

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE

Mémoire de MASTER

Domaine : Mathématiques et Informatique

Filière : Informatiques

Option : Réseaux, Systèmes et Applications Réparties

Par :
Telidji Nour El Hamra

THEME

**Etude comparative entre les protocoles de routage dans les
FANET**

Soutenu publiquement le 30-06-2022 devant le jury composé de :

Madame Abdelhafidi Zohra

M.C. (A)

Président

Mr Chaib Nourredine

M.C. (A)

Examineur

Mr Allaoui Tahar

M.C. (A)

Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Tout d'abord, je voudrais remercier ALLAH le tout-Puissant de m'avoir donné le courage et la volonté de réaliser ce mémoire et de m'avoir donné une occasion en or d'acquérir ces connaissances.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à mon superviseur du mémoire, M. Allaoui Tahar, pour son soutien continu et ses conseils dans la rédaction de cette thèse.

Aux membres du comité, je tiens à les remercier d'avoir accepté de faire partie du jury et de m'accorder un temps précieux pour évaluer mon travail.

Je profite également de cette occasion pour remercier tous mes professeurs pour leurs efforts tout au long de mes études universitaires, mes collègues et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant cette expérience.

Enfin je voudrais exprimer ma très profonde gratitude à mon cher père LAMRI TAHER pour m'avoir apporté un soutien sans faille, et également je tiens à remercier toute ma famille spécialement mes sœurs BADRA, KHADIDJA et AICHA et GIGI et ma meilleure amie AMAL et ma chère tante KIKA.

NOUR

Résumé

Les FANET est le domaine de recherche le plus évolué actuellement dans les réseaux Ad hoc en considérant les UAV comme des nœuds. L'utilisation des UAV augmente de jour en jour en raison de l'avancement des réseaux de capteurs, des processeurs et des applications dans plusieurs domaines.

En raison de la grande mobilité et du changement rapide de topologie, ainsi que la variation de la vitesse des nœuds, le réseau FANET à fait face à de nombreux problèmes qui se résument dans le dysfonctionnement du réseau causé par des interruptions de route, ce qui déclenchera fréquemment des mises à jour de routage et générera une grande quantité de surcharge de contrôle dans le réseau. Tout cela a conduit les chercheurs à implémenter de nouvelles stratégies de routage dans les FANET qui est le principal défi afin de garantir une bonne communication et un bon acheminement de données entre les UAV, ces stratégies représentent des protocoles de routage compatible avec ce genre de réseaux qui sont hautement dynamiques.

Dans ce mémoire, nous allons mieux comprendre le réseau des drones. Ensuite nous verront les différents protocoles de routages déjà proposés avec leurs fonctionnements. Enfin, parmi ces derniers on a choisi de faire la comparaison entre la performance de deux protocoles de routages qui est à travers les résultats obtenus de la simulation qui montre l'efficacité de chaque protocole dans le réseau FANET.

Mots clés : FANET, UAV, Réseaux Ad Hoc des drones, les protocoles de routage dans les FAANET, NS-2, Simulation de l'AODV and DSDV, comparaison entre AODV and DSDV.

Abstract

FANET is the most advanced research area currently in Ad hoc networks where UAVs also known as drone are considered as nodes. Whereas the use of UAVs is increasing day by day with the advancement of sensor networks, processors and applications in several fields. Due to the high mobility and rapid change of topology, as well as the variation in the speed of nodes, the FANET network encountered many problems resulting in the malfunctioning of the network caused by road interruptions, which will frequently trigger routing updates and generate a large amount of control overhead in the network. All this has led researchers to implement new routing strategies in FANETs which is the main challenge in order to guarantee a good communication and a correct data routing between UAVs, these strategies represent routing protocols that are compatible with this kind of highly dynamic networks.

In this thesis, we will learn more about we the drone's network. Then we will see the different routing protocols already proposed with their architectures and functions. Finally, we will evaluate the performance of two routing protocols that we chose among the existing ones and that is through the results obtained from the simulation which shows the effectiveness of each protocol in the FANET network.

Keywords : FANET, UAV, Flying Ad Hoc Network, Routing Protocols in fanet, NS-2, Simulation of AODV and DSDV, comparison of AODV and DSDV.

ملخص

FANET هو مجال البحث الأكثر تقدمًا حاليًا في شبكات Ad hoc حيث تعتبر الطائرات بدون طيار المعروفة أيضًا باسم drones بمثابة عقد. في حين حظي هذا المجال باهتمام كبير حيث أن استخدام الطائرات بدون طيار يتزايد يوميًا بعد يوم مع تقدم شبكات الاستشعار والمعالجات والتطبيقات في العديد من المجالات. نظرًا للتنقل العالي والتغير السريع في طوبولوجية الشبكة، وأيضًا التغير في سرعة العقد، واجهت شبكة FANET العديد من المشكلات التي تمثلت في حدوث خلل في الشبكة بسبب الانقطاعات في الطرق، مما يؤدي بشكل متكرر إلى تحديثات في التوجيه وتوليد قدر كبير من التحكم في الشبكة. كل هذا دفع بالباحثين إلى تنفيذ استراتيجيات توجيه جديدة في FANETS وهو التحدي الرئيسي من أجل ضمان اتصال جيد والتوجيه الصحيح للبيانات بين الطائرات بدون طيار، وتتمثل هذه الاستراتيجيات في بروتوكولات توجيه تنطبق مع هذا النوع من الشبكات الديناميكية للغاية. في هذه الأطروحة، سنتعرف أكثر عن شبكة الطائرات بدون طيار FANET. ثم سنأخذ فكرة عن مختلف بروتوكولات التوجيه المقترحة مع ذكر بنياتها ووظائفها. أخيرًا، سنقوم بتقييم أداء بروتوكولي توجيه اخترناهما من بين البروتوكولات الموجودة وذلك من خلال النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة التي توضح فعالية كل بروتوكول في شبكة FANET .

الكلمات المفتاح: FANET , UAV , NS-2 , بروتوكولات التوجيه في FANET , محاكاة , المقارنة بين AODV و DSDV .

Table des matières

Introduction générale	1
1.Généralités sur les réseaux FANET	2
1.1. Introduction	3
1.2. Le réseau Ad hoc	3
A. Le Réseau Ad hoc mobile (MANET)	3
B. Le Réseau Ad hoc véhiculaire (VANET)	3
C. Le Réseau Ad hoc sous-marins (UANET)	4
D. Le Réseau FANET	4
1.3. Les caractéristiques des FANET	5
1.4. Les modes de communications	5
A. La communication direct des UAV	6
B. La communication via satellite des UAV	6
C. La communication via un réseau cellulaire des UAV (multi ground station)	7
D. La communication via un réseau Ad hoc des UAV (FANET)	7
1.5. Les modèles de mobilité	8
A. Le modèle Random Way Point (RWP)	8
B. Le modèle de Gauss Markov (GM)	8
C. Le modèle Reference point group mobility (RPGM)	9
D. Le modèle Manhattan Grid (MG)	10
E. Le modèle Paparazzi (PPRZM)	11
1.6. Les applications des FANET	11
A. Surveillance des catastrophes	12
B. Surveillance des zones agricoles	12
C. Les opérations des recherches et de secoures	12
D. Construction civil	12
E. La livraison	12
F. La réalisation des vidéos	13
G. Les services militaires	13
1.7. Design des FANET	13
1.8. QoS dans les réseaux FANET	13
1.9. Conclusion	13
2.Le routage dans les réseaux FANET	14
2.1. Introduction	15
2.2. Le routage dans les réseaux FANET	15

2.3.	Les protocoles de routage et leurs classification	15
2.3.1.	Les protocoles de routage basés sur la topologie	16
2.3.2.	Les protocoles de routage basés sur la position.....	22
2.3.3.	Les protocoles de routage hiérarchique	23
2.3.4.	Les protocoles de routage basés sur l'énergie	23
2.3.5.	Les protocoles de routage basés sur swarm intelligence	24
2.4.	Conclusion.....	26
3.	Simulation et analyse des résultats	27
3.1.	Introduction	28
3.2.	Le simulateur NS-2.....	28
3.2.1.	L'architecture de NS-2.....	28
3.3.	Les paramètres de performance	28
3.3.1.	Débit moyen (Throughput).....	28
3.3.2.	Packet Delivery Ratio (PDR).....	29
3.3.3.	Délai moyen de bout en bout (Average end-to-end delay)	29
3.4.	Environnement de simulation.....	29
3.5.	Résultat de simulation et analyse	30
3.5.1.	Première analyse	30
3.5.2.	Deuxième analyse.....	32
3.6.	Conclusion.....	34
	Conclusion générale	36
	Bibliographie	38

Liste des figures

Figure 1- Exemple d'un réseau ad hoc	3
Figure 2- Les différents modèles de réseaux ad hoc	4
Figure 3- Les architectures de communication UAV	6
Figure 4- Le modèle de mobilité RWP.....	8
Figure 5- Le modèle de mobilité de Gauss Markov.	9
Figure 6- Le modèle Reference point group mobility RPGM.	10
Figure 7- Le modèle Manhattan Grid (MG).	10
Figure 8- Le modèle de mobilité Papparazzi (PPRZM)	11
Figure 9- Les applications des FANET	12
Figure 10- Les protocoles de routage	16
Figure 11- Fonctionnement du protocole MLH	17
Figure 12- Le fonctionnement de LCAD	18
Figure 13- Exemple d'un MPR choisi par un nœud source	19
Figure 14- Exemple sur le fonctionnement d'EALC	24
Figure 15- Le comportement de la colonie des abeilles	25
Figure 16- L'algorithme d'auto-organisation de la colonie des abeilles	26
Figure 17- L'architecture basic du simulateur NS-2.....	28
Figure 18- PDR vs nombre des nœuds.	30
Figure 19- Throughput vs nombre des nœuds.	31
Figure 20- Delay vs nombre des nœuds.....	32
Figure 21- PDR vs vitesse des nœuds.....	33
Figure 22- Throughput vs vitesse des nœuds.....	33
Figure 23- Delay vs vitesse des nœuds.	34

Liste des tableaux

Tableau 1- Les paramètres de simulations.....29

Introduction générale

Ces dernières années, les capacités et les rôles des véhicules aériens sans pilote (UAV) autrement appelés les drones ont rapidement évolué et leurs utilisations dans les domaines militaires et civils sont extrêmement populaires en raison de leurs progrès technologiques.

Les UAV sont disponibles en différentes tailles (grand et petit) ; les petits drones ont des capacités plus limitées que les grands dans le temps et dans l'espace, leur usage unique peut poser des problèmes pour des missions assez complexes. Donc la coopération de plusieurs petits UAV (multi-UAV) en communiquant et collaborant entre eux est assurée comme solution. Cette coopération sans fil entre les drones ou entre les GCS (Ground Control Station) a mené à la création d'un réseau appelé FANET (Flying Ad-Hoc Networks).

Le réseau FANET est une application du réseau ad-hoc mobile, plus précisément un réseau auto-organisé qui peut être formé en connectant un groupe de drones communiquant entre eux sans avoir besoin d'une infrastructure, où au moins l'un d'entre eux doit être connecté au GCS ou au satellite. FANET diffère des réseaux Ad-Hoc existants tels que MANET (Mobile Ad-Hoc Network) et VANET (Véhicular Ad-Hoc Network) en termes de conception et de qualité des services, des types de capteurs, la livraison des données etc. Par conséquent, il est nécessaire d'adapter l'architecture MANET à la conception du réseau des multi-UAV.

La grande mobilité et la vitesse élevée des nœuds dans le système multi-UAV ont fait que l'objectif principal dans le réseau FANET est de garantir le bon fonctionnement de la communication entre les nœuds, ainsi que le routage des données vers leur exacte destination. Pour cela, il existe de nombreux modèles de protocoles de routage utilisés dans la technologie FANET et chaque modèle a ses propres avantages et inconvénients en termes de mobilité des nœuds, de connectivité, de routage des messages, de qualité de service, etc.

L'évaluation de la fiabilité de la performance d'un protocole de routage dans les réseaux FANET est faite à travers une simulation adaptée au réseau FANET, car chaque type de réseau a ses propres spécifications.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, on a présenté des généralités sur les réseaux ad hoc des drones (FANET) tout en citant ses caractéristiques ses modes de communication, les modèles de mobilité et même leurs domaines d'application. Ensuite, dans le deuxième chapitre, on a présenté les différents protocoles de routages dans le réseau FANET avec leurs classification et chacun son architecture. Enfin, le troisième chapitre contient les résultats qu'on a obtenus d'après la simulation sous NS-2, des deux protocoles AODV et DSDV qu'on a choisis pour notre étude comparative. En évaluant leurs performances en se basant sur des différentes métriques.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux FANET

1.1. Introduction

Les FANET (Flying Ad hoc Network) consistent en un groupe de nœuds appelés drones ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) communiquant et se coordonnant les uns avec les autres pour accomplir une tâche désignée sans aucune intervention humaine.

Dernièrement les drones se sont imposés dans plusieurs applications diverses sous forme de recherche et surveillance des frontières, surveillance du trafic et télésurveillance [1]. En raison de toutes communications entre drones devient un sujet d'intérêt. Comme tout autre type de réseau Ad hoc, les FANET ont évolué progressivement à partir d'un seul drone de grande taille effectuant la tâche assignée à un groupe d'UAV fonctionnant collectivement pour remplir un objectif particulier, alors pour mieux comprendre il faut étudier l'ensemble des notions nécessaires des FANET. Pour cela on va présenter ces différentes notions dans ce chapitre.

1.2. Le réseau Ad hoc

Un réseau ad-hoc est un réseau sans fil décentralisé auto-configurant constitue la frontière extrême de la communication sans fil. Cette technologie permet aux nœuds de réseau de communiquer directement entre eux à l'aide d'émetteurs-récepteurs sans fil (éventuellement sur des trajets multi-sauts) sans recourir à une infrastructure fixe comme le montre la figure 1.

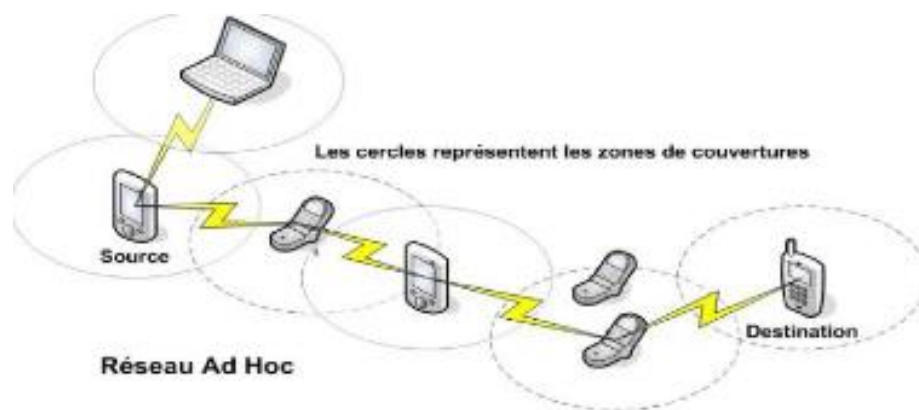


Figure 1- Exemple d'un réseau ad hoc

Le réseau ad hoc a introduit de différents modèles de réseaux, chacun selon son utilité dont on va les citer dans ce qui suit :

A. Le Réseau Ad hoc mobile (MANET)

Le réseau mobile ad hoc MANET correspond aux appareils mobiles connectés ensemble sans aucun lien filaire. Il est également appelé un réseau ad hoc sans fil. Il s'agit d'une infrastructure auto-configurable sans réseau [2]. Les nœuds mobiles sont libres de se déplacer dans ce réseau en changeant la topologie et c'est cette caractéristique qui a fait sa nomination.

B. Le Réseau Ad hoc véhiculaire (VANET)

Le réseau VANET s'agit d'une sous-classe du réseau ad hoc mobile MANET, dans lequel les nœuds de communication sont principalement des véhicules [3].

Dans ce cas, chaque voiture est considérée comme routeur ou un nœud sans fil, ce qui fait de ce réseau d'être caractérisé par la communication d'un grand nombre de nœuds mobiles dispersé dans différentes routes rendant le système difficile à concevoir.

Les premiers systèmes équipés de cette technologie sont les véhicules d'incendie et de police qui communiquent entre eux pour des raisons de sécurité.

C. Le Réseau Ad hoc sous-marins (UANET)

Les réseaux ad hoc sous-marins (UANET) et les réseaux de capteurs sous-marins (UWSN) sont de nouveaux paradigmes de mise en réseau pour explorer les océans inhabités. Cependant, les caractéristiques de ces nouveaux réseaux, telles que l'énorme délai de propagation, la mobilité des nœuds flottants et la capacité de liaison acoustique limitée, sont très différentes des MANET et WSN basés au sol. Dans UANET, les nœuds mobiles peuvent être mis en œuvre par des véhicules sous-marins autonomes (AUV) ou des véhicules télécommandés (ROV), qui sont des robots coûteux qui peuvent se déplacer sous l'eau en suivant des schémas de mouvement préprogrammés ou autonomes [4].

D. Le Réseau FANET

Les réseaux ad hoc de drones ou FANET (Flying ad hoc networks) se présentent comme une sous famille des VANET [5]. Les FANET sont apparus en réponse au besoin d'interconnexion de plusieurs drones ou UAV au sein d'un system multi-UAV. Un drone est défini comme un avion sans pilote qui peut naviguer de manière autonome en utilisant un système embarqué ou à l'aide d'un système de commande à distance. Un drone est typiquement équipé par des capteurs pour déterminer sa position et collecter des informations sur une zone d'intérêt [6]. Dans ce qui suit on va mieux expliquer le fonctionnement des réseaux FANET.

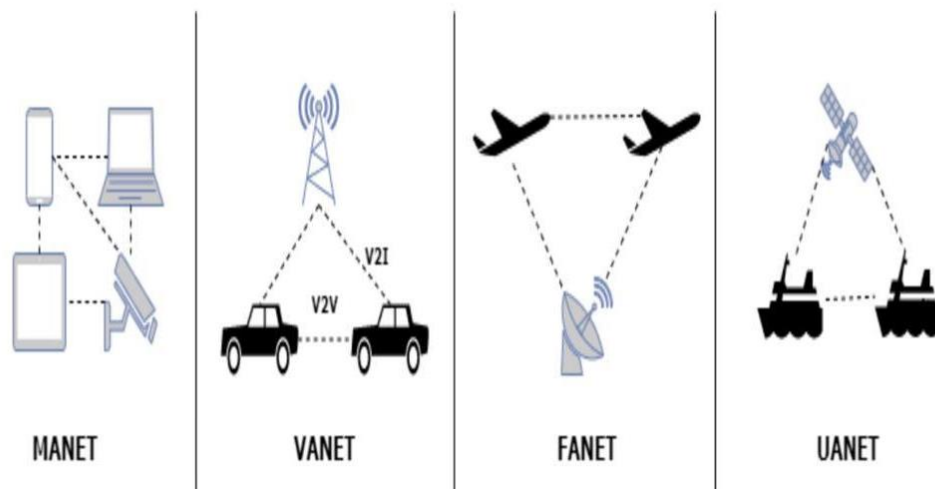


Figure 2- Les différents modèles de réseaux ad hoc [4]

1.3. Les caractéristiques des FANET

Comme le réseau MANET qui est caractérisé par ses capacités auto-organisées, les données autogérées de manière distribuée, les nœuds de communication et de coopération qui sont utilisés pour délivrer les données. L'architecture du réseau FANET qui est aussi un réseau sans infrastructure et qui utilise plusieurs nœuds pour transmettre des paquets de données possède également des caractéristiques spécifiques qui le différencient de MANET et VANET, ci-dessous on cite quelques caractéristiques :

A. Mobilité des nœuds

Les problèmes de mobilité des nœuds sont la principale différence entre FANET et les autres réseaux ad hoc. Le mouvement des nœuds MANET est relativement lent par rapport à VANET. Dans FANET, le degré de mobilité des nœuds est beaucoup plus élevé que dans VANET et MANET, pour cela les nœuds sont combinés dans des modèles de mobilité (détaillé dans la séquence 1.5).

Dans les systèmes multi-UAV, le plan de vol n'est pas fixe, si un système multi-UAV utilise des plans de vol prédéfinis, il ne peut pas réussir, en raison des déviations environnementales ou des mises à jour de fonctionnement, le plan de vol peut devoir être recalculé à chaque changement.

B. Densité des nœuds

La densité des nœuds est définie comme le nombre moyen de nœuds dans une unité de surface. Les nœuds FANET sont normalement répartis dans le ciel et la distance entre les UAV peut être calculée en kilomètres, même pour les petits systèmes multi-UAV. En conséquence, la densité des nœuds FANET est beaucoup plus faible que dans MANET et VANET.

C. Topologie du réseau

Dans les FANET, la topologie du réseau change fréquemment en raison du degré de mobilité plus élevé des UAV.

D. Le modèle de propagation radio

MANET n'utilise aucun signal radio entre les nœuds. Cependant, dans les FANET, les UAV utilisent une LoS (Line of-Sight) entre eux et avec le GCS.

E. Localisation

Il est difficile de déterminer la position précise des drones dans FANET en raison de leur degré élevé de mobilité. Les données de localisation doivent être mises à jour dans des intervalles de temps très courts.

1.4. Les modes de communications

La communication est l'un des problèmes de conception les plus cruciaux pour FANET, donc il est primordial de définir un protocole de communication fiable pour les réseaux UAV (la possibilité d'interruption de communication est augmentée par une mobilité très élevée), la figure 3 ci-dessous montre des architectures de communication UAV [7].

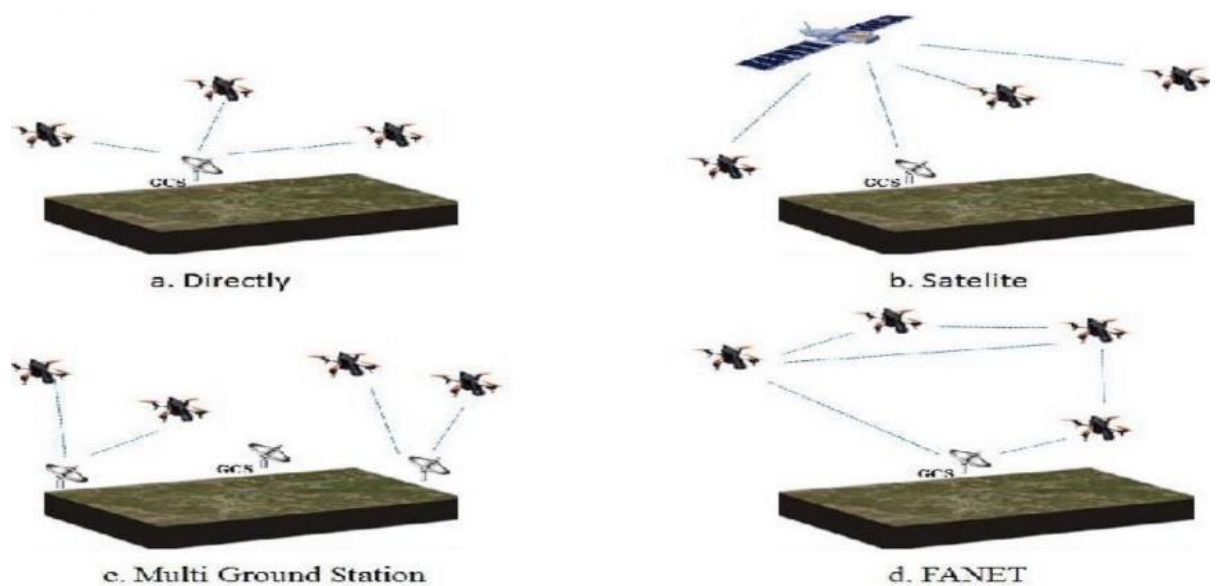


Figure 3- Les architectures de communication UAV [7].

A. La communication direct des UAV

Une liaison de communication directe peut être utilisée entre le GCS et chaque UAV, comme illustré dans la Figure3 (a). C'est l'architecture la plus simple, dans laquelle le GCS agit comme un nœud central auquel tous les drones sont connectés. Cependant, la communication directe UAV à UAV n'est pas possible en raison du schéma centralisé. Cette architecture ne peut être appliquée pour la communication NLOS (Non-Line-Of Sight) et les environnements dynamiques. De plus, le GCS représente vulnérabilité de FANET, par exemple si le GCS rencontre des problèmes, l'ensemble du réseau UAV échouera.

B. La communication via satellite des UAV

Pour faire communiquer deux points très éloignés, situés dans des régions où il est impossible d'avoir une infrastructure, les communications par satellite sont la meilleure solution, comme le montre la figure3 (b).

Les satellites peuvent créer une communication entre le GCS et l'UAV dans des systèmes UAV uniques. Ainsi, pour les systèmes multi-UAV, chaque aéronef peut communiquer avec le GCS par l'intermédiaire d'un satellite. Qui est le même cas pour les communications entre drones. Cependant, cette approche a quelques points faibles tels que la latence élevée de transmission et la location coûteuse de satellite. De plus, les UAV et le GCS doivent être en visibilité directe par le satellite.

En effet, pour certaines missions, arbres ou bâtiments peuvent constituer des obstacles au signal échangé entre les drones et leur satellite relais. De plus, les performances des systèmes satellitaires sont liées à la puissance d'émission des émetteurs au sol, qui peut être un inconvénient pour les mini ou micro UAV qui sont équipés de batteries de faible capacité.

C. La communication via un réseau cellulaire des UAV (multi ground station)

De nos jours, le type de communication le plus utilisé est le réseau cellulaire comme illustré dans la figure 3 (c). Basée sur une topologie centralisée, cette technologie consiste à découper un territoire en zones (cellules), chacune étant desservie par une station de base.

Toutes les communications doivent passer par ce point central qui a le rôle de les acheminer vers leurs destinations. Les communications cellulaires sont à la base des technologies de téléphonie mobile telles que GSM, GPRS, UMTS, LTE et des communications de données sans fil telles que WIFI et WIMAX. Puisqu'ils offrent une liberté extrême aux utilisateurs. Contrairement aux réseaux satellites, les réseaux cellulaires utilisent des émetteurs de faible puissance. Pour cela, il peut être une solution de faire communiquer les drones en utilisant l'infrastructure de l'opérateur téléphonique déjà existante pour s'affranchir des contraintes de portée et de mobilité. Cependant, le coût de la communication n'est pas négligeable, même avec l'installation d'une nouvelle infrastructure. De plus, il est difficile de couvrir tous les domaines et de maintenir ces infrastructures en sécurité dans certains cas, après des catastrophes naturelles par exemple.

D. La communication via un réseau Ad hoc des UAV (FANET)

Afin de remédier à l'inconvénient des architectures de communication discutées ci-dessus, le réseau FANET est proposé pour un essaim d'UAV, comme indiqué dans la figure 3 (d). Cette architecture de réseau fait partie du MANET dans lequel les nœuds communiquent entre eux sans avoir besoin d'une infrastructure centrale.

Chaque drone est considéré comme un système final. Tous les drones sont amenés à collaborer et doivent donc s'organiser pour relayer l'information. L'architecture Ad-Hoc s'adapte bien à la topologie en constante évolution des réseaux de drones, qui résulte de la grande mobilité des drones.

Dans FANET, le GCS agit également comme un nœud d'extrémité régulier qui peut avoir une allocation géographique fixe ou mouvant. Il communique avec le drone le plus proche qui agit comme une passerelle. Par conséquent, il existe deux types de communication à prendre en compte dans FANET : la communication UAV à UAV et la communication UAV à GCS.

D.1. UAV à UAV

Les drones communiquent entre eux afin de bien mener une mission commune comme le suivi de cible coopératif ou la planification de trajectoire. Ce type de communication peut être direct ou multi saut. Les UAV peuvent avoir une portée de communication courte ou longue entre eux, ce qui peut augmenter l'efficacité de FANET en termes de portée de communication et de débit de données.

D.2. UAV à GCS

Dans ce type de communication, les drones communiquent avec une infrastructure fixe (GCS, navire de guerre, infrastructure cellulaire ou satellite) pour fournir des services d'information aux autres utilisateurs du réseau mondial.

1.5. Les modèles de mobilité

Les modèles de mobilité représentent le mouvement des nœuds et la façon dont leurs emplacements, leurs vitesses et leurs accélérations changent au fil du temps [8]. Il existe plusieurs types de modèles de mobilité parmi lesquels on peut citer :

A. Le modèle Random Way Point (RWP)

La pause temporelle entre les changements de direction et de vitesse due aux changements fréquents de topologie résulte de la grande mobilité des nœuds. Ceux-ci doivent être pris en compte lors de la conception des FANET.

Autres facteurs qui nécessitent une redéfinition des itinéraires comprennent les obstacles environnementaux tels que les montagnes, les défaillances des drones existants dans le réseau, injection de nouveaux drones, éventuelles mises à jour de mission, besoins opérationnels, avec prise en compte tenu de l'adaptabilité, de l'évolutivité et de la latence, toutes ces contraintes font de la conception de FANET un problème difficile.

Les UAV du modèle RWP se déplacent de manière aléatoire dans une zone donnée. Ils sont libres de se déplacer dans la simulation indépendamment de tout autres UAV de la région. Ce modèle n'est pas adapté aux aéronefs qui ne changent pas de direction ni de vitesse rapidement et ne peuvent pas s'arrêter dans le ciel. RWP est basé sur trois actions : tourner à droite, tourner à gauche et aller [9] comme l'indique la figure 4.

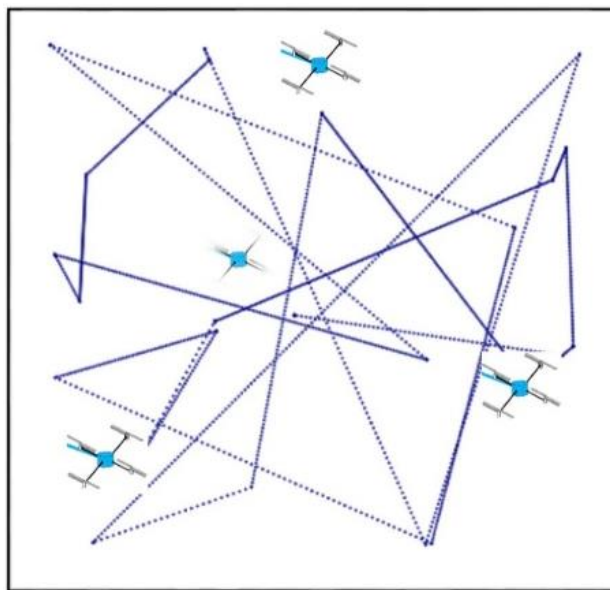


Figure 4- Le modèle de mobilité RWP.

B. Le modèle de Gauss Markov (GM)

Le modèle de mobilité de Gauss Markov est utilisé pour simuler le comportement d'un drone dans un essaim. La taille de la zone simulée est variable. La position du nœud est toujours dirigée par sa position précédente en raison de la vitesse de

déplacement élevée. La trajectoire d'un drone est déterminée par la mémoire du modèle.

Dans le modèle de mobilité de Gauss Markov, chaque nœud est initialisé avec une vitesse et une direction, Après cela à chaque période du temps, l'action rafraîchira la direction et la vitesse du nœud [10]. Pour être précis, la valeur de la vitesse et la direction au nième moment sont calculées sur la base de la valeur de la vitesse et de la direction au $n - 1$ premier et une variable aléatoire. Comme le montre la figure 5, le nœud se déplace en fonction de la position du nœud précédent.

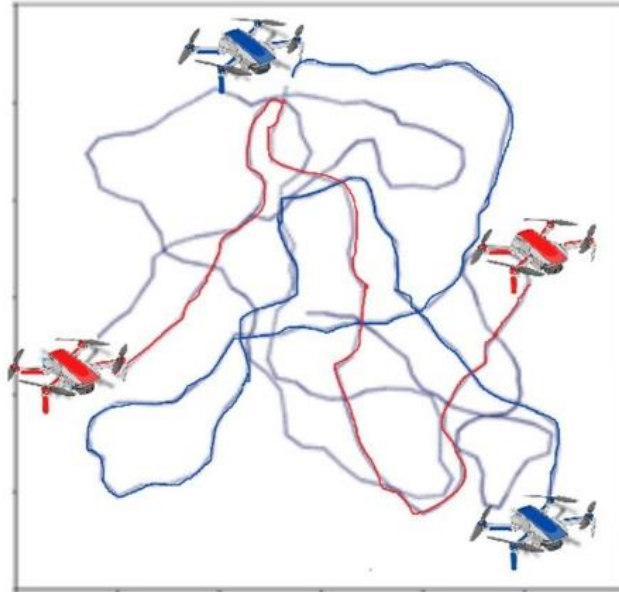


Figure 5- Le modèle de mobilité de Gauss Markov.

C. Le modèle Reference point group mobility (RPGM)

Dans le RPGM chaque groupe ou cluster a un point de référence sur lequel le mouvement, la direction, la vitesse et l'accélération de tous les membres du groupe en dépendent. La tête du groupe est positionnée au point de référence pendant toute la simulation les nœuds membres le suivent. Ainsi, le réseau de drones au sein du cluster est dans un état de connexion totale la plupart du temps. Les nœuds volent en formation et la grappe reste intacte et aucun nouveau drone n'y entre ou n'en sort [11].

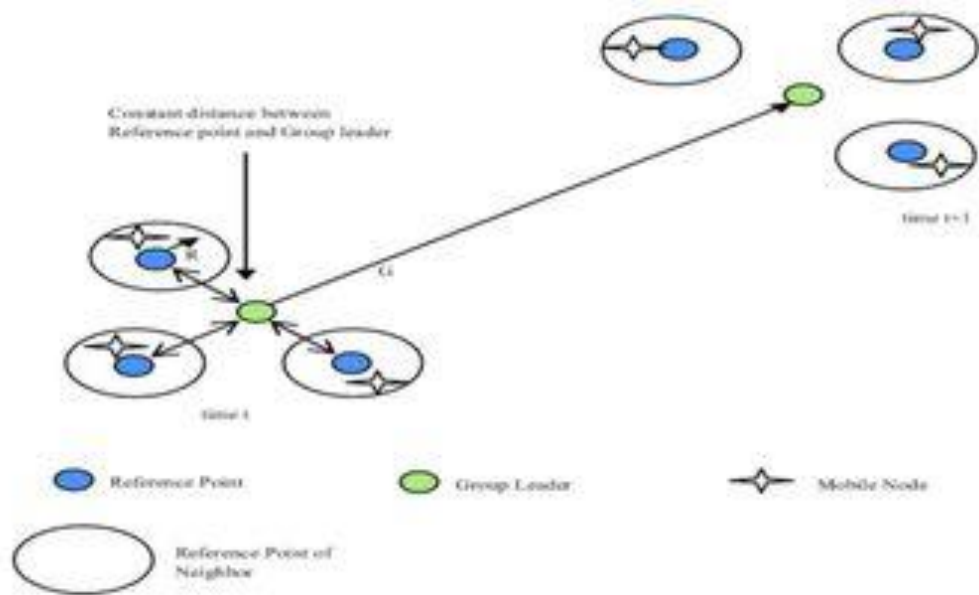


Figure 6- Le modèle Reference point group mobility RPGM.

D. Le modèle Manhattan Grid (MG)

Le modèle de mobilité du réseau de Manhattan Grid (MG), illustré sur la figure 7, utilise une topologie de route quadrillée. Ce modèle fonctionne comme une route droite horizontale et verticale en choisissant une approche probabiliste pour le nœud à chaque intersection, un drone choisit soit d'avancer, soit de devoir tourner. Bien que les directions des nœuds puissent être modifiées, cela impose des restrictions géographiques à la mobilité des nœuds [12].

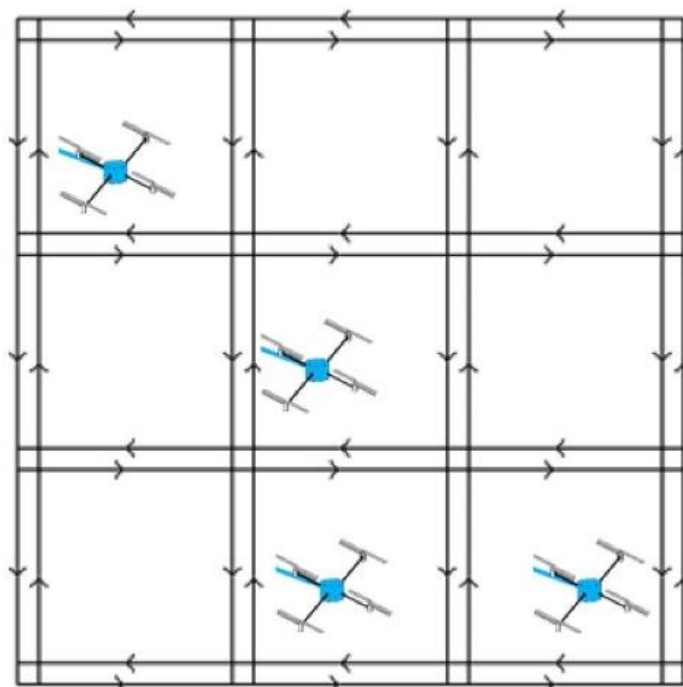


Figure 7- Le modèle Manhattan Grid (MG).

E. Le modèle Paparazzi (PPRZM)

Le modèle de mobilité Paparazzi (PPRZM) est un modèle probabiliste de trajectoire planifiée qui reproduit le comportement des drones Paparazzi à l'intérieur du mouvement de vol du pilote automatique Paparazzi [13]. De plus, il s'agit d'une conception basée sur une machine à états qui peut effectuer cinq mouvements possibles : Waypoint, Scan, Stay-At, Eight et Oval. Au début, chaque UAV sélectionne une position de départ, un type de mouvement et une vitesse. Après cela, l'UAV sélectionne une altitude aléatoire qui sera maintenue pendant l'expérience. Les divers schémas de mouvement des UAV du PPRZM sont illustrés dans la figure 8.

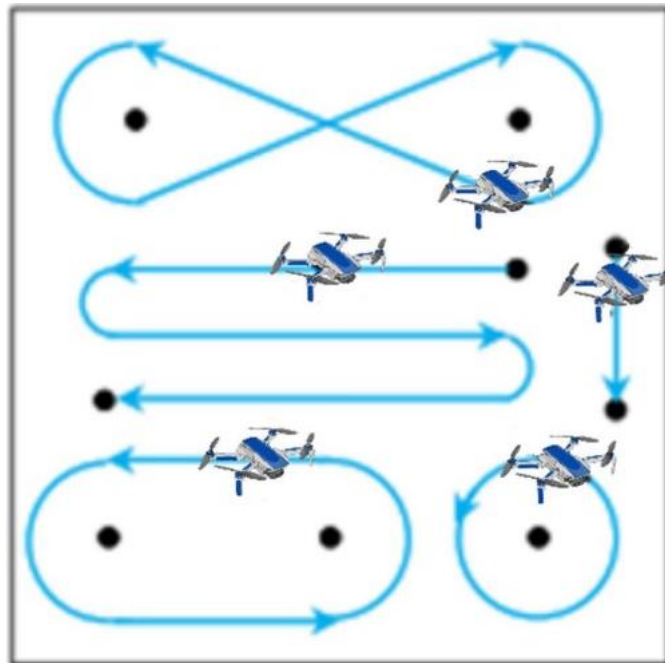


Figure 8- Le modèle de mobilité Paparazzi (PPRZM)

1.6. Les applications des FANET

Les architectures diverses et les caractéristiques physiques des drones ont rendu ces derniers utiles dans plusieurs applications comme indiqués sur la Figure 9 et encore plus.

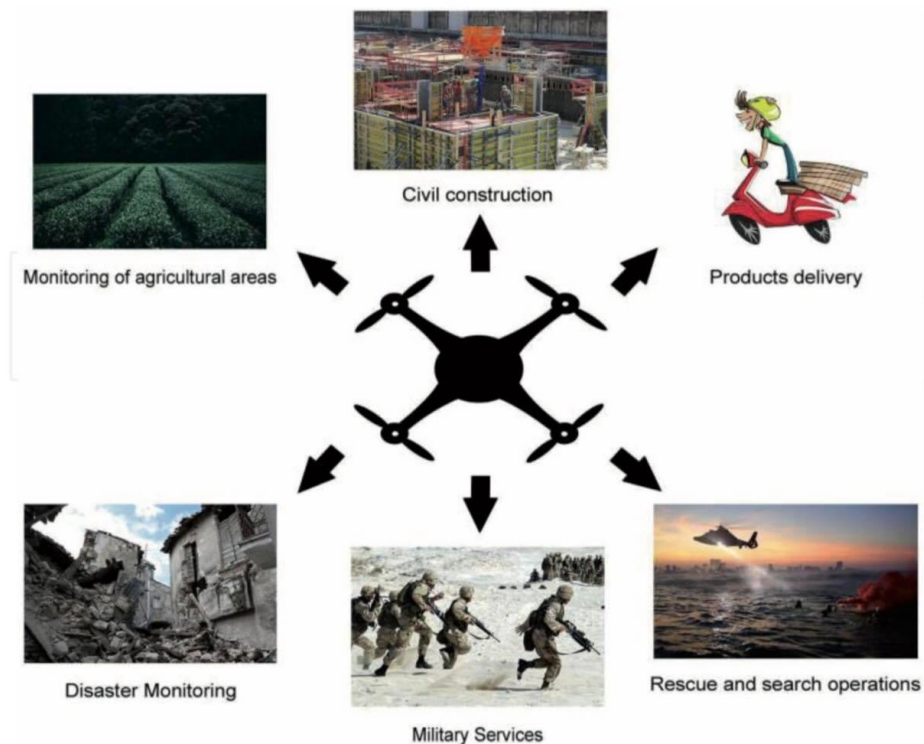


Figure 9- Les applications des FANET [13].

A. Surveillance des catastrophes

Un être humain peut rencontrer des obstacles dans certains cas de catastrophes pour faire l'analyse de l'ensemble de la zone touchée par la catastrophe alors les FANET sont utiles pour évaluer complètement le scénario [13].

B. Surveillance des zones agricoles

Il existe plusieurs possibilités d'utilisation des FANET dans l'agriculture, telles que l'évaluation complète des agricultures, l'analyse de la santé des plantes et la cartographie des zones possibles pour l'expansion des plantations [13].

C. Les opérations des recherches et de secours

Dans les situations de sauvetage où les réseaux mobiles conventionnels sont endommagés, les FANET peuvent être utilisés pour rechercher des otages dans la zone touchée. En raison de la taille des drones, il est possible d'accéder à des endroits dans lesquels un humain aurait de la difficulté [13].

D. Construction civil

Avec l'utilisation des FANET, il est possible d'analyser les constructions et faire une étude de chantier ou de grands ouvrages sur des angles de vue permettant une meilleure implantation [13].

E. La livraison

Afin de réduire leurs coûts et d'améliorer la qualité de leurs services, certaines entreprises idéalisent déjà l'utilisation de drones pour la livraison de produits [12]. Le

service se fera de manière autonome grâce à la mise en place d'un système intelligent dans les drones.

F. La réalisation des vidéos

La vidéo avec drones est de plus en plus utilisée par les entreprises pour plusieurs avantages indéniables parce que le drone offre une présentation des angles de vue multiples et il valorise le contenu visuel grâce à des vidéos en haute définition et plus encore.

G. Les services militaires

Les FANET sont largement utilisés par les militaires principalement pour la communication entre soldats ou entre leurs casernes. Ils peuvent également être utilisés dans des opérations civiles pour maintenir la sécurité de la société [14].

1.7. Design des FANET

Les changements fréquents de topologie résultent de la grande mobilité des drones. Ceux-ci doivent être pris en compte lors de la conception des FANET.

D'autres facteurs qui nécessitent une redéfinition des itinéraires comprennent les obstacles environnementaux parmi lesquels on cite : les montagnes, les défaillances des drones existants dans le réseau, injection de nouveaux drones, éventuelles mises à jour de mission, besoins opérationnels, avec prise en compte tenu de l'adaptabilité, de l'évolutivité et de la latence, toutes ces contraintes font de la conception de FANET un problème difficile.

1.8. QoS dans les réseaux FANET

FANET est utilisé pour de nombreux types d'applications et ils sont également utilisés pour transporter différents types de données comme les sessions GPS, le streaming vidéo, les messages vidéo/vocaux et les messages texte simples. FANET doit donc prendre en charge une certaine qualité de service.

1.9. Conclusion

Le réseau FANET est un réseau prometteur avec un large éventail d'applications qui se sont rendues possibles par ce nouveau type de réseau de communication. De nos jours, les FANET sont développés et améliorés dans plusieurs domaines qui ont été mentionnés dans ce chapitre. Cependant, comme la grande mobilité des drones a un impact sur le réseau, le routage est la principale préoccupation des concepteurs en raison de l'importance des données échangées. Ainsi, des protocoles de routage ont été introduits.

Chapitre 2

Le routage dans les réseaux FANET

2.1. Introduction

Les protocoles de routage ont toujours été la technologie de base dans divers types de réseaux filaire ou sans fil. Pour les FANET hautement dynamiques, la forte mobilité d'un nœud peut facilement conduire à un dysfonctionnement du réseau ou des interruptions de route, ce qui déclenchera fréquemment des mises à jour de routage, générera une grande quantité de surcharge de contrôle dans le réseau, causera des difficultés de convergence de route, augmentera le délai de transfert de données et augmentera le taux de perte de paquets et même le protocole de routage est invalide.

Afin de réaliser une mise en réseau fiable et efficace des nœuds hautement dynamiques, les protocoles de routage sont l'un des problèmes clés qui doivent être résolus dans FANET. Dans ce chapitre on va expliquer c'est quoi le routage ensuite on va détailler les différents types de protocoles de routage utilisés dans FANET avec des exemples de chaque type.

2.2. Le routage dans les réseaux FANET

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Dans les FANET cet acheminement représente un défi de taille entre les UAV, qui n'est pas le même que celui des autres réseaux ad hoc.

Avec les conditions de la grande mobilité des UAV et les changements de topologies, les tables de routage doivent être mises à jour de manière dynamique. Qui fait que le routage dans les FANET est réalisé par des types de protocoles pour garantir la bonne diffusion de données entre UAV.

2.3. Les protocoles de routage et leurs classification

Les protocoles de routage sont modélisés pour trouver la meilleure route (usuellement la plus courte) pour la transmission de données du nœud source au nœud de destination. Divers critères (métriques) sont utilisés pour choisir les itinéraires optimaux. Les métriques peuvent inclure des informations telles que la longueur de l'itinéraire, le délai, la bande passante, l'Overhead, le coût de la communication, la consommation d'énergie, etc.

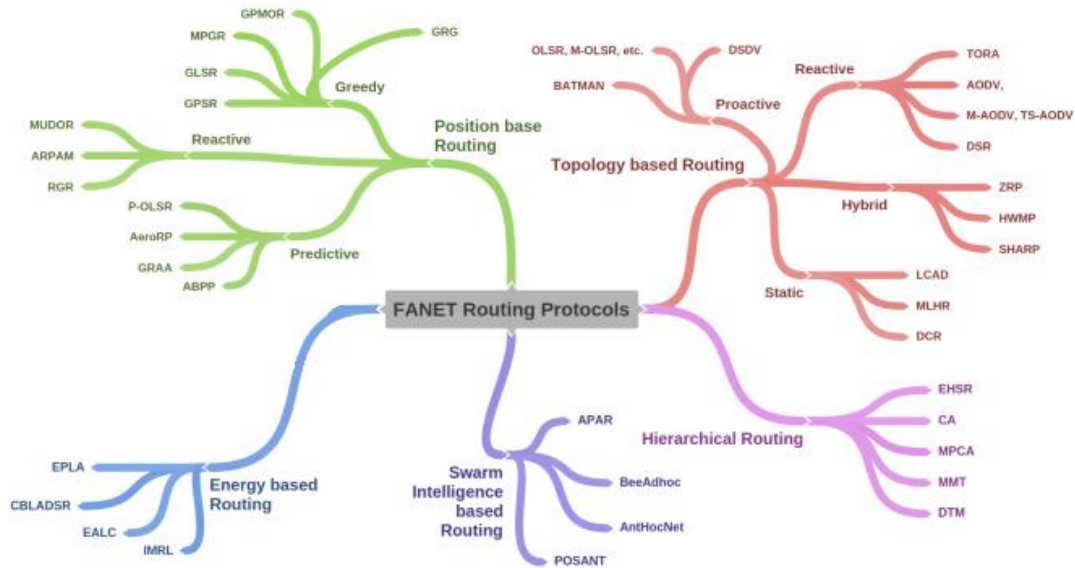


Figure 10- Les protocoles de routage [23].

Ici on va citer les différents types de protocoles dans les FANET comme indiqué sur la Figure 10 avec des exemples dans chaque type.

2.3.1. Les protocoles de routage basés sur la topologie

A. Statique

Dans les protocoles de routage statique, chaque drone possède une table de routage qui n'est pas mise à jour pendant la mission.

Les protocoles de routage statique sont applicables dans les cas où la topologie du réseau ne change pas et où les choix de sélection de route sont limités. Ici, chaque UAV communique avec les autres UAV ou la station au sol GCS et ne stocke que leurs informations. Cela conduit à réduire le nombre de liaisons de communication. Cependant, en cas d'échec de la mise à jour de la table de routage, il est obligatoire d'attendre la fin de la mission. Par conséquent, ces protocoles ne sont pas tolérants aux pannes. On va citer deux protocoles de routage statique :

- **MLH** (Multilevel Hierarchical Routing)

MLH est conçu pour traiter le problème d'évolutivité du réseau. Ici, le réseau peut être regroupé en un certain nombre de clusters désignés dans différentes zones, comme illustré sur la figure 10 [17].

Chaque cluster a un Cluster Head (CH), qui décrit l'ensemble du cluster et a également des connexions externes, il peut également attribuer des tâches différentes à chaque cluster du réseau MLH. Tous les drones d'un cluster se trouvent à portée de communication directe du CH. Le CH est directement ou indirectement connecté aux drones ou satellites de la couche supérieure. MLH peut produire de meilleures répercussions sur les performances si les UAV sont disposés en différents essaims avec une grande zone d'opération et que plusieurs UAV sont déployés dans le réseau.

Cependant, le problème de conception le plus crucial pour le routage MLH concerne les informations de cluster. La grande mobilité des UAV nécessite des

informations de cluster fréquentes et de cette manière l'adresse de clustering de prédiction de mobilité pour résoudre ce problème avec la prédiction des informations de topologie du réseau à l'aide de l'algorithme de prédiction de structure de dictionnaire Trie et de la mobilité du temps d'expiration du lien. Dans l'exemple ci-dessous, le drone le plus pondéré parmi ses voisins est choisi comme Cluster Head CH. Les critères de sélection des CH peuvent renforcer la stabilité des clusters et des Cluster Head (CH).

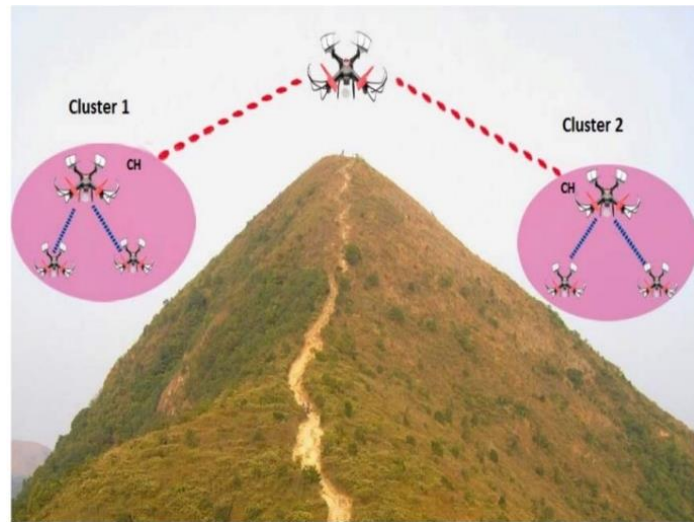


Figure 11- Fonctionnement du protocole MLH [17].

- LCAD (Load Carry and Deliver Routing)**
 Dans le modèle LCAD, un UAV stocke les données d'un nœud source placé au sol, transmet ces données en volant vers un autre nœud de destination placé aussi au sol, comme illustré dans la Figure 11 [17]. Initialement dans LCAD, le scénario d'une seule source et une seule destination a été déjà réalisé avec succès, ce dernier à faciliter la mise en œuvre de scénarios multi-sources multi-destinations qui peut également être possible si nécessaire.
 Ce mécanisme de routage est réalisable pour le transfert de données en bloc et les applications Delay-tolérant avec un minimum de sauts. Les principaux objectifs du routage LCAD sont de maximiser le débit et d'augmenter la sécurité. Cependant, le principal inconvénient de ce protocole est que chaque fois que la distance augmente entre les drones communicants, le délai de transmission devient exceptionnellement important et intolérable. Pour réduire le délai de transmission, plusieurs UAV peuvent être utilisés sur le même chemin où la distance entre les UAV doit être minimale et la vitesse des UAV peut être augmentée. De plus, le réseau LCAD peut être divisé en des petits sous-réseaux [17].

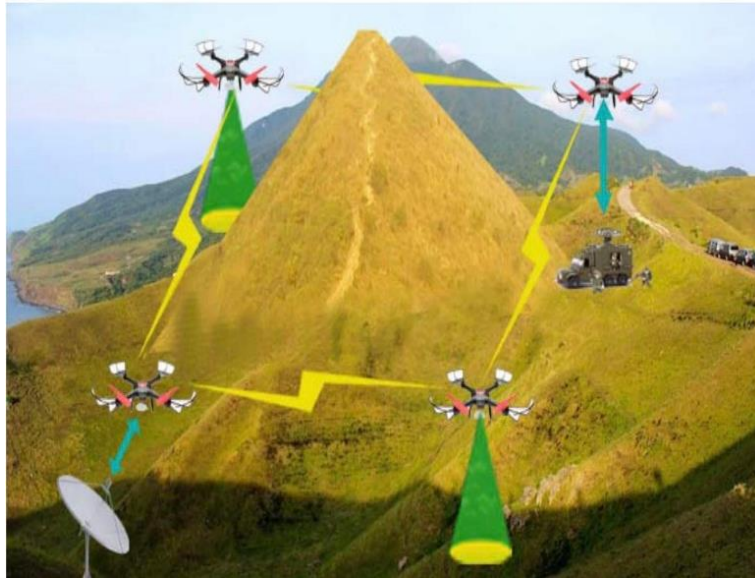


Figure 12- Le fonctionnement de LCAD [17].

B. Proactif

Dans les protocoles de routage proactif (PRP), chaque nœud maintient périodiquement une ou plusieurs tables indiquant la topologie complète du réseau. En raison de sa nature proactive, ce protocole de routage a l'avantage d'avoir des routes immédiatement accessibles en cas de besoin. Cependant, il entraîne une augmentation dans le coût de l'Overhead en raison de la mise à jour des informations. Par conséquent, le débit du réseau peut être influencé puisque les messages de contrôle sont envoyés inutilement même lorsqu'il n'y a pas de trafic de données. Pour cette raison, le protocole de routage proactif n'est pas bien adapté pour les réseaux mobiles et les grands réseaux UAV hautement dynamiques. Également pour les cas où la topologie du réseau change ou une défaillance de connexion se produit, ces protocoles de routage réagissent lentement à la défaillance [15]. Il existe divers protocoles de routage qui entrent dans cette catégorie comme :

- **DOLSR** (Dynamic Optimized Link State Routing)

Ce protocole est l'extension dynamique de l'OLSR (Optimized Link State Routing) qui utilise des Antennes Directionnelles au nombre réduit de MPR (Multi-Point Relay Nodes). Chaque nœud effectue deux opérations de base, la première consiste à calculer la distance de prochain saut pour tous les autres nœuds en utilisant le chemin le plus court et la deuxième consiste à sélectionner un certain nombre de nœuds MPR couvrant deux voisins de saut à l'aide de messages HELLO et à effectuer une élection distribuée.

OLSR utilise les messages Hello et Topology Control (TC) pour découvrir et diffuser les informations de topologie. Le nœud source diffuse des messages Hello qui contiennent son adresse unique et la liste de ses nœuds voisins, les nœuds voisins à 1 saut répondent, puis diffusent à leur tour des messages Hello et à travers des messages de réponse qu'ils reçoivent, les voisins à 2 saut seront reconnus maintenant ces nœuds voisins à 2 sauts seront MPR pour le nœud source.

Que les nœuds MPR diffusent des messages de TC qui diffusent ses informations réseau sur les nœuds qui l'ont sélectionné en tant que nœud MPR qui fait que les nœuds source communiquent avec le nœud MPR, réduisant ainsi l'inondation des messages de contrôle [19].

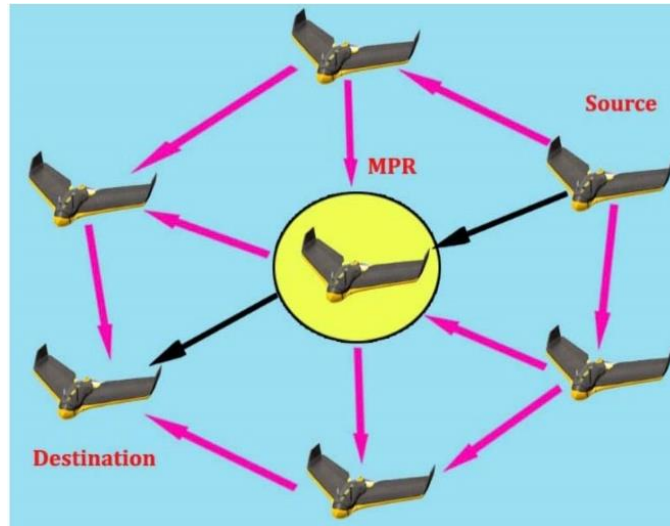


Figure 13- Exemple d'un MPR choisi par un nœud source [17].

- **DSDV** (Destination Sequence Distance Vector)

Ce protocole est basé sur l'algorithme Bellman-Ford avec peu de modifications nécessaires en le rendant plus adapté à FANET. Dans DSDV, chaque UAV doit tout distinguer de tous les autres UAV connectés au réseau. La table de routage ici est périodiquement mise à jour sur l'ensemble du réseau avec un numéro de séquence pour éviter les boucles de routage. La route récemment utilisée avec le numéro de séquence le plus élevé est prioritaire à une route avec le numéro de séquence le plus bas.

Les principaux avantages de DSDV sont à la fois la simplicité et l'utilisation des numéros de séquence, ce qui promet une transmission de données sans boucles. Cependant, le principal inconvénient de cet algorithme de routage est la mise à jour périodique de la table de routage qui est dynamique, ce qui crée une surcharge pour le réseau.

Ce protocole prend en charge le routage à chemin unique et ne prend pas en charge le routage multi-chemin. Autrement dit ; il n'est pas adapté aux réseaux hautement dynamiques où la topologie change plus fréquemment [19].

C. Réactif

Le protocole de routage réactif (RRP) est également connu sous le nom de protocole de routage à la demande, ce qui signifie qu'il découvre ou maintient une route à la demande.

La table de routage est ici périodiquement mise à jour, lorsqu'il y a des données à envoyer, s'il n'y a pas de connexion entre deux nœuds, il n'est pas nécessaire de calculer une route entre eux. Ainsi, ces protocoles de routage ne conservent que les routes actuellement utilisées [16], par conséquent, ils surmontent le problème de

surcharge de PRP. Dans ce modèle de routage, il existe deux types de messages générés : le message RouteRequest et le message RouteReply [6]. Le message RouteRequest est transmis du drone source à tous les drones adjacents en utilisant le mécanisme d'inondation pour découvrir le chemin, et chaque drone utilise la même approche jusqu'à ce qu'il atteigne le drone de destination. Alors que le message RouteReply est initié par l'UAV de destination et va à l'UAV source en utilisant le mode de communication unicast.

Dans cette approche de routage, il n'est pas nécessaire d'actualiser toutes les tables du réseau. Les protocoles de routage réactifs sont économes en bande passante, car il n'y a pas de mises à jour périodiques. Le principal défaut du RRP est qu'il faut beaucoup de temps pour trouver l'itinéraire, par conséquent, une latence élevée peut se produire dans le réseau pendant le processus de recherche d'itinéraire optimal. On va citer deux protocoles qui utilisent ce mécanisme :

- **DSR (Dynamic Source Routing)**

DSR est un protocole de routage dynamique dans lequel aucune route n'est fixée chaque fois qu'il y a des données à envoyer. Le nœud source (un nœud qui veut envoyer des données) lance le processus de recherche de route c'est pourquoi ce protocole est nommé Dynamic Source Routing (DSR) [19]. Il s'agit d'une sorte de processus de configuration de circuit virtuel en utilisant deux messages :

1. RREQ (Route Request) qui agit comme une requête ou un message Hello et ce message est diffusé à ses nœuds voisins à proximité du nœud si ces derniers sont des expéditeurs qui font suivre le paquet seulement.
2. RREP (Route Reply) qui agit comme un accusé de réception et ce message est indiqué aux nœuds qui ont une route vers une destination qui est un processus de retour en arrière de la destination à la source.

- **AODV (Ad-Hoc On-Demand Vector Routing)**

AODV est un protocole réactif, qui a les mêmes caractéristiques avec DSR, mais avec un différent mécanisme de maintenance de table de routage.

Dans AODV, chaque nœud stocke une table de routage, qui contient un seul enregistrement pour chaque destination ; en mode DSR, chaque nœud peut stocker plusieurs entrées dans sa table de routage pour chaque destination. Une autre différence avec DSR où les paquets de données portent le chemin complet entre les nœuds source et destinations.

Dans AODV, le nœud source (et aussi d'autres nœuds de relais) stocke les informations de saut suivant correspondant à chaque transmission de données. Le protocole de Routage AODV comprend trois phases : découverte de la route, transmission de paquets et maintien de la route. Si le nœud source doit envoyer des paquets, il démarre d'abord un processus de découverte de route pour localiser le nœud de destination, puis distribue ces paquets sur un itinéraire déterminé. Dans ce processus, les nœuds intermédiaires mettent également à jour leurs tables de routage.

En raison des nœuds mobiles, certaines coupures de liens peuvent se produire qui déclenchent un processus de réparation pour maintenir les itinéraires [17].

D. Hybride

Le protocole de routage hybride (HRB) est une combinaison de protocoles de routage proactifs et réactifs, prenant les meilleures fonctionnalités et permettant de surmonter les limitations des deux modes. Les protocoles de routage réactifs ont généralement besoin de plus de temps pour découvrir la route et les protocoles de routage proactifs ont une surcharge énorme de messages de contrôle. Ces lacunes peuvent être atténuées en utilisant HRP. Les protocoles hybrides sont particulièrement appropriés pour les grands réseaux et sont basés sur les concepts de zones où le routage intra-zone est exécuté à l'aide d'un routage proactif et le routage dans la zone interne est réalisé en utilisant l'approche de routage réactif [17]. Les deux protocoles qui suivent sont des protocoles de type hybride :

- **TORA** (Temporarily Ordered Routing Algorithm)

TORA est un protocole de routage distribué où les routeurs ne conservent que les informations sur les routeurs adjacents pas sur tout l'ensemble du réseau.

TORA utilise principalement un protocole de routage réactif, mais il utilise également un protocole proactif. Plutôt que d'utiliser le chemin le plus court, TORA construit DAG qui est Directed Acyclic Graph de la source à la destination.

Chaque nœud a une valeur de paramètre appelée "height" utilisant 5 tuples (t, oid, ref, h, id) dans DAG, qui est unique pour chaque nœud [18].

t: Heure à laquelle la panne s'est produite.

oid: ID du nœud sur lequel la panne s'est produite.

ref: niveau de référence du nœud.

h: hauteur du nœud.

id: id du nœud qui diffuse les messages.

DAG est formé dans la stratégie Downstreaming qui va du nœud de hauteur le plus élevé au nœud de hauteur le plus bas, ainsi les données circulent également dans la direction du DAG. Le graphique utilisé dans TORA est sans boucle car les données circulent toujours dans le chemin en Downstream et non en Upstream [18].

TORA se compose de 3 mécanismes :

1. Route Creation : initiation de route.
2. Route Maintenance : le cache de la route.
3. Route Erasure : arrivé à destination le nœud remet les champs des tuples à zéro.

- **ZRPR** (Zone-Based Routing Protocol)

ZBRP est basé sur le concept de zones c'est-à-dire que l'ensemble du réseau est divisé en zones, la zone ici est définie par Radius R qui peut être préfixé.

Ce protocole utilise une approche basée sur des tables de PRP dans la zone ; chaque nœud conserve des informations détaillées des zones de distance de saut R comme dans DSDV pour réduire le délai de configuration de l'itinéraire et l'itinéraire peut être trouvé facilement en comptant le nombre de sauts /distance

stockée dans le tableau de chaque nœud se situe dans les zones de rayon R . Ensuite, il traite RREP en envoyant le paquet RREQ pour les nœuds de distance de saut les plus élevés qui diffusent le message RREQ en multidiffusion.

Le routage à l'intérieur de la zone est appelé routage intra-zone et utilise la méthode proactive. Si les nœuds source et destination se trouvent dans la même zone, le nœud source peut démarrer la communication de données instantanément. Lorsque les paquets de données doivent être envoyés en dehors de la zone, le routage inter-zone est utilisé et la méthode réactive est appliquée à l'aide de la multidiffusion qui est aux nœuds qui ont la distance de saut la plus élevée égale à R [18].

2.3.2. Les protocoles de routage basés sur la position

Des protocoles de routage basés sur la position ont été proposés pour assumer la connaissance des informations de position géographique des UAV afin de prendre en charge un routage efficace [16]. Dans ce type de protocoles, ils supposent que l'UAV source connaît la position physique des UAV communicants et envoie un message aux UAV de destination sans découverte d'itinéraire. Généralement, chaque UAV détermine sa propre position à l'aide d'un système GPS ou de tout autre type d'installation de positionnement. Cet algorithme de routage s'inspire principalement de deux sujets : le premier une installation de position est normalement utilisée par l'expéditeur d'un paquet pour localiser la position physique du récepteur et le deuxième une approche de transfert est utilisée pour transmettre des paquets de données à l'UAV prévu.

- **GPSR** (Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR est un protocole de routage très réactif et efficace dans les réseaux mobiles et sans fil. Dans ces protocoles, chaque nœud a des informations sur l'emplacement de chaque nœud, il devient donc greedy et transmet le paquet à l'un des nœuds voisins qui a une très courte distance jusqu'à la destination. Ce transfert est donc connu sous le nom de greedy forwarding de paquets, mais il n'a aucune idée du prochain voisin du nœud auquel le paquet est livré en premier. Si aucun chemin n'existe dans le réseau d'un expéditeur à une destination, il n'y a pas de méthode selon laquelle le paquet est livré sur le même lien, il y aura une forte possibilité d'abandon de paquet si aucun chemin n'existe et aucune méthode n'est fournie pour récupérer le paquet perdu [18].

- **GPMOR** (Geographical Positional Mobility Oriented Routing)

En général les protocoles de routage basé sur la position utilisent des appareils externes tels que le GPS pour collecter les informations de localisation des nœuds, mais GPMOR utilise le concept de modèle de mobilité Gauss-Markov et la relation de mobilité des nœuds pour prédire le nœud suivant sur la route de la source à la destination afin de réduire l'impact d'inter-connectivité grâce à la mobilité dynamique. Ce protocole a servi à améliorer la stabilité des clusters et des clusters heads dans le réseau [18].

2.3.3. Les protocoles de routage hiérarchique

Dans les protocoles de routage hiérarchique, la capacité de choisir un routage proactif et réactif dépend sur le niveau hiérarchique du réseau dans lequel réside un UAV. Ce routage spécifique est principalement déterminé avec des itinéraires planifiés proactifs, puis aide la demande des nœuds déclenchés via un protocole réactif aux niveaux inférieurs. Le principal inconvénient de ce protocole est la complexité et le schéma d'adressage de la réponse à la demande de trafic et par conséquent, il draine les facteurs d'interconnexion.

- **MPC** (Mobility Prediction Clustering)

Le fonctionnement de ce protocole est basé sur la structure arborescente pour faciliter la communication et il utilise également "Link Termination Time Mobility Model" pour deviner les mises à jour dans la topologie du réseau afin qu'il puisse former des clusters plus constants.

Ces protocoles fonctionnent sans aucun périphérique externe tel que le GPS pour garder une trace de l'emplacement des nœuds. Tous les nœuds sont divisés en trois types d'états tels que l'état orphelin (OS), le membre du cluster (CM), le chef de cluster (CH). Les CH assurent la plupart des fonctions telles que l'acheminement et la diffusion d'informations/données et la communication entre les CM. Le nœud orphelin n'appartient à aucun autre état de nœuds qui n'est ni CM ni CH.

Ces protocoles utilisent principalement "Dopplers Shift" pour calculer la vitesse relative de la paire particulière de nœuds, qui transmettent ou échangent des messages HELLO. A l'aide de cette vitesse relative, le temps qu'il a passé dans un nœud CM est calculé pour un CH particulier qui est le voisin de ce CM [18].

Tous les nœuds sont initialement des nœuds orphelins, c'est-à-dire qu'ils ne sont ni un CM ni un CH, donc ces nœuds diffusent des messages HELLO portant des informations sur leurs vitesse, leurs direction, leurs état actuel et leurs identifications, puis la vitesse relative de chaque nœud est estimée ou calculée en utilisant des paquets hello et la réponse de ces messages à l'aide du "Dopplers Shift" qui sont associés aux messages HELLO.

2.3.4. Les protocoles de routage basés sur l'énergie

L'UAV en tant que nœud volant dans le réseau FANET nécessite une manipulation et une consommation d'énergie appropriées, car il n'y a qu'une dépendance à la source d'alimentation de la batterie qui est également de petite taille. Le niveau d'énergie des drones doit être pris en compte lors du routage, et ceux qui ont moins de niveau doivent d'abord s'en débarrasser pour la survie du réseau.

- **EALC** (Energy Aware Link-based Clustering)

La méthode EALC est un modèle de communication FANET mais on peut aussi la classer comme un protocole de routage. EALC essaye de minimiser les problèmes de calcul et de communication Overhead. La surcharge de calcul peut être réduite en gardant le mécanisme de clustering plus simple et la communication Overhead peut être minimisée en augmentant la durée de vie du cluster [19], le fonctionnement de cette méthode est illustré sur la Figure 14.

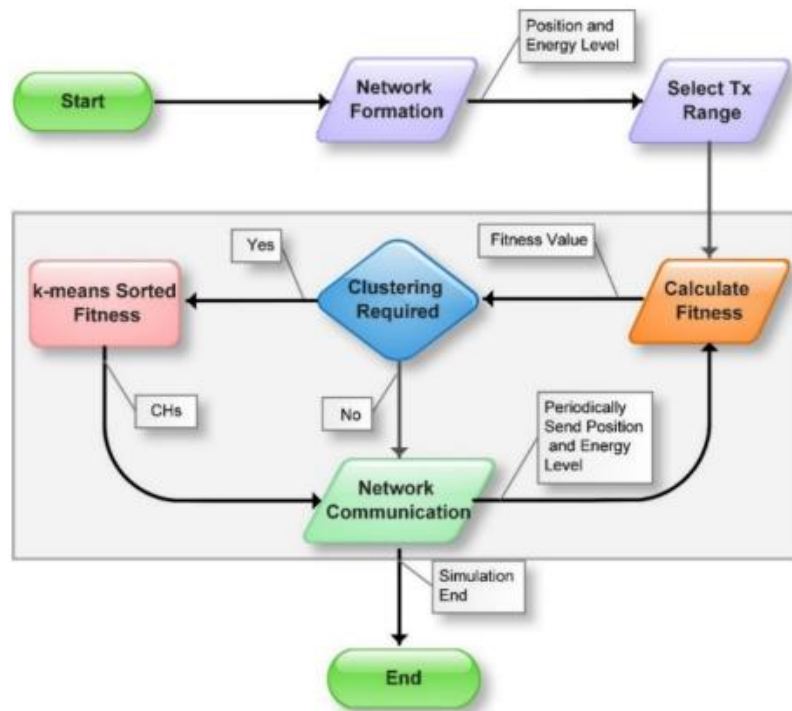


Figure 14- Exemple sur le fonctionnement d'EALC [19].

2.3.5. Les protocoles de routage basés sur swarm intelligence

Le swarm intelligence (SI) est un système auto-organisé. Il a d'abord été utilisé pour le système robotique cellulaire. Le SI peut être considéré comme un algorithme d'optimisation en théorie de l'intelligence. La mise en œuvre d'un tel système repose sur des algorithmes en essaim. Pour réaliser ce type d'algorithmes, ils sont inspirés de la nature (Bio-inspired) les comportements des oiseaux ou poissons en troupes ou d'insectes sur essaim. Celles-ci peuvent constituer la solution adaptée aux problèmes d'optimisation complexes. Ces algorithmes visent à trouver une solution quasi optimale pour la mission visée. En tant que protocole de routage basé sur des essaims qui un groupe d'UAV, dédiés aux FANET [20], on va citer :

- **BeeAdhoc**

C'est un protocole basé sur un essaim d'abeilles qui s'auto-organise. Le principal paradigme de la colonie d'abeilles réside dans l'utilisation d'une stratégie à deux niveaux.

Au premier niveau, les éclaireurs proposent de nombreux sites prometteurs, et au second niveau, les abeilles butineuses explorent les alentours des sites. Le but de la colonie d'abeilles est de trouver la source avec la quantité maximale de nectar comme illustré sur la figure 15 [21].

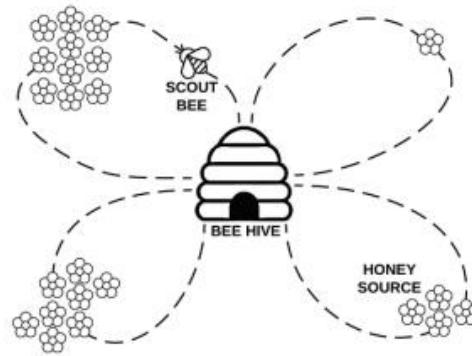


Figure 15- Le comportement de la colonie des abeilles [21].

Le développement du modèle comportemental de l'auto-organisation de la colonie d'abeilles consiste à déployer les méthodes et techniques suivantes :

1. Rechercher l'espace de la formation ; formation d'un essaim d'agents éclaireurs et d'un essaim d'agents butineurs.
2. Rechercher des sites prometteurs par des éclaireurs.
3. Choisir des sites basiques parmi les plus prometteurs pour explorer leurs quartiers.
4. Transférer les informations entre les éclaireurs et les butineuses.
5. Choisir des sites de base par les butineuses.
6. Choisir des sites dans le voisinage des sites de base par les butineuses.
7. Faire la structure générale du processus d'optimisation.

L'organigramme ci-dessous explique bien l'ordre et le fonctionnement de l'algorithme suivi pour cette méthode. Ce dernier est même modélisé sur les réseaux MANET en premier, ensuite sur les réseaux VANET et FANET où les UAV prennent le rôle des éclaireurs et butineurs pour choisir le meilleur chemin pour accomplir une tâche donnée [21].

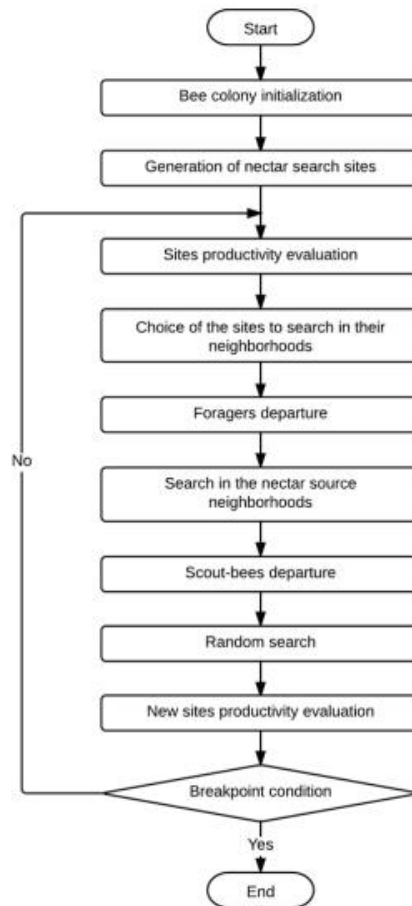


Figure 16- L'algorithme d'auto-organisation de la colonie des abeilles [21].

2.4. Conclusion

En résumé, le routage entre les UAV est une tâche assez complexe et de nombreux protocoles de routage ont été conçus qui utilisent diverses stratégies pour fournir un routage fiable et assurer la livraison des données.

Le nombre total des protocoles de routage dans FANET est suffisamment important en fonction de plusieurs raisons parmi lesquels on trouve la diversité des exigences relatives à l'échange d'informations, les caractéristiques des données transmises et des fonctionnalités du matériel et des logiciels et plusieurs d'autres raisons qu'on a détaillé dans ce chapitre.

Etant donné que chaque protocole offre des avantages et des inconvénients et que l'un différent de l'autre, on a choisi de faire une étude comparative entre deux protocoles de routage dans FANET dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Simulation et analyse des résultats

3.1. Introduction

Pour choisir le protocole de routage dans FANET en fonction du problème considéré est l'aspect principal, de plus le protocole doit être capable de fournir un fonctionnement efficace du réseau dans les conditions spécifiées.

Dans ce chapitre on va faire une étude comparative et évaluation de deux protocoles de routage dans FANET, mais il est coûteux de déployer un réseau FANET en réel pour valider et vérifier ou comparer des protocoles spécifiques c'est pour cela on va utiliser un simulateur de réseau le plus populaire NS-2 pour comparer les performances de DSDV et AODV en se basant sur des paramètres métriques pour enfin analyser les résultats qu'on va obtenir.

3.2. Le simulateur NS-2

Le simulateur réseau NS-2 a été développé par l'Université de Californie et l'Université Cornell, une plate-forme open-source pour la simulation d'événements discrets, en 1989. Il utilise les langages C++ et OTcl pour la programmation et il est purement basé sur un langage de programmation orienté objet.

3.2.1. L'architecture de NS-2

NS2 se compose de deux langages principaux : C++ et le langage orienté objet de commande (OTcl). Alors que le C++ définit le mécanisme interne des objets de simulation, l'OTcl met en place la simulation en assemblant et en configurant les objets ainsi qu'en programmant des événements discrets. Le C++ et l'OTcl sont liés entre eux à l'aide de TclCL.

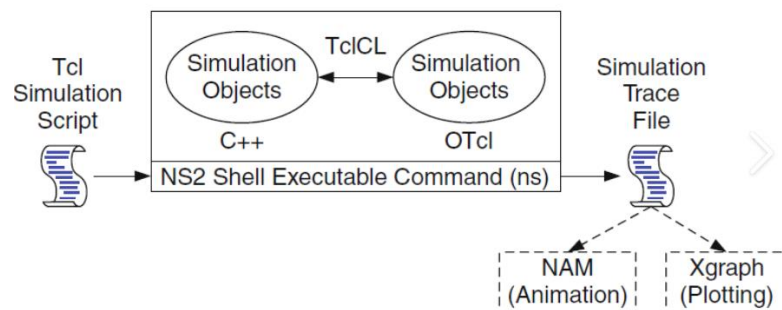


Figure 17- L'architecture basic du simulateur NS-2

3.3. Les paramètres de performance

Pour faire l'analyse des performances d'un protocole de routage il existe un grand ensemble des paramètres pour mesurer. Dans ce qui suit sont les paramètres utilisés pour faire notre comparaison et évaluation des protocoles de routage dans FANET.

3.3.1. Débit moyen (Throughput)

Le débit (Throughput), correspond au taux entre le nombre de paquets envoyés et le temps qui a été nécessaire à leurs transmissions. Afin de l'exprimer, on utilise la taille des paquets en bits. Le résultat est donc en bits/secondes.

On calcule le débit moyen pour toute la simulation à l'aide de la formule suivante [22] :

$$\text{Throughput} = \sum \frac{\text{taille}_{ps}}{(\text{temps}_{rec} - \text{temps}_{emis})}$$

Sachant que :

- $taille_ps$: le nombre de paquet reçu par la destination.
- $temps_rec$: le temps de réception de tous les paquets reçus par la destination.
- $temps_emis$: le temps d'émissions de tous les paquets envoyés par la source.

3.3.2. Packet Delivery Ratio (PDR)

Il définit le taux entre le nombre de paquets envoyés de la source à la destination et le nombre de paquets effectivement reçus à destination. L'équivalent mathématique utilisé pour le taux de livraison de paquets est :

$$PDR = (\text{Nombre total de paquets envoyés par source} / \text{nombre de paquets reçus par destination}) * 100$$

3.3.3. Délai moyen de bout en bout (Average end-to-end delay)

Le délai moyen de bout en bout (Average end-to-end delay) est le temps pris par un paquet pour acheminer son itinéraire sur le réseau, de la source à la destination. Le délai moyen de bout en bout peut être obtenu en calculant la moyenne du délai de bout en bout de tous les messages remis avec succès.

Le délai moyen de bout en bout inclut tous les retards possibles dans le réseau, c'est-à-dire le temps de latence de découverte de la route, les retards de retransmission au niveau du MAC, ainsi que les retards de propagation et de transmission.

On calcule le débit moyen pour toute la simulation à l'aide de la formule suivante :

$$D = \frac{\sum(\text{temps}_{rec} - \text{temps}_{emis})}{N}$$

Sachant que :

- N : le nombre de paquets livrés avec succès.

3.4. Environnement de simulation

Le tableau suivant montre les paramètres avec leurs valeurs qu'on a utilisés pour la simulation

Paramètres	Valeur
Simulateur réseau	NS-2
Environnement de simulation	Linux Mint
Nombre de nœuds	50,100, 150, 200
Temps de simulation	300 s
Zone de simulation	1500 m, 1500 m
Modèles de mobilité	RWP
MAC protocole	802.11b
Vitesse	15, 30, 60 m/s

Tableau 1- Les paramètres de simulations

3.5. Résultat de simulation et analyse

Dans notre cas d'étude, la performance de nos deux protocoles de routage choisis a été mesurée en fonction de :

- Changement du nombre de nœuds.
- L'influence de la vitesse des nœuds.

3.5.1. Première analyse

Dans ce cas la vitesse est fixée à 15 alors que le nombre total d'UAV varie (50, 100, 150, 200).

A. PDR (Packet Delivery Ratio)

Selon les résultats obtenus (figure 18), AODV a un meilleur taux de livraison de paquets par rapport à DSDV, la courbe d'AODV explique que la destination reçoit la majorité des paquets envoyés par la source, car AODV peut s'adapter rapidement aux changements puisque il ne maintient qu'une seule route activement utilisée. Par contre, DSDV fournit moins de paquets de données que AODV, car DSDV n'est pas aussi adaptatif aux changements rapides d'itinéraire lors de la mise à jour de ses tables. Le changement rapide de topologies des UAV impacte sur le fonctionnement de DSDV pour cela on remarque sa faible performance à travers les résultats. Mais l'augmentation dans le nombre des nœuds fait que les UAV soient en grande mobilité ce qui provoque le changement rapide de leurs topologies Influence sur les deux protocoles.

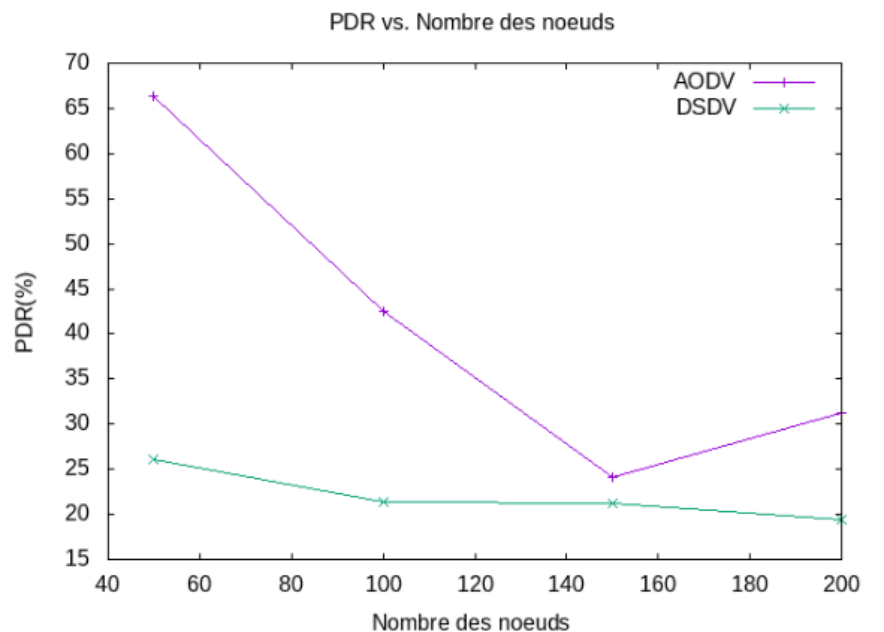


Figure 18- PDR vs nombre des nœuds.

B. Débit moyen

Cette performance (figure 19) pour les deux protocoles de routage, elle est augmentée en raison de la densité de nœuds qui cause moins de canaux libres.

Comme le débit dépend du temps et que DSDV est le protocole géré par table, donc Il lui faut plus de temps pour configurer les tables de routage avant de livrer les paquets au nœud suivant pour cela son débit devient inférieur à celui de l'AODV ; qui à son tour convient aux réseaux de taille moyenne, mais malgré l'augmentation dans le nombre de nœuds la performance de AODV est resté meilleure que celle de DSDV .

D'un autre coté la petite taille du réseau du protocole DSDV est très efficace et simple, mais lorsque le réseau devient plus grand, les performances du protocole DSDV se dégradent, mais aussi avec la taille de paquet, DSDV ne sera pas capable de gérer de gros paquets qui finiront par n'être pas correctement livré à la destination.

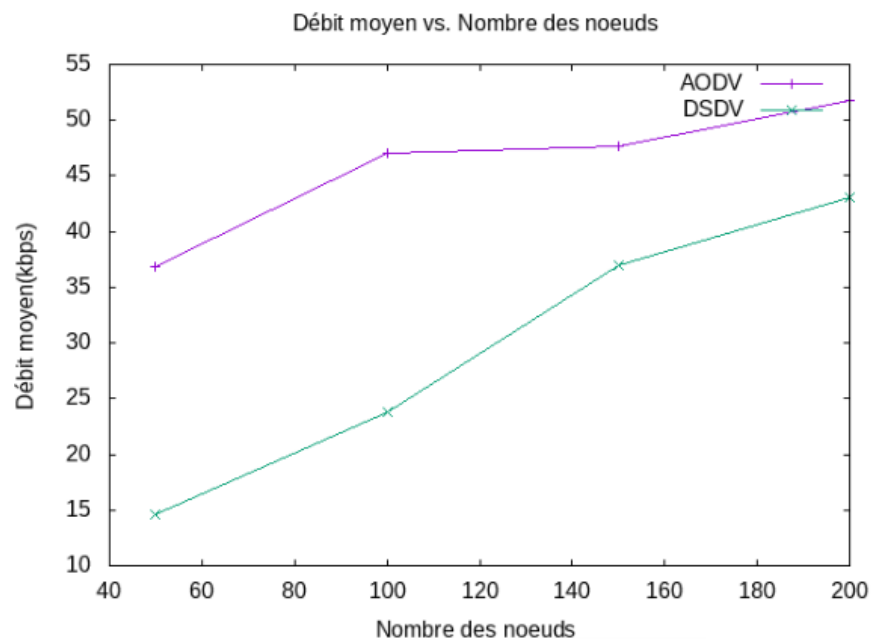


Figure 19- Throughput vs nombre des nœuds.

C. Délai moyen de bout en bout

Comme on peut le voir sur la figure 20, le délai de bout en bout est plus élevé dans DSDV, AODV ayant le délai de bout en bout le plus faible et le plus stable en mobilité.

AODV n'a qu'une seule route par destination dans la table de routage, qui est constamment mise à jour et DSDV doit continuellement mettre à jour toute la table de routage en fonction du numéro de séquence.

La performance de DSDV se dégrade en raison de l'augmentation du nombre de nœuds, la charge d'échange des tables de routage devient élevée et la fréquence d'échange augmente également en raison de la mobilité des nœuds. Le délai pour tous les cas augmente à mesure que le nombre de sauts augmente. Dans ces cas, le paquet doit parcourir une longue distance pour atteindre la destination.

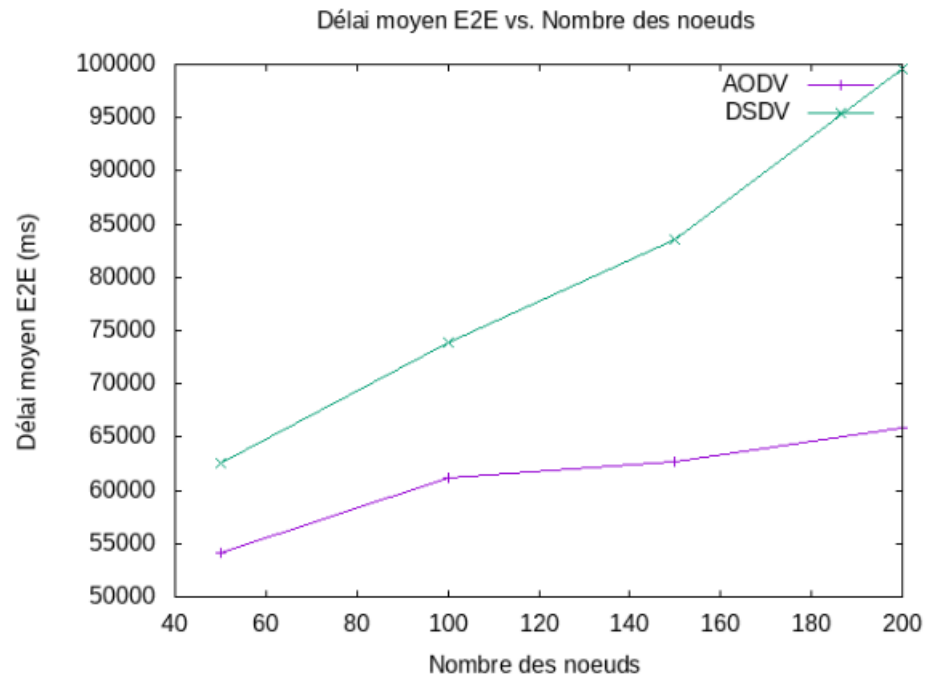


Figure 20- Delay vs nombre des nœuds.

3.5.2. Deuxième analyse

Dans ce cas le nombre total d'UAV est fixé à 50 alors que la vitesse varie (15, 30, 60, 90).

A. PDR (Packet Delivery Ratio)

La figure 21 représente la variation du PDR en fonction de la vitesse. On remarque que pour une vitesse faible de 15 le protocole DSDV présente les meilleurs résultats. Un autre point à retenir est que l'augmentation de vitesse fait perdre les performances du protocole DSDV et AODV mais d'un autre côté AODV donne une meilleure performance que DSDV pour les vitesses les plus élevées.

Il est également montré que généralement l'augmentation de la vitesse provoque la dégradation dans la perte de paquets. En contradiction avec ce qu'en a obtenu en dégradation dans la performance des deux protocoles, car la vitesse influence sur le temps de la recherche du saut prochain ce qui cause une perte de paquets.

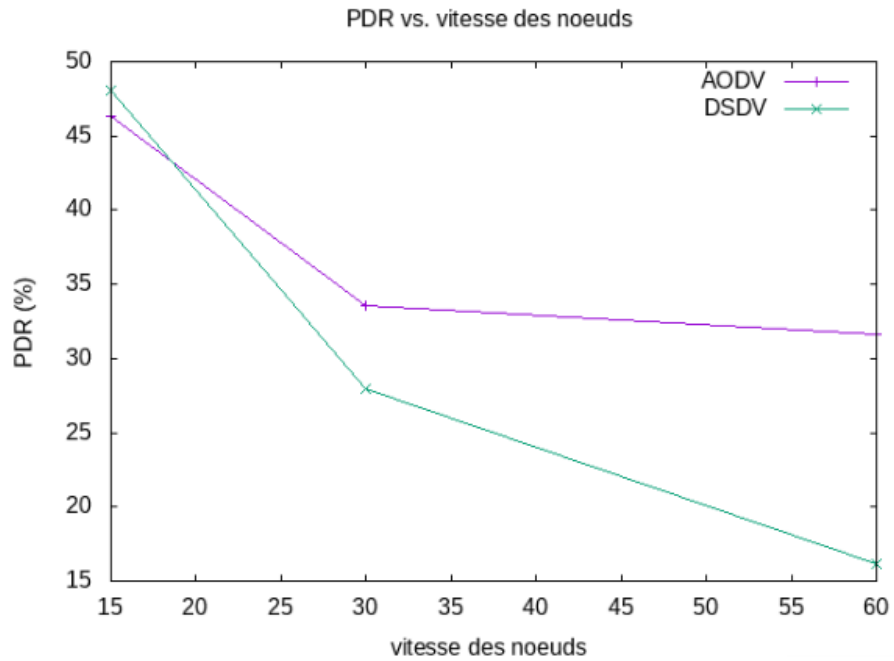


Figure 21- PDR vs vitesse des noeuds.

B. Débit moyen

La figure 22 représente la variation du débit moyen en fonction de la vitesse. Comme le débit moyen dépend du taux de paquets livré à la destination PDR qui s'est dégradé dans les résultats de la figure 21 ; ce qui explique la dégradation des résultats ci-dessous, autrement dit l'augmentation de vitesse qui a causé une perte des paquets assure que les paquets n'ont pas été livré à destination ce qui garantit la dégradation du débit de AODV et DSDV.

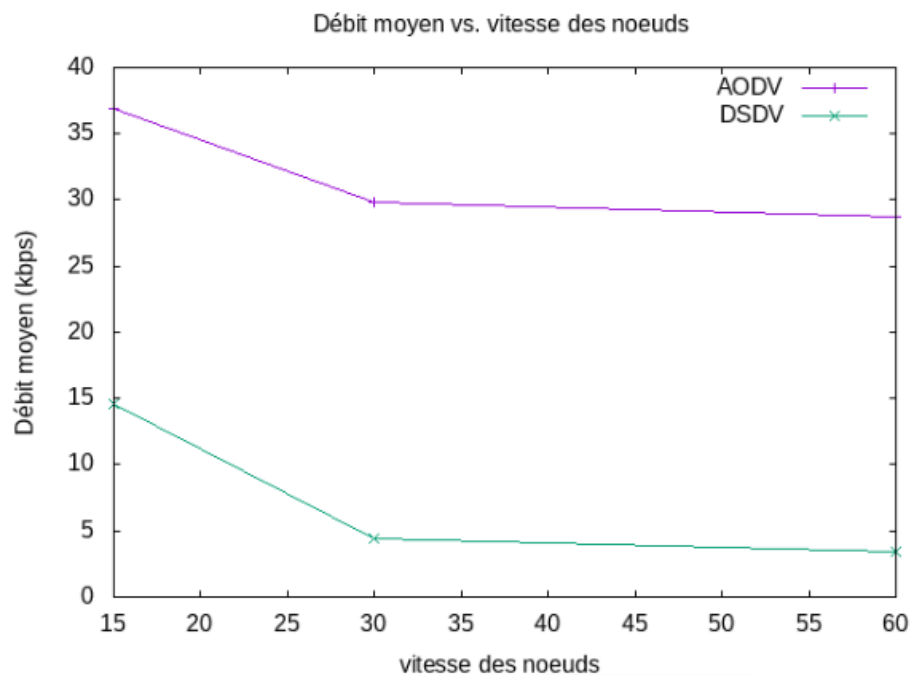


Figure 22- Throughput vs vitesse des noeuds.

C. Délai moyen de bout en bout

Selon la figure 23 qui représente la variation du délai moyen de bout en bout en fonction de la variation de la vitesse, on remarque l'augmentation dans le débit d'AODV qui était linéaire avec la variation de la vitesse, par contre DSDV était instable. On peut justifier les résultats d'AODV par sa bonne performance et son adaptation avec les réseaux de densité moyenne (ici le nombre de nœuds est 50). Mais ça n'empêche que la variation de vitesse à influencé sur les deux protocoles ; car l'augmentation de vitesse fait que les nœuds font toujours une mise à jour à leurs tables en recherche de nouveaux chemins vers d'autres nœuds voisins qui influence à son tour sur le temps de transmission.

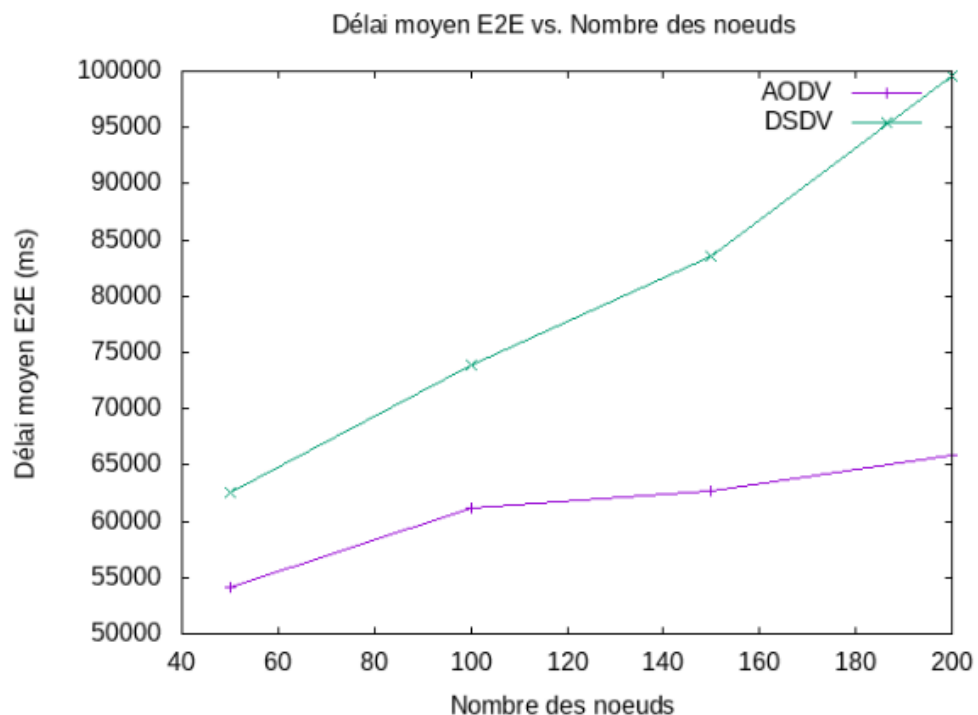


Figure 23- Delay vs vitesse des nœuds.

3.6. Conclusion

Les résultats de la simulation révèlent que le protocole de routage DSDV est moins performant en raison de la diffusion fréquente des mises à jour de routage. Alors que l'AODV est meilleur que le DSDV car il ne maintient aucune table de routage au niveau des UAVs, ce qui entraîne moins de délai et une bonne livraison de paquets par rapport à DSDV. D'après les comparaisons ci-dessus, on peut supposer que le protocole de routage DSDV fonctionne mieux pour les petits réseaux, mais pas pour les grands réseaux et les réseaux hautement dynamiques.

Notre conclusion est que le protocole de routage AODV est le mieux adapté aux réseaux ad hoc de drones FANET ; AODV fonctionne mieux dans des simulations à haute mobilité que DSDV. Une mobilité élevée entraîne des défaillances de liaison fréquentes et des pertes de paquets qu'on a remarqué depuis les résultats du PDR, ainsi que la mise à jour de tous les nœuds avec les nouvelles informations de routage, comme dans DSDV, est bien

supérieure à celle impliquée par AODV où les itinéraires sont créés au fur et à mesure des besoin.

Conclusion générale

Le réseau FANET a suscité énormément d'attention ces dernières années, en réalisant de diverses applications dans plusieurs domaines grâce auxquelles leur intégration avec les technologies émergentes est devenue évidente avec une grande importance dans leur utilisation surtout en ce qui concerne l'échange d'informations.

Ce réseau se distingue par une mobilité élevée, des changements de topologies fréquents en fonction du mouvement des nœuds (UAV) dans l'espace 3D, ce qui constitue des problèmes de mise en réseau qui à son tour va affecter négativement sur la communication et le routage de données entre ses nœuds qui est un élément clé dans FANET.

Le routage des données entre les drones volants autonomes est une tâche assez complexe pour laquelle de nombreux protocoles de routage ont été conçus qui utilisent une variété de stratégies de recherche de chemin et de mécanismes de récupération de chemin pour fournir des routes fiables pour la livraison de données. Autrement dit ; le choix d'une architecture de communication appropriée à travers des protocoles de routage fiables est obligatoire pour garantir une communication robuste entre les UAV.

Les réseaux ad-hoc on introduits plusieurs protocoles de routages chacun ses points forts et ses points faibles, certains d'eux sont adapté juste à des réseaux spécifique. Pour cela le travail présenté dans ce mémoire porte sur la simulation de deux protocoles de routage qu'on a choisi qui sont AODV et DSDV, en utilisant le simulateur de réseaux NS-2. Les performances de ces protocoles sont évaluées par rapport à leurs taux de paquets reçus, débits moyen et délai moyen de bout en bout. L'objectif visé par notre simulation est de déterminer l'efficacité de chacun des protocoles sur FANET en analysant les résultats obtenus selon l'influence de changement dans les paramètres réseaux sur la performance des deux protocoles. Notre étude comparative s'est basée sur deux scénarios ; dont le premier était la variation dans le nombre des nœuds et le deuxième l'augmentation dans leurs vitesses.

Notre étude nous a mené à conclure que pour les réseaux de grande densité et hautement dynamique DSDV est moins performants contrairement à AODV qui a montré une meilleure performance et de bons résultats par rapport à ceux obtenus avec DSDV. Donc, le protocole de routage le mieux adapté entre AODV et DSDV aux réseaux ad hoc de drones FANET est bien AODV.

Il y a eu des défis rencontrés par ces protocoles de routage tout en prenant soin du dynamisme du réseau qui a causé des dégradations de performances qui ont été observées dans leurs opérations.

Pour des améliorations futures et des perspectives les chercheurs de ce domaine ce sont consacré pour améliorer les stratégies de certains protocoles de routages afin qu'ils soient mieux performant en surmontant les dégradations de leurs performances et que les

opérations de routage puissent être optimisées et mieux adaptés en synchronisation avec la nature dynamique du réseau. D'une autre part, on cite d'autres domaines de recherches stimulantes à l'avenir parmi lesquels on trouve :

- Routage des communications multimédias : Les UAV peuvent aider les gens à accomplir des tâches dans l'air en utilisant des dispositifs radiocommandés et leurs propres équipements de contrôle programmés. [24]

- Planification de trajectoire : Dans le processus d'application des drones dans la ville intelligente, l'optimisation de la trajectoire est très importante afin de garantir que les drones voleront selon l'itinéraire prédéfini en analysant l'état de routes. [24]

- Sécurité : En prenant l'exemple d'un groupe d'UAV est déployé dans la zone militaire pour détecter la situation de guerre, l'UAV peut être attaqué par l'ennemi et ne pas exécuter ses tâches. Les données secrètes que nous transmettons par les drones seront également volées par l'ennemi. Par conséquent, la sécurité est un problème important qui ne peut être ignoré. Donc il est mieux d'améliorer la transmission de données à d'autres drones au moment où le drone visé détecte qu'il est en risque.

Bibliographie

- [1] A. Malhotra, S. Kaur. "A comprehensive review on recent advancements in routing protocols for flying ad hoc networks", Atul Malhotra, Department of Computer Science and Engineering, Thapar Institute of Engineering and Technology, Patiala-147 004, 2019, India.
- [2] T. Melodia, H. Kulhandjian, L. Kuo, and E. Demirors. "Mobile ad hoc networking : cutting edge directions. Advances in Underwater Acoustic Networking", 2013.
- [3] K. Kamini, R. Kumar. "Vanet parameters and applications : review. Global Journal of Computer Science and Technol", 10(7), 2010.
- [4] J. Kong, J. hong Cui, D. Wu, and M. Gerla. "Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications", In Proceedings of the IEEE MILCOM, Atlantic City, NJ, USA, Oct. 2005.
- [5] Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, "Flying ad-hoc networks (FANET): A survey," Ad Hoc Networks, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270, 2013.
- [6] O. K. Sahingoz, "Networking models in flying ad-hoc networks (FANET): Concepts and challenges," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 74, no. 1-2, pp. 513-527, 2014.
- [7] I. Bekmezci, I. Sen, E. Erkalkan, "Flying Ad Hoc Networks (FANET) Test Bed Implementation", Computer Engineering Department Turkish Air Force Academy Istanbul, Turkey, 2015.
- [8] K. Kumari, B. Sah, and S. Maakar, "A survey: different mobility model for FANET," International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, vol. 5, no. 6, 2015.
- [9] A. Chriki, H. Touati, H. Snoussi, F. Kamoun, "FANET : Communication, mobility models and security issues", Computer Networks, 2019.
- [10] T. Camp, J. Boleng, V. Davies, A survey of mobility models for Ad-Hoc network research, Wirel. Commun. Mob. Comput. 2 (5) (2002) 483–502.
- [11] W. Zafar and B. M. Khan, "A reliable, delay bounded and less complex communication protocol for multicluster FANET", Digital Communications and Networks, vol. 3, no. 1, pp. 30-38, 2017.
- [12] M. M. Mowla, M. A. Rahman, and I. Ahmad, "Assessment of Mobility Models in Unmanned Aerial Vehicle Networks", International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp. 1-4 : IEEE.
- [13] Munawar, H.S. Inam, H. Ullah, F. Qayyum, S. Kouzani, A.Z. Mahmud, "M.A.P. Towards Smart Healthcare: UAV-Based Optimized Path Planning for Delivering COVID-19 Self-Testing Kits Using Cutting Edge Technologies", Sustainability 2021.
- [14] K. Singh, AK. Verma, "Flying adhoc networks concept and challenges". In : Khosrow-Pour M DBA, editor, Advanced Methodologies and Technologies in Network Architecture, Mobile Computing, and Data Analytics.

-
- [15] P. L. Yang, C. Tian, and Y. Yu, "Analysis on optimizing model for proactive ad hoc routing protocol", in Proc. Military Commun. Conf. (MILCOM), vol. 5, Atlantic City, NJ, USA, pp. 2960-2966, Oct. 2005.
- [16] S. Habib, S. Saleem, Saqib, K. M, "Review on MANET routing protocols and challenges", IEEE Student Conference on Research and Development SCORED, pp. 529-533, 2013.
- [17] M.A Khan, "Flying Ad-Hoc Networks (FANET) : A Review of Communication architectures, and Routing protocols", 2017.
- [18] P. Kaushik, "FANET routing protocols: Review", Student, YMCA University of Science and Technology, Faridabad, Haryana, International Journal of Advance Research and Development, (Volume3, Issue5), 2018.
- [19] F. Aadil, A. Raza, M. Fahad Khan, M. Maqsood, I. Mehmood, S. Rho "Energy Aware Cluster-Based Routing in Flying Ad-Hoc Networks", sensors, 2018.
- [20] O.S Oubbati, A. Lakas, F.Zhou, M. Günes, M.B Yagoubi, "A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANET)", Vehicular Communications, 10, p 29–56, 2017.
- [21] AV. Leonov, "Modeling of Bio-Inspired Algorithms AntHocNet and BeeAdHoc for Flying Ad Hoc Networks (FANET)", Student Member, IEEE Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 2016.
- [22] M.Mabiala, A. Busson, V.Vèque. " Analyse du trafic et du routage dans un réseau ad hoc de véhicules". In Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles-CFIP 2006, pages 12_p. Hermès, 2006.
- [23] I.U KHAN, I. M QURESHI, M.A AZIZ, T.A CHEEMA, S.B.H SHAH, " Smart IoT Control-Based Nature Inspired Energy Efficient Routing Protocol for Flying Ad Hoc Network (FANET)", " IEEE Isra University at Islamabad Campus, Islamabad 44000, Pakistan, 2020.
- [24] Q. Sang, H. Wu, L. Xing, P. Xie, " Review and Comparison of Emerging Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks", Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China, 202

Glossaire

AUV	Autonomous underwater vehicle
CH	Cluster Head
CM	Cluster Member
DAG	Directed Acyclic Graph
FANET	Flying Ad hoc Network
GCS	Ground Control Station
GPS	Global Position System
GSM	Global System for Mobile communications
LOS	Line-Of-Sight
LTE	Long-Term-Evolution
MANET	Mobile Ad hoc Network
MPR	Multi-Point Relay
NLOS	None-Line-Of-Sight
OS	Orphelin State
ROV	Remotely Operated Vehicles
TC	Topology Control
UANET	Underwater Ad hoc Network
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VANET	Vehicular Ad hoc Network
WSN	Wireless Sensors Network