



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des nouvelles technologies de l'information et de la communication
Département d'informatique et technologie de l'information

Mémoire de Master en Informatique

Option : Administration et sécurité des réseaux

Thème

Routage dans les réseaux FANET, Etude comparative

Présenté par

Raounak BABELHADJ, Rayane SEDRATI

Devant le jury composé de :

Président	DJEDIAI Hmida	M.A.A	Université de Ouargla
Rapporteur	KAHLESSENANE Fares	M.A.A	Université de Ouargla
Examineur	KHELILI Farida	M.A.A	Université de Ouargla

Promotion 2021/2022

Remerciements

*Grâce à **ALLAH** vers lequel vont toutes les louanges, ce travail s'est accompli.*

*En particulier, nous exprimons notre gratitude à notre encadreur : **KAHIESSNANE Faress**, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail. Un grand merci à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements à notre respecté professeur **CHERADID Abdellatif** pour son aide précieuse. Il a toujours été là dans les moments les plus difficiles, Merci.*

*Nous remercions également nos amis **Halimi Ibtihal** et **ATlil Sara** et **BOULIFA Ala** pour leur aide dans la réalisation de ce travail.*

Nous tenons à remercier notre famille de nous avoir soutenus pendant que nous écrivons cette lettre et tout au long de nos études.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Avec joie je veux dédier ce modeste travail

*A mes chers parents **EL HADJ ET BOUBLAL ZOHRA**, mon cher frère ET mes sœurs pour leurs soutiens durant toutes ces années d'étude*

*A toute la famille **BABELHADJ ET BOUBLAL***

*Je suis profondément reconnaissant à mon amie et sœur **MARWA SAIFI** de m'avoir accueilli Une aide précieuse apportée. Il était toujours présent dans les moments les plus difficiles, Merci*

*Aussi je dédie ce travaille à ma binôme **RAYANE***

A tout mes Amis d'enfance ET mes collègues d'université

Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près pendant les moments difficiles

Dans ma vie ou Durant mes études

RAOUNAK

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu qui m'a permis de terminer ce travail, et mon succès n'est que par Dieu

Je dédie ce travail :

*A mon cher père **HASSEN** et à ma chère mère **AISHA**, qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours universitaire jusqu'à ce jour.*

*Je remercie feu mon père **BELKHEIR** qui a travaillé si dur pour moi et que j'aimerais qu'il soit avec moi aujourd'hui*

*Ma chère mère **MEFTAH Merzaka** qui m'a toujours soutenu*

A mes sœurs: Nourhane, Aziza, Safa, Nadia, Lila, Nesrin, Fatima, Fouziya, Oum alkhir, Hadja, Fadila, Mouloda

A mes frères: Moustafa, Ali, Fateh, M Alhadi

A mon oncle: M Saleh

A mes tantes: Aicha, Khira

Mes princesses: Mirale, Ritadj, Baylassene, Lojayne

Mes chéri: Oum Alkhire, Djamila et Hassina

A mes amies: Wala, Raounak , Marwa, Rihab

Je remercie Ibtihal HALIMI et le prof Abdellatif CHERADID qui nous a beaucoup aidés à mener à bien ce travail

*A Mon fiancé **Islam** qui se tenait à côté de moi*

A Toute ma famille, mes amis et tous ceux qui m'ont soutenu

RAYANE

Résumé

Ces dernières années, le développement de la technologie dans la microélectronique, les communications et les systèmes de petits capteurs nous a présenté un nouveau type de réseau sans fil basé sur cette technologie appelé MANET, composé des nœuds mobiles interconnectés par des liens sans fil, sans l'utilisation d'une infrastructure. Un réseau FANET peut être vu comme un réseau MANET dans lequel les nœuds sont des UAV. Ils sont utilisés dans des situations difficiles telles que les inondations, les zones de guerre et les opérations de sauvetage où les MANET conventionnels ne peuvent pas être déployés car ils utilisent des nœuds mobiles au sol. Ce niveau de coordination nécessite des protocoles de routage précis qui peuvent être programmés dans les drones. Dans ce mémoire, nous étudions différents protocoles de routage dans le réseau FANET. Pour enrichir notre travail, nous comparons deux protocoles de deux familles différentes, DSDV(proactif) et AODV(réactif), sur la base de deux indices de performance telles que le taux de livraison des paquets (PDR) et la consommation d'énergie en utilisant un modèle de mobilité RandomWayPoint. La simulation a été faite en utilisant le simulateur OMNET++. Les résultats montrent que les performances du protocole AODV sont meilleures par rapport au protocole DSDV.

Mots clés: MANET, FANET, UAV, Protocol de Routage: DSDV, AODV, OMNET++.

Abstract

In recent years, the development of technology in microelectronics, communications and small sensor systems has presented us with a new type of wireless network based on this technology called MANET, composed of mobile nodes interconnected by wireless links, without the use of an infrastructure. A FANET network can be seen as a MANET network in which the nodes are UAV. They are used in difficult situations such as floods, war zones and rescue operations where conventional MANET cannot be deployed because they use mobile nodes on the ground. This level of coordination requires precise routing protocols that can be programmed into the drones. In this thesis, we study different routing protocols in the FANET network. To enrich our work, we compare two protocols from two different families, DSDV (proactive) and AODV (reactive), on the basis of two performance indices such as the packet delivery rate (PDR) and the energy consumption in using a RandomWayPoint mobility model. The simulation was done using the OMNET++ simulator. The results show that the performance of the AODV protocol is better compared to the DSDV protocol.

Key words: MANET, FANET, UAV, Routing Protocol: DSDV, AODV, OMNET++.

Table des matières

Tables des matières	V
Liste des tableaux	IX
Liste des figures	X
Liste des abréviations	XII
Introduction générale	1
Chapitre 1: Généralités sur les réseaux sans fils et ad-hoc	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Les réseaux sans fils.....	3
1.2.1 Définition.....	3
1.2.2 Les Catégories des réseaux sans fils.....	3
1.2.3 Les environnements mobiles.....	4
1.2.3.1 Les réseaux avec infrastructure (cellulaire).....	5
1.2.3.2 Les réseaux sans infrastructure (Ad Hoc).....	5
1.3 Technologies de communication sans fil.....	6
1.3.1 Technologies de communication à courte portée.....	6
1.3.2 Technologies de communication longue portée.....	7
1.4 Types des réseaux ad hoc.....	7
1.4.1 MANET (Mobile ad hoc network).....	7
1.4.2 VANET (vehicular ad hoc network).....	9
1.4.3 FANET (flying ad hoc network).....	10
1.5 Comparaison des classes de réseaux ad-hoc.....	11
1.6 Modes de communication.....	11
1.6.1 Communication sans fils air-air.....	12
1.6.2 Communication sans fil air-sol.....	12
1.7 Conclusion	12

Chapitre 2: Les FANET ou Réseaux ad hoc de Drones.....	14
2.1 Introduction.....	14
2.2 Unmanned Aerial Vehicles (UAV).....	15
2.2.1 Définition.....	15
2.2.2 Technologie de communication.....	15
2.3 Unmanned Aerial System (UAS).....	15
2.3.1 Définition.....	15
2.3.2 Composants.....	16
2.4 Définition de FANET.....	17
2.5 Évolution des drones.....	17
2.6 Architecture de FANET.....	19
2.7 Caractéristiques de FANET.....	21
2.8 Domaine d'application.....	22
2.8.1 Applications militaires (marine, armée et force aérienne).....	22
2.8.2 Applications civil	22
2.9 Différents modèles de mobilité de FANET.....	23
2.9.1 Random way point.....	23
2.9.2 Modelé de mobilité de Gauss Markov.....	24
2.9.3 Reference point group mobility (RPGM).....	25
2.9.4 Manhattan Grid.....	25
2.10 Protocoles de communication.....	26
2.10.1 Au niveau de la couche MAC.....	26
2.10.2 Au niveau de la couche réseau.....	27
2.11 Conclusion	27
Chapitre 3: Protocoles de routages dans les FANET.....	30
3.1 Introduction.....	30

3.2	Définition de routage.....	30
3.3	Problème de routage dans les réseaux ad hoc.....	31
3.4	Routage Basé sur la topologie	31
3.4.1	Les protocoles de routage statique.....	31
3.4.2	Protocoles de routage proactifs.....	32
3.4.3	Protocole de routage réactif (RRP).....	32
3.4.4	Protocole de routage hybride.....	33
3.5	Protocole hiérarchique.....	33
3.6	Routage basé sur la position (Protocole géographique).....	33
3.6.1	Routage géographique prédictif.....	34
3.7	Protocoles de routage basés sur l'intelligence des essaims (Swarm Intelligence SI).....	34
3.8	Protocoles hétérogènes.....	35
3.9	Description des protocoles d'étude AODV et DSDV.....	35
3.9.1	Protocol AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector).....	35
3.9.1.1	Définition.....	35
3.9.1.2	Le type des messages.....	36
3.9.2	Protocol DSDV (Dynamic destination Sequenced Distance Vector)..	37
3.9.2.1	Définition	37
3.9.2.2	Fonctionnement du protocole.....	38
3.10	Conclusion.....	38
 Chapitre 4: Présentation et simulation des protocoles de routage.....		40
4.1	Introduction.....	40
4.2	La simulation.....	40
4.3	Types de simulation.....	40
4.3.1	Systèmes de simulation discrète.....	41
4.3.2	Systèmes de simulation continue.....	41

4.4	Les simulateurs réseaux.....	41
4.5	Le simulateur OMNET++.....	42
4.6	Les principaux fichiers d'OMNET++.....	43
4.6.1	Fichier (.NED).....	43
4.6.2	Fichier (.ini).....	44
4.7	INET Framework.....	45
4.8	Métriques de la simulation.....	45
4.9	Étudier et comparer les performances des deux protocoles.....	45
4.9.1	Consommation d'énergie (Energie Balance).....	46
4.9.2	Packet Delivery Ratio (PDR).....	47
4.10	Conclusion.....	48
	Conclusion générale et perspectives	50
	Bibliographie	52
	Webographie	56

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison des MANET, VANET et FANET.....	11
Tableau 4.1 : Comparaison des caractéristiques importantes des simulateurs de réseau.....	41
Tableau 4.2 : Simulation paramètres.....	46

Liste des figures

Figure 1.1: Les catégories du réseau sans fil.....	4
Figure 1.2: Classement des réseaux sans fils selon la portée.....	4
Figure 1.3: Les catégories des réseaux mobiles.....	4
Figure 1.4: Réseaux cellulaires.....	5
Figure 1.5: Le modèle de réseaux mobile sans infrastructure.....	6
Figure 1.6: Distances extérieures/intérieures pour certaines des technologies sans fil à courte portée.....	7
Figure 1.7: Topologie d'un réseau MANET.....	8
Figure 1.8: Modèle en couches des MANET.....	9
Figure 1.9: Modes de communication dans Manet.....	10
Figure 1.10: Modes de communication dans les systèmes multi-UAV.....	10
Figure 1.11: Communication sans fils entre les nœuds FANET.....	12
Figure 2.1: Composants principaux d'un système d'UAV.....	17
Figure 2.2: Unmanned US Navy Grumman F6F.....	18
Figure 2.3: General Atomics MQ-1 Predator 1994.....	18
Figure 2.4: DJI Phantom 4 Pro V2.0.....	18
Figure 2.5: Juan JJRC H8 Mini Drone Eachine H8 Mini Drone RTF RC Quadcopter 2,4Ghz Tirée du site tokopedia.com (2020).....	18
Figure 2.6: (a) unmanned aerial vehicle (UAV) ad-hoc network ; (b) multi- group UAV ad-hoc network ; (c) multi-layer UAV ad-hoc network.....	20
Figure 2.7: An impression of a complete FANET architecture.....	20
Figure 2.8: L'utilisation des drones.....	23
Figure 2.9: Random way point mobility model.....	24
Figure 2.10 : Modelé de mobilité de Gauss Markov.....	25
Figure 2.11: RPGM.....	25
Figure 2.12 : Manhattan Grid.	26
Figure 2.13: Architecture multicouche proposée.....	27

Figure 3.1: Taxonomie des protocoles de routage FANET.....	31
Figure 3.2: Procédure de découverte de route dans AODV.....	36
Figure 3.3: RREQ (RouteRequest Message).....	36
Figure 3.4: RREP (Route Reply Message).....	37
Figure 3.5: RERR(RouteErrorMessage).....	37
Figure 3.6: Opération AODV.....	37
Figure 3.7: Procédure de découverte de route dans DSDV.....	38
Figure 4.1: le lancement du simulateur OMNET++.....	42
Figure 4.2: Simple et composant Connexion du module OMNET ++.....	43
Figure 4.3: Fichier NED en mode Graphique.....	43
Figure 4.4: Fichier NED en mode source.....	44
Figure 4.5: Exemple d'un Fichier *.ini	44
Figure4.6: Consommation d'énergie .VS. Temps de simulation.....	47
Figure4.7: Consommation d'énergie .VS. Nombres de nœuds.....	47
Figure4.8: Packet Delivery Ratio .VS. Temps de simulation.....	48
Figure4.9: Delivery Ratio .VS. Nombres de nœuds.....	48

Liste des abréviations

AODV	Ad Hoc On-Demand Distance Vector
CBLADSR	Cluster-Based Location-Aided Dynamic Source Routing
CBR	Cluster-Based Routing
BGP	Border Gateway Protocol
DCR	Data Centric Routing
DCR	Data Centric Routing
DSDV	Dynamic destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
EPLA	Energy-Efficient Packet Load Algorithm
ETX	Expected Transmission Count
FANET	Flying Ad Hoc Networks
GCS	Ground Control System
GM	Gauss Markov
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GS	Ground Station
GSM	Global System for Mobile Communication
IBSS	Independent Basic Service Set
IP	Internet protocol
IPV4	Internet Protocol version 4
IPV6	Internet Protocol version 6
LCADR	Load Carry and Deliver Routing
LDP	Label Distribution Protocol
LTE	Long-Term Evolution
MANET	Mobile Ad-hoc Networks
MLH	Multilevel Hierarchical

OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PPP	Partenariat Public-Privé
RGR	Reactive-Greedy-Reactive protocol
RREP	Route Reply Message
RREQ	Route Request Message
RRER	Route Error Message
TCP	Transmission Control Protocol
TORA	Temporairement Ordered Routing Algorithm
UA	Unmanned Aerial
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
U2U	UAV-UAV
U2I	UAV-Infrastructure
UDP	User Datagram Protocol
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WWAN	Wireless Wide Area Networks
WSN	Wireless Sensor Network
ZRP	Zone Routing Protocol

Introduction générale

Ces dernières années, le besoin de connectivité sans fil est devenu fondamental. Ce besoin pose plus de défis à la technologie moderne, la rendant plus innovante et créative. Ainsi de nouvelles technologies telles que les réseaux sans fil et les réseaux ad hoc ont vu le jour.

Les réseaux ad-hoc sont des réseaux sans fil capables de s'organiser sans infrastructure. Dans un contexte de mobilité. Un réseau ad hoc mobile MANET (Mobile Adhoc Network) est un système autonome de nœuds mobiles, reliés par des liens sans fils, dont l'union forme un graphe arbitraire. Les nœuds du réseau jouent le rôle de routeurs ils sont libres de se déplacer aléatoirement et de s'organiser arbitrairement. En conséquence, la topologie du réseau peut changer rapidement et de manière imprévisible. Ce réseau a attiré l'attention des constructeurs et des chercheurs, ce qui a conduit à la naissance des réseaux de communication ad-hoc aériens FANETs (Flying Adhoc Networks).

Les FANET sont des MANET dans lesquels les nœuds sont des véhicules aériens sans pilote UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Dans ce réseau, il existe deux voies de communication : UAV-To-UAV et UAV-To-Infrastructure. Cependant, les nœuds sont très mobiles et peuvent se déplacer à grande vitesse. Pour obtenir des informations d'un nœud à un autre sur un réseau, un routage des informations rapide et efficace est nécessaire. Le drone est généralement équipé de capteurs et de caméras pour déterminer sa position. Les drones promettent de nouvelles applications militaires et civiles telles que : opérations de recherche et de premiers secours après une catastrophe naturelle, découverte et suivi de cibles militairesetc.

Les protocoles de routage de FANET tiennent compte de la nature des

applications et des services qui déploient et prennent les drones pour différents modes de navigation. Cependant, la conception de protocoles de routage pour FANET n'est pas une tâche facile compte tenu de la structure dynamique de FANET et des contraintes de vol auxquelles il est soumis. Ainsi, le problème le plus important pour la conception de plusieurs systèmes UAV est la sélection du protocole de routage correspondant.

Le principal problème dans les réseaux Ad-hoc est le contrôle de puissance, avec lequel nous étudions une comparaison entre les protocoles de routage AODV et DSD en termes de consommation d'énergie et de taux de livraison de paquets.

Organisation du mémoire

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

Chapitre 1: nous allons présenter des informations générales sur les réseaux sans fils et des concepts sur réseaux Ad Hoc et MANET.

Chapitre 2: nous allons présenter de manière générale les FANET, leurs caractéristique sainsi que leurs applications.

Chapitre 3: nous allons présenter la notion de routage avec la classification des protocoles de routage dans les réseaux Ad-hoc FANET.

Chapitre 4: nous allons faire une comparaison entre deux protocoles des différentes familles, le protocole DSDV qui est un protocole proactif et l'autre est le protocole AODV qui est, à son tour, appartient à la famille des protocoles réactifs, utilisant le modèle de mobilité pour évaluer les performances des deux protocoles.

1

Généralités sur les réseaux sans fils et ad-hoc

1.1 Introduction

Ces dernières années, le développement de la technologie de transmission sans fil a offert des nouvelles perspectives dans le domaine de la télécommunication. Nous décrivons dans ce chapitre les différences entre les réseaux ad-hoc terrestres, aériens. Les réseaux mobiles Ad Hoc constituent un nouveau type de réseaux basés sur cette technologie.

Dans ce chapitre, on commence par définir les réseaux sans fils et sont catégories, par la suite nous présentons les environnements mobiles et citer les deux classes qui le constituent, et Après les réseaux MANET (Mobile Ad-hoc Network), Mobilité et le routage dans ce type de réseaux. En fin nous présentons les différents types des réseaux Ad Hoc Une comparaison détaillée de ces réseaux sera ensuite établie.

1.2 Les réseaux sans fils

1.2.1 Définition

Un réseau sans fil (en anglais Wireless network) est comme son nom l'indique, un réseau dans lequel au moins deux terminaux (ordinateur portable, téléphone portable, etc.) peuvent communiquer sans liaison filaire. La transmission des données se fait via les ondes hertziennes (radio ou infrarouge), il permet de relier très facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres [Web 1].

1.2.2 Les Catégories des réseaux sans fils

Plusieurs technologies de réseaux sans fil existent qui se distinguent par la fréquence d'émission utilisée, le débit, la portée des transmissions et même le mode de fonctionnement. Plusieurs classifications peuvent être définies suivant ces caractéristiques. Dans le cadre de ce mémoire, nous étudions deux de ces classifications à savoir, la classification selon la portée de site et selon

l'infrastructure utilisée.

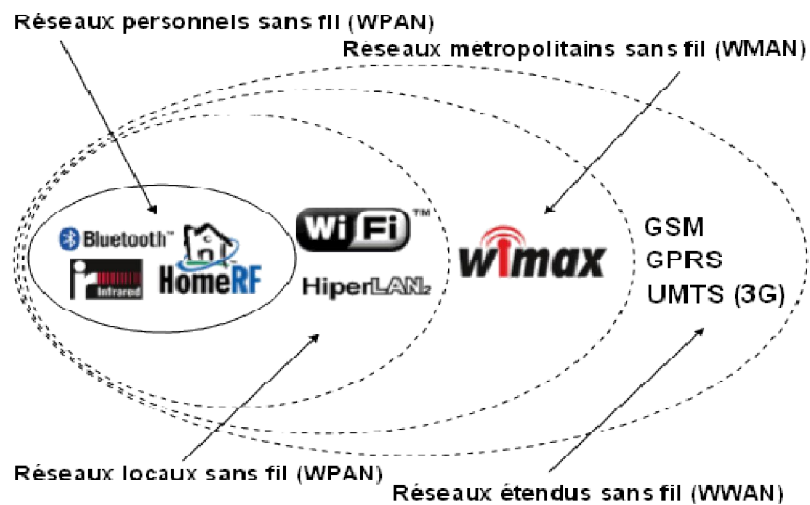


FIG. 1.1 - Les catégories du réseau sans fil [Web 1].

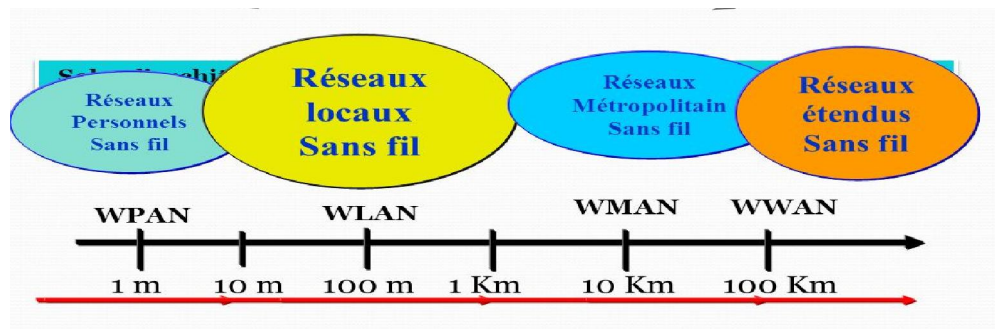


FIG. 1.2 - Classement des réseaux sans fils selon la portée [Web 1].

1.2.3 Les environnements mobiles

Un environnement mobile est un système composé de sites mobiles qui permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Il peut être classé en deux catégories, les réseaux avec infrastructures et les réseaux sans infrastructures.

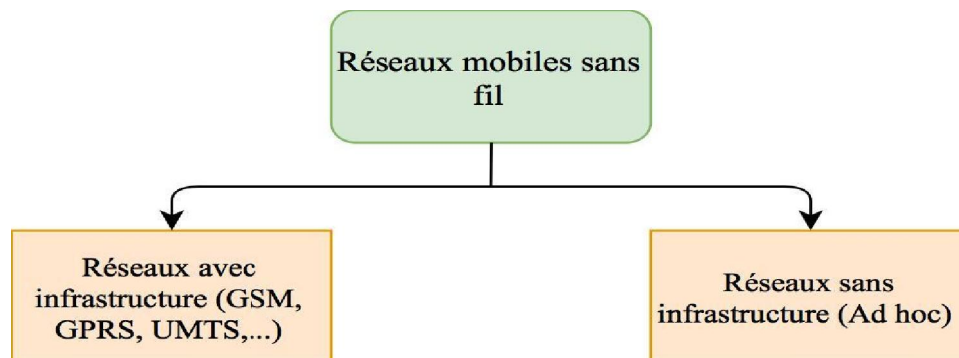


FIG. 1.3 - Les catégories des réseaux mobiles [1].

1.2.3.1 Les réseaux avec infrastructure (cellulaire)

- Le mode infrastructure dispose de certains sites fixes, appelés stations support mobile (Mobile Support Station) ou stations de base (SB).
- Les SB dotées d'une interface de communication sans fil permettant la communication directe avec les unités mobiles (UM) localisées dans une zone géographique autour de la station de base.
- Les sites fixes (SB) sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication statique fiable possédant un débit élevé.
- Chaque station mobile se connecte et communique avec les autres stations mobiles du réseau à travers une seule station de base qui est la plus proche dans sa portée de communication.
- Si la station mobile quitte la portée de cette station, elle doit trouver une autre station de base pour continuer la communication [1].

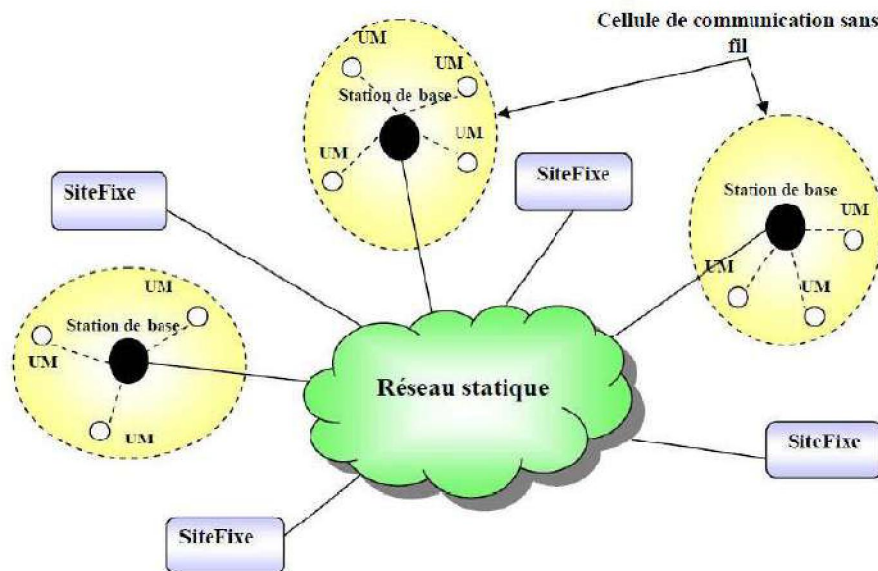


FIG. 1.4 - Réseaux cellulaires [1].

1.2.3.2 Les réseaux sans infrastructure (Ad Hoc)

- Le réseau mobile sans infrastructure également appelé réseau ad hoc ou l'ensemble de service de base indépendante (IBSS) ne comporte pas l'entité «site» fixe.
- Tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil [1].



FIG. 1.5 - Le modèle de réseaux mobile sans infrastructure [1].

1.3 Technologies de communication sans fil

De nombreuses technologies de communication sans fil sont des choix potentiels pour fournir des liaisons de communication fiables et flexibles pour le déploiement rapide de FANET. Une liste de candidats probables pouvant être sélectionnés pour les différentes liaisons de communications UAV-UAV (U2U) et UAV-Infrastructure (U2I) est tabulée. Les technologies sans fil peuvent être divisées en deux catégories principales : les technologies de communication à courte portée et à longue portée. Les technologies de communication à courte portée, telles que le Wi-Fi, ZigBee et Bluetooth, sont utilisées pour les communications à courte distance, tandis que les technologies de communication à longue portée, telles que le cellulaire, le WiMAX et le satellite, peuvent être utilisées pour des zones plus étendues. Les deux technologies sont explorées plus en détail dans les paragraphes suivants.

1.3.1 Technologies de communication à courte portée

Les technologies de communication à courte portée ne visent pas seulement à fournir un accès sans fil dans le voisinage immédiat, mais, dans une perspective plus large, elles offrent également des liaisons de communication prêtes à l'emploi, léger et rentable grâce aux bandes sans spectre. Les technologies de communication à courte portée offrent un transfert d'informations de quelques millimètres à quelques centaines de mètres. La distance intérieure/extérieure maximale pour certaines des technologies de communication à courte portée est illustrée. Certaines des principales technologies de communication à courte portée étudiées comme suit FIG. 1.6 :

- Wi-Fi (IEEE 802.11)
- Bluetooth (IEEE 802.15.1)

- ZigBee (IEEE 802.15.4)

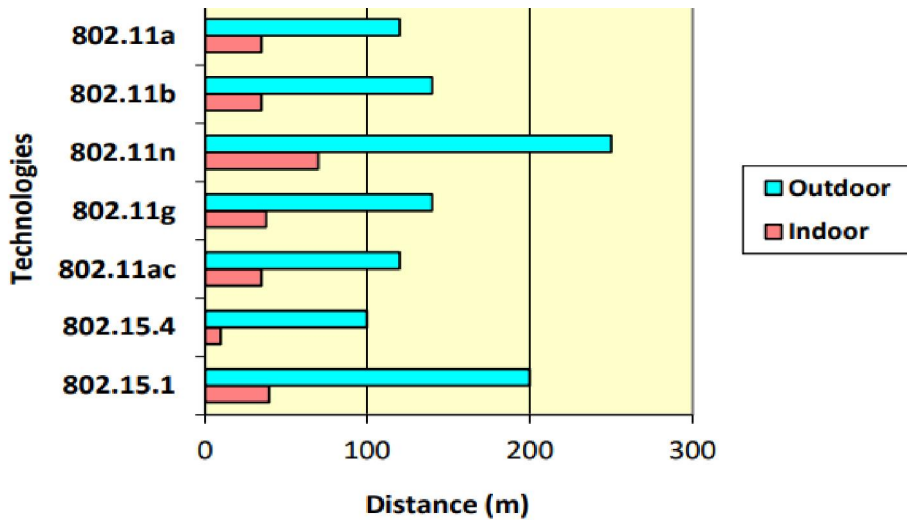


FIG. 1.6 - Distances extérieures/intérieures pour certaines des technologies sans fil à courte portée.

1.3.2 Technologies de communication longue portée

Les technologies de communication à longue portée peuvent être utilisées comme liaison entre deux points de vue pour fournir des services de communication de données sur une grande distance. Ces technologies peuvent également être utiles pour les véhicules aériens afin de leur permettre de communiquer directement entre eux (via U2U) et avec l'infrastructure fixe (utilisant U2I) comme :

- WiMAX (IEEE 802.16)
- Long-Term Evolution (LTE)
- Fifth Generation (5G)
- Satellite Communication (SATCOM)

1.4 Types des réseaux ad hoc

1.4.1 MANET (Mobile ad hoc network)

Les réseaux mobiles ad hoc, ou MANET pour Mobile Ad hoc Network [Chlamtac, 2003], constituent un type de réseau mobile spontané : aucune infrastructure n'est nécessaire pour déployer un réseau. Ceci autorise une nouvelle gamme d'utilisations pour ces réseaux de communications. Ces réseaux sont principalement constitués d'objets mobiles comme des PDA, des téléphones

mobiles ou des ordinateurs portables, Les technologies sans fil utilisées sont diverses : Bluetooth, IEEE 802.11, Infra-rouge [2].

Les Manet sont concentrées sur ce qu'on appelle «MANET pur à usage-général» (en anglais : Pure General-Pur pose MANET). «Pur» indique qu'aucune infrastructure n'est supposée assurer les fonctionnalités du réseau et qu'aucune autorité n'est en charge de la gestion et de contrôle du réseau. «Usage générale» signifie que ces réseaux ne sont pas conçus pour une application spécifique, mais qu'ils peuvent supporter n'importe quelle application TCP/IP conventionnelle. Les algorithmes et les protocoles proposés pour les Manet sont conçus pour un scénario comme celui de la FIG. 1.7.

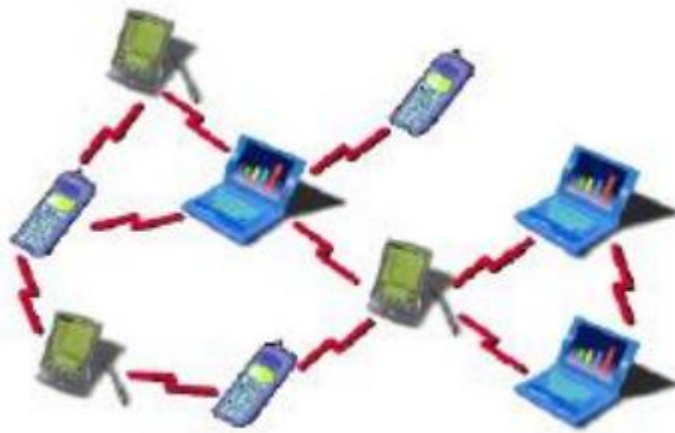


FIG. 1.7 - Topologie d'un réseau MANET [2].

Le groupe de travail MANET créé au sein de l'IETF constitue le point de référence pour les activités de recherche en matière des Manet. L'objectif de ce groupe de travail MANET est la spécification et la standardisation des protocoles de routage pour les réseaux ad hoc au niveau IP. Ces protocoles doivent pouvoir supporter des couches physiques et MAC hétérogènes et offrir aux couches supérieures la possibilité de fonctionner uniquement sur IP. Comme le montre la FIG.1.8 [3], le modèle en couche adopté pour les Manet est directement calqué de l'architecture TCP/IP [4].

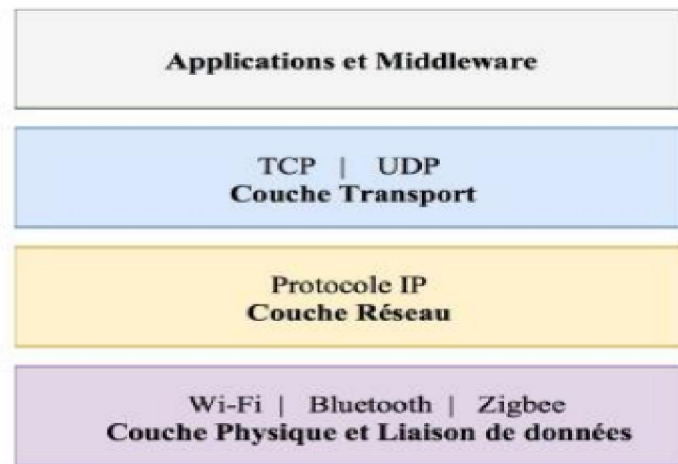


FIG. 1.8 - Modèle en couches des MANET [4].

1.4.2 VANET (vehicular ad hoc network)

VANET est la forme abrégée de «VehicularAd-hoc Network». C'est une sous-classe du réseau mobile MANET dont les nœuds ne sont pas soumis à des limitations de stockage d'informations et de puissance de calcul. C'est un réseau de communication sans fil autonome et auto-organisé, où les nœuds s'impliquent en tant que serveurs et / ou clients pour échanger et partager des informations. Cependant, les VANET sont différents des autres réseaux ad-hoc en raison de la mobilité élevée des nœuds, de la densité variable et de l'environnement de communication imprévisible. Les véhicules et les routes sont équipés de dispositifs de communication sans fil tels que les unités embarquées (OBUs) dans les véhicules et les nœuds stationnaires appelés unités de bord (RSUs) déployées le long des routes. A partir de ces unités, il existe trois scénarios de communication : véhicule à véhicule (V2V) (c'est-à-dire entre les OBUs), véhicule à route (V2R) (entre OBU et RSU) et hybride (HVC). Les VANET sont considérés comme une partie importante des Systèmes de Transport Intelligents (STIs) pour assurer la sécurité routière, le confort de la conduite et la diffusion d'informations actualisées sur les routes.

Par exemple, en cas d'accident, les véhicules envoient des messages d'avertissement aux conducteurs pour prendre les bonnes décisions avant d'entrer dans la zone du crash. De même, les conditions de circulation peuvent être communiquées pour faciliter la conduite en empruntant de nouveaux chemins en cas de congestion [5].

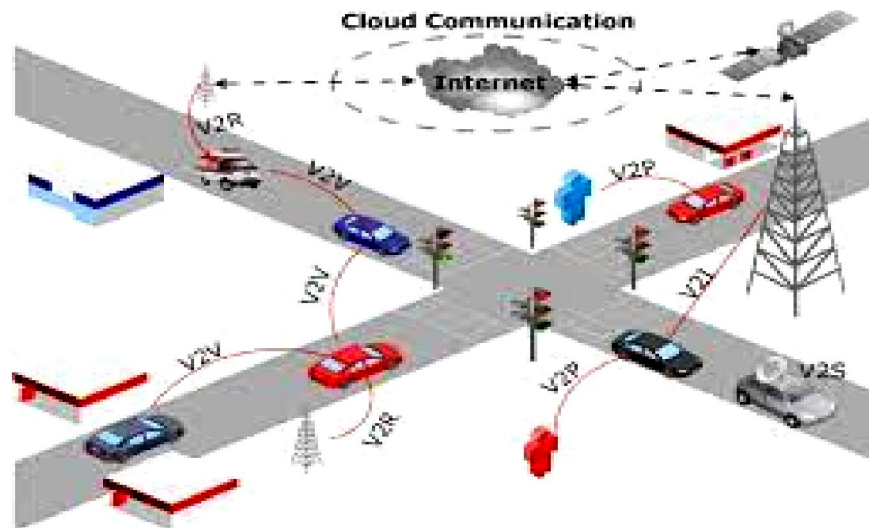


FIG. 1.9 - Modes de communication dans VANET [5].

1.4.3 FANET (flying ad hoc network)

Les réseaux ad hoc de drones ou FANET (Flying ad hoc network) se présentent comme une sous famille des VANETs. Les FANETs sont apparus en réponse au besoin d'interconnexion de plusieurs drones ou UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) au sein d'un system multi-UAV. Un drone est défini 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. Les drones promettent des nouvelles applications aussi bien militaires que civiles telles que : l'interconnexion des réseaux ad hoc terrestres, les opérations de recherche et de secourismes après une catastrophe naturelle, la détection et la poursuite de cibles militaires, la surveillance de feux de forêts, la télédétection agricole, etc.

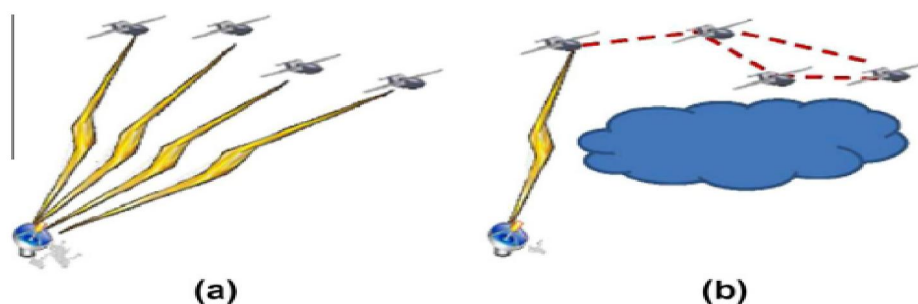


FIG. 1.10 - Modes de communication dans les systèmes multi-UAV [6].

Dans un système multi-UAV (FIG.1.10), les stations de base terrestres ou satellitaires assurent les communications de type UAV à infrastructure.

Cependant, avec l'augmentation du nombre des UAV au sein du système, la communication directe entre les UAVs se révèle une alternative intéressante à la communication centralisée passant via les stations de base. Cela peut être réalisé par l'établissement d'un réseau ad hoc entre les UAVs. En effet, l'utilisation de plusieurs drones en mode ad hoc présente les avantages suivants:

- Réduction du temps d'accomplissement des missions : des missions de reconnaissance, de surveillance et de secours peuvent être accomplies plus rapidement selon le nombre des drones utilisés.
- Réduction du coût de maintenance total : au lieu d'utiliser un seul grand UAV onéreux, il vaut mieux utiliser plusieurs mini-drones dont le coût de maintenance de chacun est minimal [6].

1.5 Comparaison des classes de réseaux ad-hoc

La comparaison entre MANET, VANET, FANET est clairement exprimée dans vue d'ensemble qui apparaît dans (TAB.1.1).

Critère de comparaison	MANET	VANET	FANET
Mobilité des nœuds	Faible	Haute	Très haute
Modèle de mobilité	Aléatoire	Régulier	Aléatoire/régulier
Changement de topologie	Lent	Rapide	Très rapide
Densité	Faible	Haute	Très faible
Problème d'énergie	Posé	N'est pas posé	Posé pour les mini-UAV
Puissance de calcul	Limité	Elevée	Elevée

TAB.1.1 - Comparaison des MANET, VANET et FANET [39].

1.6 Modes de communication

Les FANET ont une norme similaire à celle des MANET dans lesquels les nœuds volent, ce qui crée des caractéristiques différentes. FIG.1.11 montre deux types de communications différents qui peuvent être établis entre les nœuds formant un FANET classique [7] :

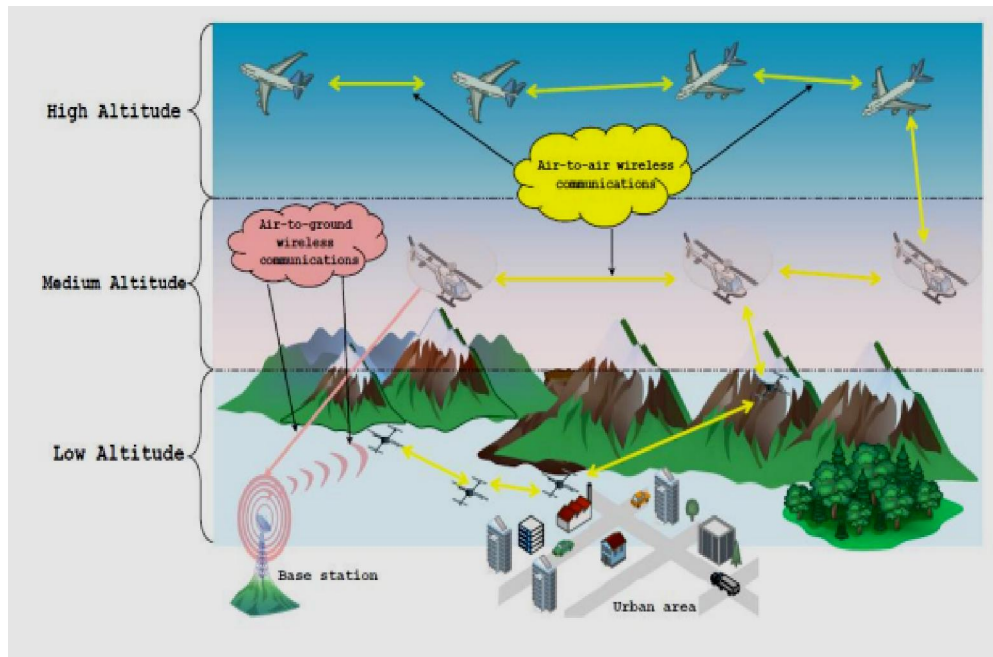


FIG.1. 11 - Communication sans fils entre les nœuds FANET [7].

1.6.1 Communication sans fils air-air

Il s'agit de la communication entre les drones dans un réseau ad hoc afin d'échanger des informations entre eux. En effet les drones peuvent communiquer entre eux en utilisant une architecture purement ad hoc afin d'éviter les restrictions sur les portées de transmission imposées par la communication entre les drones et les stations de base au sol. De plus ce type de communication sans fil peut être utilisé pour prendre en charge différentes applications et communication à sauts multiples lorsque le nœud veut établir une transmission du paquet de données vers un autre nœud en dehors de la portée [7].

1.6.2 Communication sans fil air-sol

Ce mode permet la communication entre les drones et les stations de base. Dans FANET, tous les drones ne peuvent pas communiquer avec les infrastructures existantes telles que les stations au sol et les satellites. Toutefois, seuls certains drones peuvent établir une communication avec les infrastructures afin d'améliorer et d'accroître la connectivité et de fournir des services supplémentaires [7].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectuée l'étude sur les réseaux sans fils, nous avons présenté la classification des environnements mobiles (avec infrastructure et sans infrastructure), et mentionné les différentes technologies de communication sans fil courte et longue portée, ce qui nous a permis dans la recherche d'atteindre

3 types de réseaux ad-hoc : MANET , VANET et FANET.

Ce dernier nous amène à une étude détaillée de FANET dans notre deuxième chapitre.

2

Les FANET ou Réseaux ad hoc de Drones

2.1 Introduction

Ce chapitre explore et définit les contours de notre sujet afin de mettre en évidence les éléments nécessaires à sa compréhension et à son élaboration. Dans un premier temps nous allons introduire les drones de façon générale en montrant leur évolution et les différents aspects de leur utilisation. Les FANET constituent l'une des parties la plus importante. Les réseaux ad hoc de drones définissent une nouvelle forme de MANET, les drones coopèrent entre eux afin d'accomplir une mission avec des meilleures performances. Comme l'échange de positions géographiques pour l'évitement de collisions ou pour la ré-planification autonome de tâches entre les agents d'une mission. Les réseaux ad hoc de drones peuvent être appliqués aux systèmes plusieurs drones sont utilisés, un seul drone ne peut pas créer un réseau ad hoc.

FANET est un type de réseau qui consiste en un groupe de petits drones connectés de manière ad hoc, qui sont intégrés dans une équipe pour atteindre des objectifs de haut niveau. Les FANET peuvent être utilisés pour fournir un réseau de dépenses d'exploitation rapidement et flexible, auto-configurable et relativement petit, la connexion de plusieurs drones dans un réseau ad hoc est un grand défi. Ce niveau de coordination nécessite une architecture de communication et des protocoles de routage appropriés qui peuvent être mis en place sur des nœuds volants très dynamiques afin d'établir une communication fiable et robuste.

2.2 Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

2.2.1 Définition

UAV est un aéronef sans passager ni pilote qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol. Le mot « drone » est une extrapolation d'un terme anglais qui signifie « faux-bourdon ». En français, le terme est employé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins, alors que la classification anglo-saxonne distingue chaque type d'appareil [Web 2], L'appellation UAV regroupe tous les aéronefs non occupés et plus ou moins intelligents, voire complètement autonomes. On parle aussi parfois simplement de (UA) [23].

2.2.2 Technologie de communication

La communication collaborative est une partie importante des systèmes UAV pour le soutien de réseau et les composants de service. Cela est important puisque les UAV peuvent être équipés de technologies différentes de mise en réseau pour la communication avec plusieurs UAV et entre les UAV et d'autres systèmes tels que les GCS, les WSN (Wireless Sensor Network) et les robots au sol. De plus, tous les UAV ne peuvent pas communiquer directement entre eux ou avec la station de base. D'un point de vue opérationnel, les systèmes UAV ont un large éventail d'applications avec des exigences de communication et de mise en réseau variables. En outre, de nombreux liens de communication différents peuvent être disponibles. Ces liens de communication sont, par exemple, les réseaux cellulaires, les satellites, la ligne de visée, les réseaux ad hoc mobiles en temps réel et les capacités de mise en réseau tolérant les retards avec des dispositifs de transfert de données [26].

2.3 Unmanned Aerial System (UAS)

2.3.1 Définition

Unmanned Aircraft System (UAS) désigne un aéronef sans pilote et l'équipement pour le contrôler à distance, que nous définissons comme étant une unité volante, une caméra embarquée (ou un appareil connexe) pour l'imagerie des cibles au sol, et une station au sol qui est utilisée pour surveiller les données de vol, sont particulièrement attrayants pour les travaux sur le terrain à distance étant donné leur taille relativement petite et leur facilité d'utilisation [24]. Les résolutions spatiales et temporelles élevées représentent certaines des caractéristiques les plus importantes des données acquises par les UAS. Ces aspects, en plus d'une grande souplesse opérationnelle, de la personnalisation des projets, de la rapidité de la livraison des données, du faible coût de l'acquisition d'images, de l'insensibilité au nuage et de la courbe d'apprentissage peu profonde de l'utilisation des UAS [25].

2.3.2 Composants

Un système aérien sans pilote (UAS) est un système complexe composé de six sous-modules principaux qui travaillent de manière coordonnée pour obtenir une plate-forme d'observation très précieuse [27] :

- **La cellule de l'UAV** : Une plate-forme simple, aérodynamiquement efficace, légère et évidemment pas d'espace pour un pilote, et stable avec un espace limité pour l'avionique.

- **L'ordinateur de vol** : Le cœur de l'UAV. Un système informatique conçu pour collecter des informations aérodynamiques à travers un ensemble de capteurs (accéléromètres, capteurs de pression, GPS, gyroscopes, magnétomètres, etc.), afin de diriger automatiquement le vol d'un avion le long de son vol-planifier au moyen de plusieurs surfaces de contrôle présentes dans la cellule.

- **La charge utile** : Un ensemble de capteurs composé de caméras de télévision, de capteurs infrarouges, de capteurs thermiques, etc. pour recueillir des informations qui peuvent être partiellement traitées à bord ou transmises à une station de base pour une analyse plus approfondie.

- **Le contrôleur de mission / charge utile** : Un système informatique à bord de l'UAV qui doit contrôler le fonctionnement des capteurs inclus dans la charge utile. Cette opération devrait être effectuée en fonction de l'élaboration du plan de vol et de la mission réelle attribuée à l'UAV.

- **La station de base** : Un système informatique au sol conçu pour surveiller le développement de la mission et, à terme, utiliser l'UAV et sa charge utile.

- **L'infrastructure de communication** : L'infrastructure de communication. Un mélange de mécanismes de communication (modems radio, satcomm, hyperfréquences, etc.) qui devrait garantir la liaison continue entre l'UAV et la station de base. La technologie actuelle des UAV offre des solutions techniques réalisables pour les cellules, le contrôle de vol, les communications et les stations de base. Cependant, si les applications civiles/commerciales doivent être abordées, deux éléments limitent la flexibilité du système : l'intervention humaine et la flexibilité de la mission. L'efficacité économique exige que le même UAV puisse fonctionner dans différents domaines d'application. Cette nécessité se traduit par des exigences plus rigoureuses pour les sous-systèmes de gestion de la mission et de la charge utile, avec des niveaux accrus de souplesse et d'automatisation [28].

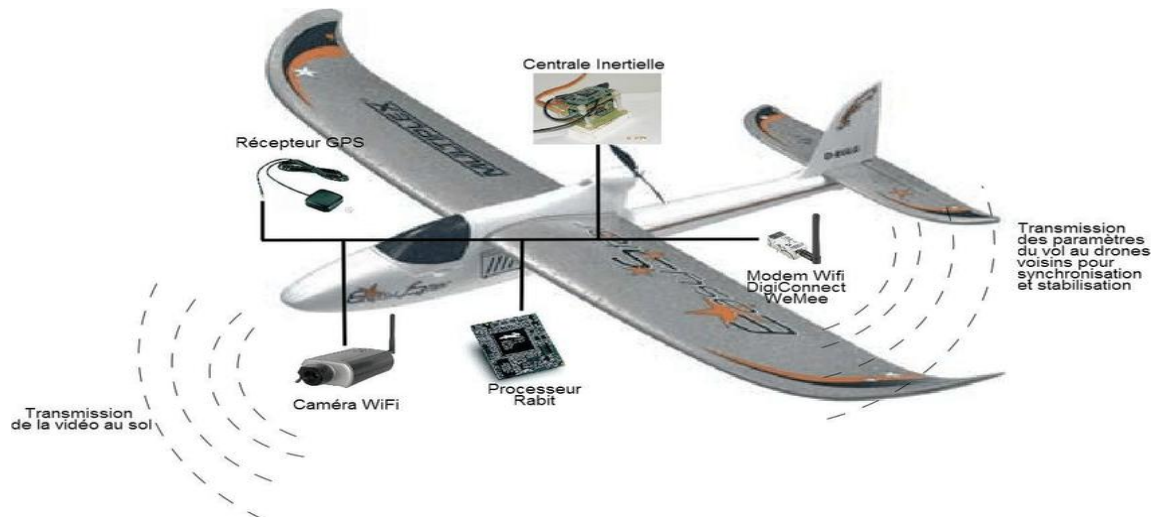


FIG. 2.1 - Composants principaux d'un système d'UAV [27].

2.4 Définition de FANET

FANET est une classe spéciale de MANET qui assure la communication entre de petits drones volants appelés UAV (véhicule aérien sans pilote) équipés d'une caméra, d'un capteur et d'un système de communication. Les nœuds FANET communiquent entre eux dans les airs ; transférer les données et les signaux entre eux sans aucun expert humain et aucune connectivité physique entre les nœuds. FANET a un large domaine d'applications comme la reconnaissance et la surveillance à des fins militaires et civiles [9].

FANET peut être défini comme un nouveau de MANET dans lequel les nœuds sont des UAV. Selon cette définition système unique-UAV. D'autre part, pas tous les systèmes multi-UAV d'un FANET. La communication UAV doit être réalisée à l'aide d'un réseau ad hoc entre UAV. Par conséquent, si la communication entre les UAV repose entièrement sur les liens entre les UAV et l'infrastructure, elle ne peut pas être classée comme FANET [12].

2.5 Évolution des drones

Les drones étaient des engins qui à la base ne comprenaient que des capteurs, calculateurs et quelques dispositifs leur permettant d'assurer leur vol pour effectuer essentiellement des missions militaires dangereuses où la présence d'un être humain semblait trop risquée ont très vite changé d'aspect. En effet jusqu'aux années 1980, les drones ont été améliorés pour être utilisés par les services de renseignements et d'espionnages, par exemple pour effectuer des missions de reconnaissance en effectuant des prises de vues aériennes. Ce n'est que dans les années 2000 que les UAV font leur entrée véritable dans le secteur civil.

En effet, le progrès technologique et la miniaturisation des systèmes

informatiques, les caméras et les batteries dotant ces machines de capacités énormes ont permis de rendre les drones accessibles à plusieurs secteurs d'activités [8].

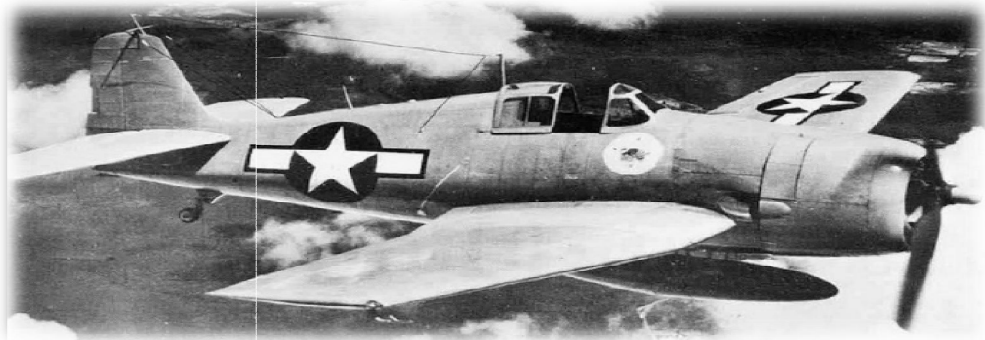


FIG. 2.2 - Unmanned US Navy Grumman [8].



FIG. 2.3 - General Atomics MQ-1 Predator 1994 [8].



FIG. 2.4 - DJI Phantom 4 Pro V2.0 [8].



FIG. 2.5 - Jual JJRC H8 Mini Drone Eachine H8 Mini Drone RTF RC Quadcopter 2,4Ghz Tirée du site tokopedia.com (2020) [8].

2.6 Architecture de FANET

UAV de manière ad hoc avec communication sans fil entre les uns des autres appelés FANET. Communiquer dans un tel modèle est de différents types, et une organisation de réseau diversifiée est mise en œuvre, et diverses fonctionnalités sont requises. Différents chercheurs ont des noms différents à ces très mobiles modèles de mise en réseau [10]. Dans l'architecture FANET, les UAV rendent la communication en temps réel de manière ad hoc qui peut abolir la nécessité de l'infrastructure et corrige la contrainte de la gamme de communication [13]. Plusieurs architectures de communication différentes sont proposées pour multi-UAV systèmes, dans lequel nous introduisons trois architectures de communication pour FANET.

- **UAV Ad Hoc Network:**

Dans une architecture de « réseau ad hoc d'UAV », tous les véhicules aériens sans pilote (UAV) sont reliés entre eux et la station de base de façon autonome sans avoir d'installation de communication préexistante. Dans cette architecture spécifique, chaque UAV sera engagé dans le transfert de données du système FANET. Dans le réseau ad-hoc des UAV, un UAV de base sert de Passerelle entre la station Terrestre et les autres UAV (comme le montre la FIG. 2.6 (a)). L'UAV passerelle est équipé de dispositifs de communication sans fil capables de fonctionner à la fois sur une faible puissance, une courte portée pour la communication avec l'UAV et une grande puissance, une longue portée pour la communication avec la station au sol [14]. Cette architecture de réseau convient mieux à un groupe d'UAV de petite taille et de taille similaire pour poursuivre des opérations persistantes comme une mission autonome de surveillance aérienne.

- **Multi-Group UAV Ad hoc Network:**

Un réseau ad-hoc multi-groupe d'UAV est principalement une intégration d'un réseau ad-hoc d'UAV et d'une architecture de réseau centralisée (comme le montre la FIG. 2.6 (b)). Dans cette architecture, les UAV au sein d'un groupe forment un réseau ad-hoc, et l'UAV de base de chaque groupe est en outre connecté à la GS de manière centralisée. La communication intra-groupe est effectuée au sein d'un réseau ad hoc d'UAV sans impliquer le GS, tandis que la communication inter-groupe est effectuée via l'UAV de base [15]. Ce type d'architecture de réseau d'UAV convient aux cas où un grand nombre d'UAV sont impliqués dans une mission avec des caractéristiques de vol et de communication différentes. Cependant, en raison de sa nature semi-centralisée, cette architecture de communication n'est pas robuste [14].

• **Multi-Layer UAV Ad Hoc Network:**

La FIG. 2.6 (c) montre un réseau ad-hoc d'UAV à plusieurs niveaux. Dans cette architecture, la mise en réseau entre les UAV membres au sein d'un groupe spécifique forme un réseau ad-hoc d'UAV, qui correspond à la couche inférieure du réseau. Les UAV de base de tous les groupes sont reliés entre eux et se trouvent sous la couche supérieure. Cependant, un seul UAV de base d'un groupe est relié au GS. En outre, seul le GS détient l'information qui lui est acheminée afin de réduire la Communication et la charge de calcul sur le GS. Par conséquent, cette architecture convient aux missions qui impliquent un grand nombre d'UAV hétérogènes [15]. En résumé, une architecture de communication décentralisée est l'architecture la plus appropriée pour connecter une équipe d'UAV [14], tandis qu'un réseau ad hoc d'UAV multicouches est plus approprié pour FANET.

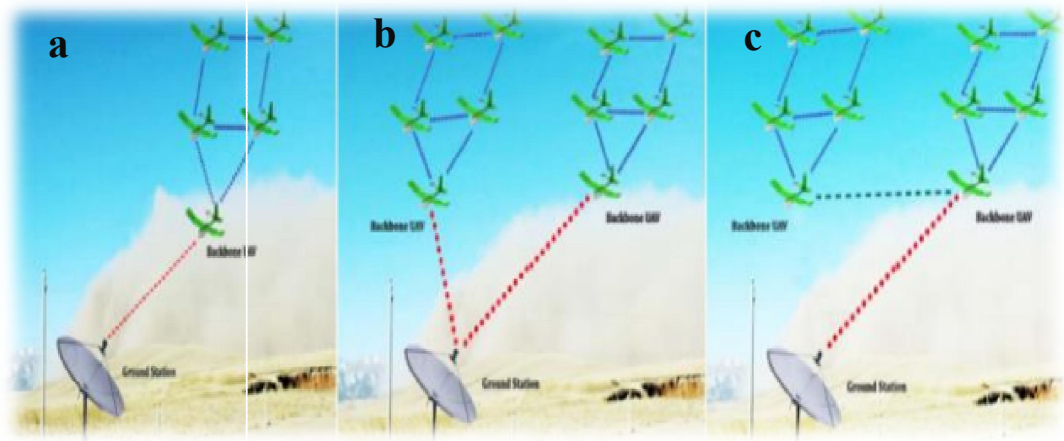


FIG. 2.6 - (a) unmanned aerial vehicle (UAV) ad-hoc network ; (b) multi-group UAV ad-hoc network ; (c) multi-layer UAV ad-hoc network [14].

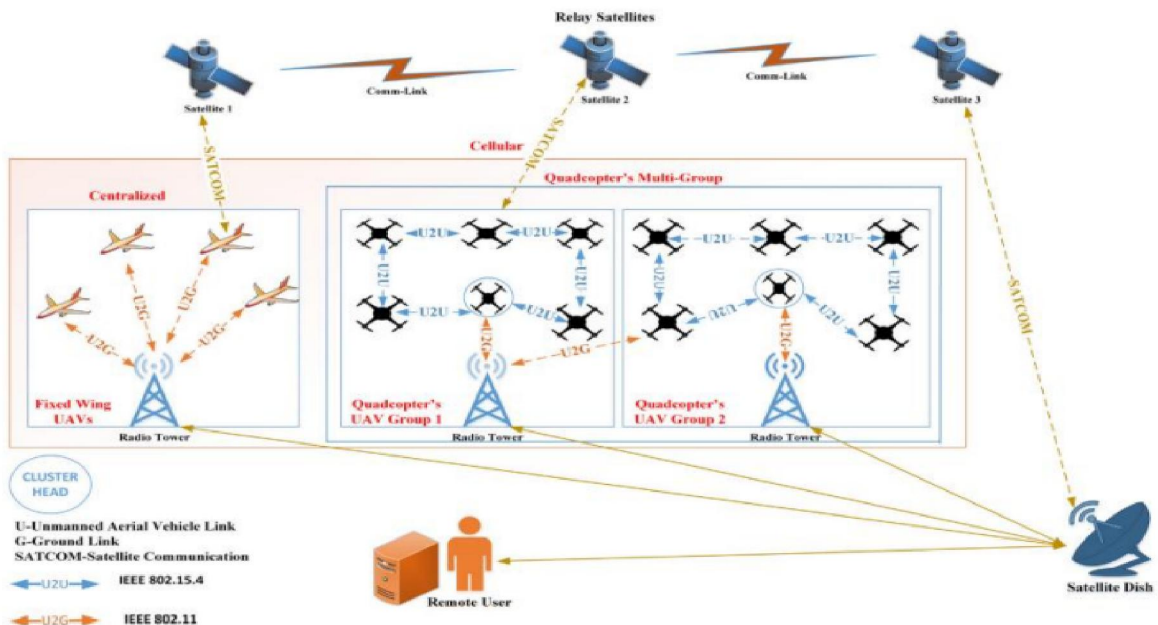


FIG.2.7 - An impression of a complete FANET architecture [15].

2.7 Caractéristiques de FANET

Chaque tâche ou utilisation est différente les unes des autres et vous devez comprendre la demande ou le travail. Quelle méthode dépend directement de ses caractéristiques. Les fonctionnalités FANET sont répertoriées dans les sous-sections suivantes [11].

- **Mobilité des nœuds**

Le degré de mobilité des nœuds est plus important que d'autres réseaux ad hoc comme MANET et VANET. La vitesse du nœud UAV varie de 30 à 460 km/h à différents taux d'aéronefs à voilure fixe et à voilure tournante ou d'autres types d'UAV. Cette vitesse provoque des pannes de liaison, des perturbations, des retards dans transfert de messages et autres problèmes de routage.

- **Modèles de mobilité**

Les modèles de mobilité FANET doivent être dynamiques ; le plan de vol prédéterminé n'est pas précis dans tous les cas. Il y a une transformation à chaque étape, le recalcul de l'itinéraire se produit à chaque niveau de communication; de plus, différents modèles de Mobilité utilisés selon la nature et application du routage. Chaque modèle de mobilité a ses avantages et ses inconvénients qui peuvent aider à la compréhension de la transmission des messages.

- **Densité de nœuds**

La somme moyenne des UAV dans n'importe quelle zone appelée densité de nœuds d'un réseau. la densité de nœuds des drones varie de faible à très dense selon l'objectif de la mission. Les drones sont capables de transmission à longue portée ainsi qu'à faible portée également. Dans les FANET, leur ordre doit disperser la densité par des plages appropriées, en les séparant toutes selon l'essentiel du vol.

- **Topologie du réseau**

Plus le degré de mobilité est élevé, plus les changements de topologie sont fréquents. Dans de telles circonstances, La topologie du réseau FANET est une topologie en étoile ou maillée. Les deux ont leurs avantages spécifiques et inconvénients et utilisés comme tels.

- **Modèle de propagation radio**

L'évolution d'un plan de communication se fait sur le modèle de propagation radio. FANET a son attribut à savoir. Les effets d'action, l'influence de la réflexion au sol et la forte probabilité de contrôlé avec la station de base.

- **Bande de fréquence**

Dans le système de communication UAV, les bandes sans licence telles que 0,9 GHz et 2,4 GHz utilisées dans la majorité. Les bandes sans licence peuvent provoquer une congestion. FANET UAV to Groundlink meilleur résultat est avec la fréquence de 5 GHz en combinaison avec IEEE 802.11a Évitements des interférences avec les autres bandes fonctionnent mieux sur 5,9 GHz.

- **Localisation**

La vitesse des drones est élevée dans certains cas, et dans certains cas, elle est même imprévisible. Grande vitesse et la topologie fréquente nécessite une localisation à de courts intervalles de temps. Dans cette méthode, la localisation basé sur peut être la position basée sur le réseau pour l'échange de paquets et le positionnement basé sur la hauteur basé sur les altitudes des drones.

- **Consommation énergétique et durée de vie du réseau**

Parmi les enjeux critiques d'un réseau, la durée de vie du réseau est l'objectif fondamental, et l'intérêt à tous car les nœuds de FANET sont alimentés par batterie. La consommation énergétique dépend également du matériel de communication des FANET avec le lien, les distances et autres obstacles. L'exigence d'appareils sensibles à l'alimentation dans FANET améliorera directement la durée de vie du réseau et arrêter la panne du réseau. Les capteurs et actionneurs jouent un rôle essentiel dans FANET et se connecter instantanément à la consommation d'énergie.

2.8 Domaine d'application

L'objectif principal des drones est de remplir une mission qui pourrait être de nature militaire, scientifique, économique ou même commerciale. L'intérêt pour le contrôle et la navigation des drones est dû à leur utilisation dans des environnements dangereux [16].

2.8.1 Applications militaires (marine, armée et force aérienne)

- Intelligence électronique.
- Brouillage et destruction du système radar.
- Relais de signaux radio.
- Observation des flottes ennemies.
- Désignation et suivi des cibles.
- Élimination des bombes qui non pas explosées.
- Leurre de missiles par émission de signatures artificielles.

2.8.2 Applications civil

- Topographie aérienne pour les recherches géographiques.
- Pulvérisation et surveillance agricoles.

- Chercher et sauver.
- Lutte contre l'incendie et détection d'incendie forestier.
- Surveillance des importations illégales.
- Études de pollution et surveillance des terres.
- Inspection des pipelines et des lignes électriques.
- Recherche de pétrole et de gaz.
- Livraison de colis.
- Détection de véhicules mobiles au sol.
- Sauvetage en mer.



(A) Drone pulvérisateur agricole.



(B) Surveillance des feux De forêts.



(B) Sauvetage en mer avec un drone.



(D) Militaire

FIG. 2.8 - L'utilisation des drones [16].

2.9 Différents modèles de mobilité de FANET

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. Il existe plusieurs types de modèles de mobilité parmi lesquels on peut citer :

2.9.1 Random way point

Dans tous les modèles de mobilité basés sur l'aléatoire, les nœuds du drone sont libres de se déplacer de manière aléatoire dans n'importe quelle direction dans la zone de simulation. On peut dire qu'un nœud est libre de choisir sa

destination, sa vitesse et sa direction. Les drones décident de leurs actions en fonction de probabilités fixes. Jusqu'à présent, le modèle des points de cheminement aléatoires est utilisé comme modèle synthétique pour la mobilité dans la plupart des scénarios de simulation. Cependant, il ne convient pas aux avions car ceux-ci ne changent pas de direction et de vitesse de mobilité rapidement en une fois et ne peuvent pas rester pendant un certain temps au même endroit comme le modèle des points de cheminement aléatoires. Ces modèles de mobilité sont basés sur trois actions : aller "tout droit", "tourner à gauche", "tourner à droite". La simulation du modèle de mobilité des points de cheminement aléatoires ressemble à la FIG. 2.9 [17]:

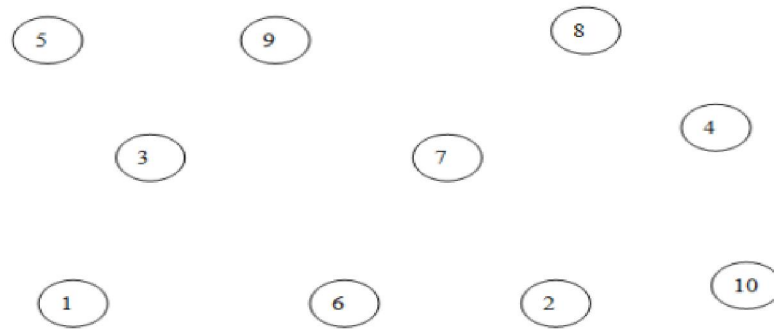


FIG. 2.9 - Random way point mobility model [17].

2.9.2 Modelé de mobilité de Gauss Markov

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 GaussMarkov, chaque nœud est initialisé avec une vitesse et une direction. Par des intervalles de temps fixes, le mouvement se produit pour mettre à jour la vitesse et la direction de chaque nœud. 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 FIG. 2.10 . le nœud se déplace en fonction de la position du nœud précédent [17].

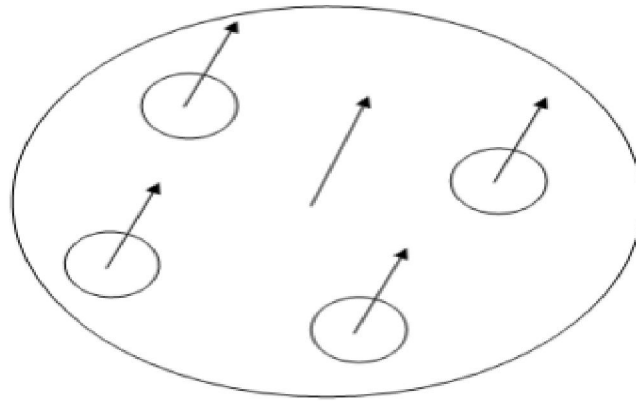


FIG. 2.10 - Modelé de mobilité de Gauss Markov [17].

2.9.3 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 [18].

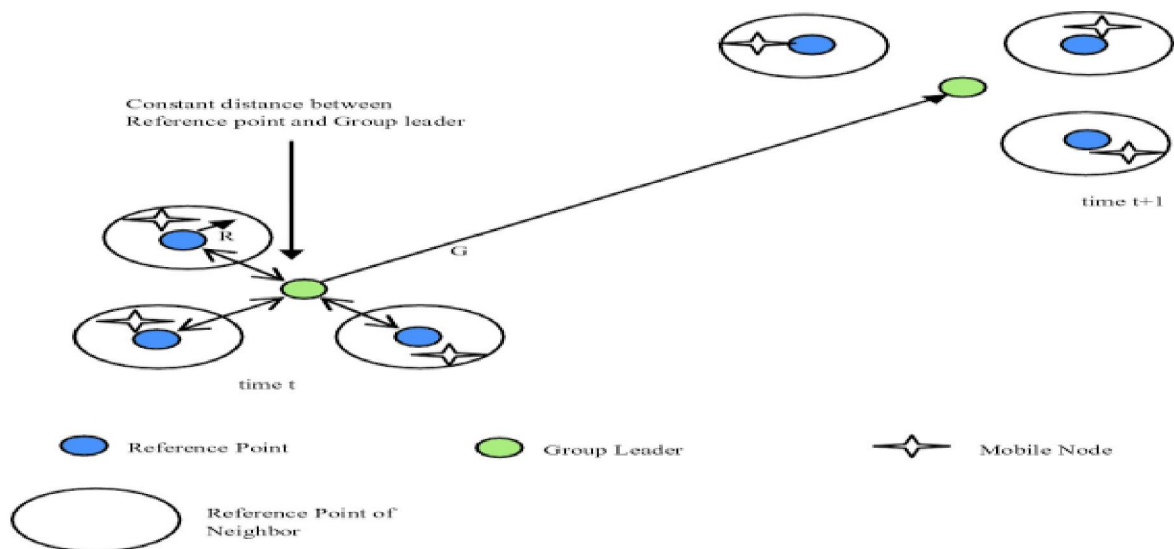


FIG. 2.11 - RPGM [18].

2.9.4 Manhattan Grid

Le modèle de mobilité du réseau de Manhattan (MG), illustré sur la FIG. 2.12, 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 [19].

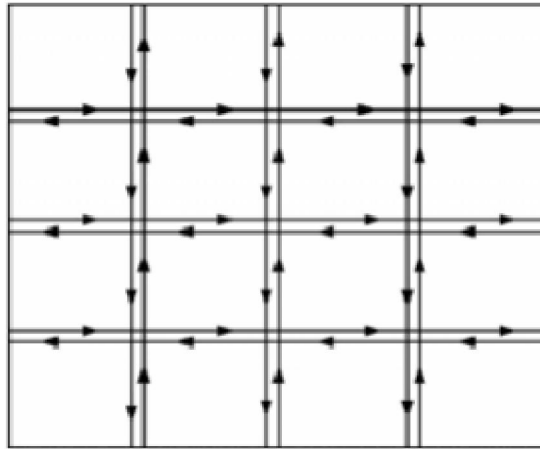


FIG. 2.12 - Manhattan Grid [19].

2.10 Protocoles de communication

2.10.1 Au niveau de la couche MAC

Les questions importantes que la couche MAC de FANET devrait aborder sont la qualité variable des liens, les retards de paquets et l'utilisation optimale des canaux pendant le fonctionnement du réseau en temps réel. Pour le protocole de la couche MAC, l'IEEE 802.11 a été utilisée en même temps que l'optimisation des composants matériels commerciaux, tels que les antennes directionnelles et omnidirectionnelles [20]. Dans [21] il a été déclaré que la norme IEEE 802.11 régit le fonctionnement de la couche physique (PHY), de la couche MAC et de la couche Logiciel Link Layer (LLC) de la pile protocolaire OSI. Elle dispose de deux méthodes d'accès : la méthode Point Coordination Fonction (PCF) et la méthode Distribuée Coordination Fonction (DCF). Avec la méthode d'accès PCF, les stations de base ont la charge de l'accès au médium radio de manière centralisée. Avec la méthode DCF, l'accès est totalement distribué et il n'existe aucune distinction entre les stations de base. Ces particularités justifient le fait que le DCF peut être employé en mode ad hoc et en mode infrastructure alors que le PCF ne peut l'être qu'en mode infrastructure. Un autre protocole à faible puissance, moins complexe et à faible débit de données, IEEE 802.15.4 MAC, pour les communications entre drones dans les FANET a été proposé dans [18]. Ce protocole peut être utilisé pour les applications moins gourmandes en bande passante telles que la surveillance et le contrôle, la gestion des feux de forêt, la télédétection et relayant les réseaux qui nécessitent l'échange d'informations de contrôle au sein du réseau. De telles applications ne nécessitent pas nécessairement un protocole à haut débit de données tel que IEEE 802.11, car la nature du message échangé sur le réseau est principalement constituée de données de contrôle sensibles au temps, informations sur la localisation des drones et mise à jour des assignations de tâches. Ainsi, la communication entre drones peut être réalisée efficacement en déployant un protocole à faible débit de données tel qu'IEEE 802.15.4 [20].

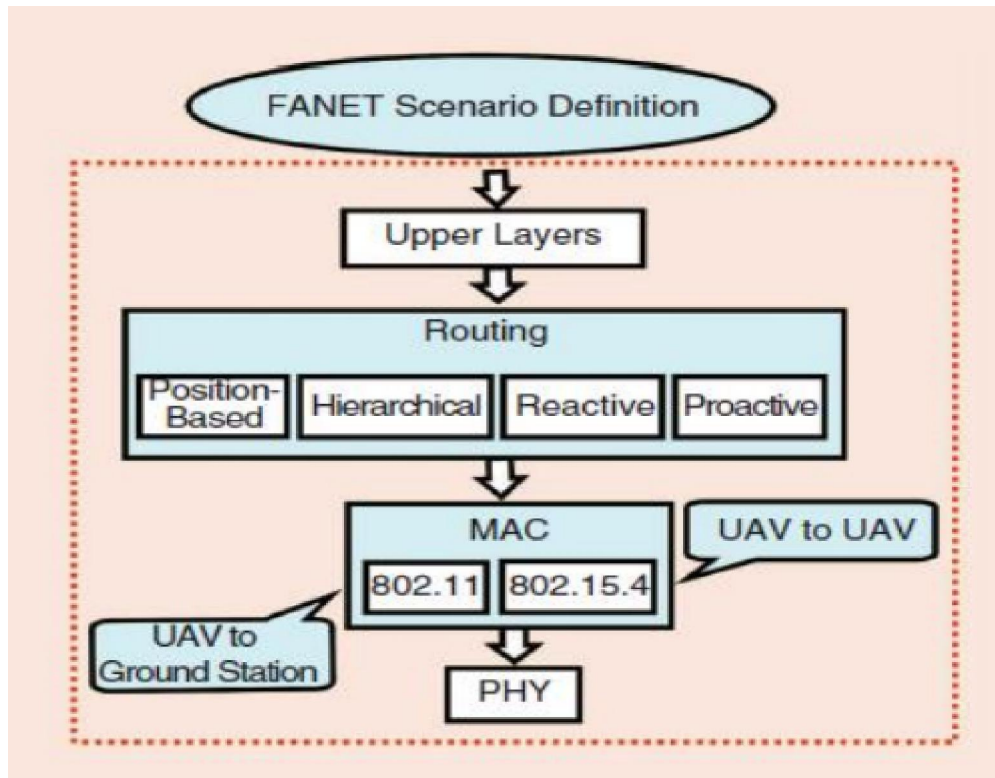


FIG. 2.13 - Architecture multicouche proposée [20].

2.10.2 Au niveau de la couche réseau

Afin d'acheminer une information entre deux drones distants, un ou plusieurs nœuds intermédiaires dans le réseau coopèrent entre eux par la retransmission des données jusqu'à leurs destinations. En effet, les protocoles de routage sont responsables de choisir la meilleure route vers la destination qui minimise les collisions, les interférences, ou encore le délai [22]. Il est important de noter qu'un réseau ad hoc de drone a pour particularité la grande mobilité de ses nœuds. Les changements fréquents de topologie impliquent des changements de route et donc une surcharge de gestion (« overhead ») du mécanisme de routage. Et il est nécessaire de restaurer rapidement une route qui aurait été perdue pour éviter une perte de paquets. Puisque les protocoles de routage est parmi les objectifs principale de notre projet, nous avons réservés un chapitre complet sur les différents protocoles de routage et ainsi un état de l'art de ces derniers dans les réseaux FANET. Le chapitre suivant détaillera cette partie.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu un ensemble de définitions et de concepts qui nous a permis de bien définir les réseaux FANET, Ces réseaux se distinguent par une grande mobilité, des changements de topologie fréquents et le mouvement 3D-espace des nœuds, ce qui constitue des problèmes de mise en réseau. Afin de surmonter ce genre de problèmes, il est obligatoire de choisir une architecture de communication appropriée et des protocoles de routage fiables pour authentifier une communication robuste entre les UAV. Nous avons enrichie nos recherches

sur les deux couches basses du modèle OSI afin de bien comprendre les fonctionnements de chaque couche. Le prochain chapitre fera l'objet d'une étude détaillée sur la couche réseau, plus précisément les protocoles de routages car c'est le but de notre sujet.

3

Protocoles de routage dans les FANET

3.1 Introduction

Le routage est une composante fondamentale de la gestion des réseaux. C'est le principe qui permet à des paquets de quitter la machine locale pour atteindre une machine qui se trouve au-delà d'un routeur ou d'une passerelle. Le routage est une méthode contribuant à l'acheminement des données depuis un nœud émetteur jusqu'à son (ses) destinataire(s). FANET sont composés de véhicules aériens sans pilote, permettant une grande mobilité et assurant la connectivité aux zones reculées.

Dans ce chapitre on va présenter les protocoles de routages d'un réseau ad hoc de drones.

3.2 Définition de routage

Le routage est une méthode à travers laquelle on fait transiter une information donnée depuis un certain émetteur vers un destinataire bien précis. Il consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, un établissement de routes qui soient correctes et optimales entre n'importe quelle paire de nœud appartenant au réseau. Ce qui assure l'échange des messages d'une manière continue. Le routage est, donc, la brique technologique de base des réseaux sans fil Ad Hoc. Il constitue un sérieux problème à résoudre pour que ces réseaux puissent fonctionner dans de bonnes conditions.

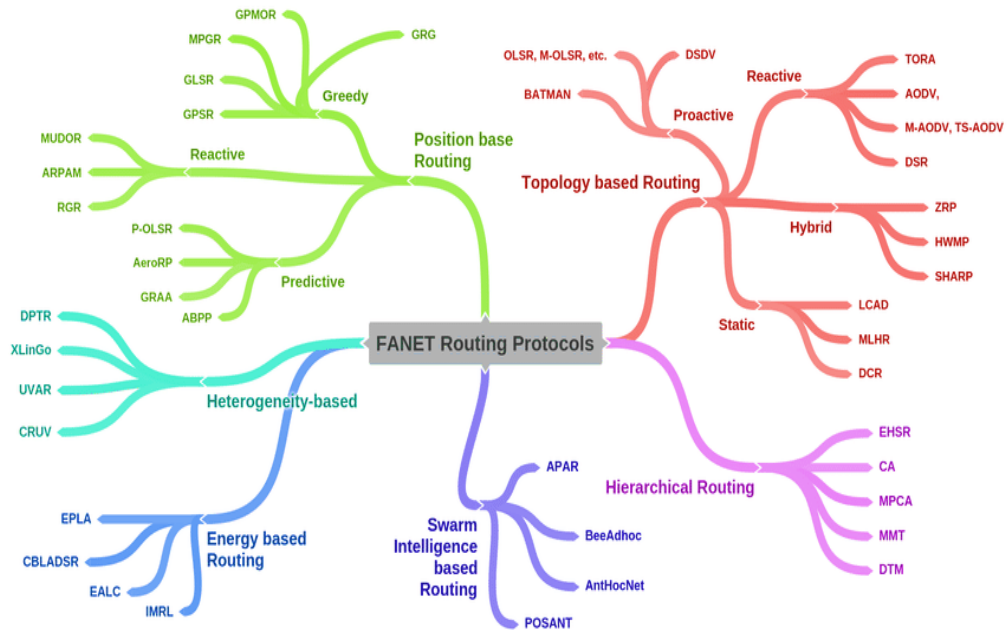


FIG.3.1 - Taxonomie des protocoles de routage FANET [Web4].

3.3 Problème de routage dans les réseaux ad hoc

Comme nous l'avons vu précédemment, l'architecture d'un FANET est caractérisés par une absence d'infrastructure fixe préexistante et les noeuds sont libres de se déplacer aléatoirement et s'organisent arbitrairement. Donc, le problème consiste à déterminer un acheminement optimal des informations à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance [Dawoud, 2006]. En effet, il y a une difficulté dans le choix du protocole de routage de dire qu'un chemin est meilleur que l'autre.

3.4 Routage Basé sur la topologie

Les protocoles de routage basé sur la topologie utilisent les informations de la table de routage pour transférer les données de la source à la destination. Les adresses IP sont utilisées pour identifier les nœuds et il utilise les informations de connexion au réseau pour envoyer un fichier paquets via le chemin approprié. Il est divisé en quatre sous-catégories, routage statique, Réactif, Proactif et Hybride :

3.4.1 Les protocoles de routage statique

Dans les protocoles de routage statique, chaque drone dispose d'une table de routage qui n'est pas mise à jour pendant la mission. Les protocoles de routage statiques sont applicables dans les cas où la topologie du réseau ne change pas et où les choix de sélection des routes sont limités. Ici, chaque drone communique avec les autres drones ou avec la station au sol et ne stocke que leurs informations.

Cela permet de réduire le nombre de liaisons de communication.

Toutefois, en cas d'échec de la mise à jour de la table de routage, il est obligatoire d'attendre que la mission soit terminée. Par conséquent, certains protocoles ne sont pas tolérants aux fautes [29]. Il y a plusieurs protocoles de routage statique parmi lesquels on peut citer :

- ✓ Load carry deliver routing (LCAD)
- ✓ Multilevel Hierarchical Routing (MLH)
- ✓ Protocole de routage proactif (PRP)
- ✓ Data Centric Routing(DCR)

3.4.2 Protocoles de routage proactifs

La PRP utilise une table de routage pour stocker tous les routes dans le réseau de communication. Ces tables de routage sont mises à jour et partagées périodiquement entre les nœuds. Lorsque la topologie change, les tables doivent être mises à jour. Le principal avantage du PRP est qu'il contient toujours les informations les plus récentes. Pour continuer à mettre à jour les tables de routage, des messages de routage doivent être échangés entre tous les nœuds de communication. Toutefois, cela nécessite une bande passante trop importante et rend le réseau inadapté. Lorsque la topologie du réseau change, elle montre la lenteur de la réponse qui entraîne un retard dans le réseau [30]. On peut citer parmi les protocoles de routage proactif :

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

3.4.3 Protocoles de routage réactifs (RRP)

Le RRP est un protocole de routage à la demande. Une route entre une paire de nœuds est stockée lorsqu'ils communiquent entre eux. Le principal objectif de conception du RRP est de surmonter le problème de surcharge des protocoles de routage proactifs. Au cours du processus de routage, une forte latence peut apparaître en raison du temps nécessaire pour trouver l'itinéraire. Le RRP comporte deux catégories : l'une est le routage à la source, l'autre le routage "hop-by-hop". Dans le cas du routage source, le paquet porte l'adresse complète de

la source à la destination, de sorte que les nœuds intermédiaires peuvent facilement faire suivre les paquets en fonction des informations. Un autre protocole de routage manuel, saut par saut, transporte simplement l'adresse de destination et l'adresse du saut suivant dans le paquet. Pour transmettre les données, un nœud intermédiaire est responsable de la maintenance des tables d'acheminement[30]. Parmi les protocoles de routage réactif on peut citer :

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

3.4.4 Protocole de routage hybride

Pour minimiser les problèmes de surcharge des protocoles proactifs et réactifs, des protocoles de routage hybrides sont introduits : Le RRP a besoin de plus de temps pour découvrir les itinéraires, tandis que le PRP a une importante surcharge de messages de contrôle. Le HRP convient aux réseaux à grande échelle qui peuvent comporter plusieurs sous-réseaux, où le routage intra-zone utilise le PRP et le routage inter-zone utilise le RRP [30]. Parmi les protocoles de routage hybrides on peut citer :

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

3.5 Protocole hiérarchique

Les protocoles de routage hiérarchiques fonctionnent en confiant aux nœuds des rôles spécifiques qui varient en fonction du temps. Certains nœuds sont élus et assument des fonctions particulières qui conduisent à une vision hiérarchisée de la topologie du réseau.

Par exemple, les nœuds élus peuvent être utilisés comme passerelles pour un certain nombre de nœuds qui se seront rattachés à ce dernier. Ainsi, le routage sera simplifié, puisque il se fera de passerelle à passerelle [30].

3.6 Routage basé sur la position (Protocole géographique)

Dans un protocole de routage géographique, un nœud est supposé connaître sa position géographique, celle de ses voisins et celle du nœud de destination. La connaissance du voisinage est périodiquement mise à jour à l'aide des messages Hello échangées entre nœuds voisins.

Chaque nœud connaît sa position géographique à l'aide d'un système tel que le GPS (Global Positioning System). Les données sont par la suite envoyées en direction de la position géographique du destinataire. Le voisin le plus proche de la destination retransmet le message. La difficulté réside dans le fait que chaque nœud doit connaître la position de tous ses voisins. Les messages Hello, qui sont envoyés à intervalles réguliers (mécanisme proactif) ou à la demande (mécanisme réactif), peuvent être utilisés pour donner des valeurs approximatives. La méthode réactive permet d'envoyer une requête de voisinage uniquement quand un nœud a besoin de la position de ses voisins, tandis que la méthode proactive inonde le réseau pour obtenir la dernière position de chaque nœud. Ces messages envoyés pour découvrir la position des voisins représentent la plus grande partie de l'overhead des protocoles géographiques. Le temps d'envoi et d'exécution de ces informations a aussi des répercussions sur le délai d'acheminement des messages entre une source et une destination du réseau [31].

3.6.1 Routage géographique prédictif

Il existe plusieurs formes et techniques de prédiction pour le transport de données utilisées dans les FANET. Le plus populaire est la prédiction basée sur l'emplacement géographique, la direction et la vitesse, pour prédire la position future d'un nœud donné. Tous ces paramètres peuvent donner une information précise sur le prochain emplacement du nœud de relais, ce qui diminue considérablement les pertes de paquets, et réduit parfois le délai de bout en bout entre deux nœuds communicants. Predictive-Optimized Link-State Routing (P-OLSR) est l'un de ce type de protocole, ou la version originale d'OLSR est modifiée pour partager les positions géographiques via les paquets Hello. En conséquence, chaque nœud connaît la position de ses voisins, ce qui permet de calculer la métrique de comptage de transmission attendu (ETX) par un facteur qui prend en compte la vitesse relative entre les drones [31].

3.7 Protocoles de routage basés sur l'intelligence des essaims (Swarm Intelligence SI)

Les algorithmes d'essaim utilisés pour le système d'intelligence d'essaim (SI), qui sont des systèmes auto-organisés et mis en œuvre dans le système robotique cellulaire. les algorithmes d'essaims sont une solution pour des problèmes complexes d'optimisation. Ils cherchent près solution optimale pour la mission cible. Le SI pouvant être présenté comme une optimisation algorithme dans la théorie de l'intelligence. La mise en œuvre d'un tel système repose sur algorithmes en essaim. Pour actualiser ce type d'algorithmes, les comportements sociaux des oiseaux ou des poissons en troupeaux ou des insectes en essaim sont modélisés. Ceux-ci peuvent être appropriés solution aux problèmes d'optimisation

difficiles. En tant que protocoles de routage basés sur un essaim, qui sont dédiés aux FANET, on distingue Bee Ad hoc et APAR [31].

3.8 Protocoles hétérogènes

Les protocoles de routage FANET hétérogènes maintiennent l'interaction entre les UAV et les différents types de nœuds au sol, que les nœuds soient fixes ou mobiles. De nombreux avantages sont fournis par l'utilisation de cette architecture. Dans un premier temps, il peut étendre la couverture du sous-réseau situé au sol. De plus, les nœuds fixes au sol peuvent fournir un réseau fédérateur fiable et une bande passante plus élevée pour permettre la maintenance et mieux contrôler ces nœuds. Différentes applications peuvent être distinguées selon que les informations sont partagées entre les nœuds et le but de l'échange de données. Certains protocoles sont basés sur la consommation d'énergie comme les protocoles EPLA (Energy-Efficient Packet Load Algorithm) et CBLADSR (Cluster-Based Location-Aided Dynamic Source Routing) [32], autres protocoles à hétérogénéité générale comme XLinGo (Cross-layer Link quality and Geographical aware beacon-less opportunistic routing protocol) et DPTR (Distributed Priority Tree-Based Routing Protocol)[32].

3.9 Description des protocoles d'étude AODV et DSDV

3.9.1 Protocol AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

3.9.1.1 Définition

AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) est un protocole réactif à vecteur de distance destiné aux réseaux mobiles Ad hoc [35]. Dans ce protocole, les nœuds se réfèrent à leurs tables de routage comme une base pour acheminer les paquets. Ces tables de routage contiennent des informations qui sont mises à jour à partir des données contenues dans les paquets de contrôle [34]. Lorsqu'un nœud source désire envoyer des données vers un destinataire, il vérifie tout d'abord dans sa table de routage s'il existe une route valide vers ce destinataire. Si la route n'est pas trouvée, le nœud source lance la procédure de découverte de route en diffusant en broadcast un paquet RREQ (Route Request message) à la recherche d'un chemin vers le destinataire.

A la réception de ce paquet, le nœud répond par un paquet RREP (Route Reply message) s'il est lui-même le destinataire ou s'il possède dans sa table une route vers la destination. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si la table de routage ne contient pas de route vers le destinataire, le nœud rediffuse le RREQ. Une fois la route trouvée, le nœud source transmet les paquets de données en transitant de proche en proche et chaque nœud détermine le prochain relais à partir de sa table

de routage. En cas de rupture de route, le nœud intermédiaire envoie un paquet RERR (Route Error message) pour informer la source qui décide ou non de recommencer l'envoi du paquet [33].

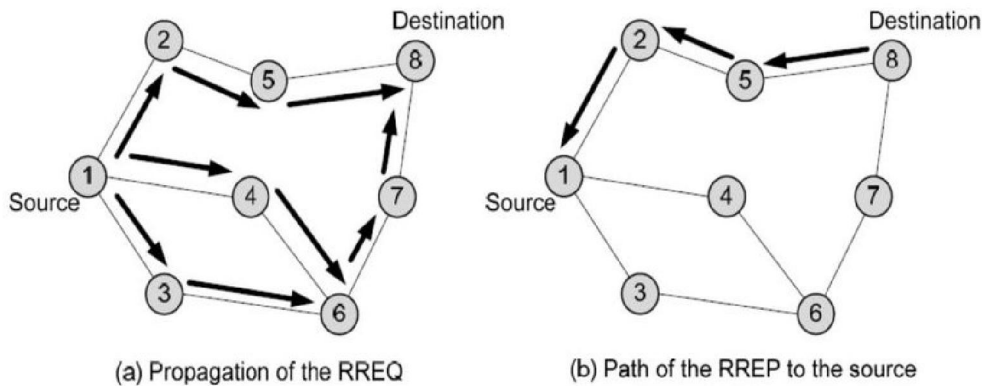


FIG.3.2 - Procédure de découverte de route dans AODV [33].

3.9.1.2 Le type des messages

En plus des messages (RREQ, RREP, RERR), l'AODV utilise des paquets contrôle HELLO qui permettent de vérifier la connectivité des routes :

➤ RREQ (Route Request Message)

Le message RREQ est utilisé par le nœud source pour découvrir une route valide vers un point particulier nœud de destination.

0									1									2									3												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type									J	R	G	D	U	Reserved									Hop Count																
RREQ ID																																							
Destination IP Address																																							
Destination Sequence Number																																							
Originator IP Address																																							
Originator Sequence Number																																							

FIG.3.3 - RREQ (Route Request Message) [34].

➤ RREP (Route Reply Message)

Le message RREP est utilisé pour établir une route entre le nœud de destination et la source nœud, et tous les nœuds intermédiaires entre eux intermédiaire au nœud de destination.

0									1									2									3												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type									R	A	Reserved									Prefix Sz									Hop Count										
Destination IP address																																							
Destination Sequence Number																																							
Originator IP address																																							
Lifetime																																							

FIG.3.4 - RREP (Route Reply Message) [34].

➤ **RERR (Route Error Message)**

Les messages d'erreurs sont générés si un nœud détecte un lien défaillant sur une route, il informe les nœuds de la route via un message RERR (Route Error).

0									1									2									3												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type									II	Reserved									Hop Count																				
Unreachable Destination IP Address (1)																																							
Unreachable Destination Sequence Number (1)																																							
Additional Unreachable Destination IP Addresses (if needed)																																							
Additional Unreachable Destination Sequence Numbers (if needed)																																							

FIG.4.5 - RERR (Route Error Message) [34].

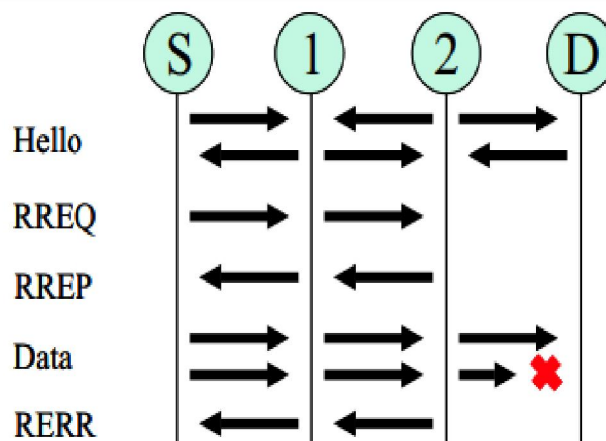


FIG.4.6 - Opération AODV [34].

3.9.2 Protocol DSDV (Dynamic destination Sequenced Distance Vector)

3.9.2.1 Définition

L'algorithme DSDV a été conçu spécialement pour les réseaux mobiles. Chaque nœud maintient une table de routage qui contient des informations sur les

destinations accessibles dans le réseau [35]. Ces informations comprennent : le nœud suivant utilisé pour atteindre la destination, le nombre de sauts qui sépare le nœud de la destination et le numéro de séquence (SN) qui correspond à un nœud destination. Ce numéro de séquence permet de distinguer les nouvelles routes des anciennes et d'éviter la formation de boucles de routage. Les mises à jour des tables sont transmises périodiquement à travers le réseau. Quand un nœud reçoit un paquet de mise à jour, il le compare avec les informations existantes dans sa table de routage. Toute entrée dans la table est mise à jour si l'information reçue est plus récente (ayant un numéro de séquence plus grand), ou si elles ont le même numéro de séquence mais avec une distance plus courte.

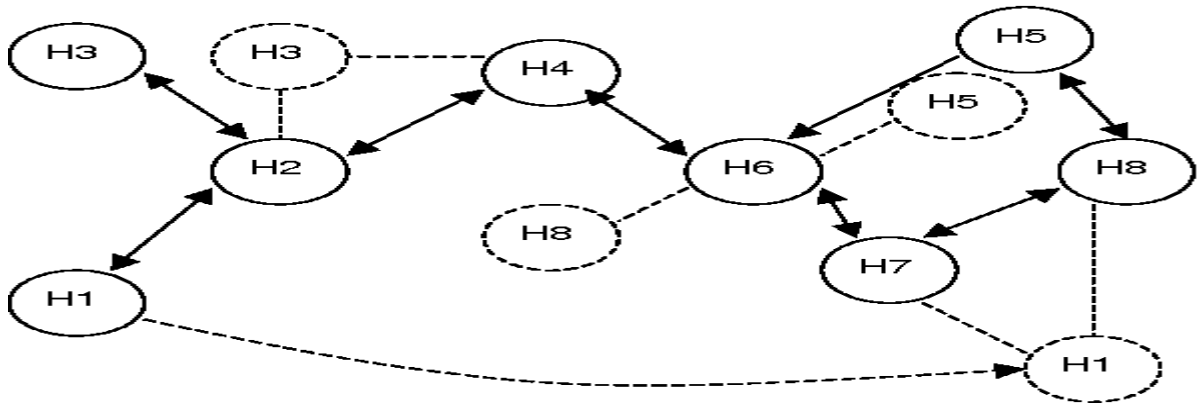


FIG.4.7 - Procédure de découverte de route dans DSDV [35].

3.9.2.2 Fonctionnement du protocole

Périodiquement chaque nœud dans le réseau diffuse par inondation un paquet de mise à jour des tables de routage qui inclue les destinations accessibles et le nombre de sauts exigés pour atteindre chaque destination avec le numéro de séquence lié à chaque route. Des paquets de mise à jour sont aussi diffusés immédiatement s'il y a un changement dans la topologie du réseau afin de propager les informations de routage aussi rapidement que possible. A la réception d'un paquet de mise à jour, chaque nœud le compare avec les informations existantes dans sa table de routage. Les routes les plus récentes (qui ont le plus grand numéro de séquence) avec la distance la plus courte sont gardées, les autres sont simplement ignorées. DSDV fournit à tout moment des routes valables vers toutes les destinations du réseau, mais l'inondation des paquets de mise à jour (périodique et en cas de changement de topologie) cause une charge de contrôle importante au réseau.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les protocoles de routage pour les FANET. De plus, une taxonomie complète de ces protocoles étudiés est fournie,

dans laquelle les protocoles de routage sont classés en Cinq catégories principales :

- (1) Protocoles de routage basés sur la topologie.
- (2) protocoles de routage hiérarchiques.
- (3) Protocoles de routage basés sur la position(Protocole géographique).
- (4) Protocoles de routage basés sur l'intelligence en essaim (intelligence distribuée)
- (5) Protocoles hétérogènes.

4

Présentation et simulation des protocoles de routage

4.1 Introduction

Dans les trois premiers chapitres, nous avons fait une étude détaillée des réseaux sans fil, en particulier des réseaux Fanet. Le problème de conception le plus important pour un système multi-UAV est de choisir le bon protocole de routage.

Dans ce chapitre, nous analysons et comparons les performances des protocoles de deux familles différentes, réactifs et proactifs (AODV et DSDV) sous des modèles mobilité de FANET basés sur différentes métriques de réseau afin de voir l'efficacité de chaque protocole de routage et d'aider les futures études de développement. Ensuite, nous présentons les résultats de leur performance en utilisant le simulateur OMNET++ en se basant sur diverses métriques réseau.

4.2 La simulation

La simulation est une technique utilisée pour exécuter le réseau sur l'ordinateur et avec ceci, le comportement du réseau est calculé à l'aide de quelques calculs mathématiques qui sont utilisés par les organisations en réseau [36]. Ils sont utilisés pour permettre aux chercheurs de développer, tester et diagnostiquer des scénarios de réseau difficiles à simuler dans le monde réel. C'est fondamentalement utilisé pour tester les nouveaux protocoles réseau ou pour modifier les protocoles existants sous contrôle et milieu de reproduction. Différents types de topologies peuvent être conçus en utilisant divers types de nœuds (hôte, ponts, routeurs, concentrateurs et unités mobiles, etc.) [37].

4.3 Types de simulation

En fonction du type d'évènements dans la simulation, nous distinguons deux types des systèmes de simulation: les systèmes discrets et les systèmes continus [38].

4.3.1 Systèmes de simulation discrète

Sont des systèmes pour lesquels les variables concernées par la simulation ne changent d'état qu'en un nombre fini de points sur l'axe du temps. On appelle également ces systèmes: systèmes de simulation à évènements discrets [38].

4.3.2 Systèmes de simulation continue

Ce sont des systèmes pour lesquels les variables peuvent changer d'état à n'importe quel instant pendant la simulation [38].

4.4 Les simulateurs réseaux

Les outils de simulation peuvent être open source ou commerciaux. Ils sont téléchargés gratuitement depuis leur site officiel. les simulateurs commerciaux et open source sont passés en revue. Exemples: OPNET(Optimum Network Performance), NS-2 (Network Simulator 2), OMNET++ (Objective Modular Network), GloMoSim (Global Mobile Simulator), QualNet, NetSim, JiST/SWANS, J-Sim (Java-based simulation system), NS-3 (Network Simulator 3).

Simulation	Évolutivité	Extensibilité	Documentation	Network Support
OPNET	Enterprise	Oui	Bien	Wireless Ad hoc, Cellular, WLAN, PAN
NS-2	Small-scale	Oui	Pauvre	Wired, Wireless, Ad, hoc, satellite
OMNET++	Small-scale	Oui	Moyen	Wired, Wireless AD hoc
GloMoSim	Large-scale	Oui	Bien	Wireless, WSN, Ad hoc
QualNet	Enterprise	Oui	Bien	MANET, Wired, Cellular, Satellite
NetSim	Large-scale	Oui	Bien	Wired, Wireless AD hoc
JiST/SWANS	Large-scale	Oui	Moyen	Wired, Wireless AD hoc
J-Sim	Medium	Oui	Moyen	Wired, Wireless WSN
NS-3	Large-scale	Oui	Bien	Wired, Wireless AD hoc, IP and Non IP

TAB.4.1 – Comparaison des caractéristiques importantes des simulateurs de réseau [Web3].

4.5 Le simulateur OMNET++

OMNET++ (Objective Modular Network Testbed in C++) est un outil bien conçu environnement de simulation d'événements discrets tels que NS2 et NS3. Il a été développé par andras Varga de l'Université technique de Budapest, avec quelques contributeurs. La première utilisation d'OMNET++ était pour la simulation de réseaux de communication, mais plus tard il a été utilisé pour les systèmes informatiques complexes, organiser des réseaux ou des architectures matérielles en raison de son architecture souple. Le langage C++ est utilisé pour la programmation des composants (ou modules) et la bibliothèque de classes C++ est également utilisée pour en développer de nouveaux, qui contient un noyau de simulation et des classes utilitaires pour la génération de nombres aléatoires, collecte de statistiques, découverte de topologie, etc. Un langage de haut niveau appelé Network.



FIG.4.1 - le lancement du simulateur OMNET++.

La description (NED) est utilisée pour regrouper des composants individuels dans des composants et modèles. À côté de la bibliothèque du noyau de simulation, l'environnement contient différentes fonctionnalités qui sont Graphical Network Editor (GNED), un compilateur NED, graphique (Tkenv) et ligne de commande (Cmdenv) interfaces pour l'exécution de la simulation, des outils graphiques pour l'analyse des résultats de la simulation, un outil de documentation du modèle, utilitaires (outil de génération de graines de nombres aléatoires, etc.), documentation et exemples de simulations. La simulation dans un réseau sans fil nécessite des extensions externes pour OMNET++. Là sont deux extensions célèbres sont INET Framework et Mobility Framework, qu'ils

fournissent un support pour la simulation de réseau sans fil [Web 3].

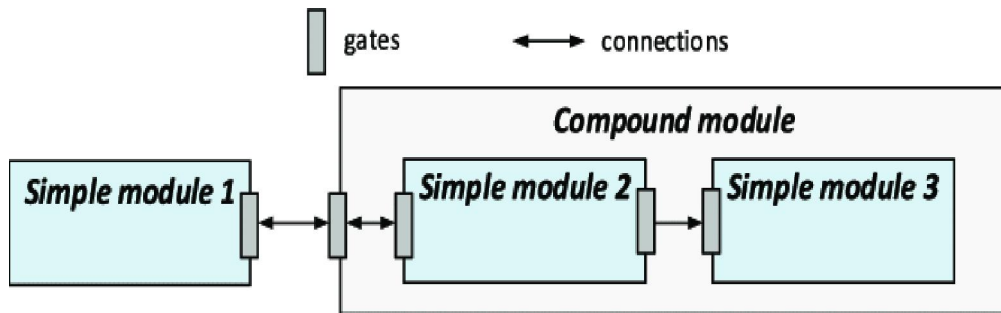


FIG.4.2 - Simple et composant Connexion du module OMNeT ++ [Web 3].

4.6 Les principaux fichiers d'OMNET++

4.6.1 Fichier(.NED)

Utilise le langage NED de description de réseau. Il peut être utilisé en 2 modes : Mode Graphique et Mode Source qui permettent de décrire les paramètres et les ports du module. Les erreurs comises sont indiquées en temps réel par un point rouge situé à la gauche du code.

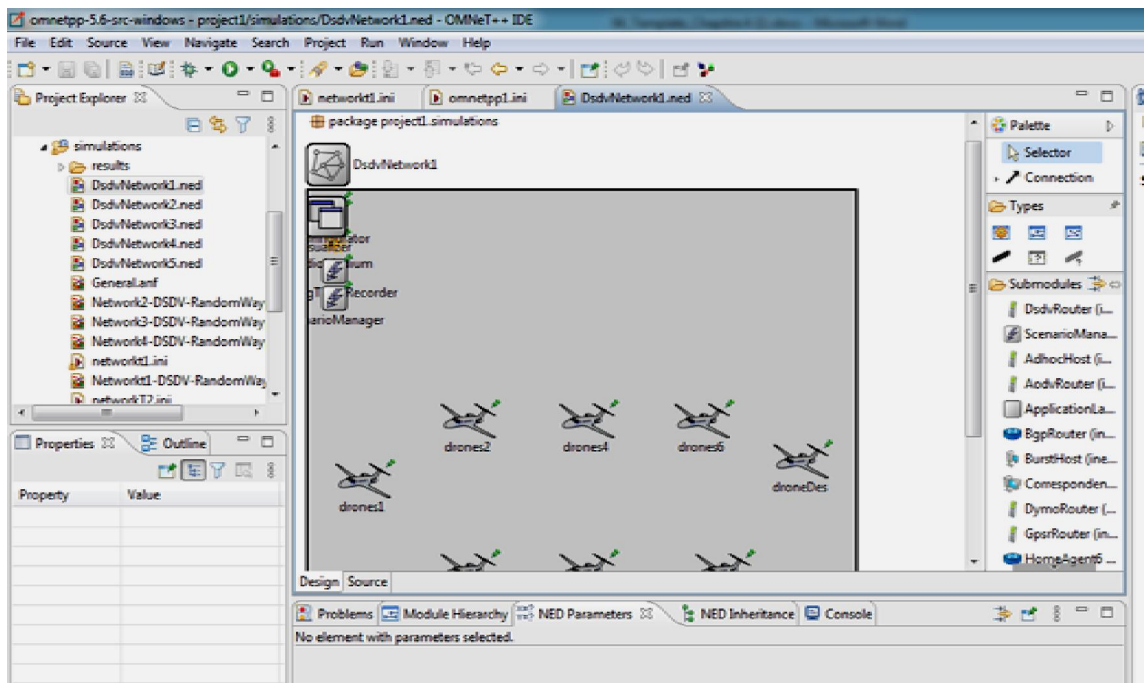


FIG.4.3 - Fichier NED en mode Graphique.

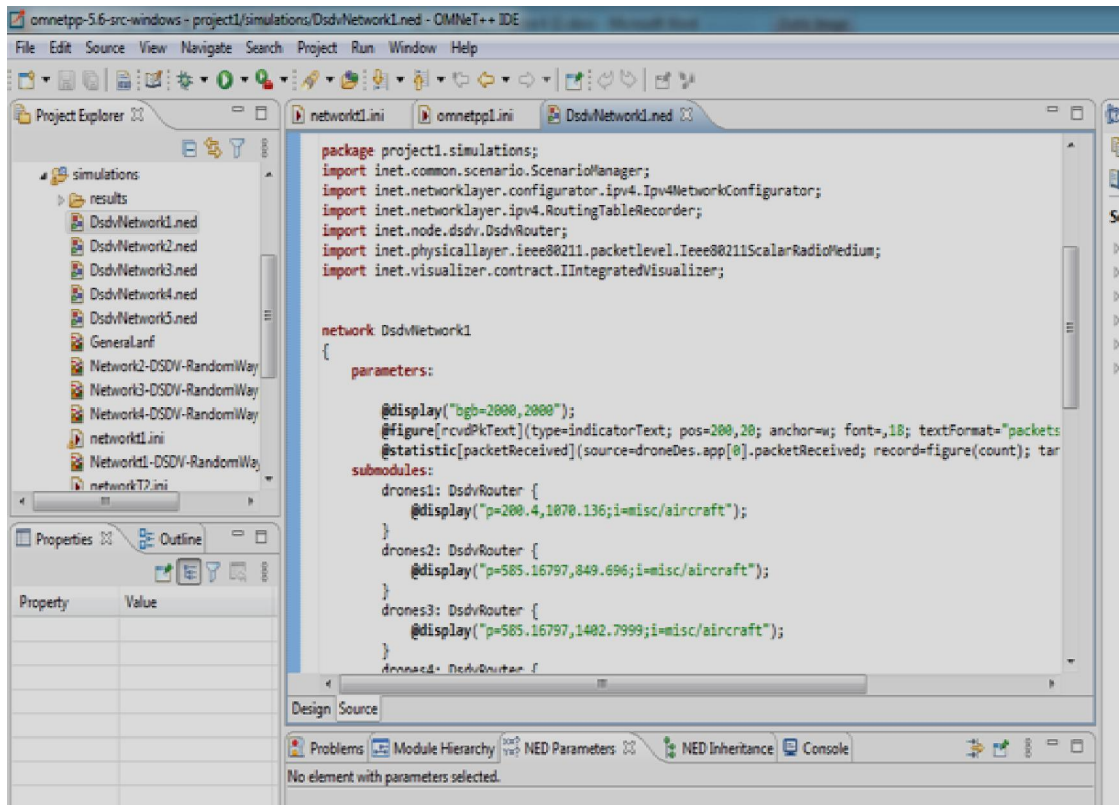


FIG.4.4 - Fichier NED en mode source.

4.6.2 Fichier(.ini)

Est lié étroitement avec le fichier NED. Permet à l'utilisateur d'initialisé les paramètres des différents modules ainsi la topologie du réseau.

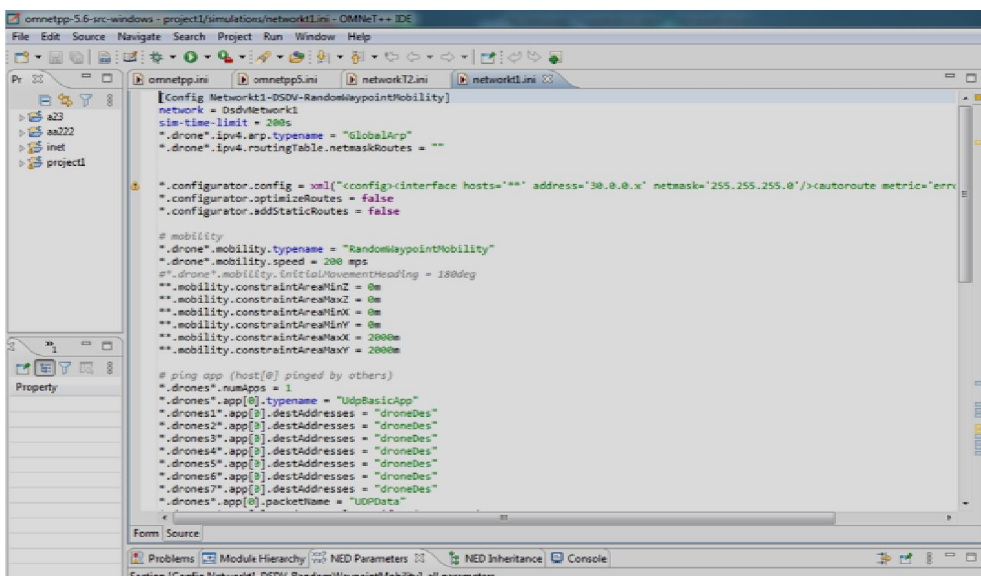


FIG.4.5 – Exemple d'un Fichier *.ini .

4.7 INET Framework

INET Framework est une bibliothèque de modèles open source pour l'environnement de simulation OMNET ++. Il fournit des protocoles, des agents et d'autres modèles aux chercheurs et étudiants travaillant avec des réseaux de communication. INET est particulièrement utile lors de la conception et de la validation de nouveaux protocoles ou lors de l'exploration de scénarios nouveaux ou exotiques.

INET contient des modèles pour la pile Internet (TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP, etc.), les protocoles de couche liaison filaire et sans fil (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, etc.), la prise en charge de la mobilité, les protocoles MANET, DiffServ, MPLS avec signalisation LDP et RSVP-TE, plusieurs modèles d'application et de nombreux autres protocoles et composants.

4.8 Métriques de la simulation

Mesures de performance sélectionnées Pour évaluer les performances des protocoles de routage inclus Dans cette étude:

- **Packet Delivery Ratio (PDR)** : le nombre de paquets qui ont été livrés avec succès à destination. Le rapport entre le client des colis provenant des sources CBR «application layer » et le nombre de colis reçus par le puits CBR à la destination finale.

$$\text{PDR} = \frac{\sum \text{Number of packets received}}{\sum \text{number of packets sent}}$$

- **Consommation d'énergie** : c'est une valeur négative qui représente la quantité d'énergie consommé.

4.9 Étudier et comparer les performances des deux protocoles

Nous avons fait la simulation en utilisons OMNET++ V.5.6.2 avec Inet V.4.2.5, Pour notre travail, nous avons utilisé les paramètres de simulation et de configuration suivants :

Paramètre	Valeur
Type de modèle de mobilité	RandomWaypoint
Nombre de nœuds	8, 12, 16, 20
Durée de simulation (sec)	200, 300, 400,500
Energie initiale (W=1j)	1
La dimension de topologie(m)	2000*2000

TAB.4.2 – Simulation paramètres.

Dans cette section, nous allons évaluer les résultats des performances des simulateur OMNET ++ étudiées avec les protocoles de routage AODV, DSDV et comparés en termes de taux de livraison de paquets et la consommation d'énergie avec un modelé de mobilité(RandomWaypoin).

4.9.1 Consommation d'énergie (Energie Balance)

les figures 4.6 et 4.7 qui montrent les résultats de Consommation d'énergie avec un nombre variable de nœuds et de temps de simulation dans le simulateur OMNeT++. Ce sont les moyennes arithmétiques des résultats obtenus après avoir essayant dans les quatre topologies réalisées en simulateur OMNET,on peut observer qu'en général, la consommation d'énergie augmente à mesure que le nombre de nœuds augmente. En détails, on peut remarquer que DSDV et AODV obtiennent des résultats proches. Cependant, en augmentant le nombre de nœuds, AODV obtient de meilleurs résultats que DSDV, sauf en remarquer que dans le Temps de simulation=(200 et 400) ,et nombre des nœuds=(8 et 16) les deux protocole sont égaux. En résumé AODV obtient de meilleurs résultats que DSDV dans le modèle de mobilité RandomWaypoint.

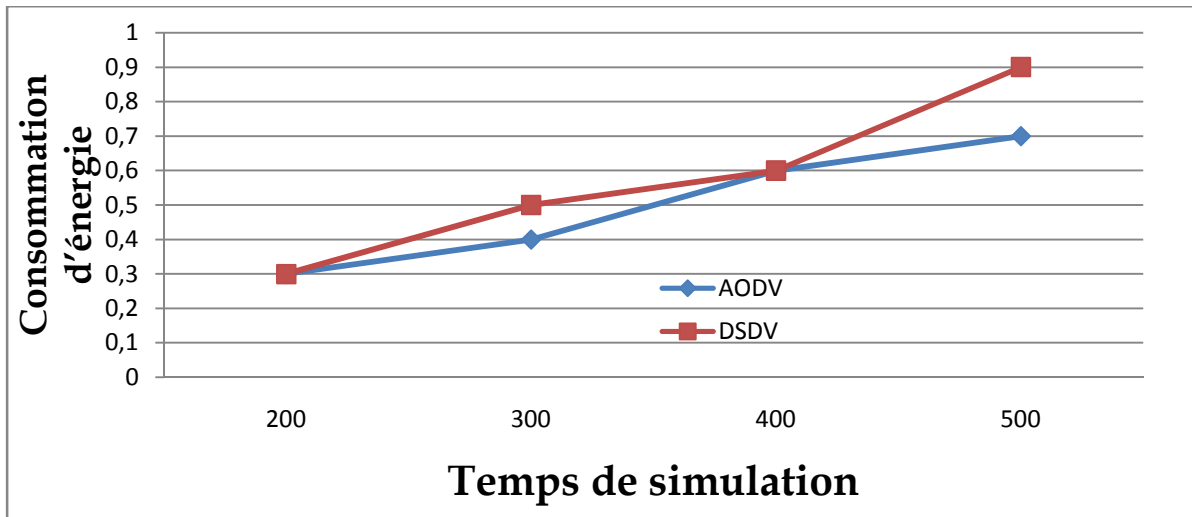


FIG.4.6 - Consommation d'énergie .VS. Temps de simulation.

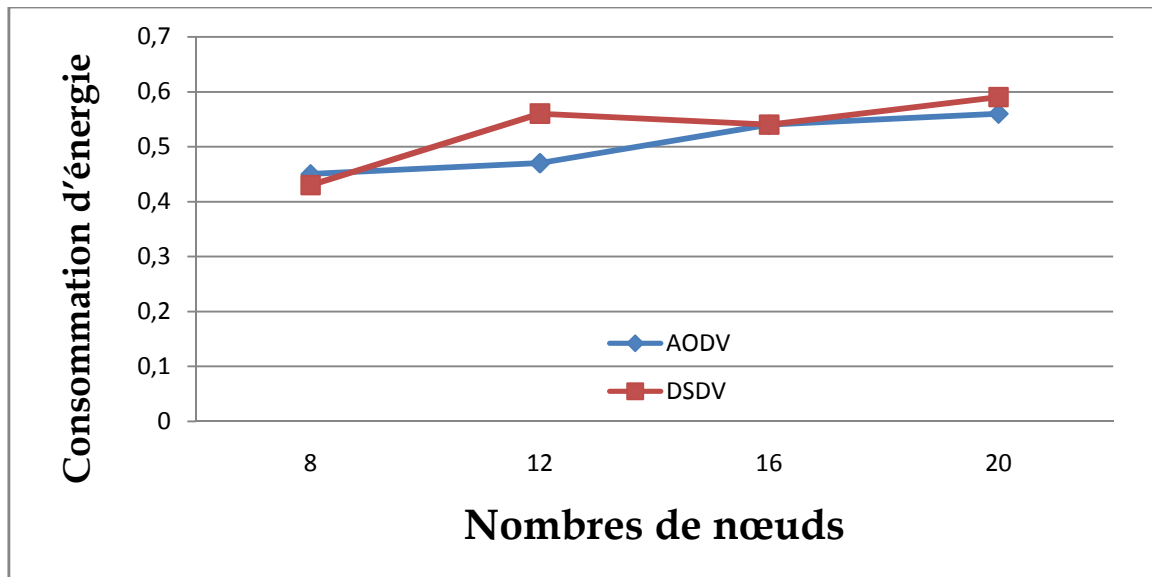


FIG.4.7 - Consommation d'énergie .VS. Nombres de nœuds.

4.9.2 Packet Delivery Ratio (PDR)

Les figures 4.8 et 4.9 montrent les résultats de PDR avec un nombre variable de nœuds et de temps de simulation dans le simulateur OMNET++. Ce sont les moyennes arithmétiques des résultats obtenus après avoir essayé dans les quatre topologies réalisées en simulateur OMNET++. Il a fourni un meilleur PDR pour le protocole de routage AODV par rapport au protocole de routage DSDV sur le modèle de mobilité RandomWaypoint.

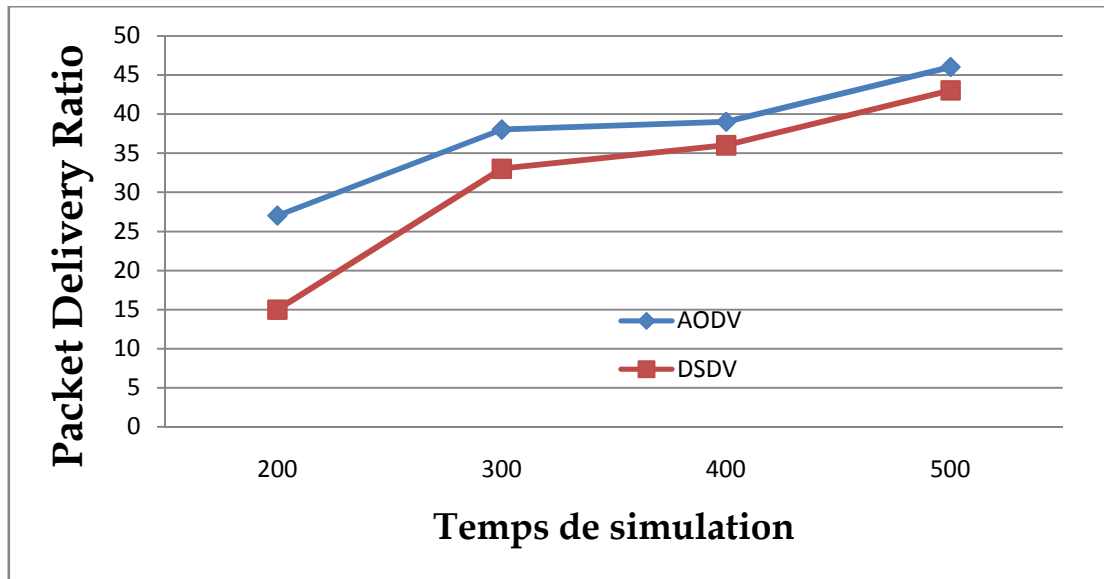


FIG.4.8 – Packet Delivery Ratio .VS. Temps de simulation.

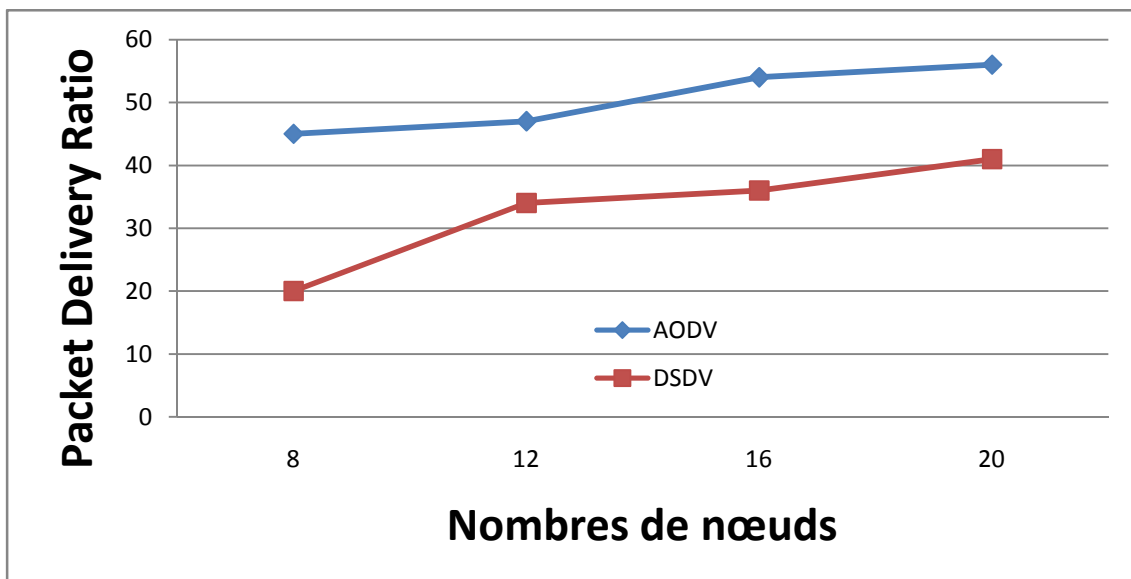


FIG.4.9 – Packet Delivery Ratio .VS. Nombres de nœuds.

4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une performance de deux protocoles de routage, ces protocoles un proactif DSDV et l'autre réactif AODV. Nous avons utilisé deux métriques qui sont le taux de livraison de paquets (Packet Delivery Ratio) et Consommation d'énergie (Energie Balance) avec différents scénarios

pour évaluer la performance de chacun d'eux, nous avons utilisé un nombre différent des nœud entre 8 et 20 nœud, les deux protocoles mentionnés sont configurés dans chaque scénario afin de se comparer.

Le modèle de mobilité (RandomWaypoint) implémenté dans tous scénarios. Après collecte et analyse des résultats nous concluons que : malgré l'échange de temps de simulation (200s a 500s) AODV atteint toujours les meilleurs résultats, on peut conclure que AODV accompli une bonne performance par rapport au DSDV dans toutes les métriques données.

Conclusion générale & perspectives

A travers ce projet de fin d'étude, notre objectif est la comparaison entre les deux protocoles de routages des familles différentes (AODV réactif et DSDV proactif) dans Les réseaux FANET après une définition détaillée de ceux-ci, et de leurs composants, et architecture et l'étude de caractéristiques (modèles de mobilités, densité de nœuds, Bande de fréquences, etc.). On a trouvé que c'était son rôle Prometteur dans un large éventail d'opérations critiques, il est utilisé dans des situations difficiles telles que les inondations, les zones de guerre et les opérations de sauvetage où le MANET conventionnel ne peut pas être déployé car il utilise des nœuds mobiles au sol.

Nous avons étudiés les classes de routage pour s'adapter aux limitations imposées par les réseaux ad hoc. Cela se fait en suggérant des moyens moins gourmands en ressources, Au cours de ce projet, nous avons concentré notre étude sur les deux protocoles qui intéresser, AODV et DSDV.

Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé l'émulateur OMNET++, afin de comparer les taux de livraison de paquets et la consommation d'énergie avec un modèle de mobilité (Random Waypoint) Protocoles AODV et DSDV.

Quelques perspectives :

- Nous visons à l'optimisation de AODV en introduisant à notre mécanisme de communication opportuniste, afin de diminuer le délai de transmission des paquets.
- L'extension de nos simulations aux autres protocoles de routage du groupe FANET à savoir les protocoles hybrides, afin de comparer les trois classes.

Bibliographie

- [1] Boukhamla. A, "Réseaux mobile", Support de cours M1, Université KasdiMerbah–Ouargla-,2017.
- [2] Paroux, G. (2005, November). Une plate-forme pour les échanges P2P sur les réseaux mobiles ad hoc. In *MajecSTIC 2005: Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC* (pp. 275-282).
- [3] Md. ArafaturRahman. Enabling drone communications with WiMAXTechnology.University of Naples Federico II, Naples, Italy.pp3-4.
- [4] DIAWARA Mahamadou. « Contribution et étude d'un scénario réel de la télésurveillance en utilisant les drones et en appliquant l'intelligence ».2020.pp 3-4.
- [5] Hajlaoui, R. (2018). Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de vehicules (Doctoral dissertation, Bourgogne Franche-Comté).
- [6] Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013). Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254-1270.
- [7] Oubbati, O. S., Lakas, A., Zhou, F., Güneş, M., & Yagoubi, M. B. (2017). A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc Networks (FANETs). *Vehicular Communications*, 10, 29-56.
- [8] Koffi, A. J. H. (2021). Optimisation d'un réseau ad hoc de véhicules aériens sans pilote (UAV) dans un environnement urbain: Positionnement des UAV à l'aide de l'apprentissage automatique (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [9] Ilyas, H., & Sofiane, Z. (2021). Evaluation and comparison study of transport layer protocols for data transmission in flying ad-hoc networks.
- [10] Srivastava, A., & Prakash, J. (2021). Future FANET with application and enabling techniques: Anatomization and sustainability issues. *Computer Science Review*, 39, 100359.
- [11] Ilyas, H., & Sofiane, Z. (2021). Evaluation and comparison study of transport layer protocols for data transmission in flying ad-hoc networks.

- [12] Bekmezci, I., Sen, I., & Erkalkan, E. (2015, June). Flying ad hoc networks (FANET) test bed implementation. In 2015 7th International conference on recent advances in space technologies (RAST) (pp. 665-668). IEEE.
- [13] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Enquête sur les problèmes importants dans les réseaux de communication UAV," IEEE Communications Survey & Tutoriaux, vol. 18, no. 2, pp. 1123- 1152, 2015 .
- [14] Alamgir Safi, InamUllah Khan, IjazMansoor Qureshi, Muhammad Asghar Khan, "Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Une revue des architectures de communication et des protocoles de routage", Université d'Islamabad, Pakistan,2017 .
- [15] Muhammad Asghar Khan, FahimullahKhanzada, IjazMansoor Qureshi, "Un système de communication hybride pour un Déploiement à faible coût du futur Flying Ad-Hoc (FANET)", Islamabad 44000, Pakistan, 2019.
- [16] ZIOU, A. (2020). Réalisation d'un système de suivi d'objets basé sur les Drones.
- [17] Kumari, K., Sah, B., & Maakar, S. (2015). A survey: different mobility model for FANET. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 5(6).
- [18] Zafar, W., & Khan, B. M. (2017). A reliable, delay bounded and less complex communication protocol for multicluster FANETs. Digital Communications and Networks, 3(1), 30-38.
- [19] M. M. Mowla, M. A. Rahman, and I. Ahmad, "Assessment of Mobility Models in Unmanned Aerial Vehicle Networks," in 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp. 1-4: IEEE.
- [20] Zafar, W., & Khan, B. M. (2016). Flying ad-hoc networks: Technological and social implications. IEEE Technology and Society Magazine, 35(2), 67-74.
- [21] Maxa, J. A. (2017). Architecture de communication sécurisée d'une flotte de drones (Doctoral dissertation, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)).

- [22] Bouachir, O. (2014). Conception et mise en oeuvre d'une architecture de communication pour mini-drones civils (Doctoral dissertation, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)).
- [23] Dubois, S., Vanhellefont, Y., & de Bouw, M. (2018). Les drones au service de la construction: technologies, enjeux et perspectives.
- [24] Blanco-Montenegro, I., De Ritis, R., & Chiappini, M. (2007). Imaging and modelling the subsurface structure of volcanic calderas with high-resolution aeromagnetic data at Vulcano (Aeolian Islands, Italy). *Bulletin of Volcanology*, 69(6), 643-659.
- [25] Stefano Puliti, Hans Ole Ørka, Terje Gobakken, Erik Næsset, Inventaire des petites zones forestières à l'aide d'un système aérien sans pilote, Université norvégienne des sciences de la vie, ISSN 2072-4292, 2015.
- [26] Imad Jowhar, Nader Mohammed , Jameel Al-Jaroodi , Dharma P. Agrawal , Sheng Zhang, Communication et mise en réseau des systèmes basés sur les UAV: classification et architectures associées, USA, No. 31T045, 2017.
- [27] Spitzer, C., *Digital Avioniques Systèmes : Principes et pratique* 2e édition, Blackburn Press, 2001.
- [28] Enric Pastor, Juan Lopez, Pablo Royo, "Une architecture logicielle matérielle pour la charge utile des UAV et le contrôle de mission", Département d'architecture informatique, technique Université de Catalogne, Castelldefels (Barcelone), Espagne, 2006.
- [29] Khan, M. A., Safi, A., Qureshi, I. M., & Khan, I. U. (2017, November). Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols. In *2017 First international conference on latest trends in electrical engineering and computing technologies (INTELLECT)* (pp. 1-9). IEEE.
- [30] Arafat, M. Y., & Moh, S. (2019). Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey. *IEEE access*, 7, 99694-99720.
- [31] Sharma, S. (2009, October). P-OLSR: Position-based optimized link state routing for mobile ad hoc networks. In *2009 IEEE 34th Conference on Local Computer Networks* (pp. 237-240). IEEE.

- [32] Oubbati, O. S., Atiquzzaman, M., Lorenz, P., Tareque, M. H., & Hossain, M. S. (2019). Routing in flying ad hoc networks: Survey, constraints, and future challenge perspectives. *IEEE Access*, 7, 81057-81105.
- [33] Bouguer Safia, « Etude et simulation comparative entre les réseaux de capteurs sans fils traditionnels et les réseaux de capteurs véhiculaires » Mémoire d'Ingénieur de l' Université Abou BekrBelkaid Tlemcen, Options Système de Télécommunication, Soutenu en Juin 2012, 81pages.
- [34] Ajmal, S., Rasheed, A., Qayyum, A., & Hasan, A. (2014). Classification of VANET MAC, Routing and Approaches A Detailed Survey. *J. Univers. Comput. Sci.*, 20(4), 462-487.
- [35] Gawedzki, I. (2008). Algorithmes distribués pour la sécurité et la qualité de service dans les réseaux ad hoc mobiles (Doctoral dissertation, Paris 11).
- [36] Siraj, S., Gupta, A., & Badgujar, R. (2012). Network simulation tools survey. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 1(4), 199-206.
- [37] Mallapur, S. V., & Patil, S. R. (2012). Survey on simulation tools for mobile ad-hoc networks. *International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC)*, 2(2), 241-248.
- [38] Füßler, H., Widmer, J., Käsemann, M., Mauve, M., & Hartenstein, H. (2003). Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 1(4), 351-369.
- [39] Sumra, I. A., Sellappan, P., Abdullah, A., & Ali, A. (2018). Security issues and challenges in MANET-VANET-FANET: A survey. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 5(17), e16-e16.

Webographie

- [Web1] <https://www.commentcamarche.net/contents/1309-reseaux-sans-fil-wireless-networks>, date 04/04/2022, heur 21 : 14.
- [Web2] <https://www.futurasciences.com/sciences/definitions/aeronautique-e-drone-6174/>.date 10/03/2022, heur 22 : 30.
- [Web3] <https://omnetpp.org/>. Date 22/05/2022, heur 23:47.
- [Web4] https://www.researchgate.net/publication/340010404_Smart_IoT_ControlBased_Nature_Inspired_Energy_Efficient_Routing_Protocol_for_Flying_Ad_Hoc_Network_FANET, date 07/06/2022, heur 10:29.