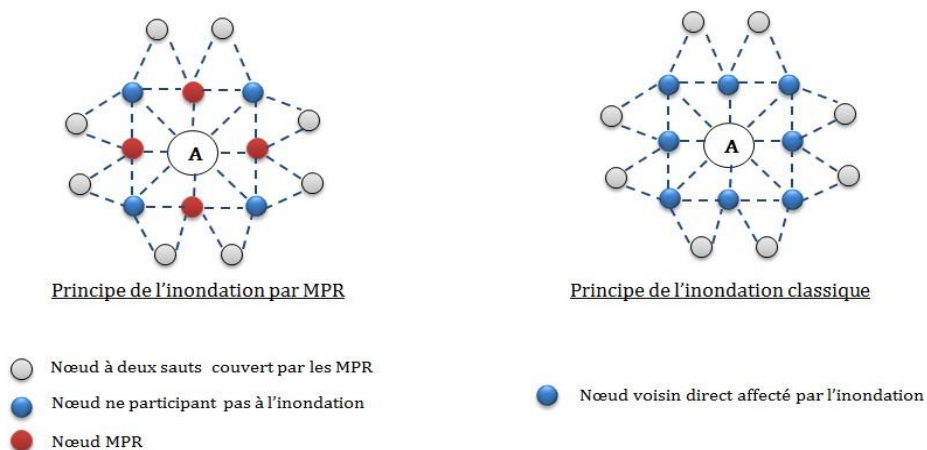


Figure 2.7 : Principes de l'inondation classique et par MPR [24].

L'algorithme de cette heuristique se présente comme suit :

Étape 1 : commencer par un ensemble vide de relais multipoints ($MPR(x) = \emptyset$).

Étape 2 : calculer le degré (le nombre de voisins à liens symétriques) pour tout nœud y « $D(y)$ » s'apparentant à l'ensemble des voisins à un saut.

Étape 3 : ajouter à l'ensemble de relais multipoints $MPR(x)$, les nœuds voisins à un saut $N(x)$ qui sont les seuls à pouvoir acheminer le trafic à un élément de l'ensemble des voisins à deux sauts ($N_2(x)$) et éliminer par la suite les nœuds couverts dans ce dernier.

Étape 4 : tant que $N_2(x) \neq \emptyset$.

Étape 4.1 : pour chaque nœud $y \in N_2(x)$ qui n'appartient pas à $MPR(x)$, calculer son degré.

Étape 4.2 : Sélectionner le nœud ayant la plus grande valeur de $N_willingness$ avec un maximum de degrés comme MPR et l'ajouter à $MPR(x)$, puis retirer de $N_2(x)$ tous les nœuds couverts par celui-ci.

Étape 5 : l'ensemble des MPR d'un nœud est constitué par la réunion des différents MPR.

- **Gestion de la topologie :**

Les messages de contrôle, qui sont utilisés pour gérer la topologie du protocole OLSR, permettent de détecter les voisins et de choisir ses MPR, ce qui lui permet de diffuser ses informations de contrôle dans le réseau.

- **Le message TC et la base d'informations topologiques :**

Pour diffuser les informations de topologie d'état de lien dans le réseau, chaque nœud MPR avec un ensemble $MPR_{selector}$ non vide annonce périodiquement un message de contrôle de topologie TC. Ces messages TC contiennent l'identification du nœud MPR ainsi que son ensemble $MPR_{selector}$. Les nœuds MPR qui reçoivent ces messages TC les retransmettent une fois de plus. En utilisant les informations de topologie obtenues à partir des messages TC, les nœuds MPR peuvent calculer le chemin

le plus court vers chaque nœud du réseau et former la table de routage. Les itinéraires dans OLSR comprennent toujours des nœuds MPR comme transitaires. Par conséquent, OLSR ne construit pas toujours le chemin le plus court, mais garantit un chemin vers la destination.

0	7 8	15 16	23 24	31
ANSN		Reserved		
Advertised Neighbor Main Address				
Advertised Neighbor Main Address				
...				

Figure 2.8: Format d'un message TC [24].

Le RFC 3626 définit les champs du message Topologie Control comme suit :

- **ANSN (Advertised Neighbor Sequence Number)** : un numéro de séquence associé avec l'ensemble des voisins avertis de ce message indiquant la fraîcheur de l'information.
- **Reserved** : ce champ est réservé et doit être maintenu à "0000000000000000".
- **Advertised Neighbor Main Address** : ce champ contient l'adresse du nœud voisin averti par les changements topologiques.
- **Calcul des routes** :

Le routage se fait saut par saut. Chaque nœud dans le réseau calcule sa table de routage pour atteindre tout autre nœud présent dans le réseau. Ce calcul est basé sur les informations de voisinage et de topologie rafraîchies périodiquement.

De ce fait, à chaque fois que l'une des adresses change, la table de routage est mise à jour et recalculée. La table de routage possède le format de la figure 2.9.

R_dest_addr	R_next_addr	R_dist	R_iface_id
-------------	-------------	--------	------------

Figure 2.9: Format de la table de routage du protocole OLSR [24].

- **R_next_addr** : est l'adresse identifiante du nœud à un saut à prendre pour atteindre le nœud identifié par son adresse R_dest_addr.
- **R_iface** : est l'identifiant de l'interface locale par laquelle le nœud peut atteindre R_dest_addr.
- **R_dist** : est la distance estimée en nombre de sauts séparant R_dest_addr du nœud local.

La table de routage est actualisée localement à chaque changement topologique sans générer de messages réseau, en réagissant à l'apparition ou à la disparition de tuples dans la base de données topologiques.

- **Avantages et inconvénients**

OLSR fonctionne efficacement dans un réseau très dense avec des nœuds qui se déplacent sporadiquement. On peut expliquer cette caractéristique par le fait que OLSR est un protocole proactif et dispose toujours d'itinéraires disponibles. L'intérêt d'OLSR réside dans sa capacité à minimiser les dépenses. Informations de vérification. Malgré le fait qu'OLSR propose un itinéraire de la source à la destination, il n'est pas forcément le plus court, car chaque itinéraire comprend les nœuds MPR.

2.5 Récapitulation

Il existe donc quatre catégories de protocoles de routage : proactifs, réactifs, hybrides et géographiques [15][19][18], comme nous l'avons vu. Les principaux protocoles présentés sont regroupés sous forme schématique dans la Figure 2.10.

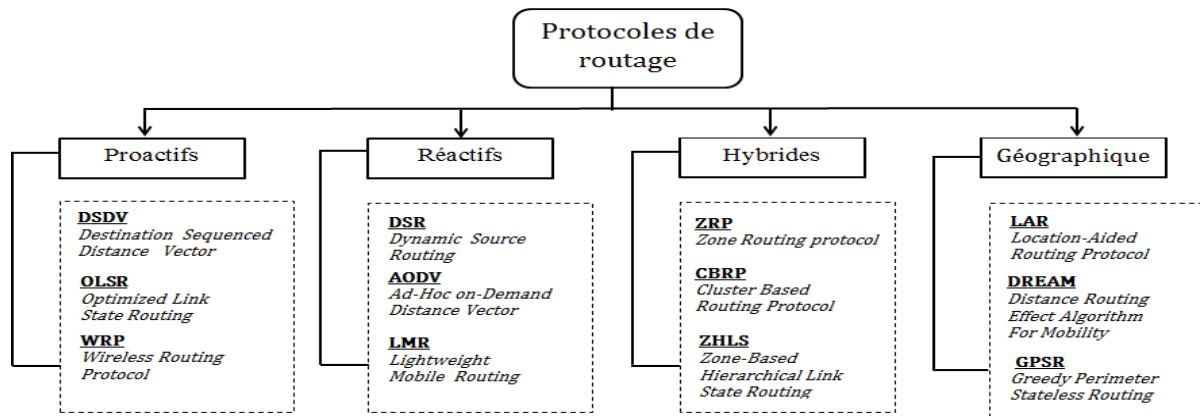


Figure 2.10: Synthèse des protocoles de routage de MANETs [19].

- **Protocoles proactifs** : Réactifs, conçus pour les réseaux mobiles de taille moyenne. La bande passante nécessaire est élevée, ce qui ne convient pas aux grands réseaux.
- **Protocoles réactifs** : économiques en bande passante, conçus pour les réseaux de grande taille et à haute latence, mais non adaptés aux réseaux très mobiles.
- **Protocoles hybrides** : combinent les avantages des deux types précédents. Défis : complexité, ressources, temps de retard.
- **Les protocoles géographiques** : En utilisant la position et la vitesse des nœuds, vous pouvez améliorer le routage.

Procurez-vous une meilleure connexion entre la source et le but. Il est nécessaire d'avoir un GPS pour localiser les nœuds. Ils ne sont pas adaptés à tous les réseaux. Spécialement conçus pour les réseaux de véhicules. Une option intéressante pour le routage dans les réseaux spécifiques, en particulier pour les réseaux de véhicules.

Protocoles	Avantages	Inconvénients
Proactifs	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de temps de réaction ; - Adaptés aux réseaux denses de taille moyenne ; - Adaptés aux réseaux à forte mobilité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic de contrôle important ; - Capacité d'échange du réseau limitée ; - Consommation énergétique plus Important.
Réactifs	<ul style="list-style-type: none"> - Trafic de contrôle faible ; - Adapté aux grands réseaux ; - Consommation énergétique réduite. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de réaction long ; - Problème en cas de forte mobilité des nœuds.
Hybrides	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptables aux grands réseaux ; - Consommation énergétique réduite ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche des routes complexes ; - Temps de réaction long ; - Ressources CPU et mémoire.
Géographique	<ul style="list-style-type: none"> - Position des nœuds connue ; - Limitation du trafic. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'un GPS ; - Ressources CPU et mémoire.

Table 2.1: Avantages et inconvénient des différentes catégories de protocoles de routage.

La Table 2.1 indique que chaque famille de protocole de routage s'adapte plus ou moins à un type de réseau. Ainsi, pour sélectionner un protocole de routage approprié, il est important de spécifier les caractéristiques du réseau, telles que sa taille, sa mobilité, ses ressources et le volume d'informations à échanger [20].

2.6 Routage dans les réseaux FANETs

Le routage dans les réseaux FANETs est crucial pour assurer une communication fiable et efficace entre les UAVs [42]. Étant donné la nature dynamique et mobile de ces réseaux, les protocoles de routage doivent s'adapter rapidement aux changements fréquents de topologie. Les approches de routage

incluent les schémas plats, où chaque UAV a un rôle égal, et les schémas hiérarchiques, qui exploitent une structure en couches pour améliorer l'efficacité. Les protocoles peuvent être proactifs, réactifs ou hybrides, chacun offrant des avantages spécifiques en termes de rapidité de réponse, de consommation d'énergie et de gestion de la bande passante. Le choix du protocole approprié est essentiel pour optimiser les performances et la durée de vie des réseaux FANETs [14].

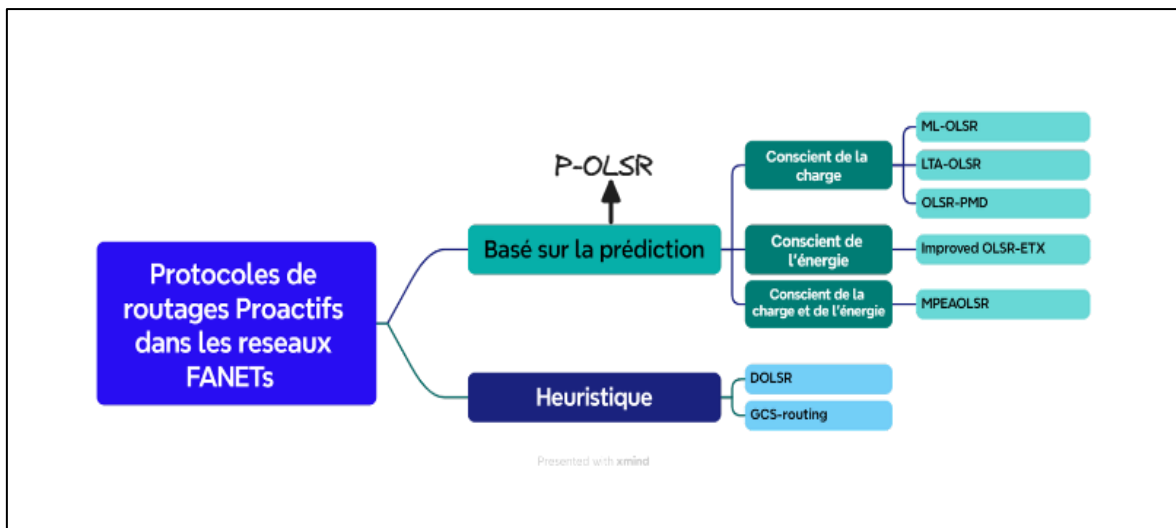


Figure 2.11 : Les protocoles de routage proactifs dans les réseaux FANETs.

2.7 Classification des protocoles de routage FANETs

Un schéma de routage plat utilise une approche d'adressage plate de sorte que chaque UAV (véhicule aérien sans pilote) participant au routage joue un rôle égal [41]. De plus, selon la manière dont les informations de routage sont obtenues et maintenues par les UAV dans le réseau [14], les schémas de routage plats sont catégorisés en schémas de routage proactifs :

2.7.1 Predictive OLSR (P-OLSR)

Le P-OLSR (Predictive Optimized Link State Routing) est une extension du protocole de routage OLSR conçue pour les réseaux ad hoc de véhicules aériens (FANET) hautement dynamiques. Contrairement à l'OLSR traditionnel

[8], qui utilise des paquets "hello" pour établir et maintenir des connexions, le P-OLSR intègre des informations de position GPS pour anticiper l'état futur des liens entre UAV. La métrique ETX [40], pondérée par la vitesse relative entre les nœuds, est utilisée pour sélectionner les meilleures routes, améliorant ainsi la fiabilité du routage. Les simulations montrent que le P-OLSR surpasse l'OLSR et le protocole Babel [5] en termes de taux de perte de datagrammes, bien que ses exigences de stockage et son utilisation proactive restent élevées. Il est particulièrement adapté pour des applications telles que l'extension de la couverture réseau, la reconnaissance et les missions de recherche et de sauvetage.

2.7.2 Mobility and Load-Aware OLSR (ML-OLSR)

Zheng Yi et al. ont proposé le ML-OLSR, une amélioration du protocole OLSR pour les FANETs (réseaux ad hoc de véhicules aériens) très dynamiques, en tenant compte de la mobilité et de la charge pour résoudre les échecs de liaison récurrents dus à la haute mobilité des UAVs. Cette méthode garantit la connectivité entre les UAVs et/ou le GCS, en évitant la sélection des liens les plus congestionnés. Elle utilise les informations GPS embarquées pour calculer deux métriques de routage : le degré de portée du nœud (RDN) et le degré de stabilité du nœud (SDN), ce dernier indiquant la stabilité des liens de communication. Les algorithmes sensibles à la mobilité et à la charge améliorent la découverte de la topologie, la sélection des MPRs et le mécanisme de sélection des chemins, augmentant ainsi les performances du réseau en termes de délai de bout en bout et de taux de livraison des paquets [7].

2.7.3 Link-quality and Traffic-load aware OLSR (LTA-OLSR)

LTA-OLSR est une amélioration du protocole OLSR conventionnel qui intègre la qualité des liens et la charge de trafic pour la sélection des routes, visant à fournir une communication et une transmission de données fiables et

efficaces dans les FANETs (réseaux ad hoc de véhicules aériens) [6]. Contrairement à l'OLSR conventionnel qui utilise le chemin le plus court basé sur le nombre de sauts, LTA-OLSR prend en compte l'indication de la force du signal reçu (RSSI) pour évaluer la qualité des liens et la charge de trafic en considérant le nombre de paquets en mémoire tampon et les informations de contention de canal de la couche MAC. Cela permet d'éviter la surcharge des UAVs sur les routes les plus courtes et de réduire les pertes de paquets et les délais de bout en bout. Les simulations ont montré que LTA-OLSR surpasse l'OLSR et le routage source dynamique (DSR) en termes de latence et de taux de livraison des paquets, bien que cela puisse augmenter la surcharge de routage [46].

2.7.4 OLSR based on Mobility and Delay Prediction (OLSR-PMD)

OLSR-PMD est une extension de l'OLSR conventionnel intégrant un modèle de prédiction de la mobilité utilisant un filtre de Kalman pour sélectionner des UAVs voisins stables comme MPR UAVs, améliorant ainsi la stabilité du routage [5]. Un modèle de prédiction du délai de mise en file d'attente inter-couche est également utilisé pour équilibrer la charge de trafic et réduire la latence. Le message "hello" est modifié pour inclure les informations de position et de vitesse des UAVs, permettant de prédire la position et la vitesse des UAVs voisins et de calculer la durée de vie du lien. La durée de vie du lien est ensuite utilisée pour sélectionner les MPR UAVs. Le modèle autorégressif à moyenne mobile (ARMA) est utilisé pour prédire le délai de mise en file d'attente moyen en se basant sur les paquets reçus. Les simulations montrent que OLSR-PMD réduit le délai de bout en bout et améliore le taux de livraison des paquets par rapport à OLSR et DSDV, bien que la prédiction de la mobilité en 2D soit une limitation [47].

2.7.5 Improved OLSR-ETX

L'OLSR-ETX amélioré est une version améliorée du protocole OLSR, adaptée aux FANET dynamiques, notamment pour les missions maritimes telles que les patrouilles et les opérations de recherche et de sauvetage. En tenant compte des fréquents changements de topologie et des temps de connexion très courts entre les UAV, cette version améliore la sélection des MPR UAV en intégrant le temps d'expiration du lien et l'énergie résiduelle des UAV. La métrique ETX est pondérée par le temps d'expiration du lien, calculé à partir de la vitesse relative et de la distance entre les UAV, et les UAV ayant une énergie résiduelle inférieure à un seuil ne sont pas sélectionnés comme MPR [40]. Les simulations ont montré des améliorations en termes de surcharge de routage, de délai de bout en bout et de taux de livraison des paquets par rapport à l'OLSR avec uniquement la métrique ETX. Cependant, des facteurs environnementaux complexes et la prise en compte de la hauteur des UAV restent des défis à relever pour améliorer ce protocole [48].

2.8 La qualité de service (QoS)

Le terme « qualité de service » fait référence à divers concepts liés à l'adaptation du comportement du réseau pour répondre aux besoins des applications ou à l'assurance d'un niveau de garantie pour la transmission de données au sein d'un élément de réseau, CCITT (Consultative Committee for International Telegraph and Telephone), On définit la qualité de service comme l'impact global de la performance du service qui influence le degré de satisfaction d'un utilisateur envers le système [26].

2.9 Les métriques de la qualité de service

La qualité de service (QoS) est une mesure de la qualité du service d'un réseau. L'ensemble des facteurs qui déterminent la satisfaction des utilisateurs d'un service la définit [27].

La qualité du service est un ensemble de normes que le réseau doit respecter pour le transport du trafic d'une source à une destination, selon la RFC 2386 telles que :

- Le nombre de paquets perdus.
- La bande passante.
- Le délai de bout en bout.
- La sécurité des données transmises.
- La durée de vie du réseau.

Nous présenterons certaines de ces métriques de QoS :

- **Perte de Paquets** : La perte de paquets mesure le pourcentage de paquets de données envoyés qui ne parviennent pas à leur destination, indiquant des problèmes de transmission ou de congestion du réseau.
- **Bande Passante** : La bande passante est la capacité maximale du réseau à transmettre des données, généralement mesurée en bits par seconde (bps).
- **Délai de Bout en Bout** : Le délai de bout en bout est le temps total nécessaire pour qu'un paquet de données soit transmis d'une source à une destination finale à travers le réseau.
- **Gigue (Variation du Délai)** : 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.

2.10 Choix du protocole de routage OLSR

Nous sommes convaincus que le choix d'OLSR permettra à notre réseau Ad hoc de fonctionner de manière fiable, efficace et évolutive.

L'OLSR est l'un des protocoles standards implémentés par le simulateur NS-3 que nous avons choisi (NS-3 qui implémente les protocoles standards OLSR, AODV, DSR).

En conclusion, le choix d'OLSR comme protocole de routage pour notre réseau Ad hoc est une décision éclairée qui s'appuie sur une analyse approfondie des besoins et des contraintes de notre environnement réseau.

2.11 Conclusion

Le routage est un élément essentiel de l'architecture de communication des FANETs, car les UAVs doivent relayer les trafics de contrôle et de données entre eux vers les GBS (Global Business Services). Dans ce chapitre, on a examiné les classifications de routage avec QoS dans le réseau FANET, les critères qui doivent être prises en compte avant le choix et la conception des schémas de routage. Le routage avec QoS est un domaine de recherche actif dans les FANETs. Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, mais aucune d'elle n'est prise comme standard. Dans le chapitre suivant, nous aborderons notre contribution dans ce domaine ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre 03

Contribution et Simulation

3.1 Introduction

Après avoir décrit le routage avec qualité du service dans les FANETs dans le chapitre précédent, nous allons maintenant présente notre idée. Notre travail est basé sur le protocole standard OLSR. Ce protocole n'est plus adaptable tel qu'il est pour les réseaux FANET. L'objectif de notre idée est d'améliorer ce protocole pour garantir un meilleur débit pour les applications et une forte durabilité pour le réseau et les chemins installés.

3.2 La simulation

La simulation est une méthode employée afin de mettre en place un réseau sur l'ordinateur. Cette méthode permet de calculer le comportement du réseau en utilisant des calculs mathématiques qui sont employés par les organisations en réseau [28]. Les simulateurs de réseaux sont des outils précieux pour les chercheurs, les développeurs et les ingénieurs qui travaillent sur des réseaux complexes. Ils offrent un environnement flexible et contrôlé pour concevoir, tester, déboguer et optimiser les protocoles et les architectures réseaux [29].

3.3 L'environnement de développement

Plusieurs simulateurs ont été développé pour valider les performances des réseaux. Le tableau 3.1 présente une comparaison entre quelques simulateurs réseaux.

Simulation	Evolutivité	Extensibilité	Documenta-tion	Network Support
OPNET	Enterprise	Oui	Bien	Wireless Ad hoc, Cellular, WLAN, PAN
NS-2	Small cale	Oui	Pauvre	Wired, Wireless, Ad, hoc, satellite
OMNET++	Small cale	Oui	Moyen	Wired, Wireless Ad hoc
GloMoSim	Larges cale	Oui	Bien	Wireless, WSN, Ad hoc
QualNet	Enterprise	Oui	Bien	MANET, Wired, Cellular, Satellite
NetSim	Larges cale	Oui	Bien	Wired, Wireless Ad hoc
J-Sim	Medium	Oui	Moyen	Wired, Wireless WSN
NS-3	Larges cale	Oui	Bien	Wired, Wireless Ad hoc, IP and Non-IP

Table.3.1 : Comparaison des caractéristiques importantes des simulateurs de réseau.

3.3.1 L’environnement matériel de notre simulation

Notre simulation a été réalisée sur un ordinateur HP EliteBook 840 G5 avec les spécifications suivantes :

Système d'exploitation	Processeur	Mémoire	Type
UBUNTO 23.02	Intel(R) Core (TM) i7-8350U CPU @ 1.70 GHz	16,00 Go	Système d'exploitation 64 bits, processeur x64.

Table 3.2 : spécifications de l’appareil.3.3.2 L’environnement logiciel.

3.3.2 L’environnement logiciel

•Ubuntu

Ubuntu est un système d'exploitation open source basé sur Linux, développé et maintenu par la communauté Ubuntu, soutenue par Canonical. Ubuntu est célèbre pour son cycle de publication régulier, avec des

versions LTS (Long Term Support) tous les deux ans, offrant un support à long terme pour les mises à jour de sécurité et les correctifs [52].

• **NS-3**

Ns-3 est un simulateur de réseau à événements discrets, principalement destiné à la recherche et à l'éducation. Il est distribué sous licence GNU GPLv2, ce qui le rend accessible au public pour la recherche, le développement et l'utilisation. Le projet ns-3 vise à créer un environnement de simulation privilégié et ouvert pour la recherche en réseau, aligné sur les besoins actuels en simulation de la recherche en réseau et encourageant la contribution de la communauté, l'évaluation par les pairs et la validation du logiciel [50].

• **C++**

En tant que successeur du langage C, C++ est génial et efficace. Mais il possède également des fonctionnalités puissantes, telles que des concepts « classe », qui permettent de l'application des techniques de la programmation orientée objet [51]. Il existe deux types de fichiers sources :

- Ceux qui contiennent réellement des instructions ; leurs noms sont EX. ccp.
- Ceux qui ne contiennent que des déclarations ; leurs noms sont EX.H.

3.4 Installation de NS-3

La commande ligne pour installer NS3 est :

Étape 1 : tape sur terminal

```
$ sudo apt update
$ sudo apt install g++ python3 cmake ninja-build git gir1.2-goocanvas-2.0 python3-gi python3-gi-cairo python3-pygraphviz gir1.2-gtk-3.0 ipython3 tcpdump wireshark sqlite sqlite3 libsqlite3-dev qtbase5-dev qtchooser qt5-qmake qtbase5-dev-tools openmpi-bin openmpi-common openmpi-doc libopenmpi-dev doxygen graphviz imagemagick python3-sphinx dia imagemagick texlive dvipng latexmk texlive-extra-utils texlive-latex-extra texlive-font-utils libeigen3-dev gsl-bin libgsl-dev libgslcblas0 libxml2 libxml2-dev libgtk-3-dev lxc-utils lxc-templates vtun uml-utilities ebttables bridge-utils libxml2 libxml2-dev libboost-all-dev
```

Tous ces packages ne sont pas obligatoirement nécessaires, mais installez ces éléments, sinon il peut y avoir des bugs qui empêchent l'exécution de votre code. Installons donc tous ces packages.

Étape 2 : maintenant, décompressez ou décompressez le ns-allinone-340.tar.bz2 dans le dossier personnel.

Maintenant extrait avec succès.

Étape 3 : nous devons maintenant l'installer en exécutant la commande
Ouvrir un nouveau terminal.

```
$ cd ns-allinone-3.40/ $ ./build.py --enable-examples --enable-test
```

3.5 Notre proposition

Pour notre proposition, on a travaillé à améliorer la qualité de service dans les réseaux de communication Ad hoc aériens (FANET). DEOLSR (Data-rate Energy-OLSR) est une version améliorée du mécanisme de sélection MPR du protocole OLSR. L'utilisation de l'algorithme DEOLSR permet à un nœud de créer un ensemble MPR en tenant compte du débit et l'énergie résiduelle maximale de chaque nœud voisin à une distance d'un coup. Par conséquent, les nœuds qui ont la plus grande capacité de débit et d'énergie sont considérés dans la sélection.

3.5.1 Principe de notre amélioration

Notre proposition est basée sur :

- L'échange des valeurs d'énergie et de débit entre les voisins à un saut. Nous savons tous que le protocole OLSR utilise des messages HELLO pour vérifier l'état des liens entre les nœuds.
- Dans notre proposition, nous modifions le paquet HELLO pour véhiculer les informations voulues : l'énergie résiduelle et le débit, voir la figure 3.1.

Mécanisme de choix les MPRs

Cette section explique en détail la procédure de choix des MPRs. En commençant par présenter le processus de sélection traditionnel des MPR, nous décrivons ensuite le mécanisme de sélection spécifique aux MPR de DEOLSR.

Choix des MPRs dans le protocole OLSR classique

Les auteurs du protocole OLSR ont proposé une méthode heuristique pour sélectionner les nœuds MPR, où ils tentent de minimiser leur nombre maximum dans le réseau. Dans cette méthode, un algorithme récursif est appliqué à chaque nœud pour sélectionner ses MPR dans le voisinage à un saut. Cet algorithme sélectionne un nœud voisin comme MPR si le lien vers ce voisin est symétrique et que ce voisin couvre le nombre maximum de voisins à deux sauts (degré de portée). Le nœud MPR sélectionné et les nœuds à deux sauts couverts par ce MPR ne seront pas pris en compte dans l'itération suivante de l'algorithme. Cet algorithme est répété jusqu'à ce que tous les voisins à deux sauts soient couverts par les nœuds MPR sélectionnés. Les auteurs du OLSR ont montré que le calcul d'un ensemble minimal de relais multipoints en utilisant cet algorithme est un problème NP-complet.

L'algorithme MPRs dans le protocole DEOLSR

L'algorithme montre notre modification sur la méthode standard pour l'élection des MPR dans le réseau :

Algorithme 3.1 : nouveau mécanisme de sélection des MPR

Entrée :

$N(x)$: liste des voisins à un saut.

$N2(x)$: liste des voisins à deux sauts.

Sortie :

Liste des MPR (x)

Début :

1. Commencez avec un ensemble de relais multipoint vide.
2. S'il existe des nœuds à deux sauts qui sont connectés seulement à un seul voisin de $N(x)$, alors,
Ajouter ce voisin de $N(x)$ à la liste des MPRset (x) et supprimez ces nœuds à deux sauts de $N2(x)$.
3. Tant que ($N2(x)$ n'est pas vide) Faire
 - {
 - (a) Calculer le de degré d'accessibilité $R(y)$ de chaque nœud dans $N(x)$.
 - (b) Ajoutez le nœud (y) de $N(x)$ avec l'énergie supérieur à un seuil à MPRset (x).
 - Si plusieurs nœuds existent alors, prenez le nœud avec le plus haut débit,
Si plusieurs nœuds ont la même valeur de débit maximal alors, prenez le nœud avec le plus haut degré d'accessibilité $R(y)$.
 - Supprimez tous les nœuds du deuxième niveau couvert par ce nœud dans l'ensemble $N2(x)$.
 - }

3.5.2 Avantages de l'algorithme DEOLSR

- Privilégie les nœuds puissants : Favorise les nœuds avec une réserve d'énergie suffisante pour assurer une transmission fiable des données.
- Optimise le débit : Sélectionne les nœuds offrant le débit maximal pour une meilleure performance de routage.

- Considère la connectivité : Prend en compte le nombre d'opportunités d'accessibilité pour une meilleure couverture du réseau.
- Gère les cas d'égalité : Utilise le degré comme critère de départage en cas d'égalité de performance énergétique et de débit.

Impact de la sélection des MPR dans la méthode DEOLSR sur les performances du réseau

L'algorithme DEOLSR conduit à la sélection des MPR les plus puissants et performants par rapport à la méthode standard. Cela peut se traduire par une meilleure couverture du réseau, une transmission de données plus fiable et un débit de routage plus élevé.

Points importants à noter

L'algorithme DEOLSR ajuste la sélection des MPR en fonction des contraintes de puissance des nœuds voisins à un saut.

Il vise à optimiser les performances du routage en privilégiant les nœuds avec un niveau d'énergie supérieur à un seuil et un débit maximal.

L'impact du nouvel algorithme sur la sélection des MPR dans des scénarios spécifiques dépendra de la topologie du réseau et de la distribution des nœuds. En conclusion, le protocole DEOLSR constitue une approche prometteuse pour améliorer les performances du routage dans les réseaux FANETs. Il combine efficacement la gestion de l'énergie, l'optimisation du débit et la prise en compte de la connectivité pour une sélection des MPR plus robuste et performants.

3.6 Modèle de réseau

Pour valider notre protocole, nous l'avons implémenté sur le simulateur NS3.40. La Table 3.3 résume les paramètres les plus importants choisis dans nos simulations.

Nous avons fait varier le nombre de nœuds dans le réseau (20 ,40,60,80) nœuds avec une vitesse des nœuds fixe (25 m/s). La simulation est réalisée sur une zone de réseau de 1000 m × 1000 m× 1000 m. Nous avons aussi varié les valeurs d'énergies des nœuds (100 Joule, 55 Joule) et le débit (11 Mbit/s,5 Mbit/s,2 Mbit/s). Dans nos simulations, le modèle de mobilité considéré est le GMM (Gauss Markov Mobility Model) et l'intervalle des messages TC est fixé à 2s. La table 3.3 résume les paramètres les plus importants choisis dans nos simulations et la Figure 3.3 présente un exemple de positionnement des drones dans nos simulation pris par l'outil NetAnim du NS3.

Paramètres	Valeurs
Protocole	OLSR, DEOLSR
Nombres des nœuds	20 ,40,60,80
Modèle de mobilité	Gauss Markov Mobility Model
Temps de simulation(s)	200
Vitesse de nœud (m/s)	25
Phys + liaison	IEEE 802.11b
Intervalle TC(S)	2.0
La dimension de topologie(m)	1000*1000*1000
Taille du paquet(oct)	64
Débit (bits/s)	11,5,2
Energie (Joule)	100, 55

Table 3.3 Paramètres de simulation.

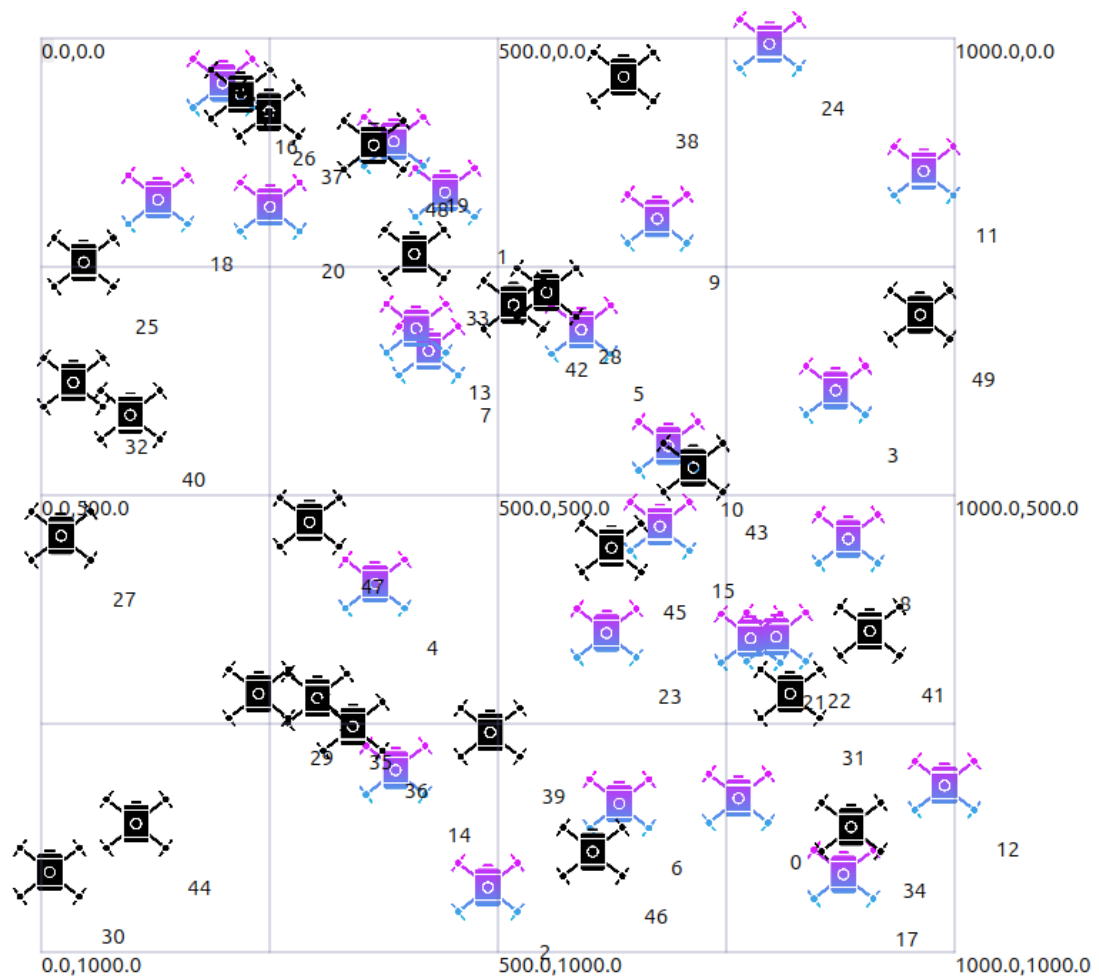


Figure 3.3: Visualisation de la simulation sur NetAnim.

3.7 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour notre protocole DEOLSR et les comparons à ceux obtenus pour le protocole OLSR. Pour les métriques de simulation, nous considérons.

- **Le nombre total des paquets reçus (NPR) :**

L'objectif de cette étude est d'analyser le nombre total de paquets reçus dans un réseau ad hoc en utilisant les protocoles DEOLSR et OLSR, en fonction du temps et du nombre de nœuds.

- **Taux de réception (TR)**

Cette étude analyse le taux de réception des paquets dans un réseau ad hoc en utilisant les protocoles DEOLSR et OLSR, en fonction du temps et du

nombre de nœuds. Le taux de réception est un indicateur clé de la performance du réseau, reflétant la capacité d'un protocole à acheminer efficacement les paquets de données à travers le réseau.

3.7.1 Le nombre total des paquets reçus

1-Par a port au temps

Nous avons mené une étude pour évaluer l'influence du nombre de nœuds sur les performances d'DEOLSR, en se référant au nombre de paquets reçus.

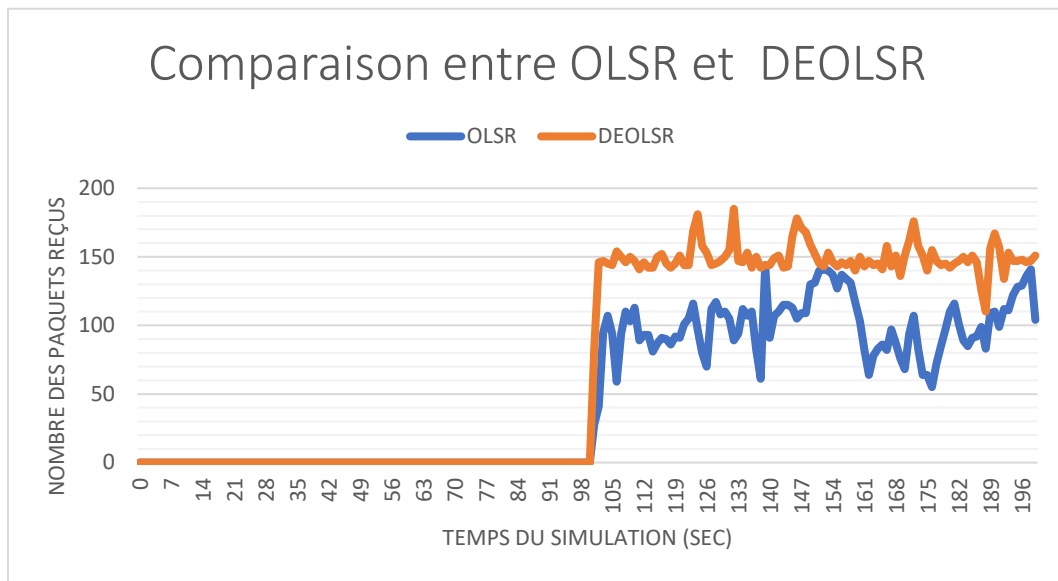


Figure 3.4: Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 20 drones et le critère nombre total des paquets reçus.

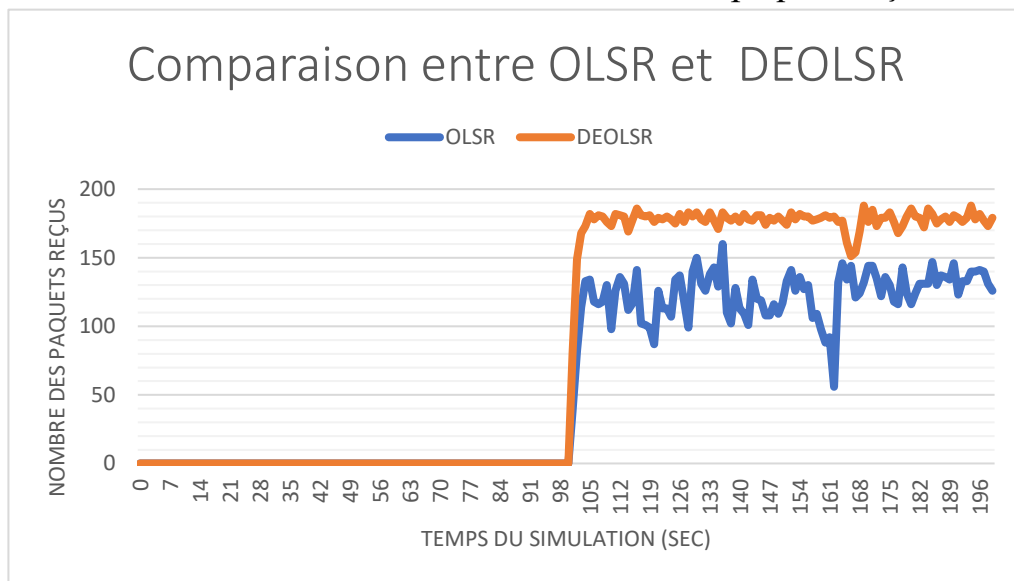


Figure 3.5: Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 40 drones et le critère nombre total des paquets reçus.

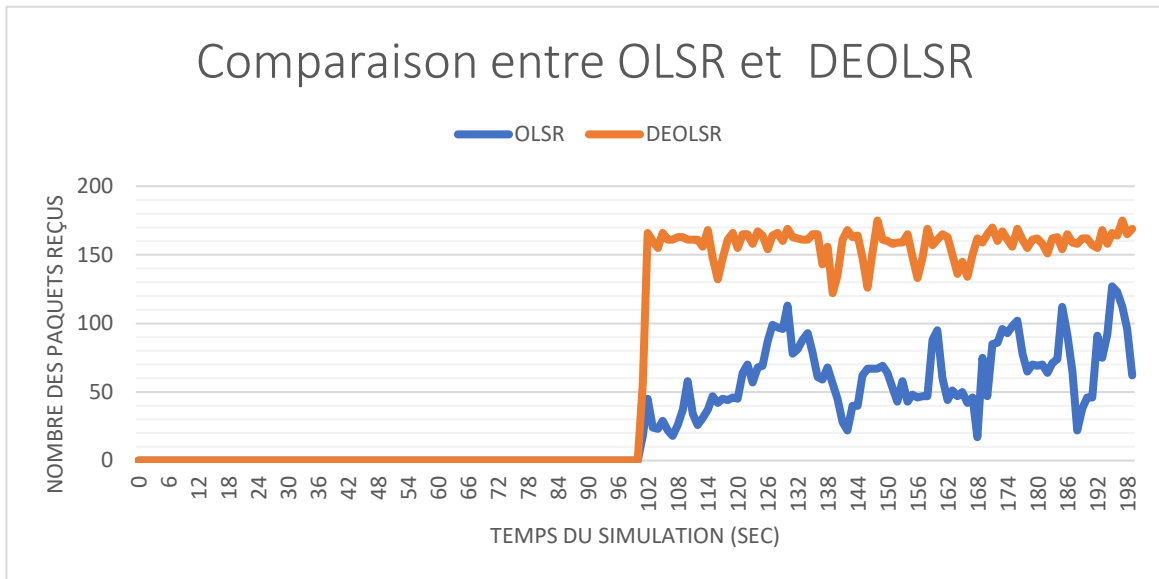


Figure 3.6: Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 60 drones et le critère nombre total des paquets reçus.

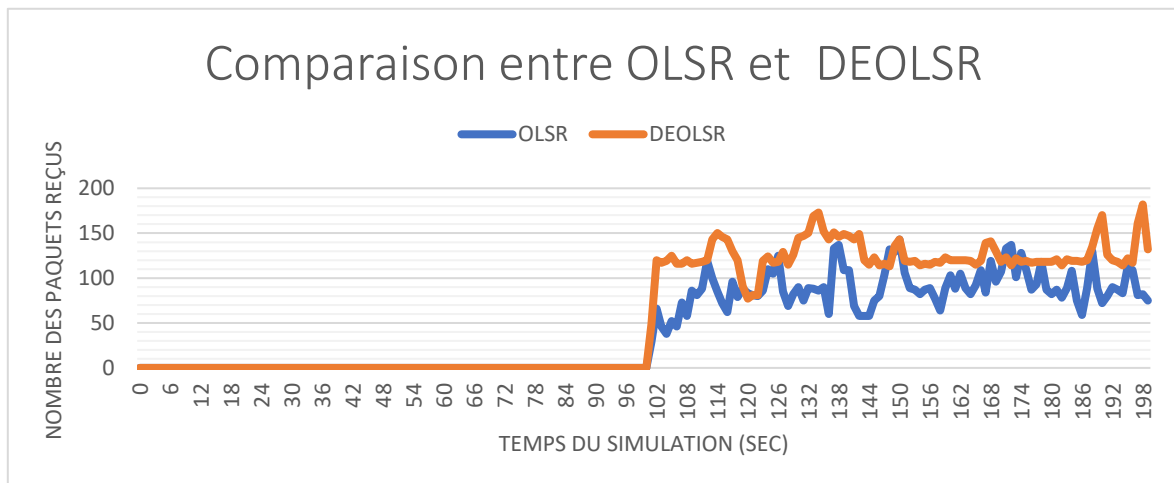


Figure 3.7: Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 80 drones et le critère nombre total des paquets reçus.

Discussion

Dans chaque configuration, DEOLSR a réussi à recevoir un nombre plus élevé de paquets par rapport à OLSR. Cette différence est particulièrement notable dans les scénarios où les nœuds ont des niveaux d'énergie disparates. DEOLSR a démontré une capacité supérieure à optimiser le routage des paquets en tenant compte de l'état énergétique des nœuds, ce qui a conduit à une réception plus élevée des paquets.

2-Par a port au nombre de nœud

La Figure 3.8 montre un récap des résultats des simulations faites sur plusieurs scénarios avec des nombres de nœuds différents.

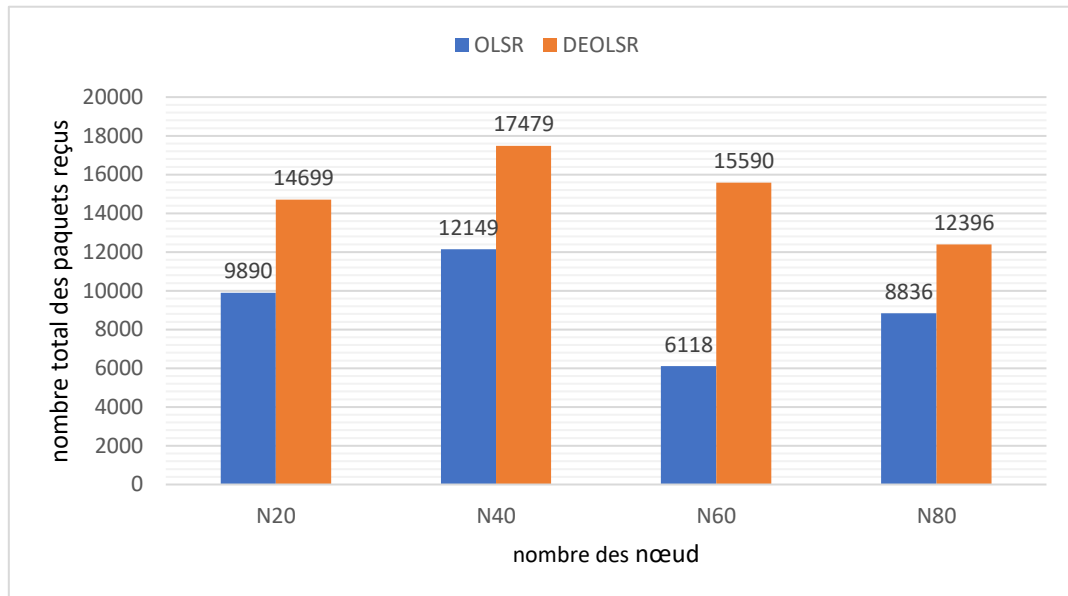


Figure 3.8 : Comparaison entre DEOLSR et OLSR par à port au nombre de nœud sur le critère nombre total des paquets reçus.

Discussion

La Figure 3.8 montre clairement que notre amélioration à conduit à une augmentation des paquets de données reçus quel que soit le nombre de nœuds. Ceci est obtenu à cause de la qualité des chemins installés dans DEOLSR qui se base sur l'énergie et le débit.

DEOLSR surpasse OLSR en termes de nombre total de paquets reçus, à la fois en fonction du temps et du nombre de nœuds. DEOLSR offre une solution plus robuste et fiable pour les réseaux FANETs, particulièrement dans des environnements dynamiques avec une forte densité de nœuds. Cette performance améliorée est attribuable à la capacité de DEOLSR à optimiser dynamiquement les chemins de routage en fonction des conditions du réseau, garantissant ainsi une meilleure réception des paquets.

3.7.2 Le taux de réception

Dans cette section, nous allons présenter le taux de réception des paquets reçus dans nos simulations. Bien sûr, il y a une différence entre le nombre de paquets reçus et le taux de réception. Dans le dernier, c'est le nombre de paquets reçus par rapport au nombre de paquet envoyés dans le réseau qui est considéré. Avec ce paramètre, on peut déduire le taux de paquets perdus dans le réseau.

1-Par a port au temps

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de simulations sur le critère du taux de réception des paquets tous en modifiant le nombre de nœuds dans le réseau. Les résultats sont présentés par rapport au temps.

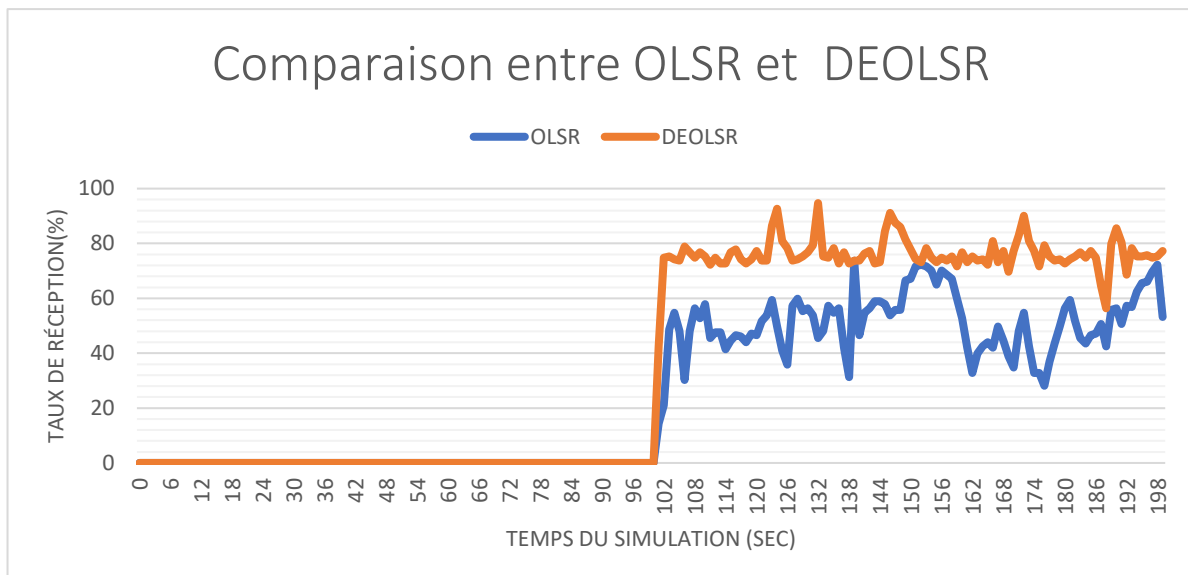


Figure 3.9: Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 20 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau.

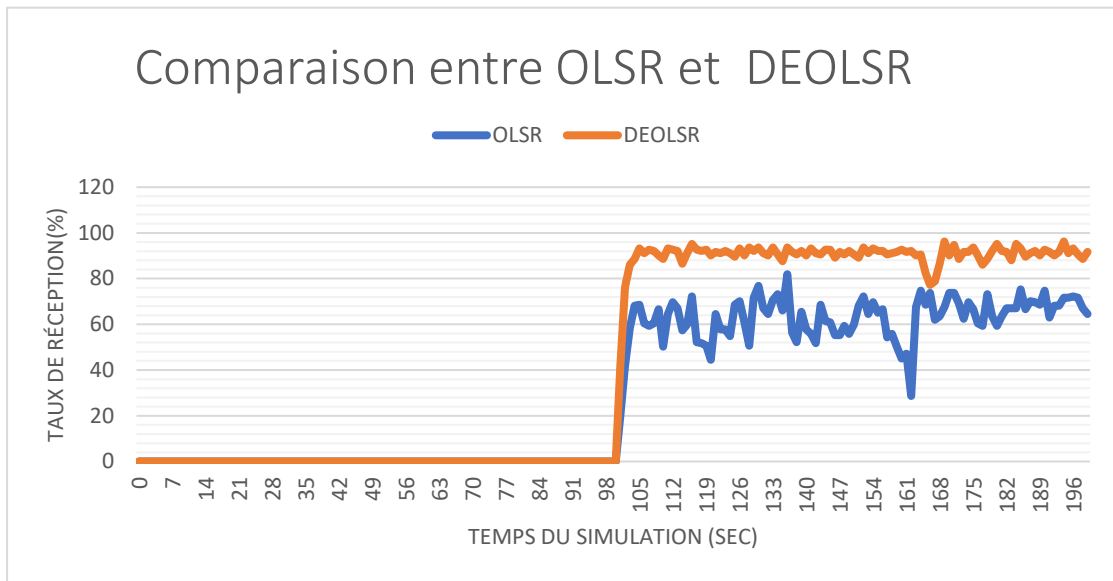


Figure 3.10 : Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 40 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau.

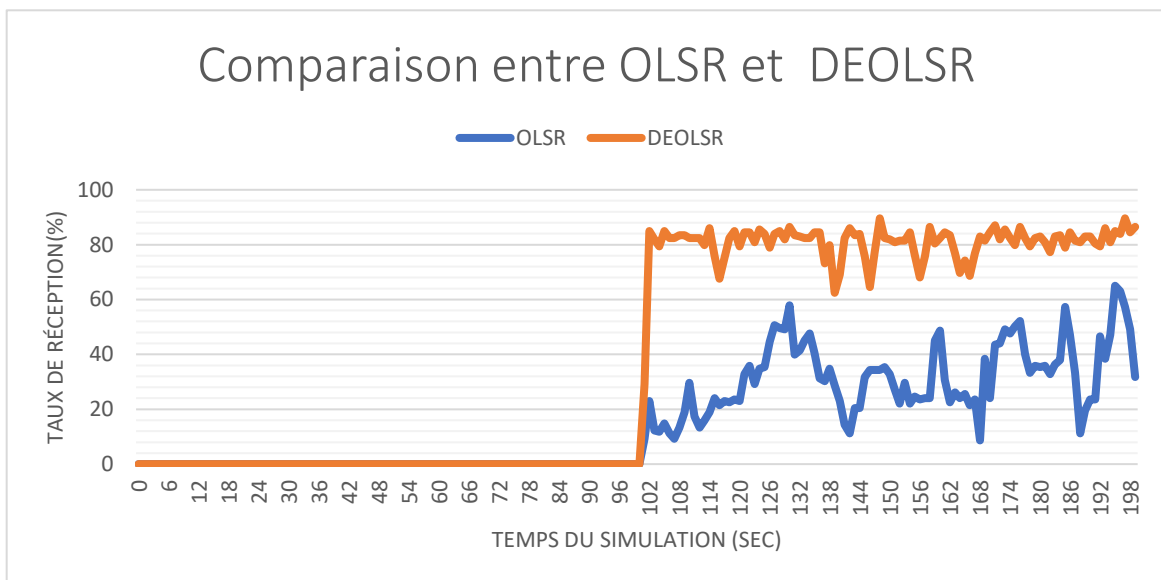


Figure 3.11: Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 60 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau.

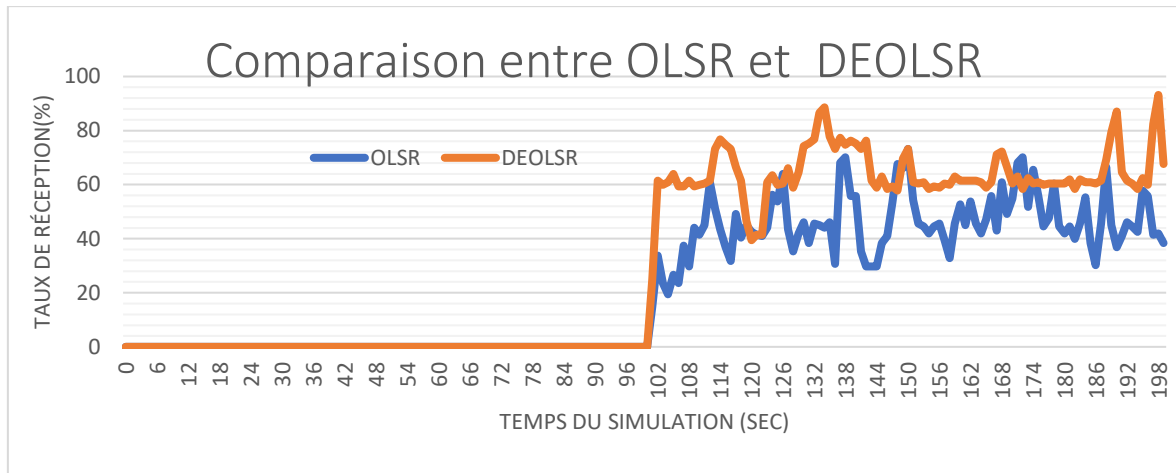


Figure 3.12 : Résultat de comparaison entre DEOLSR et OLSR sur un réseau de 80 drones et le critère taux de réception de paquets dans le réseau.

Discussion

En examinant l'évolution du taux de réception des paquets au fil du temps, nous avons observé que DEOLSR maintient généralement un taux de réception plus élevé et plus stable que OLSR.

Cette stabilité dans le taux de réception suggère que DEOLSR est plus robuste face aux variations du trafic et de la topologie du réseau.

2-Par a port au nombre de nœud

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation sur le critère du taux de réceptions par rapport au nombre de nœuds dans le réseau.

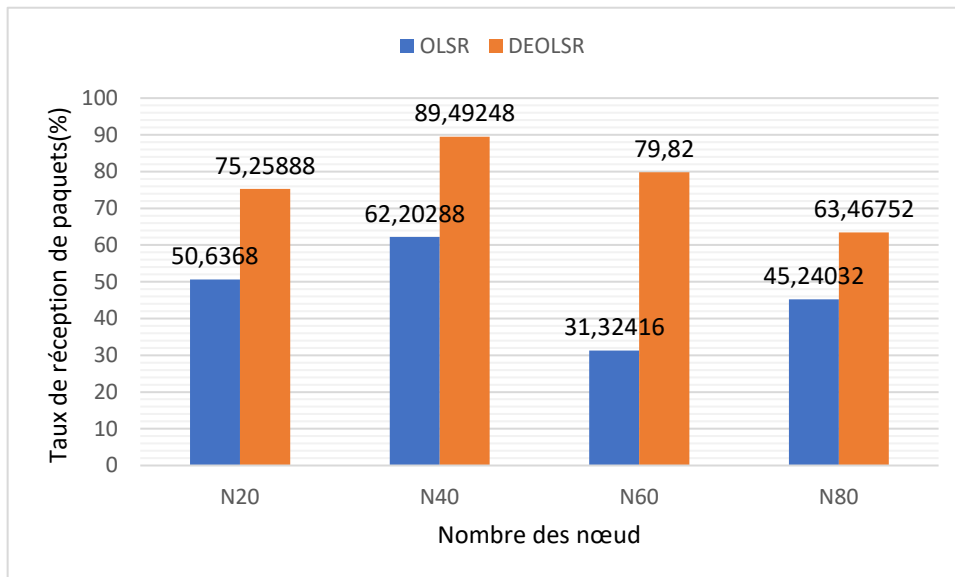


Figure 3.13 Comparaison entre DEOLSR et OLSR par à port au nombre de nœud sur le critère taux de réception de paquets dans le réseau

Discussion

Nous constatons sur la Figure 3.13 que le taux de réception des paquets est généralement plus élevé dans les scénarios où DEOLSR est utilisé par rapport à OLSR, indépendamment du nombre de nœuds.

Cette observation suggère que DEOLSR est plus efficace pour garantir la livraison des paquets même dans des réseaux denses avec un grand nombre de nœuds.

DEOLSR maintient un taux de réception des paquets plus élevé et plus stable que OLSR, même lorsque le nombre de nœuds dans le réseau augmente. Cette stabilité est cruciale pour garantir une communication fiable dans les FANETs, où la densité des nœuds et les conditions de trafic peuvent varier considérablement

Conclusion de l'Analyse

L'analyse comparative des performances des protocoles DEOLSR et OLSR dans les FANETs a révélé que DEOLSR surpasse OLSR en termes de nombre total de paquets reçus et de taux de réception des paquets, que ce soit en fonction du temps ou du nombre de nœuds.

3.8 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté le simulateur NS-3. Nous avons aussi présenté notre contribution pour la sélection des nœuds MPR basé sur deux paramètres : le débit et l'énergie résiduelle. Note nouveau protocole baptisé DEOLSR a été évaluée en utilisant NS-3.40. Les résultats de la simulation ont montré que DEOLSR a amélioré les performances du réseau en terme du total des paquets reçus, la durabilité des chemins et offre au applications les débits requis.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les réseaux ad hoc de véhicules aériens (FANETs) représentent une technologie émergente permettant la communication et la coordination entre véhicules aériens sans pilote (UAVs) en vol. Ces réseaux sont utilisés dans diverses applications telles que la surveillance, la reconnaissance, les missions de recherche et de sauvetage, et les patrouilles maritimes. En raison de la haute mobilité des UAVs, les FANETs sont caractérisés par une topologie dynamique et changeante, nécessitant des protocoles de communication robustes et adaptatifs pour assurer une connectivité fiable et efficace.

Le routage dans les réseaux FANETs est un défi majeur en raison de la mobilité élevée des UAVs et des variations rapides de la qualité des liens. Les protocoles de routage traditionnels, tels que l'OLSR (Optimized Link State Routing), sont souvent adaptés et améliorés pour répondre aux exigences spécifiques des FANETs. Ces adaptations visent à optimiser la sélection des routes en tenant compte de facteurs tels que la stabilité des liens, la charge de trafic, et la consommation d'énergie pour maintenir une communication fiable et minimiser les interruptions.

La problématique du routage avec qualité de service (QoS) dans les réseaux FANETs réside dans la nécessité d'assurer non seulement la connectivité mais aussi la performance du réseau en termes de délai, de débit et de taux de livraison des paquets. Les défis incluent la gestion de la mobilité des UAVs, l'équilibrage de la charge de trafic, et la conservation de l'énergie des UAVs pour prolonger la durée de la mission. Les protocoles de routage doivent être capables de s'adapter aux conditions changeantes et de choisir des routes optimales pour répondre aux exigences de QoS.

Notre travail rentre dans ce cadre, le routage avec qualité de service. Pour cela, on a proposé des améliorations significatives sur le protocole OLSR standard pour répondre aux deux exigences essentielles dans un réseau la durabilité des nœuds et le débit. Le nouveau protocole baptisé DEOLSR,

CONCLUSION GÉNÉRALE

basé sur des critères énergétiques et de débit, permet de choisir des chemins de routage qui équilibrent la charge de trafic et minimisent la consommation d'énergie des UAVs.

Pour montrer l'efficacité de notre approche, nous avons implémenter notre protocole sur le simulateur NS3. Les résultats obtenus montrent que DEOLSR améliore significativement les performances du réseau en termes de délai de bout en bout et de taux de livraison des paquets en comparaison avec OLSR standard. Ces simulations confirment la viabilité et l'efficacité de notre méthode dans des scénarios de FANETs dynamiques.

Cette recherche établit des bases solides pour de futures avancées dans le domaine des protocoles de routage avec qualité de service, ce qui ouvre la voie à des réseaux plus durables et plus performants en matière d'énergie, de débit et d'autres paramètres de QoS.

Bibliographie

- [1] Patel, Vishal M., and Nikhil N. Gondaliya. "Performance Analysis of Ad-hoc Routing Protocols for Disaster Scenario." *International Journal of Research in Information Technology-january-2014S*.
- [2] Zoubir, Khaldia, and Sichem Yazid. *Protocoles de routage ad-hoc: étude et simulation*. Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2022.
- [3] Bekmezci, Ilker, Ozgur Koray Sahingoz, and Şamil Temel. "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey." *Ad Hoc Networks* 11.3 (2013): 1254-1270.
- [4] Ahmed, Gamil, et al. "Performance Evaluation of Three Routing Protocols for Drone Communication Networks." *Arabian Journal for Science and Engineering* (2024): 1-13..
- [5] Mahajan, Prateek, et al. "Multi-Objective MDP-based Routing In UAV Networks For Search-based Operations." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2024).
- [6] Gangopadhyay, Swati, and Vinod Kumar Jain. "A position-based modified OLSR routing protocol for flying ad hoc networks." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023).
- [7] Mateo, Felipe Leon, Marely Cruz Felipe, and Elba Zambrano Solorzano. "Analysis of routing protocols in a FANET for an emergency system against seismic events." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2994. No. 1. AIP Publishing, 2024.
- [8] Lau, Wei Jian, et al. "AQR-FANET: An Anticipatory Q-Learning-based Routing Protocol for FANETs." *2023 IEEE 16th Malaysia International Conference on Communication (MICC)*. IEEE, 2023.
- [9] Singh, Rajnesh, and Neeta Singh. "Performance assessment of DSDV and AODV routing protocols in mobile adhoc networks with focus on node density and routing overhead." *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*. IEEE, 2020.
- [10] Tareque, Md Hasan, Md Shohrab Hossain, and Mohammed Atiquzzaman. "On the routing in flying ad hoc networks." *2015 federated conference on computer science and information systems (FedCSIS)*. IEEE, 2015.
- [11] Lakew, Demeke Shumeye, et al. "Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2020): 1071-1120.
- [12] Maakar, S., Yudhvir Singh, and Rajeshwar Singh. "Considerations and open

Bibliographie

issues in flying ad hoc network." *Inter. J. of Sci. Engg. & Res.(IJSER)* 5.7 (2017): 397-402.

[13] Mowla, Md Munjure, Md Ashiqur Rahman, and Iftekhar Ahmad. "Assessment of mobility models in unmanned aerial vehicle networks." *2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)*. IEEE, 2019.

[14] Nadeem, Adnan, et al. "A review and classification of flying ad-hoc network (FANET) routing strategies." *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 8.3 (2018): 1-8.

[15] Frikha, Mounir. "Réseaux ad hoc: routage, qualité de service et optimisation. Performance des réseaux." 2013.

[16] Khan, Muhammad Asghar, et al. "Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols." *2017 First international conference on latest trends in electrical engineering and computing technologies (INTELLECT)*. IEEE, 2017.

[17] Arafat, Muhammad Yeasir, and Sangman Moh. "Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey." *IEEE access* 7 (2019): 99694-99720.

[18] Djahel, Soufiene. *Le routage OLSR et l'attaque du trou noir: Analyse & Détection*. GRIN Verlag, 2011.

[19] Qureshi, Kashif Naseer, and Abdul Hanan Abdullah. "Study of efficient topology based routing protocols for vehicular ad-hoc network technology." *World Applied Sciences Journal* 23.5 (2013): 656-663.

[20] Gupta, Arti, and Manish Pradhan. "A Comparative Study of Current Routing Protocol in Wireless Ad-Hoc Network." *International Journal of Engineering Research and Technology* 2 (2013): 144-148.

[21] Kulkarni, Nidhi S., Indra Gupta, and Balasubramanian Raman. "On demand routing protocols for mobile ad hoc networks: A review." *2009 IEEE International Advance Computing Conference*. IEEE, 2009.

[22] Souad Imane, D. J. I. E. D., and H. A. L. I. M. I. Ibtihal. *Evaluation des Performances des Différents Protocoles de Routage des Réseaux AD HOC pour les Réseaux Multi-UAV (FANET) Etude Comparative des Protocoles DSDV et AODV*. Diss. UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.

Bibliographie

- [23] Nadeem, Adnan, et al. "A review and classification of flying ad-hoc network (FANET) routing strategies." *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 8.3 (2018): 1-8.
- [24] Tuli, Esmot Ara, et al. "Performance enhancement of optimized link state routing protocol by parameter configuration for UANET." *Drones* 6.1 (2022): 22.
- [25] Gadekar, Sonam, and Sujata Kadam. "Secure optimized link state routing (OLSR) protocol against node isolation attack." *2017 IEEE international conference on power, control, signals and instrumentation engineering (ICPCSI)*. IEEE, 2017.
- [26] Ma, Xiaoyan. *Data collection of mobile sensor networks by drones*. Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2017).
- [27] Ksouri, Chahrazed. *Smart Mobility and Routing in Intermittent Infrastructure-based Internet of Vehicles*. Diss. Université de Bordeaux; Université de Sfax (Tunisie), 2020. {
- [28] Musa, Ahmad, and Irfan Awan. "Functional and performance analysis of discrete event network simulation tools." *Simulation Modelling Practice and Theory* 116 (2022): 102470.
- [29] Cheraghi, Ahmad, et al. "The state of simulation tools for p2p networks on mobile ad-hoc and opportunistic networks." *2016 25th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*. IEEE, 2016.
- [30] Souad Imane, D. J. I. E. D., and H. A. L. I. M. I. Ibtihal. *Evaluation des Performances des Différents Protocoles de Routage des Réseaux AD HOC pour les Réseaux Multi-UAV (FANET) Etude Comparative des Protocoles DSDV et AODV*. Diss. UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA,2020.
- [31] Djenidi, Nabil. *Analyse de la sélection dynamique des chefs de cluster pour FANET*. Diss. UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA,2022.
- [32] Lahcen, Toudjine, and Mohammed Bendjeddou. *Routage avec Qualité de service dans les réseaux Ad hoc*. Diss. Université Mohamed el-Bachir el-Ibrahimi Bordj Bou Arréridj Faculté de Mathématique et Informatique, 2021.
- [33] Bekmezci, Ilker, Ozgur Koray Sahingoz, and Şamil Temel. "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey." *Ad Hoc Networks* 11.3 (2013): 1254-1270.
- [34] Saddiki, Kamel. *Denial of services attack in wireless networks*. Diss. PhD thesis, University Djillali liabes of Sidi Bel Abbes, 2019.
- [35] Jhaveri, Rutvij H., and Narendra M. Patel. "Mobile Ad-hoc Networking with

Bibliographie

AODV: A Review." *International Journal of Next-Generation Computing* 6.3 (2015).

[36] Delhaye, Jean-Loïc. *Voyage au coeur de l'informatique: Technologies, Manet, usages, enjeux*. ISTE Group, 2021.

[37] Li, Zonglin, et al. "Flying Ad-Hoc Network Covert Communications with Deep Reinforcement Learning." *IEEE Wireless Communications* (2024).

[38] Wei, Peng, Quanquan Gu, and Dengfeng Sun. "Wireless sensor network data collection by connected cooperative UAVs." *2013 American control conference*. IEEE, 2013.

[39] Purohit, Aveek, Frank Mokaya, and Pei Zhang. "Collaborative indoor sensing with the sensorfly aerial sensor network." *Proceedings of the 11th international conference on Information Processing in Sensor Networks*. 2012.

[40] Karbooz, Shiyar, Yaser Fawaz, and Bader Al-Din Kassab. "Improving Performance of Data Routing Protocol in Flying Ad-Hoc Networks." (2023).

[41] X. Hong, K. Xu, and M. Gerla, "Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks," *IEEE network*, vol. 16, no. 4, pp. 11–21, Jul. 2022.

[42] Lakew, Demeke Shumeye, et al. "Routing in flying ad hoc networks: A comprehensive survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2 (2020): 1071-1120.

[43] Ali, Moussaoui. *Routage QoS et prédiction de rupture de route dans les réseaux Ad-hoc*. Diss. Université de Béjaia-Abderrahmane Mira, 2006.

[44] Fan, Ruihua, et al. "Diagnostics of mixed-state topological order and breakdown of quantum memory." *PRX Quantum* 5.2 (2024): 020343.

[45] Souad Imane, D. J. I. E. D., and H. A. L. I. M. I. Ibtihal. *Evaluation des Performances des Différents Protocoles de Routage des Réseaux AD HOC pour les Réseaux Multi-UAV (FANET) Etude Comparative des Protocoles DSDV et AODV*. Diss. UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.2019.

[46] Danesh, Somayeh, and Javad Akbari Torkestani. "CLARA: clustered learning automata-based routing algorithm for efficient FANET communication." *Cluster Computing* (2024): 1-17.

[47] Nandhini, S., and Jeen Marseline KS. "Intelligent Routing Scheme for FANET Using Bio-Inspired Optimisation." *Intelligent Decision Making Through Bio-Inspired Optimization*. IGI Global, 2024. 218-226.

[48] Bekmezci, Ilker, Ozgur Koray Sahingoz, and Şamil Temel. "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey." *Ad Hoc Networks* 11.3 (2013): 1254-1270.

Bibliographie

[49] Ilyas, Hadjou, and Zaidi Sofiane. "Evaluation and comparison study of transport layer protocols for data transmission in flying ad-hoc networks." (2021).

[50] NSNAM, "ns-3," ns-3; <https://www.nsnam.org/>.

[51] "Standard C++;" <https://isocpp.org/>.

[52] "Enterprise Open Source and Linux | Ubuntu," Ubuntu; <https://ubuntu.com/>.