

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES

قسم الاعلام الالي

DEPARTEMENT DE L'INFORMATIQUE

Mémoire de MASTER

Domaine : Mathématiques et Informatique

Filière : Informatiques

Option : Réseaux, Systèmes et Applications Réparties

Par :

Naima Tahri

THEME

Simulation de protocole de routage OLSR dans les réseaux FANET

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mme Fatna GHIBAJ

M.C. (A)

Président

Mr Nouredine CHAIB

M.C. (A)

Examineur

Mr Tahar ALLAOUI

M.C. (A)

Encadreur

Année Universitaire 2017/2018

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu DIEU le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience et qui a éclairé mon chemin pour achever ce travail.

Je tiens à remercier **Mr Tahar ALLAOUI** qu'il a accepté de m'encadrer. Je tiens à remercier sincèrement **Mr Ayoub Benayache** pour ses remarques constructives, ses orientations, et ses conseils, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Je tiens à remercier sincèrement **Mr Haider Boudjemline** pour ses corrections de ma mémoire, et pour tout le temps qu'elle m'a consacré, pour ces précieux conseils et pour toute son aide. Mes remerciements à le membre de jury pour l'honneur qu'il m'as fait en acceptant d'examiner ce travail. Mes sincères remerciements à tous mes enseignants du département d'informatique de la faculté des sciences.

Enfin, je n'oublierai pas de remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou loin à réaliser ce travail et tout particulièrement à ma soeur Asma Boulebda.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à

Mes très chers parents

Vous représentez 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 et de prier pour moi.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance.

Mes très chers sœurs et frères

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

Ma très chère amie ASMA Boulebda

Je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de succès, ainsi toute sa famille.

A tous les étudiants de l'informatique de l'université de Laghouat et particulièrement à tous mes collègues de la promotion Master 2 informatique 2017/2018. A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Résumé

Flying Ad-Hoc Networks (FANET) est une collection de véhicules aériens sans pilote (UAV). Le rôle de l'UAV se développe très rapidement. Grâce à l'avancement des technologies, diverses tâches intéressantes sont également liées, comme la croissance et le coût de maintenance et incorporation. Les principales caractéristiques de FANET sont flexibles, économique en plus vite pour prendre des dispositions ou organiser un réseau. D'autre part, le défis majeur dans cette catégorie de réseaux qui est la communication entre tout véhicule aérien non habité, outre le mouvement aléatoire de l'UAV dans ce réseau. Notre but, à travers ce mémoire, est d'étudier et d'évaluer les performances des protocoles de routage OLSR et TORA.

Mots clés : FANET, protocoles de routage, OLSR, TORA, NS2, MANET.

Abstract

Flying Ad-Hoc Networks (FANET) is a collection of unmanned aerial vehicles (UAVs). The role of the UAV is growing very rapidly. Thanks to the advancement of technologies, various interesting tasks are also linked, such as growth and the cost of maintenance and incorporation. The main features of FANET are flexible, economical and faster to make arrangements or organize a network. On the other hand, the major challenge in this category of networks which is the communication between any unmanned aerial vehicle, besides the random movement of the UAV in this network. Our goal, through this memory, is to study and evaluate the performance of OLSR and TORA routing protocols.

keyword : FANET, routing protocol, OLSR, TORA, NS2, MANET.

Table des matières

Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Table des matières	ix
Table des figures	x
Liste des tableaux	xi
Liste des abréviations	xii
Introduction générale	1
1 Réseaux de UAVs : Vue générale	4
1.1 Introduction	5
1.2 Taxonomie des MANETs	6
1.2.1 Les VANETs	7

1.2.2	Les FANET	8
1.2.3	Comparaison des réseaux	9
1.3	Les concepts des reseaux FANET	9
1.3.1	Architectures de communication dans les réseaux d'UAV	9
a)	Communications de UAV à UAV (U2U) : Architecture distribuée	10
b)	Communications de UAV à infrastructure (U2I) : Architecture centralisée	10
c)	Communications hybrides	11
1.3.2	Caractéristiques des réseaux d'UAV	11
1.3.3	Applications des réseaux d'UAV	15
1.3.4	Les problèmes et les défis des réseaux d'UAV	18
1.3.5	Thèmes de recherche dans le domaine des réseaux d'uav	22
1.4	Conclusion	23
2	Le routage dans les reseaux FANET	24
2.1	Introduction	25
2.2	Routage dans les UAVs	26
2.3	Classification des protocoles de routage dans les réseaux UAVs	26
2.3.1	Les protocoles de routage d'un seul-saut	27
2.3.2	Les protocoles de routage multi-sauts	28
2.4	Les protocoles de routage basés sur la localisation	28
2.5	Les protocoles de routage basés sur la topologie	28
2.5.1	Les protocoles proactifs	29

2.5.2	Les protocoles réactifs	29
2.5.3	Les protocoles hybrides	30
2.6	OLSR (Optimized Link State Routing)	30
2.6.1	Les messages échangés dans OLSR	31
a)	Le message HELLO	31
b)	Le message TC (Topologie Control)	32
2.6.2	Fonctionnement du protocole OLSR	32
a)	Détection de voisinage	32
b)	Gestion de topologie	33
c)	le routage	33
2.6.3	Avantages et inconvénients d'OLSR	34
a)	Avantages	34
b)	Inconvénient	34
2.7	TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)	35
2.7.1	Les messages échangés dans TORA	36
2.7.2	Fonctionnement du protocole TORA	36
2.7.3	Avantages et inconvénients de TORA	39
a)	Avantages	39
b)	Inconvénient	40
2.8	Conclusion	40
3	Simulation et discussion des résultats	41
3.1	Introduction	42
3.2	Environnement de simulation	42
3.2.1	NS2 (Network Simulator 2)	42
3.2.2	Architecture du NS2	42

3.3	Les modèles de mobilité	44
3.3.1	Les modèles par entité	45
a)	Random Waypoint	45
3.4	L'ajout de 3D dans NS2	45
3.5	Métriques de performance	46
3.6	Paramètres de simulation	48
3.7	Simulation et discussion des résultats	48
3.7.1	Premier scénario	48
3.8	Conclusion	50
	Conclusion générale	51
	Références	53
	Annexe	58
3.9	Installation et Configuration	58
3.9.1	Installation du simulateur NS2	59
3.9.2	intégration de protocole OLSR dans NS2	59

Table des figures

1.1	Le réseau MANET	6
1.2	Le réseau VANET	7
1.3	Le réseau FANET	8
1.4	Les modes de communication dans les FANET	10
1.5	Les applications FANET	16
2.1	Classification des protocoles de routage dans les FANET[24]	27
2.2	La comparaison de la hauteur en TORA [29]	37
2.3	DAG de TORA [29]	39
3.1	L'architecture générale du NS2.	43
3.2	Classification des modèles de mobilité	44
3.3	Les fichiers de code source modifiés	46
3.4	Nombre de paquets perdus.	49

Liste des tableaux

1.1	Comparaison MANET,VANET et FANET	9
3.1	Paramètres de simulation	48

Liste des abréviations

AANET	Aeronautical Ad hoc NETWORK
DAG	Directed Acyclic Graph
FANET	Flying Ad-Hoc Networks
MANET	Mobile Ad-hoc Networks
MPR	Multi Point Relays
NAM	Network AniMator
NS2	Network Simulator 2
OLSR	Optimized Link State Routing
OTCL	Object oriented Tool Comand Language
PDR	Packet Delivery Ratio
QOS	Quality of Service
RWP	Random Way Point
TC	Topologie Control
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network

Introduction générale

Les véhicules aériens sans pilote (UAV) sont de plus en plus intéressants pour les chercheurs en raison de leurs diverses domaines d'applications. Ils étaient depuis longtemps un outil militaire, cependant, ces dernières années, leur utilisation a été étendue au secteur civil et présente une solution prometteuse pour les plus dangereuses, difficiles et inadaptés missions de pilotes humains. L'utilisation de drones dans telles applications permet d'économiser de l'argent puisqu'ils peuvent remplacer les avions habités et les hélicoptères. En effet, il y a des petites, plus léger et moins cher UAV capables de remplacer les humains dans des missions civiles telles que la surveillance de l'environnement, le monitoring, la recherche, le sauvetage des survivants des catastrophes[1], ainsi que le contrôle des frontières [2]. Dans certaines missions, les UAVs peuvent également servir de relais ad hoc pour l'échange de données entre deux ou plusieurs groupes terrestres éloignés ou utilisateurs [3][4].

Afin d'améliorer les performances des UAVs pour ces missions, des recherches sont menées pour faire des drones coopératifs. En effet, les drones coopératifs pourrait accomplir des missions complexes plus rapidement et

d'une façon très efficace en partageant différentes tâches entre eux. Ce type de réseaux coopératifs peut être intéressant dans les endroits où il n'y a pas de couverture cellulaire en raison de la complexité d'atteindre ces endroits et d'installer des relais fixes ou à cause de la destruction des infrastructures existantes après une catastrophe naturelle.

Le déploiement d'une flotte de drones collaboratifs avec des mécanismes de routage ad hoc pourrait être l'une des solutions possibles pour mettre en place des applications. Cette solution, sera confrontée à de nombreux défis principalement la forte mobilité des drones et le maintien de la connectivité. En effet, la mobilité élevée et indépendante des drones peut provoquer des changements fréquents et rapides de la topologie du réseau et donc des échecs de liaison. Pour acheminer les informations d'un UAV à un autre à travers un réseau composé de beaucoup de drones, il est nécessaire d'effectuer un routage rapide et efficace de l'information à transmettre.

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donnée. Il consiste à assurer une stratégie qui garantit, à tout moment, un établissement de routes qui soient correctes et efficaces entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau.

Dans ce mémoire, on propose une étude sur les protocoles de routage dans les réseaux FANET, nous allons choisir deux protocoles de routage OLSR et TORA afin de d'évaluer leurs performances.

Notre mémoire est composé de trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous adresses les réseaux FANET (Flying Ad-Hoc Networks), en commençant par introduire les principaux concepts liés à ces environnements, par la suite nous décrivons les architecture, les caractéristiques, quelques applications et les thèmes de recherche de ce type de réseau.

Dans le second chapitre, nous mettons en exergue le routage dans les réseaux FANET ainsi que la description des protocoles de routage OLSR et TORA.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les outils de simulation. Puis nous analysant et discutant les résultats de simulations du protocole OLSR et TORA.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

Réseaux de UAVs : Vue générale

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Taxonomie des MANETs	6
1.2.1	Les VANETs	7
1.2.2	Les FANET	8
1.2.3	Comparaison des réseaux	9
1.3	Les concepts des reseaux FANET	9
1.3.1	Architectures de communication dans les réseaux d'UAV	9
1.3.2	Caractéristiques des réseaux d'UAV	11
1.3.3	Applications des réseaux d'UAV	15
1.3.4	Les problèmes et les défis des réseaux d'UAV	18
1.3.5	Thèmes de recherche dans le domaine des réseaux d'uav	22
1.4	Conclusion	23

1.1 Introduction

Grâce aux progrès technologiques rapides sur les technologies électroniques, de capteurs et de communication, il est devenu possible de produire des systèmes de véhicules aériens sans pilote (UAV), qui peuvent voler de manière autonome ou être contrôlés à distance sans intervention humaine. vu leur polyvalence, flexibilité, et facilité d'installation et de leurs coûts d'exploitation relativement réduit, l'utilisation de drones promet de nouvelles applications militaires et civiles, telles que les opérations de recherche et de destruction [5], la surveillance des frontières, relais pour réseaux ad hoc [6, 7], estimation de vent [8], surveillance des catastrophes [9], télé-détection [10] et surveillance du trafic [11]. Bien que les systèmes à un seul UAV soient utilisés depuis des décennies, au lieu de développer et d'exploiter un grand UAV, l'utilisation d'un groupe de petits UAV présente de nombreux avantages. Cependant, les systèmes multi-drones comportent des défis majeurs à la communauté de la recherche, l'un des problèmes les plus importants de conception est la communication. Le réseau ad hoc entre les UAVs est Flying Ad-Hoc Network (FANET) , est considéré comme une nouvelle famille de réseaux[12].

Dans ce chapitre, nous présentons dans la première section les différentes classe de MANET avec une comparaison de leurs caractéristiques, la deuxième section est dédié à la description détaillée des concepts de FANET : les architectures de communications UAV, les caractéristiques, les applications diverses et les thèmes de recherche dans ce domaine. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

1.2 Taxonomie des MANETs

Les MANETs sont adaptés aux réseaux distribués moyennement denses qui permettent de définir des routes entre les différents nœuds. Chaque système peut être caractérisé par des critères particuliers comme les conditions de son environnement d'application (densité, interférence, changement de topologie, etc), la capacité des équipements utilisés (portée radio, autonomie, énergie, etc). Par conséquent, il existe plusieurs sous-classes de MANET classifiées selon leurs utilisations, objectifs, déploiements ou types de communications. Les réseaux ad hoc véhiculaires VANET (Véhiculaire Ad hoc NETWORK) ainsi que les réseaux ad hoc aéronautiques AANET (Aeronautical Ad hoc NETWORK) sont deux classes de MANET[13].

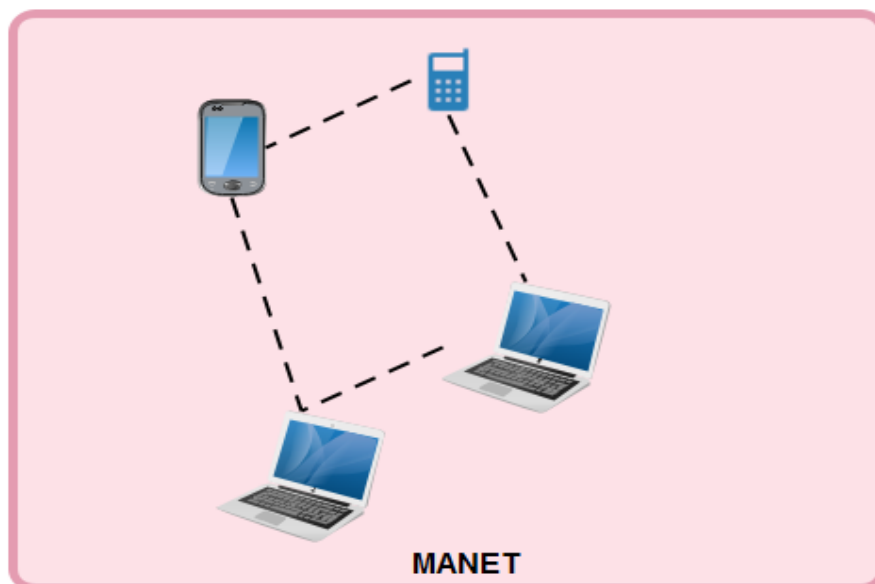


FIGURE 1.1 – Le réseau MANET

1.2.1 Les VANETs

Un réseau VANET est une sous-classe des réseaux MANETs où les nœuds mobiles sont des véhicules. Ces derniers communiquent entre eux et via des stations de base. Les véhicules se déplacent de manière organisée sur des chemins pré-définis et n'ont aucune contrainte liée à l'énergie. VANET est un moyen très efficace de garder le trafic sûr en faisant de chaque véhicule un système informatique indépendant permettant de se relier à d'autres équipements ou véhicules[14].

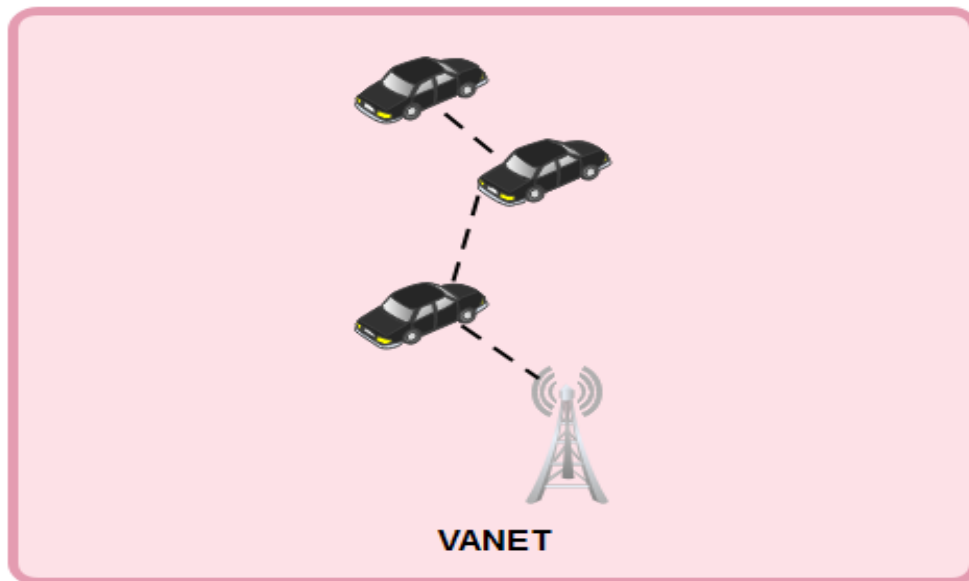


FIGURE 1.2 – Le réseau VANET

1.2.2 Les FANET

FANET est une nouvelle forme de MANET [29] où les nœuds sont des Drones. Les réseaux adhoc guidés par un seul UAV ont certaines limitations car un seul UAV ne peut pas collecter les informations de toute la zone géographique de l'opération de manière indépendante. Alors, plusieurs UAV sont utilisés pour former des réseaux ad hoc appelés FANET. Chaque drone est équipé de capteurs, d'un moniteur, d'un récepteur GPS et d'un pilote automatique...etc. Les drones sont disponibles en différentes tailles pour différentes applications [15].

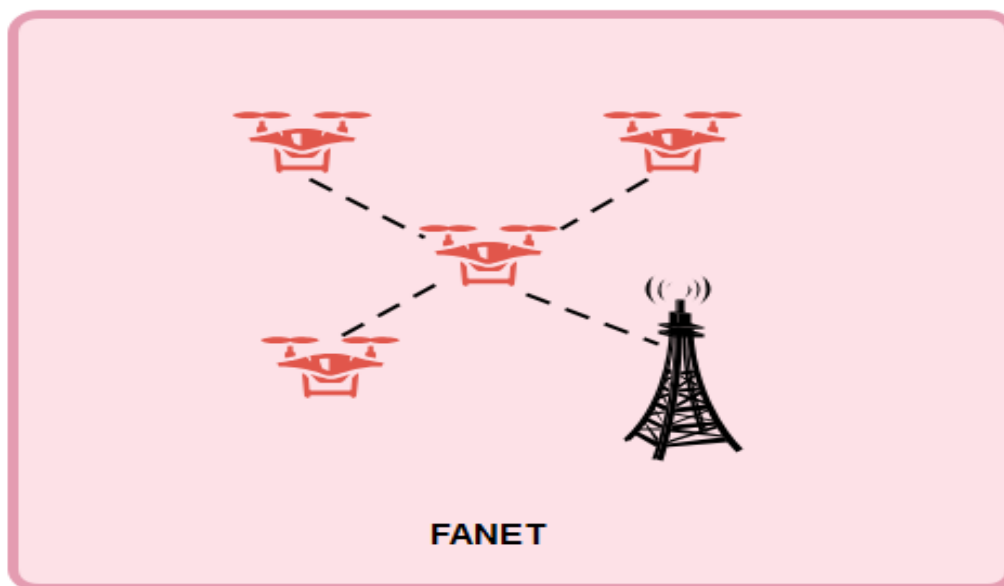


FIGURE 1.3 – Le réseau FANET

1.2.3 Comparaison des réseaux

Le tableau 1.1 présente une comparaison des différentes caractéristiques de FANET, VANET et MANET.

Caractéristique	MANET	VANET	FANET
Connectivité du réseau	+++	++	+
Densité de nœuds	+++	++	+
Changement de topologie	lent	rapide	très rapide
Localisation	GPS	GPS, AGPS, DGPS	GPS, AGPS, DGPS, IMU
Mobilité des nœuds	+	++	+++
Modèle de Mobilité	aléatoire	organiser	modèles de mobilité spéciaux
Énergie	faible	importante	faible

TABLE 1.1 – Comparaison MANET, VANET et FANET

1.3 Les concepts des reseaux FANET

1.3.1 Architectures de communication dans les réseaux d’UAV

Dans les réseaux de fanet, on peut distinguer trois modes de communications, UAV-à-UAV(U2U), UAV-à-Infrastructure(U2I) et hybride. Dans cette section, nous présentons le principe de chaque mode [16] :

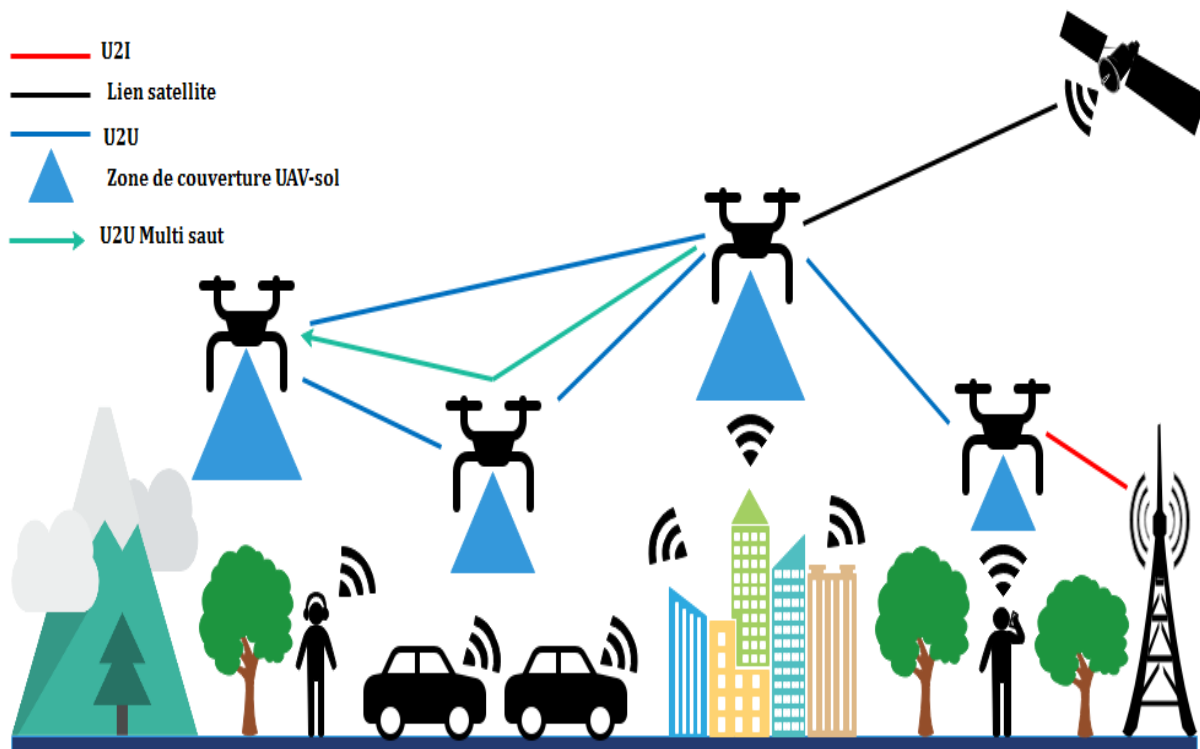


FIGURE 1.4 – Les modes de communication dans les FANET

a) **Communications de UAV à UAV (U2U) : Architecture distribuée**

Dans ce mode, les UAV peuvent communiquer entre eux directement dans une portée sans fil ou indirectement dans un mode multi-sauts. La communication de nœud à nœud est difficile à maintenir dans FANET du fait de la mobilité élevée des nœuds[16].

b) **Communications de UAV à infrastructure (U2I) : Architecture centralisée**

Il est nécessaire d'échanger des données avec l'infrastructure de réseau et internet. A cet effet, l'un des UAVs peut jouer le rôle d'un nœud de passerelle. Cela peut être utilisé pour collecter des données U2U d'autres drones en vol, et échanger ces données vers et à partir de l'infrastructure

de réseau en utilisant l'un des protocoles WLAN et WWAN existants selon la distance et le type de service qui sont disponibles dans cette zone géographique particulière. Les nœuds passerelles sont appelés Gateway data Acquisition Units (GAU). Cette unité pourrait être basée sur le sol, telle que cellulaire ou IEEE 802.16 (WiMax), ou pourrait être basée sur des systèmes satellitaires[16].

c) Communications hybrides

La combinaison de ces deux types de communication fournit une communication hybride très intéressante. En effet, les portées d'infrastructures étant limités, l'utilisation d'UAV comme relais permet d'étendre cette distance. Pour des raisons économiques et en évitant la multiplication des bornes, l'utilisation de sauts par des véhicules intermédiaires devient très importante[16].

1.3.2 Caractéristiques des réseaux d'UAV

Similaire aux MANETs, l'architecture Fanet est un réseau sans infrastructure utilisant plusieurs nœuds pour transmettre des paquets de données. Il partage également d'autres caractéristiques telles que la capacité de s'auto-organiser, information autogérée de manière distribuée, communications et coopération entre les nœuds pour effectuer la livraison des données. Cependant, les FANET ont aussi des caractéristiques spécifiques qui les différencient de MANET :

- **Connectivité du réseau** : La déconnexion dans les réseaux FANET est plus important à celle des MANET et des VANETS. Cela résulte principalement de la mobilité des UAV, l'interruption de la communication pourrait être critique lors de la transmission d'informations importantes (trafic de contrôle/commande). De plus, une panne d'un UAV peut entraîner une défaillance de la connectivité, ce qui entraîne un échec de routage, et donc un échec de communication ou un retard plus long. Un autre aspect qui affecte la connectivité est les interruptions de connexion. En raison des mouvements d'UAV et des variations de distances entre les UAV, la qualité de liaison fluctue et peut entraîner une perte de connectivité et des dégradations de performances [21].
- **Densité de nœuds** : La densité de nœuds est définie comme le nombre moyen de nœuds dans une unité de surface. Les nœuds FANET sont répartis dans le ciel, et la distance entre les UAV peut être de plusieurs kilomètres, même pour petits systèmes multi-UAV. À la suite de cela, la densité des nœuds FANET est beaucoup plus faible que dans le MANET et le VANET [21].
- **Changement de topologie** : En raison de la forte mobilité, la topologie FANET change plus régulièrement que les topologies MANET et VANET. Quand un UAV est perdu, les liens dans lesquels l'UAV est partagé sont également perdus, entraînant une mise à jour de la topologie. Un autre facteur qui affecte la topologie FANET est les interruptions de liaison, en raison des horaires des UAV et les variations

des distances de nœuds FANET, et les changements très rapides de la qualité de lien [21]

- **Modèle de propagation radio** : Le réseau FANET et d'autres environnements d'exploitation de réseau ad hoc affectent les caractéristiques de propagation radio. Les nœuds MANET et VANET sont très proches du sol, et dans de nombreux cas, il n'y a pas de line of-sight entre l'émetteur et le récepteur. Les signaux radio sont principalement affectés par la structure géographique. En outre, les nœuds FANET éloignés du sol peuvent être pilotés à distance, et au maximum, il y a un line of-sight entre les véhicules aériens sans pilote [21].
- **Pouvoir de calcul :(Computational power)** Les nœuds MANET sont des petits ordinateurs alimentés par batterie tels que les ordinateurs portables, les PDA (Personal Digital Assistant) et les téléphones intelligents (smart phones). En raison des contraintes de taille et d'énergie, les nœuds ont une capacité de calcul limitée. D'un autre côté, les VANET et les FANET supportent des appareils à haute puissance de calcul [21].
- **Localisation** : Dans MANET, le GPS est généralement utilisé pour recevoir les coordonnées d'un terminal de communication mobile, le GPS est suffisant pour préciser l'emplacement des nœuds. Dans VANET, pour un récepteur GPS de navigation, il y a une précision d'environ 10-15 m, ce qui peut être satisfaisant pour le guidage routier.

En raison de la grande vitesse et les différents modèles de mobilité du systèmes multi-UAV, FANET a besoin de données de localisation très précises avec des intervalles de temps plus courts. Le GPS fournit des informations de position à un intervalle d'une seconde, ainsi peut être inappropriés pour certains protocoles de FANET [21].

- **Énergie suffisante** : Selon leur taille et leur type, les nœuds UAA-NET sont généralement supposés avoir suffisamment d'énergie et de puissance de calcul par rapport aux nœuds des MANETs. Cela est dû au fait que le niveau d'énergie requis pour déplacer un UAV est beaucoup plus élevé que l'énergie nécessaire pour calculer les données [21].
- **Contraintes de délais strictes** : Généralement, UAANETs sont utilisés pour des applications en temps réel, comme la photographie aérienne et la capture vidéo. En conséquence, le trafic de contrôle/commande doivent arriver à l'heure spécifiée, et être calculé par l'UAV avec une faible latence pour éviter la perte de contrôle[21].
- **Mobilité** : Le modèle de mobilité joue un rôle important dans la conception de protocoles réseau pour les réseaux ad-hoc. Les modèles de mobilité des UAV sont différents des autres véhicules. Un mouvement d'UAV est avant tout tridimensionnel. Cela entraîne des défis au niveau physique, pour le comportement de l'antenne et pour la sécurité (par exemple, détection de mauvaise conduite). Dans ce dernier

point, de nombreuses techniques de détection d'inconduite actuelles reposent souvent sur la position du nœud pour déterminer si son rejet du réacheminement de paquets est justifié ou non. Les techniques existantes prennent en compte leur position basée sur 2D. Ainsi, une étude devrait être effectuée pour prendre en compte les informations d'altitude dans l'algorithme de détection de mauvaise conduite. En outre, selon la tâche, l'UAV peut suivre différents types de modèle de mobilité. Peut être directement après le point de la route, circulaire restant dans une zone spécifique, Ou ovale et scanne en patrouillant autour d'un certain cercle[21].

1.3.3 Applications des réseaux d'UAV

En raison de divers avantages et d'une vaste gamme de domaines d'applications, les FANET obtiennent des attentions de la communauté de la recherche dans le monde entier. Diverses applications des FANET sont expliquées ci-dessous :

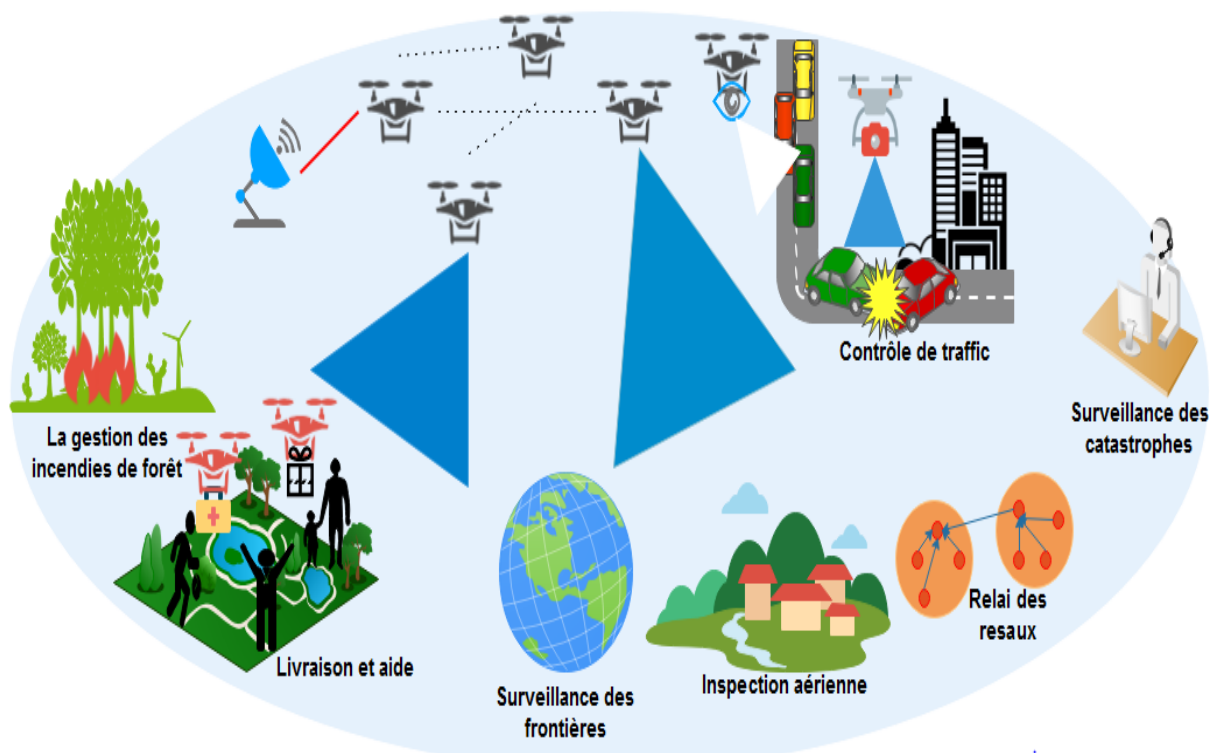


FIGURE 1.5 – Les applications FANET

- **Militaire** : FANET sont très utiles dans les services militaires. La mise en place d'un système de communication approprié est très difficile dans les zones militaires. Donc les FANET sont utilisés pour l'échange d'informations entre les soldats et les dirigeants militaires[]. les drones sont employés pour faire de l'observation mais également comme arme de combat. Le pilotage des drones peut s'effectuer à partir de sites distants de plusieurs milliers de kilomètres de l'avion[22].
- **Civil** :

Surveillance et Maintenance : Les drones sont utilisés pour des actions de maintenance. Par exemple EDF les emploie pour la détection de problèmes sur des lignes électriques et l'interven-

tion dans des zones difficiles d'accès. Ils peuvent être également employés pour la surveillance de matériel. Ainsi la SNTF (Société Nationale des Transports Ferroviaires) les utilise pour vérifier l'état du réseau de rails et lutter contre les vols de métaux[22].

Agriculture Les drones munis de caméras travaillant dans l'infrarouge sont utilisés en agriculture pour survoler les terrains et déterminer les zones appauvries en minéraux et qui nécessitent le dépôt d'engrais. La pulvérisation des produits peut également être réalisée par drone[22].

Trafic et surveillance urbaine : Le contrôle du trafic routier urbain est une autre parmi les applications potentielles où FANET peut remplacer le travail intensif et l'infrastructure de surveillance complexe. Les drones peuvent détecter et signaler facilement les accidents de la route. De même, ils peuvent capturer des images en temps réel pour différentes situations de sécurité et des scénarios dans les réseaux routiers et ferroviaires[22].

Sécurité Civile et Secours en cas de catastrophe : Les drones sont utilisés en sécurité civile pour la détection et le suivi de feux de végétation. Ils sont également employés pour la recherche et le secours de personnes dans tout type d'environnement[22].

- **Recherche scientifique :** Les drones deviennent également des ou-

tils très prisés en sciences. Ces engins volants équipés de caméras, capteurs et leur état d'avancement techniques permettent une collecte de données à distance sans précédent. De nombreux chercheurs font confiance aux drones pour de nombreuses raisons, mais les deux plus importants sont la flexibilité et la performance. Donc, les drones sont utilisées pour identifier les espèces végétales et détectent les maladies des arbres dans les forêts. Dans l'industrie de l'énergie, les drones sont utilisés pour l'exploration de gaz et de pétrole...etc.

- **Économique** : Des loisirs, réalisation des film, journalisme. L'idée d'avoir un petit véhicule aérien sans pilote et de l'utiliser pour des taches et des besoins quotidiens, citons l'exemple de Amazon a annoncé leurs plans de service de livraison de drones[22].

1.3.4 Les problèmes et les défis des réseaux d'UAV

FANET est un peu différent des MANET traditionnels et des VANET. Cependant, l'idée fondamentale est la même : avoir des nœuds mobiles et des réseaux ad hoc. Par conséquent, Dans FANET, certains défis sont variables comme dans VANET tout en faisant face à des défis supplémentaires. Bien que, de nombreuses recherches aient été effectuées pour augmenter l'efficacité du réseau avec des nœuds volants, il y a encore beaucoup de problèmes non résolus, qui devraient être explorés dans les travaux futurs :

- **Règlements nationaux** : Les drones sont de plus en plus utilisés

dans de nombreux domaines d'application, où ils ont leur place à l'ère de l'information moderne. Alors que les UAVs font de plus en plus partie du système d'espace aérien national de chaque pays, La plupart des réglementations aériennes actuelles des pays n'autorisent pas les opérations UAV contrôlées dans l'espace aérien civil. Cela peut être considéré comme le plus grand obstacle actuel au développement des UASs dans les zones civiles. Cependant, il existe un besoin sérieux de définir des règles distinctives et des règlements pour intégrer les vols d'UAVs dans l'espace aérien national[23].

- **Routage** : Dans FANET, en raison du mouvement rapide des UAVs, la topologie du réseau change rapidement. Le routage des données entre les UAVs est confronté à un sérieux défi, ce qui est différent de l'environnement du faible mobilité. Les protocoles de routage doivent être capables de mettre à jour les tables de routage dynamiquement en fonction des changements de topologie. La plupart des algorithmes de routage dans MANET échouent en partie à fournir une communication fiable entre les UAVs. Donc, il est nécessaire de développer des nouveaux algorithmes de routage et un modèle de réseau pour construire un modèle d'intégration flexible et réactif[23].
- **Planification du chemin** : Dans une zone de mission à grande échelle avec un fonctionnement multi-UAV, la coopération et la coordination entre les UAVs sont non seulement souhaitables mais aussi une caractéristique cruciale pour augmenter l'efficacité. Dans l'en-

droit de mission, il peut y avoir des changements dynamiques comme l'ajout/révocation de drones, obstacles statiques physiques, les menaces dynamiques (telles que les radars mobiles), ...etc. Dans ces cas, chaque UAV doit changer son chemin précédent, et les nouveaux chemins devraient être recalculés dynamiquement. Ainsi, de nouveaux algorithmes/méthodes dans la planification de trajectoire dynamique sont nécessaires pour coordonner les flottes de drones[23].

- **Intégration avec une grille d'information globale (GIG) :** GIG est un réseau de surveillance mondial et un système informatique destiné à fournir une capacité de type Internet permettant à toute personne connectée au système de collaborer avec d'autres utilisateurs et obtenir des informations de processus et de transmission à tout moment et partout dans le monde. Un FANET devrait se connecter aux futures grilles d'information comme l'un des principaux plates-formes de l'information pour augmenter l'efficacité d'un UAS en utilisant les paquets de communication d'un UAV, les capteurs...etc[23].
- **Coordination des UAVs et des aéronefs pilotés :** Il est inévitable que, à l'avenir, les vols d'UAV avec d'autres aéronefs pilotés sont susceptibles d'augmenter. Cette coordination permettra la destruction des avions ennemis avec des pertes minimales. En même temps, ces drones peuvent être utilisés comme dispositif de brouillage électronique et pour la reconnaissance vidéo en temps réel dans les zones ennemies. Par conséquent, la collaboration des UAVs et des aéronefs

pilotés devrait se faire dans un environnement en réseau[23].

- **Standardiser les FANET** : Un réseau FANET utilise diverses bandes de communication sans fil telles que VHF, UHF, bande L, bande C, bande Ku...etc. Ces bandes sont également utilisées dans différents domaines d'application tels que les réseaux GSM, la communication par satellite...etc. Pour réduire le problème de congestion du fréquence, Il y a un besoin de standardiser ces bandes de communication, modèles de modulation de signal et de multiplexage[23].
- **Mobilité et placement des UAVs** : Les mini-UAV sont plus petits et peuvent transporter des charges utiles limitées, comme un radar unique, une caméra infrarouge, une caméra thermique, un capteur d'image...etc. S'il y a un besoin d'utiliser différents capteurs, ils devraient être chargés sur différents UAVs, par exemple, un UAV peut être chargé avec une caméra infrarouge, tandis qu'un autre UAV est équipé d'une caméra à haute résolution. Cela permet de prendre plusieurs images de la même zone, ce qui peut être des centaines et des milliers de mètres carrés. Il existe un problème ouvert dans cette rubrique pour optimiser le placement d'UAV pour réduire la consommation d'énergie tout en augmentant l'information captée[23].
- **Qualité de service (QoS)** : un réseau FANET peut être utilisé pour de nombreux types d'applications, il transporte différents types de données, qui comprennent les emplacements GPS, streaming vi-

déo/voix, images, messages texte...etc. FANET doit prendre en charge certaines qualités de service pour satisfaire à un ensemble de contraintes de performance de service prédéterminées comme le délai, la bande passante, la gigue, le perte de paquets...etc. Définir un compréhensif framework pour un middleware compatible QoS est un défi crucial cela devrait être surmonté à cause de la forte mobilité et la structure dynamique de FANET[23].

- **Sécurité** : Assurer la confidentialité, La disponibilité et l'intégrité de l'information lors de la communication entre UAV-à-UAV et la communication UAV à un nœud Terrestre est l'un des problèmes majeur rencontrés par les FANET[10]. La gestion de confiance parmi les nœuds est un autre défi dû aux changements fréquents de topologie. Les nœuds rejoignent et quittent le réseau très fréquemment. Donc, le routage sécurisé est un autre sujet de préoccupation dans FANET[24].

1.3.5 Thèmes de recherche dans le domaine des réseaux d'uav

Les FANET ont attiré plus d'attention en raison de leurs capacités dans diverses situations. Ces réseaux ont des avantages supplémentaires par rapport aux réseaux ad hoc traditionnels car ils utilisent des drones pour collecter et transmettre les informations dans des zones d'opération. En raison de la grande vitesse des drones, ces réseaux sont très dynamiques et ont des changements de topologie élevés. Pour supporter la transition de données avec la forte mobilité de ces réseaux, Un système de routage efficace est

requis. De ce fait, le développement des protocoles de routage appropriés est l'un des domaines de recherche les plus inspirants. Un autre domaine de recherche exploratoire dans les FANET est la taille appropriée du nœud volant, sa consommation d'énergie, la plage de couverture par le nœud et la vitesse du nœud volant. Avec la communication et les besoins d'infrastructure, la sécurité des FANET attire également l'attention des chercheurs parce que les FANET sont sensibles et les informations confidentielles du domaine d'application sont critiques. La sécurité des nœuds volants, la gestion de la confiance dans les nœuds et le routage sécurisé sont des domaines de recherche importants dans les FANET[25].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes classes de MANET avec une description détaillée de réseaux FANET. En raison des contraintes de la forte mobilité des nœuds et de la topologie dynamique, le routage dans les FANET est un défi majeur pour assurer l'acheminement des données entre les nœuds mobiles du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le routage dans les réseaux FANET.

Le routage dans les reseaux FANET

Sommaire

2.1	Introduction	25
2.2	Routage dans les UAVs	26
2.3	Classification des protocoles de routage dans les réseaux UAVs	26
2.3.1	Les protocoles de routage d'un seul-saut	27
2.3.2	Les protocoles de routage multi-sauts	28
2.4	Les protocoles de routage basés sur la localisation	28
2.5	Les protocoles de routage basés sur la topologie	28
2.5.1	Les protocoles proactifs	29
2.5.2	Les protocoles réactifs	29
2.5.3	Les protocoles hybrides	30
2.6	OLSR (Optimized Link State Routing)	30
2.6.1	Les messages échangés dans OLSR	31
2.6.2	Fonctionnement du protocole OLSR	32
2.6.3	Avantages et inconvénients d'OLSR	34
2.7	TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)	35
2.7.1	Les messages échangés dans TORA	36
2.7.2	Fonctionnement du protocole TORA	36
2.7.3	Avantages et inconvénients de TORA	39

2.1 Introduction

Le réseau ad hoc volant FANET est un nouveau paradigme de communication sans fil. FANET peut effectuer de nombreuses tâches difficiles des réseaux mobiles traditionnels MANETs. L'un des problèmes de conception les plus importants pour les FANET est la communication qui est cruciale pour la coopération et la collaboration entre les drones. Cependant, les protocoles de routage ad hoc mobiles existants ne peuvent pas répondre aux besoins des FANET en raison de la forte mobilité à grande vitesse et des changements de topologie fréquents. le routage de réseau devient une tâche cruciale[26] et la plupart des protocoles de routage MANET et VANET ne sont pas applicables directement aux FANET. La mise en place d'un protocole de routage pose des défis majeurs pour la communauté de la recherche.

Dans ce chapitre, nous présentons le routage dans les réseaux FANET et décrivons les différentes solutions pour le routage ainsi que la classification des protocoles de routage dans ce réseaux. par la suite, nous allons présentés le principe et le fonctionnement des protocoles que nous avons choisi dans notre mémoire.

2.2 Routage dans les UAVs

La nature hautement dynamique des UAV dans les FANET provoque des changements brusques dans la topologie du réseau et fait donc du routage parmi les drones une tâche cruciale[22]. Considérant la communication UAV-à-UAV, Les protocoles de routage jouent un rôle essentiel dans la transmission de données fiables de bout en bout et moins de overhead rend le routage un sujet de recherche intéressant dans le domaine des FANET. Cependant, le principal défi pour concevoir des protocoles de routage adaptés à tous les scénarios et les conditions est encore à l'étude. Dans les premières études et les expériences dans les FANET, les protocoles de routage MANET et VANET existants sont préférés et étudiés pour les FANET. En raison des problèmes spécifiques aux drones, tels que, le changements rapides de la qualité du lien, les mouvements rapides dans l'espace 3D, le routage réseau devient une tâche cruciale [23] et la plupart des protocoles de routage MANET et VANET ne sont pas applicables directement aux FANET. Pour cette raison, afin de mettre en œuvre ce nouveau modèle de réseau, Certains protocoles de réseau ad hoc ont été implémentés et certains d'autre ont été adaptés.

2.3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux UAVs

Nous pouvons classer les protocoles de routage dans les FANET selon deux stratégies : le routage Unicast et le routage Multicast [24]. La figure

résume cette classification.

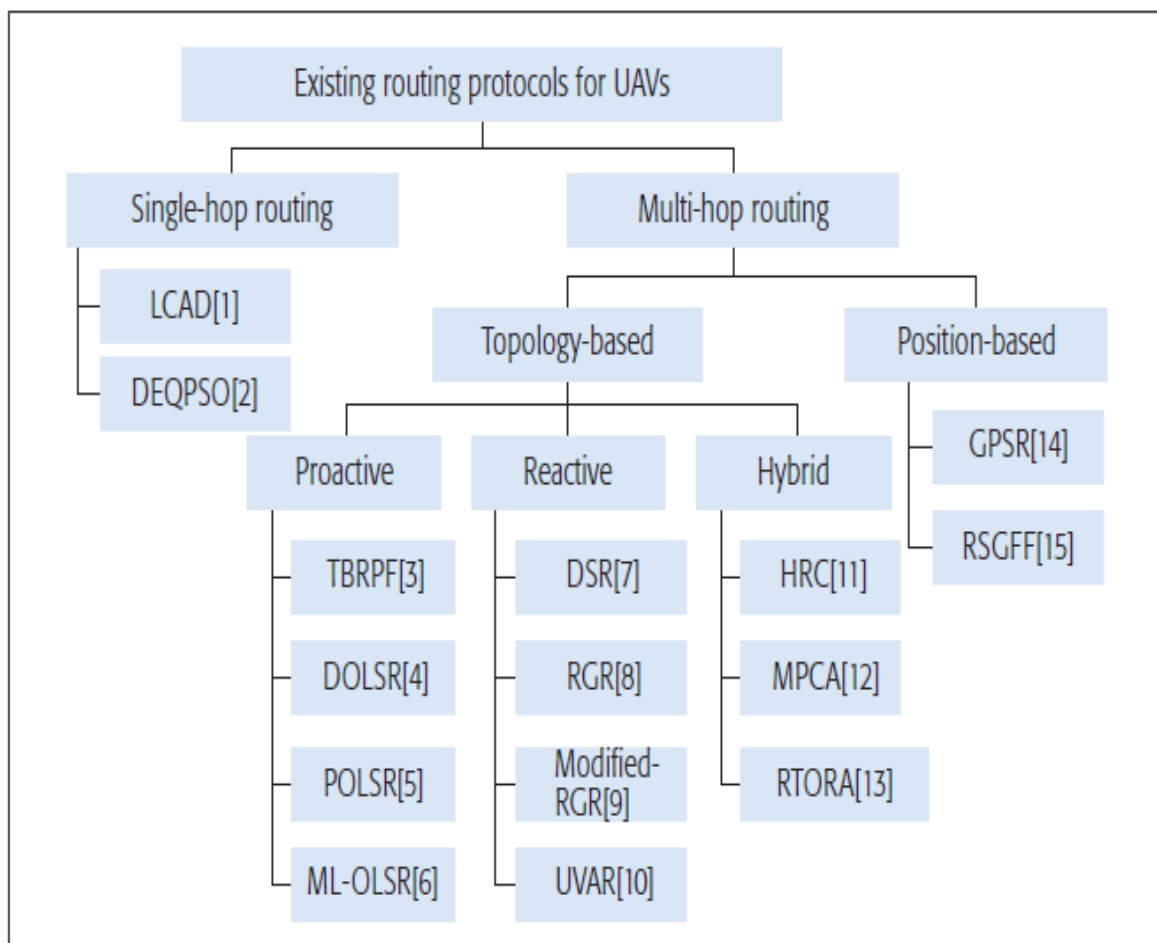


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routage dans les FANET[24]

2.3.1 Les protocoles de routage d'un seul-saut

Dans le routage Unicast, une table de routage statique qui n'a pas besoin d'être mise à jour est utilisée pour transmettre des paquets. Les UAV sont utilisés comme porte-paquets, qui transfèrent des paquets en volant de la source à la destination. Ainsi, ce type de protocole de routage est léger et principalement conçu pour les occasions à topologie fixe. Cependant, ils ont une mauvaise tolérance aux pannes et ne sont pas convenables pour les

environnements dynamiques[24].

2.3.2 Les protocoles de routage multi-sauts

Dans les protocoles de routage multi-sauts, les paquets sont transférés saut par saut. Comment sélectionner un bon nœud de prochain saut est le noyau de la découverte des chemins. En effet, se basant sur diverses stratégies de sélection pour le nœud de saut suivant, les protocoles de routage multi-sauts sont principalement classés en deux catégories : les protocoles basés sur la localisation qui utilisent la position physique des nœuds mobiles pour configurer les routages et les protocoles basés sur la topologie, qui sont divisés en protocoles proactifs, réactifs et hybrides[24].

2.4 Les protocoles de routage basés sur la localisation

Les protocoles de routage basés sur la position (ou géographique) utilisent la position des nœuds dans le réseau pour acheminer les paquets. Les nœuds connaissent leur position et que ceux-ci connaissent également la position de tous les autres nœuds du réseau. Donc, il est facile de permettre à chaque nœud de choisir parmi ses voisins un relais pour acheminer un paquet dont il connaît la destination finale et donc aussi sa position[24].

2.5 Les protocoles de routage basés sur la topologie

Les protocoles de routage basés sur la topologie utilisent les informations sur les liens qui existent entre les noeuds pour l'acheminement des

paquets. Cette famille de protocoles peut être divisée en trois catégories : proactifs, réactifs et hybrides[24].

2.5.1 Les protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs sont également appelés routage actif. Dans ce genre de protocole, les informations de routage sont enregistrées et stockées dans chaque UAV à l'avance. Ainsi, les chemins de routage peuvent être choisis pour transmettre les paquets immédiatement sans une longue attente. Cependant, les inconvénients sont également évidents, par exemple, une grande quantité de paquets de contrôle est nécessaire pour l'établissement de la route, ce qui introduit des overheads de communication plus élevés. De plus, les protocoles de routage proactifs ne sont pas adaptés aux réseaux de forte mobilité[24].

2.5.2 Les protocoles réactifs

Le routage réactif est également appelé routage passif ou routage à la demande. Ces protocoles se basent sur la découverte et le maintien des routes. Ce qui peut être utilisé pour trouver un chemin de routage à la demande lorsque des paquets doivent être envoyés une procédure de découverte globale de routes est lancée. Ce processus s'arrête une fois la route soit trouvée ou toutes les possibilités soient examinées. Dès que la communication est établie, cette route est maintenue jusqu'à ce que la destination devienne inaccessible ou jusqu'à ce que la route ne soit plus désirée. Ainsi, le routage réactif peut réduire efficacement la surcharge de message de contrôle

overhead, mais introduit également un délai important de bout en bout[24].

2.5.3 Les protocoles hybrides

Un protocole de routage hybride est une combinaison de protocoles de routage proactifs et réactifs, qui peut surmonter le problème de surcharge de message de contrôle (overhead) élevé dans le routage proactif et le long délai de bout en bout du routage réactif[24]. Il est particulièrement adapté aux grands réseaux. Dans un protocole de routage hybride, Le réseau est divisé en plusieurs zones où le routage intra-zone est effectué avec l'approche proactive tandis que le routage inter-zone est fait en utilisant l'approche réactive[24].

2.6 OLSR (Optimized Link State Routing)

Le protocole OLSR est un protocole de routage proactif. Il est considéré comme une optimisation du protocole à état des liens filaires pour les réseaux mobiles Ad Hoc[25]. Les routes sont continuellement stockées et mises à jour dans des tables dans OLSR [?]. Donc, Chaque fois que la route est requise, Le protocole définit rapidement le chemin vers toutes les destinations possibles sans délai initial [25]. En OLSR, certains nœuds candidats appelés relais multipoint (MPR MultiPoint Relays) sont sélectionnés et chargés de transmettre les paquets de diffusion pendant le processus d'inondation[26]. Cette technique réduit les overheads de transmission de paquets par rapport au mécanisme d'inondation. OLSR effectue un rou-

tage saut par saut, où chaque nœud utilise ses informations de routage les plus récentes pour acheminer les paquets. Le MPR est effectué d'une manière qui couvre tous les nœuds qui sont à deux sauts (c-à-d voisins des voisins). Un nœud détecte et sélectionne ses MPRs avec des messages de contrôle appelés messages HELLO. Les messages Hello sont utilisés pour assurer un lien bidirectionnel avec les voisins. Les messages HELLO sont envoyés à un certain intervalle. De plus, Les nœuds diffusent périodiquement des messages de contrôle TC (Topology Control) pour déterminer leurs MPRs[25].

En exploitant ces messages, Chaque nœud dans le réseau calcule sa table de routage vers tout autre nœud présent dans le réseau. Ce calcul est basé sur les informations de voisinage et de topologie rafraichies périodiquement.

2.6.1 Les messages échangés dans OLSR

Pendant la transmission, plusieurs messages OLSR sont définis et fréquemment modifiés lorsqu'ils sont actifs dans un réseau, ce qui entraîne la formation d'un trafic de contrôle OLSR[25].

a) Le message HELLO

chaque nœud doit diffuser sa propre adresse et la liste de tous les voisins qui ne répondent pas aux messages qui leur sont transmis et également envoyer la liste de tous les voisins qui sont confirmés au message par une réponse à un intervalle de temps défini [26]. Et ils doivent envoyer la liste de tous les nœuds qui sont sélectionnés comme MPR pour le nœud d'origine.

Les nœuds échangent ces messages entre leurs voisins. ceci est utilisé pour la sélection de l'ensemble MPR[25].

b) Le message TC (Topologie Control)

Ces messages sont aussi envoyés par les nœuds dans tout le réseau après un intervalle de temps. Ces messages sont utilisés pour diffuser des informations topologiques sur tout le réseau. Les expéditeurs de message TC doivent inclure la liste de tous les voisins d'un MPR, qui ont choisi ce nœud comme MPR, et doivent également inclure un numéro de séquence pour l'ensemble de sélecteur MPR inclus [26].

2.6.2 Fonctionnement du protocole OLSR

a) Détection de voisinage

chaque nœud doit détecter tous les nœuds voisins avec lesquels ce nœud a un lien direct et bidirectionnel. les incertitudes entre la propagation radio peuvent rendre un lien unidirectionnel. par conséquent, tous les liens doivent être testés dans les deux sens afin d'être considérés comme valides. Pour accomplir cela, chaque nœud diffuse périodiquement un message HELLO, contenant des informations sur ses voisins et l'état de leurs liens. ces messages de contrôle sont reçus par des voisins à un saut, mais ne sont pas liés à d'autres nœuds. Le message HELLO permet à chaque nœud d'apprendre la connaissance d'un maximum de deux sauts. La table des voisins stocke des informations sur les voisins d'un saut, l'état du lien avec ces voisins et la liste de voisin à deux sauts[26].

b) Gestion de topologie

est le processus avec lequel chaque et tout routeur est capable de diffuser des informations vers le réseau entier. Chaque routeur choisit un voisin qui est capable de transmettre les données dans les deux sens, ce nœud est connu comme sous-ensemble (ensemble MPR) et lorsque le routeur transmet un message, et ce dernier est relayé par le MPR, il doit être reçu par ses deux voisins d'un saut. La sélection MPR est encodé en messages hello sortant [17]. La volonté de sélectionner un nœud en tant que MPR par les routeurs peut exprimer, dans ces messages, sur quelle base la prise en considération de la décision de calcul du MPR est prise en compte, ce qui est utile par exemple lorsqu'un réseau de routage OLSR est "planifié"[26].

c) le routage

est le processus par lequel les routeurs apprennent quelles informations d'état de liaison doivent être publiées sur l'ensemble du réseau. Chaque et tout routeur doit annoncer, au moins tous les liens entre l'ensemble du sélecteur MPR et lui-même, à travers lequel les routeurs peuvent calculer le chemin le plus court. Ce types d'annonces d'état de liaison sont transmis dans enTCs, diffusés à travers le réseau entier en utilisant le processus d'inondation MPR qui est déjà décrit. Comme un routeur sélectionne uniquement les MPR qui ont confirmé par la réponse du message depuis la liste. Et les liens annoncés dans le message de contrôle de topologie sont également bidirectionnels et les chemins de routage calculés par OLSR contiennent également uniquement des liens bidirectionnels. Certains évé-

nements peuvent se produire dans des messages de contrôle de topologie d'intervalle de temps aléatoire, cependant, ces messages de contrôle sont normalement envoyés périodiquement[26].

2.6.3 Avantages et inconvénients d'OLSR

D'après la présentation du protocole de routage OLSR, nous soulignons les avantages et les inconvénients suivant :

a) Avantages

- L'optimisation des diffusions des messages de contrôle grâce à la technique des relais multipoints[26].
- Il offre des fonctionnalités intéressantes tout en recherchant des routes optimales en termes de nombre de sauts[26].
- Il gère correctement la topologie du réseau, en expédiant régulièrement des messages TC[26].

b) Inconvénient

Il pose un problème de sécurité, il reste toujours vulnérable malgré les recherches faites pour améliorer sa protection contre les attaques[26].

2.7 TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)

Le protocole TORA est un protocole de routage hybride. TORA répond rapidement à une panne de liaison dans le réseau en inversant le lien. Le mécanisme limite les overheads à l'échelle locale et évite l'inondation du message de contrôle. L'inversion de liaison peut augmenter l'utilisation de la bande passante et réduire le délai de rétablissement du routage, Il est adapté aux réseaux mobiles à haute dynamique. De plus, plusieurs chemins depuis la source vers la destination sont créés dans TORA, qui prend en charge l'inversion de liaison et la transmission par trajets multiples[28]. TORA est basé sur l'utilisation de la propriété appelée "orientation destination" des graphes acycliques orientés. Un graphe acyclique orienté (DAG) est orienté destination s'il y a toujours un chemin possible vers une destination spécifiée. Le graphe devient non orienté destination, si un lien (ou plus) devient défaillant. Dans ce cas, les algorithmes utilisent le concept d'inversement de liens. Ce concept assure la transformation du graphe précédent, en un graphe orienté destination durant un temps fini. Afin de maintenir le DAG orienté destination, l'algorithme TORA utilise la notion de taille de nœud. Chaque nœud possède une taille qui l'échange avec l'ensemble de ses voisins directs. Un lien est toujours orienté du nœud ayant la plus grande taille, vers le nœud ayant plus petite[29]. Avec l'aide de graphe orienté, TORA fonctionne bien dans un réseau relativement dense. Contrairement à d'autres protocoles où la source réinitialise le chemin d'accès à la routine TORA est capable de reconstruire le lien brisé localement dans lequel le paquet de contrôle flottait autour de l'endroit de la rupture, cette qualité rend ce protocole différent des autres protocoles[28].

2.7.1 Les messages échangés dans TORA

- **Requête QRY (Query)** : pour la création des routes.
- **Mise-à-jour UPD (Update)** : pour la création et la maintenance des routes.
- **Suppression CLR (Clear)** : pour la suppression des routes.

2.7.2 Fonctionnement du protocole TORA

Un graphe acyclique dirigé (DAG) d'une source vers une destination spécifique est établi par la «hauteur» des nœuds dans TORA. Les paquets de données ne peuvent être transmis que d'un nœud supérieur à un nœud inférieur, qui s'appelle downlink. La hauteur est un 5-tuple (t, oid, r, v, id) , dont les trois premières valeurs (t, oid, r) sont appelées "niveau de référence". Les significations des différents paramètres sont les suivantes[29] :

1. **Time t** : le moment de la création du niveau de référence.
2. **Identification oid** : l'identité du noeud créant le niveau de référence.
3. **Reflection r** : la valeur du bit de réflexion.
4. **Arab values v** : l'information de nombre de sauts par rapport au nœud de destination.
5. **Identification id** : l'identité d'un noeud lui-même.

Le bit de réflexion est une valeur binaire, $r=0$ signifie que le niveau de référence n'a pas été reflété, $r=1$ Signifie que le niveau de référence créé est reflété en arrière.

La "hauteur" d'un nœud est très importante pour l'établissement de routage et l'inversion de liaison. La valeur de la "hauteur" est la base pour déterminer la liaison downlink. La stratégie pour comparer la "hauteur" de $h_i (t_i,oid_i,r_i,v_i,i)$ et $h_j (t_j,oid_j,r_j,v_j,j)$ est montré dan la figure ci-dessous[29].

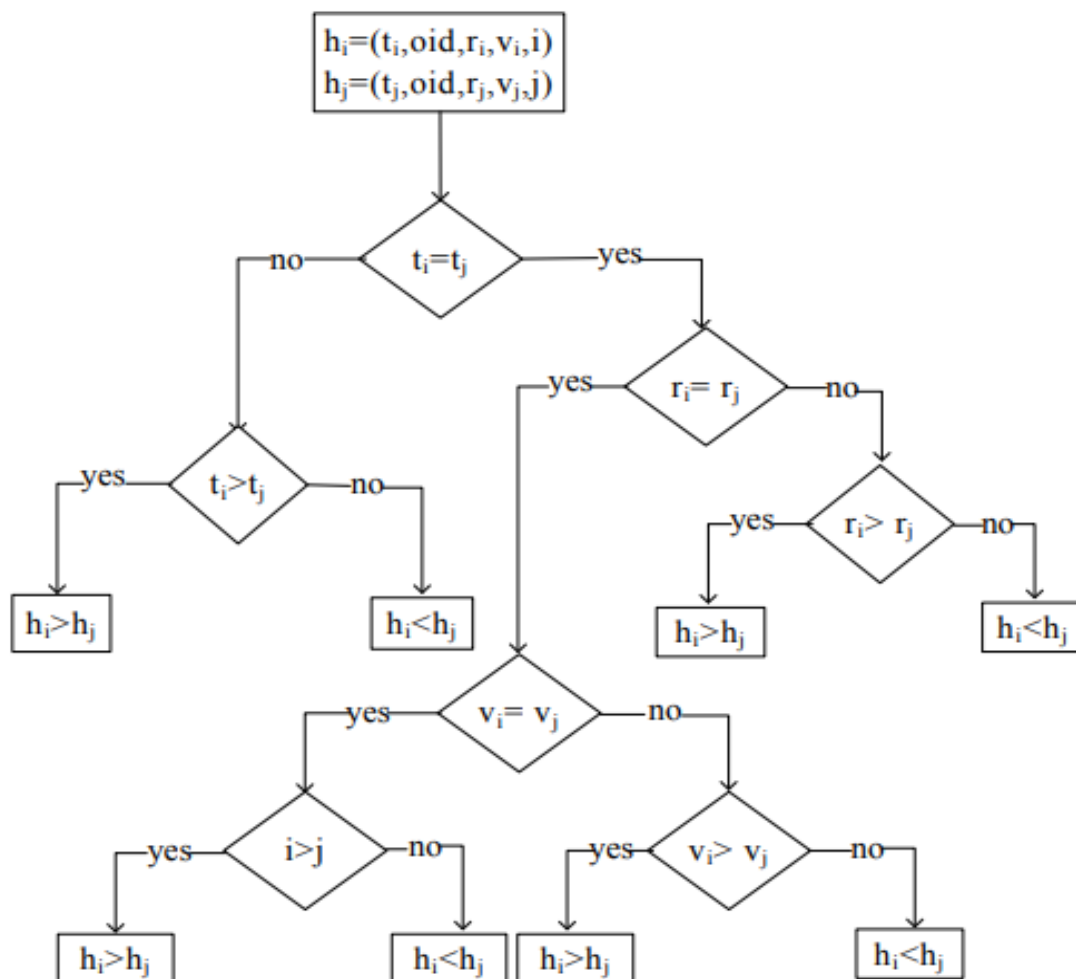


FIGURE 2.2 – La comparaison de la hauteur en TORA [29]

La figure ci-dessous montre une topologie de réseau simple. Si le nœud source S se prépare à envoyer des données au nœud de destination D, il va transmettre le paquet de requête de routage (QRY) à ses voisins. Chaque nœud qui reçoit un QRY sans être le nœud de destination relaie le paquet de contrôle. Lorsque le nœud de destination D reçoit le QRY de la source S à T_0 , le nœud D crée la hauteur $(T_0, D, 0, 0, D)$, puis diffuse un paquet de mise à jour (UPD). Chaque nœud recevant UPD définit une hauteur par rapport au nœud de destination D, tels que les nœuds C et E dans la figure. Après les nœuds C et E définissent leurs hauteurs, ils envoient également un UPD pour indiquer leurs hauteurs. En conséquence, leurs voisins peuvent définir les hauteurs aussi. Enfin, tous les nœuds définiront une hauteur par rapport à la destination et obtiendront la hauteur de ses voisins. Chaque nœud connaîtra également les liens downlinks. Dans le stockage d'un nœud, sa propre hauteur, la hauteur de ses nœuds voisins et les informations de statut de liaison seront sauvegardées.

Le DAG est formé comme indiqué dans la figure. Le nœud source S peut trouver deux routes différentes plus courtes à transmettre : S-A-BC-D et S-A-B-E-D [29].

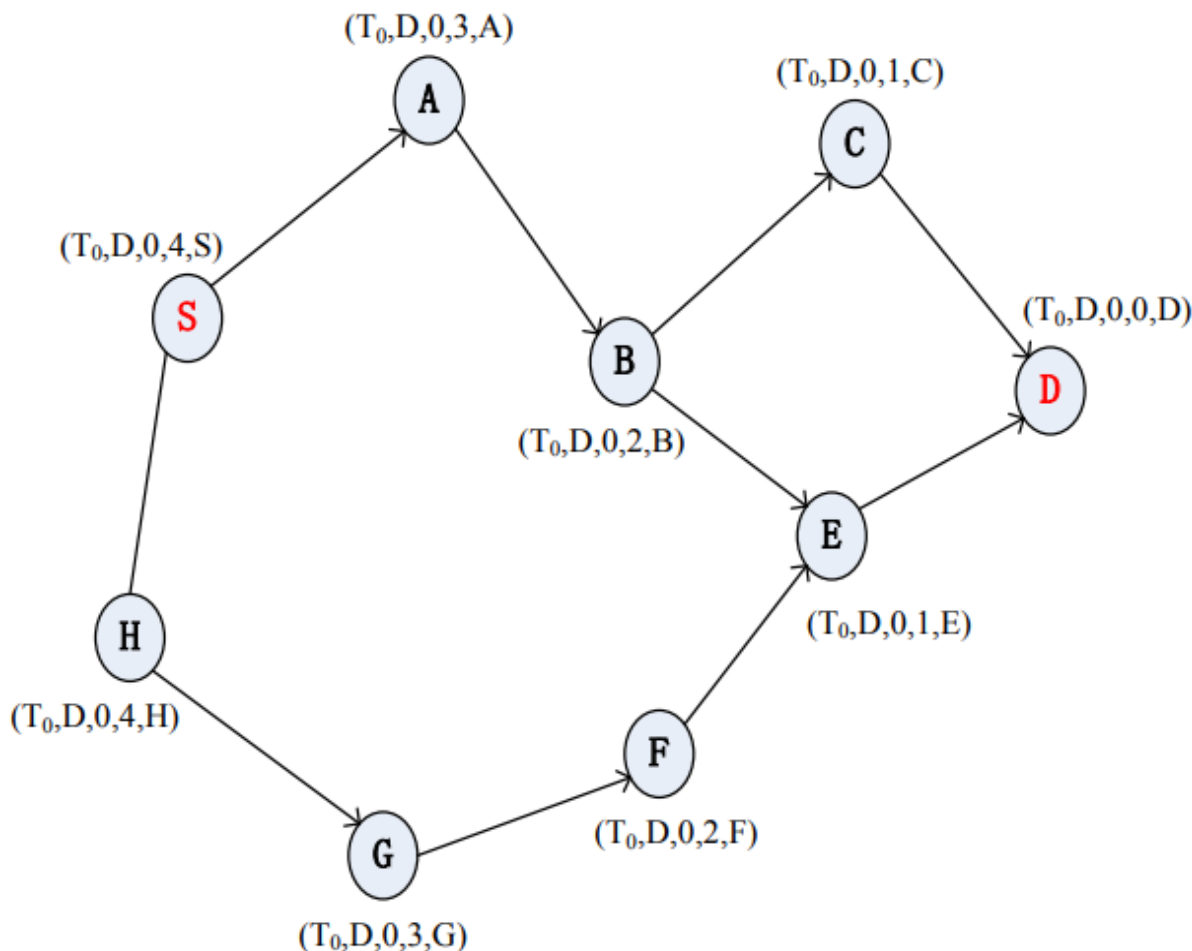


FIGURE 2.3 – DAG de TORA [29]

2.7.3 Avantages et inconvénients de TORA

a) Avantages

- TORA prend en charge plusieurs routes entre la source et la destination[29].
- La TORA ne nécessite pas de mise à jour périodique, par conséquent les overhead de communication et l'utilisation de la bande passante sont minimisés[29].
- Il fournit des routes sans boucle vers la destination[29].

- La performance de TORA dans un environnement à haute mobilité est meilleure[29].

b) **Inconvénient**

- Tora n'est pas économe en énergie et ne s'adapte pas aux larges réseaux[29].
- Tora n'assure pas le passage à l'échelle[29].
- Nécessite une synchronisation[29].

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept de routage dans les réseaux FANET. Ensuite, nous avons présenté la classification des protocoles selon différentes critères, par conséquent, nous avons constaté que les différentes caractéristiques supportées dans les FANET comme la forte mobilité qui entraîne une topologie très dynamique, et la grande vitesse rendent difficile, dans certains cas, la détermination des routes stables entre les sources et les destinations des données. En effet, cela nous a permis de conclure que le choix de protocole de routage dépend de plusieurs contraintes. Enfin, nous avons étudié en détail le fonctionnement et le comportement des deux protocoles de routage OLSR et TORA.

Simulation et discussion des résultats

Sommaire

3.1	Introduction	42
3.2	Environnement de simulation	42
3.2.1	NS2 (Network Simulator 2)	42
3.2.2	Architecture du NS2	42
3.3	Les modèles de mobilité	44
3.3.1	Les modèles par entité	45
3.4	L'ajout de 3D dans NS2	45
3.5	Métriques de performance	46
3.6	Paramètres de simulation	48
3.7	Simulation et discussion des résultats	48
3.7.1	Premier scénario	48
3.8	Conclusion	50

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'environnement de simulation et la configuration des paramètres d'entrée, ainsi que les critères d'évaluation. Enfin l'interprétation des résultats de simulation.

3.2 Environnement de simulation

3.2.1 NS2 (Network Simulator 2)

NS2 (Network Simulator 2) est un simulateur à événements discrets développé dans un but de recherche. Il fournit un environnement assez détaillé permettant entre autres de réaliser des simulations d'IP, TCP, du routage et des protocoles multicast aussi bien sur des liens filaires que sans fil [30]. Dans notre travail nous avons utilisé la version NS-2.35[30].

3.2.2 Architecture du NS2

L'architecture générale du NS2 (voir figure 4.1) consiste en deux types de Langage de programmation : le C++ et l'OTcl (Object oriented Tool Command Language). LE C++ est utilisé pour programmer les entités internes des systèmes simulé, alors que l'OTcl est utilisé pour définir les scenarios des simulations et les paramètres de configuration. Ces deux types de langages sont ensuite liés via le TclCL qui permet le passage des codes C++ vers les codes en OTcl et vice versa[30].

Une fois la simulation terminée. NS génère des fichiers particuliers dits fichiers de traces contenant un ensemble d'informations sur le déroulement

de la simulation. Ces fichiers permettent d'évaluer les performances de réseau étudié selon des critères précis. Ils peuvent être interprétés en utilisant les outils : NAM(Network AniMator)et Xgraph[30].

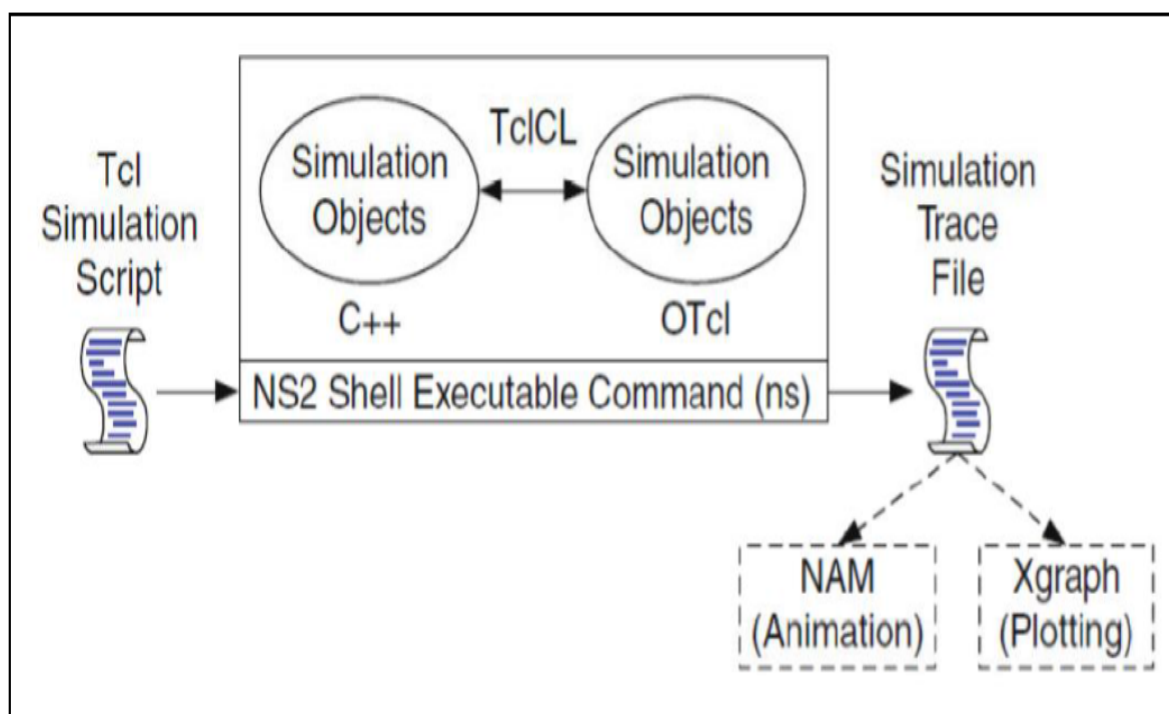


FIGURE 3.1 – L'architecture générale du NS2.

On distingue deux types de fichiers de trace :

- **Fichiers de trace ".NAM"** : Ces fichiers contiennent des informations utiles pour la visualisation des noeuds et leurs déplacements ainsi que le parcours des paquets entre les noeuds[30].
- **Fichiers trace ".tr"** : Ces fichiers contiennent un ensemble de lignes tel que chaque ligne correspond à un événement daté concernant soit un noeud ou un paquet, ils servent à calculer les différents critères et taux utiles pour évaluer les performances du réseau étudié[30].

3.3 Les modèles de mobilité

Les modèles de mobilité sont conçus pour la simulation de comportement des nœuds. Ces modèles sont divisés en deux catégories, selon le mode de déplacement des nœuds. Dans la première catégorie, le mouvement d'un nœud se fait indépendamment des autres, en appels modèles de mobilité par entité. Tandis que dans la deuxième catégorie, le mouvement des nœuds se fait en groupe et en appels les modèles de mobilité par groupe[17].

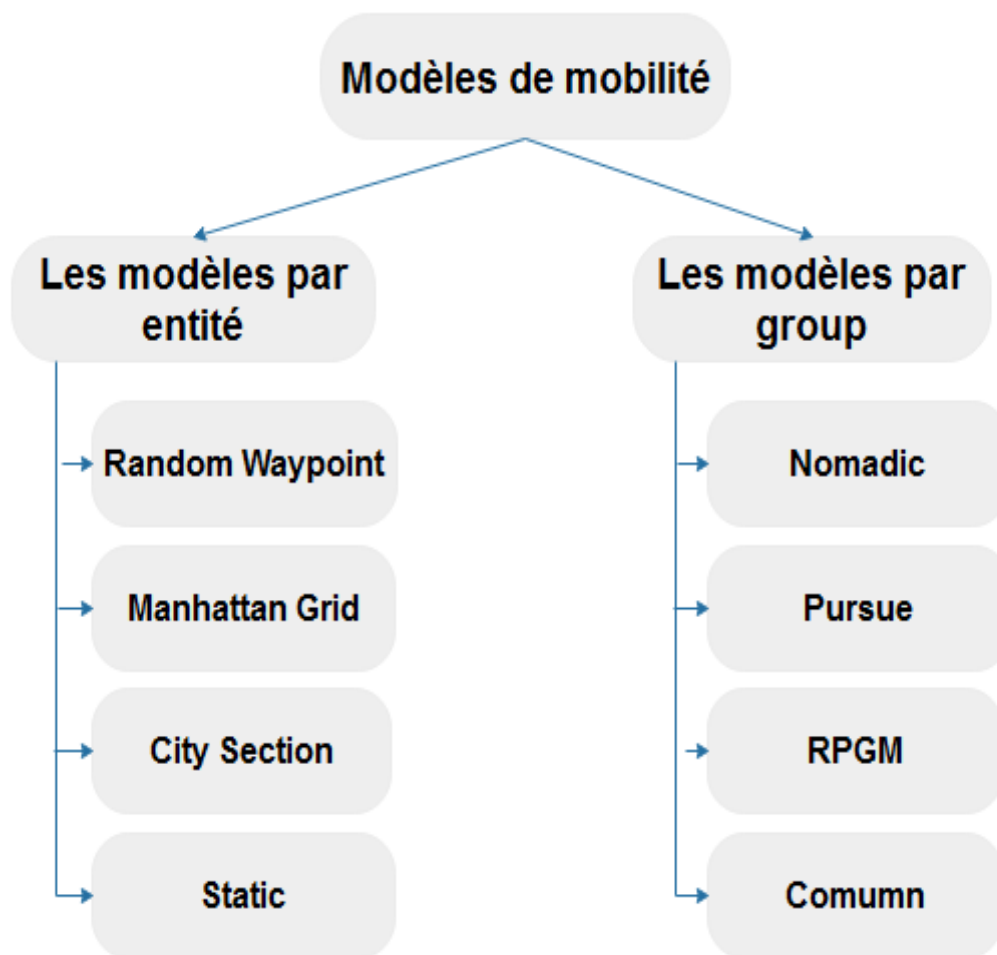


FIGURE 3.2 – Classification des modèles de mobilité

3.3.1 Les modèles par entité

Dans cette catégorie, chaque nœud se déplace indépendamment des autres. Dans notre projet nous avons utilisé pour notre simulation le modèle RandomWaypoint[17].

a) Random Waypoint

Le modèle RWP (Random Waypoint) est un modèle synthétique couramment utilisé pour la mobilité, par exemple dans les réseaux Ad Hoc. C'est un modèle élémentaire qui décrit le modèle de mouvement des nœuds indépendants par des termes simples[17].

3.4 L'ajout de 3D dans NS2

NS2 est un simulateur open source. Le code de NS2 utilise un certain nombre de conventions de codage, y compris la représentation de l'emplacement d'un nœud mobile. Les coordonnées des nœuds mobiles sont désignées par les variables X_* , Y_* et parfois Z_* . Comme le simulateur est conçu pour modéliser des environnements 2D, si et quand Z_* est utilisé, il est mis à zéro.

La recherche de fichiers sources ns2 pour les variables X_* , Y_* et Z_* suivie d'une inspection de code a abouti aux fichiers candidats suivants pour les modifications énumérées dans le figure 3.3 ci-dessous :

Fichier	Methodes
Mobilenode.cc	MobileNode() command() bound_position() set destination() update_position() og_movement()
Mobilenode.h	getVelo() destZ() set_destination() initialized()
Topography.cc	Load_cube() command()
Topography.h	Load_cube() lowerZ() upperZ() Topography()

FIGURE 3.3 – Les fichiers de code source modifiés

Le simulateur modifié a été utilisé pour expérimenter avec un réseau de support mobile FANET en 3D.

3.5 Métriques de performance

Les métriques sont des paramètres de test du protocole de routage qui permettent de mesurer les performances de celui-ci. Dans notre étude, nous avons pris en compte les métriques suivantes :

- **Taux de livraison de paquets (PDR) :** C'est un facteur très important pour évaluer les performances d'un protocole de routage dans n'importe quel type de réseau. Ces performances dépendent des dif-

férents paramètres choisis pour la simulation. Les facteurs les plus importants sont la taille du paquet, le nombre de noeuds, la portée de communication et la structure du réseau. On peut obtenir le taux de livraison de paquet PDR (Packet Delivery Ratio) à partir de la somme de nombre de paquets reçus par le destinataire divisé par la somme de paquets émis par tous les noeuds émetteurs[29].

- **Délai de bout en bout** : Cette métrique désigne le temps qui sépare le moment d'envoi d'un paquet de la couche transport de la source et le moment de réception de ce paquet par la couche transport de la destination. Seuls les paquets de données livrés avec succès à la destination qui ont comptés[29].
- **Nombre de paquets perdus** : Ce sont les paquets qui n'ont pas pu atteindre leur destination[29].

3.6 Paramètres de simulation

Les principaux paramètres de simulation des deux protocoles sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Valeur
Nombre des nœuds	25
Modèle de mobilité	Random Waypoint
Topologie réseau	1500 m * 1500 m * 1000 m
Temps de simulation	100 s
Taille des paquets	512 Ko
Couche MAC	802.11p
Gamme de transmission	300 m
Vitesse	10-100m/s
Modèle de propagation Radio	Tow Ray Ground

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation

3.7 Simulation et discussion des résultats

3.7.1 Premier scénario

Dans ce scénario le nombre total d'UAV dans le réseau est fixé et le temps de pause varie, Le temps de pause est l'intervalle de temps qui sépare deux transmissions de paquets successives. Nous avons obtenu les graphes suivants :

Nombre de paquets perdus

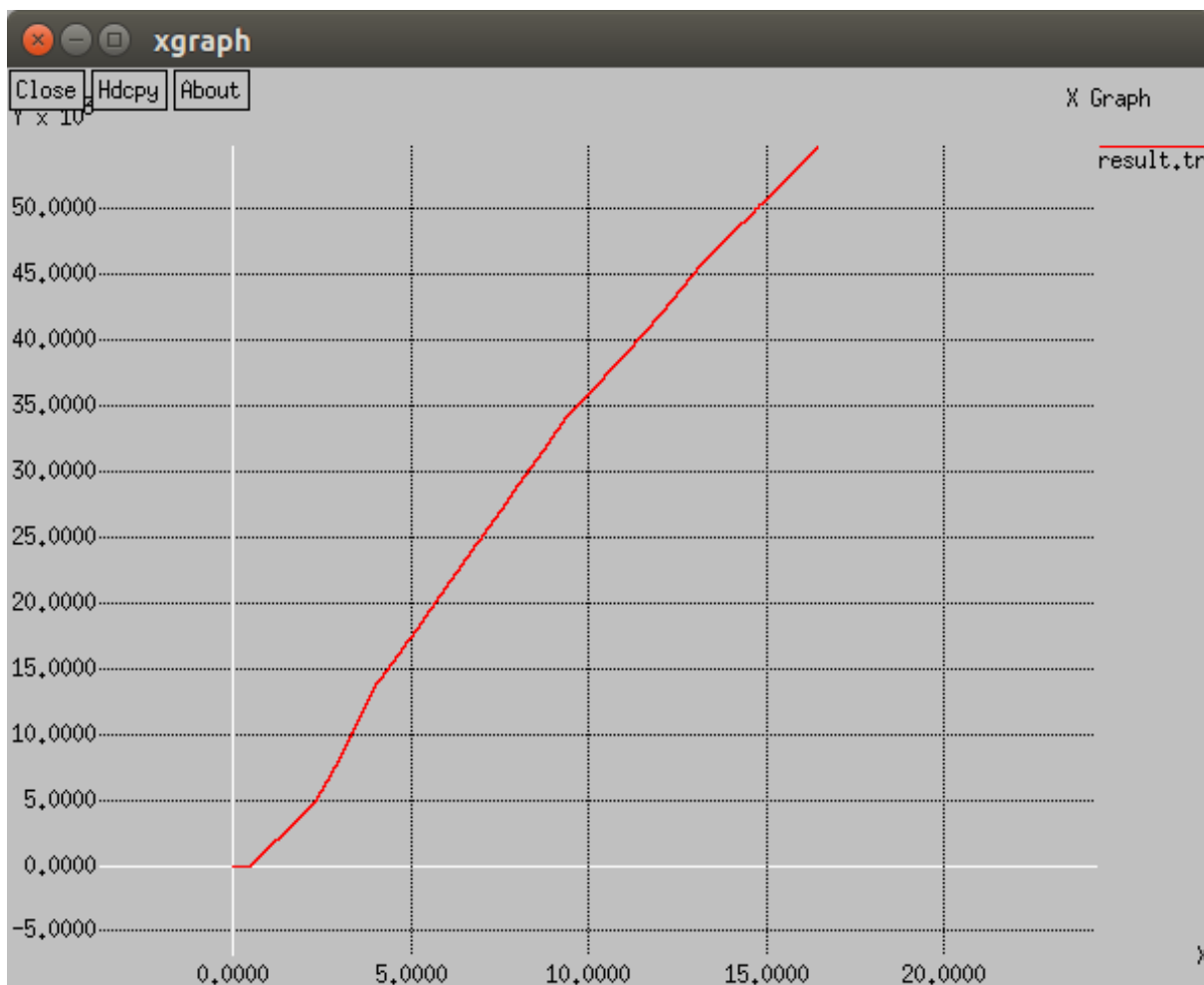


FIGURE 3.4 – Nombre de paquets perdus.

Le graphe montre que le nombre de paquets perdus augmente de façon monotone pour le protocole OLSR quand le temps est varié avec la mobilité du réseau.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'évaluer les protocoles de routage OLSR et TORA dans les réseaux FANET en variant certains paramètres délai et mobilité du réseau ... etc. Pour réaliser cette simulation nous avons ajouté le 3D dans NS2 par des modifications dans le code de ns2, cette dernière prend beaucoup de temps.

Conclusion générale

Les réseaux ad hoc de FANET forment un nouveau type de réseaux issu des réseaux ad hoc mobiles (MANET). Ils se composent d'un nombre de véhicules aériens sans pilote (UAV) dans le ciel, capables de communiquer entre eux sans une infrastructure fixe.

Le fait que la topologie du réseau soit de type très dynamique rend d'autant plus difficile à conserver les informations sur les nœuds, en effet le routage s'impose avec un rôle très important afin d'acheminer ces informations vers la bonne destination.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la simulation des protocoles de routage des réseaux FANET tel que OLSR et TORA, en utilisant le simulateur de réseau NS2.

Après avoir ajouté le 3D dans NS2 et calculé le nombre de paquet perdu, les résultats abouti pour le protocole de routage OLSR, montrent que la mobilité avait une grande influence sur le routage.

Durant notre travail, nous nous sommes vite rendu compte que le domaine de recherche dans les réseaux FANET est tout jeune et qu'il a un long chemin à parcourir. Plusieurs groupes scientifiques s'intéressent à ce type de réseaux qui promet beaucoup pour l'avenir. En effet nous avons eu l'occasion d'utiliser le langage C++ ainsi que les simulateurs NS2.

Enfin, nous souhaitons que notre mémoire apportera une contribution aux étudiants de notre université qui désire s'initier au domaine de la recherche dans les réseaux FANET.

Bibliographie

- [1] I. Maza, F. Caballero, J. Capitan, J.R. Martnez-de-Dios and A. Ollero, "Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications", In Journal of intelligent and robotic systems, 2011, vol. 61, no 1, pp. 563-585.
- [2] Z. Sun, P. Wang, M.C. Vuran, M.A. Al-Rodhaan, A.M. Al-Dhelaan and I.F. Akyildiz, "BorderSense : Border patrol through advanced wireless sensor networks", In Ad Hoc Networks, 2011, vol. 9, no 3, pp. 468-477.
- [3]] Z. Han, A.L. Swindlehurst and K.J. Liu, "Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET", In Wireless Communications and Networking Conference, IEEE WCNC 2006, vol. 1, pp. 252-257.
- [4] K. Chandrashekar, M.R. Dekhordi and J.S. Baras, "Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms", In Military communication conference, IEEE MILCOM 2004, Vol. 3, pp. 1429-1436.

-
- [5] M.Erdelj, E.Natalizio,K.R. Chowdhury and I.F Akyildiz, “Help from the sky :Leveraging UAVs for disaster management,” IEEE Pervasive Computing ,vol.16, Issue : 1, March 2017 .
- [6] ANCHORS project. ”[Online].Available : <http://anchorsproject.org/index.php/en/home/14-das-projekt-i-m-ueherhl-ick17-projectoverview.htm>!. [Accessed on 02 February 2016].
- [7] J. George, P.B. Sujit and J. Sousa, “Search strategies for multiple UAV search and destroy missions,” Journal of Intelligent and Robotics Systems 61 (2011), pp.355–367.
- [8] Z. Sun, P. Wang, M.C. Vuran, M. Al-Rodhaan, A. Al-Dhelaan and I.F. Akyildiz, “BorderSense : border patrol through advanced wireless sensor networks,” Ad Hoc Networks 9 (3) (2011),pp. 468–477.
- [9] E.P. de Freitas, T. Heimfarth, I.F. Netto, C.E. Lino, C.E. Pereira, A.M. Ferreira, F.R. Wagner and T. Larsson, “UAV relay network to support WSN connectivity,” ICUMT, IEEE, 2010, pp. 309–314.
- [10] F. Jiang and A.L. Swindlehurst,“Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink,” IEEE Globecom Workshops, 2010.
- [10] F. Jiang and A.L. Swindlehurst,“Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink,” IEEE Globecom Workshops, 2010.
- [11] A. Cho, J. Kim, S. Lee and C. Kee, “Wind estimation and airspeed calibration using a UAV with a single-antenna GPS receiver and pitot tube,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 47 (2011), pp.109–117.

-
- [12] Bekmezci, Ilker, Ozgur Koray Sahingoz, and Samil Temel. 2013. “Flying Ad-Hoc Networks (FANETs) : A Survey.” *Ad Hoc Networks* 11 (3) : 1254–70. doi :10.1016/j.adhoc.2012.12.004.
- [13] O. Bouachir, Conception et mise en œuvre d’une architecture de communication pour mini-drones civils, Thèse de doctorat, Université Toulouse 3, 2014.
- [14] C. Loison, T. Ruocco, C. Rives, Routage multicast dans les réseaux véhiculaires (vanet). Technical report, 2013.
- [15] K. kanta, M. sunil, S. basant, “A Brief Survey of Mobility Model for FANET”, National Conference on Innovative Trends in Computer Science Engineering held BRCMCET(ITCSE-2015).
- [16] OKSahingoz. “Routing protocols in flying Ad-hoc networks (FANETs) : Concepts and challenges”. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, pp. 513-27. April 2014.
- [17] I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, P. Agrawal and S. Zhang, *Communication and Networking of UAV-Based Systems : Classification and Associated Architectures*, 2017.
- [18] I Bekmezci, OK Sahingoz, S Temel, “Flying ad-hoc networks (FANETs) : A survey.” *Ad Hoc Networks* 11. No 3 1254-1270.(2013).
- [19] A. Purohit, F. Mokaya, P. Zhang, “Collaborative indoor sensing with the sensorfly aerial sensor network”, in : *Proceedings of the 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, IPSN, ACM, New York, NY, USA, 2012, pp. 145–146.

-
- [20] B.Mahalakshmi, Dr. A. Nithya, Survey on Routing Protocols on FANET, in : International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 7, Issue 2, February 2018.
- [21] Md. Hasan Tareque, Md. Shohrab Hossain, On the Routing in Flying Ad hoc Networks, in : Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems pp. 1–9, Vol. 5, 2015.
- [22] Jean-Aimé Maxa, Mohamed-Slim Ben Mahmoud, Nicolas Larrieu, Survey on UAANET Routing Protocols and Network Security Challenges, 2017.
- [23] Ozgur Koray Sahingoz, Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs) : Concepts and Challenges, in : Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014.
- [24] Jinfang Jiang and Guangjie Han, Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicles, in : IEEE Communications Magazine, 2018.
- [25] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, L. Viennot, Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks, 2001. olsr
- [26] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) RFC 3626,” <https://www.ietf.org/>. [Online] Available :<https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>. [Accessed : 23-Mar-2016].
- [28] Zhongqiang Zhai, Jun Du, Yong Ren, The Application and Improvement of Temporally Ordered Routing Algorithm in Swarm Network with Unmanned Aerial Vehicle Nodes, 2013.

- [29] B.Mahalakshmi¹, Dr. A. Nithya², Survey on Routing Protocols on FANET, 2018
- [30] The Network Simulator Project N2-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [31] A Mobility Scenario Generation and Analysis Tool, Documentation, University of Osnabruck, July 8, 2013.

Annexe

j'ai effectué les manipulations sur une machine avec Ubuntu 14.04 au lieu de 16.04 comme système d'exploitation, en raison de problème de stabilité et de compatibilité des paquets.

La version de NS est la version all-in-one 2.35

3.9 Installation et Configuration

NS-2 est un outil de simulation gratuit. NS-2 est compatible avec diverses plates-formes, y compris les systèmes Linux, Windows et Mac. Il est développé dans un environnement Unix et, de ce fait, il a la plus grande facilité de déplacement, tout comme l'installation. Les codes source NS-2 peuvent être téléchargés dans un seul package nommé tout-en-un. Pour les débutants, ceci est recommandé.

Des étapes sont indiquées ci-dessous pour l'installation de all-in-one.

3.9.1 Installation du simulateur NS2

Pour installer le simulateur de réseau, certaines étapes sont données comme suit :

- **Etap1** : Télécharger ns-2.35 depuis `http://www.isi.edu/nsnam/ns`
- **Etap2** : Enregistrez le dossier téléchargé dans le répertoire personnel et décompressez `"tar -xzf ns-allinone-2.35.tar.gz"`.
- **Etap3** : Ouvrir le terminal et utilisé la commande `"Sudo apt-get update"` en suite la commande `"sudo apt-get install build-essential autoconfautomakelibxmu-dev"`.
- **Etap4** : `cd ns-allinone-2.35` et puis la commande `./install`
- **Etap5** : Exécutez la commande suivante pour installer xgraph `"Sudo apt-get install xgraph"`.
- **Etap6** : Configurer les variables d'environnement `"gedit ~/.bashrc"`.
- **Etap7** : Exécutez la commande suivante `"source ~/.bashrc"`.
- **Etap8** : Tapez ns sur le terminal, , le symbole % indique une installation réussie de NS2.

3.9.2 intégration de protocole OLSR dans NS2

Il faut tout d'abord télécharger le paquet `um-olsr-1.0.tgz`, le copier dans le répertoire `ns-allinone-2.35/ns-2.35`, l'extraire, puis exécuter les commandes suivantes :

- **Cmd1** : `cd ns-2.35/`
- **Cmd2** : `ln -s ./um-olsr-1.0 ./olsr`
- **Cmd3** : `patch -p1 < olsr/um-olsr_ns-2.35_v1.0.patch`
- **Cmd4** : `./configure`
- **Cmd5** : `make distclean`
- **Cmd6** : `./configure`
- **Cmd7** : `make`