

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Département d'Informatique et des Technologies de l'Information



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Informatique

Domaine : Informatique et Technologie de l'Information

Spécialité : Administration et sécurité des réseaux

Présenté par : DJIED Souad Imane

HALIMI Ibtihal

Mémoire :

**Evaluation des Performances des Différents Protocoles de
Routage des Réseaux AD HOC pour les Réseaux
Multi-UAV (FANET)**

Etude Comparative des Protocoles DSDV et AODV

Mr. BENMIR Abdelkader
Mr. CHERADID Abdellatif
Mr. NAMLI Okba

Président
Encadreur
Examineur

UKM Ouargla
UKM Ouargla
UKM Ouargla

Année universitaire : 2019-2020


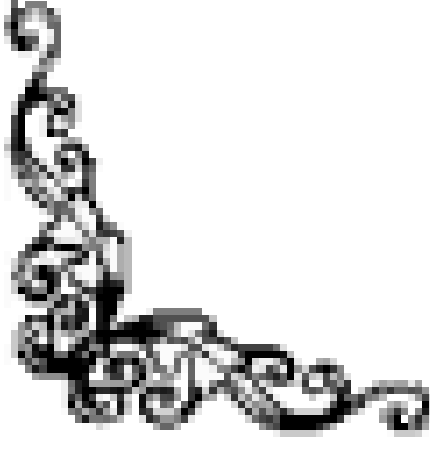


Remerciements

D'abord nous remercions le bon dieu de nous avoir donnée santé, courage, volonté et foi pour réaliser ce travail.

Au terme de la rédaction de ce mémoire, nous tenons à remercier notre encadreur Pr. CHERADID ABDELLATIF pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail. Et nous remercions le Professeur ALFONSO qui répond à toutes nos questions dans Google groupe et sur Email. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'évaluer notre travail.

On n'oublie pas de remercier nos parents, nos frères et sœurs pour leur soutien moral et physique, pour les merveilleux moments qu'on a passés ensemble, et à tous les amis sans exception.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chères personnes du monde, mon père et
ma mère.*

*A mes sœurs Amel (sans oublier sa petit Islam)
et Sana et mes frères Belkhir et Walid et à tous
la famille Halimi et Marif.*

*Je dédie aussi tous mes amis et mon chef et tous
mes collègues de travail à l'LTPS et LNHC qui
m'ont accompagné et soutenu tout au long de ce
travail.*

IBTIHAL





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chères personnes du monde, mon père et
ma mère.*

*A mes sœurs Kawther et Yasmine (sans oublier
sa petite Nadjah) et mon frère Lotfi et à toute la
famille Djied.*

*Je dédie aussi tous mes amis (Selma et Oussama)
et tous mes collègues de travail qui m'ont
accompagné et soutenu tout au long de ce
travail.*

SOUAD IMANE



Résumé

Véhicule aérien sans pilote, est un avion sans pilote à bord, il peut être télécommandé de manière autonome ou par un pilote à un poste de contrôle au sol. Récemment, la production de petits drones est devenue possible grâce aux progrès technologiques dans le domaine de l'électronique, des capteurs et des systèmes de communication. Les petits UAV peuvent être utilisés pour plusieurs applications militaires, commerciales et civiles. Cependant, la capacité d'un seul et petit UAV est insuffisante. Les drones multiples peuvent créer un système qui dépasse les limites d'un seul petit drone. Les réseaux ad hoc volants (FANET) sont composés de drones, permettant une grande mobilité et fournissant une connectivité aux zones reculées. Dans FANET, les drones sont intégrés dans une équipe pour atteindre des objectifs de haut niveau. Cependant, connecter plusieurs UAV dans un réseau ad hoc est le défi majeure des réseaux FANET. Ce niveau de coordination nécessite une architecture de communication appropriée et des protocoles de routage qui peuvent être mis en place sur des nœuds volants hautement dynamiques afin d'établir une communication fiable et robuste.

La principale contribution de cette mémoire comprend une étude des différents protocoles de routage en réseau Ad Hoc et leur compatibilité avec Flying Ad Hoc Network, ce type de réseau qui possède ses propres fonctionnalités. Et pour booster notre travail nous avons fait une comparaison entre deux protocoles des différentes familles : le protocole DSDV qui est un protocole proactif et l'autre est le protocole AODV qui, à son tour, appartient à la famille des protocoles, utilisant différents modèles de mobilité pour évaluer les performances des deux protocoles. La simulation a été réalisée à l'aide d'un outil de simulation de réseau OMNET.

Mot clé : Véhicule aérien sans pilote, FANET, réseau Ad Hoc, Protocol Routage : DSDV et AODV, simulateur OMNET++

Abstract

Unmanned aerial vehicle is an aircraft with no pilot on board, it can be remotely controlled autonomously or by a pilot at a ground control station. Recently the production of small UAVs became possible with technological progress in the field of electronics, sensors and communication systems. Small UAVs can be used for several military, commercial and civilian applications. However, the capability of a single and small UAV is inadequate. Multiple-UAVs can make a system that is beyond the limitations of a single small UAV. Flying ad hoc networks (FANET's) are composed of UAVs, allowing great mobility and providing connectivity to remote areas. In FANET UAVs are integrated into a team to achieve high-level goals. However, connecting multiple UAVs in ad-hoc network is a big challenge. This level of coordination requires an appropriate communication architecture and routing

protocols that can be set up on highly dynamic flying nodes in order to establish a reliable and robust communication.

The main contribution of this memory includes a study of the various routing protocols in Ad Hoc network and their compatibility with Flying Ad Hoc Network, this kind of network which has its own features. and to boost our work we have make a comparison between two protocols the different families: the proactive DSDV protocol and the AODV reactive protocol using different mobility models to evaluate the performance of the two protocols. The simulation was done using an OMNET network simulation tool.

Keyword : Unmanned Air Vehicle, FANET, Ad Hoc Network, Protocol Routing : DSDV and AODV, OMNET++ simulator.

الملخص

مركبة جوية بدون طيار، هي طائرة بدون طيار على متنها، ويمكن التحكم فيها عن بعد بشكل مستقل أو بواسطة طيار في محطة تحكم أرضية. في الآونة الأخيرة، أصبح إنتاج الطائرات بدون طيار الصغيرة ممكناً مع التقدم التكنولوجي في مجال الإلكترونيات وأجهزة الاستشعار وأنظمة الاتصالات. يمكن استخدام الطائرات بدون طيار الصغيرة في العديد من التطبيقات العسكرية والتجارية والمدنية. ومع ذلك، فإن طائرة بدون طيار عندما تكون منفردة تكون ذات قدرة محدودة وغير كافية. يمكن للطائرات بدون طيار المتعددة إنشاء نظام يتجاوز حدود طائرة بدون طيار صغيرة واحدة. تتكون الشبكات المخصصة للطيران (FANETs) من الطائرات بدون طيار، مما يتيح تنقلاً كبيراً ويوفر الاتصال بالمناطق النائية في شبكات FANET يتم دمج الطائرات بدون طيار في فريق لتحقيق أهداف عالية المستوى. ومع ذلك، فإن توصيل العديد من الطائرات بدون طيار في شبكة مخصصة يمثل تحدياً كبيراً. يتطلب هذا المستوى من التنسيق بنية اتصال مناسبة وبروتوكولات توجيه يمكن إعدادها على عقد طيران ديناميكية للغاية من أجل إنشاء اتصال موثوق وقوي.

تشمل المساهمة الرئيسية لهذه الرسالة دراسة بروتوكولات التوجيه المختلفة في شبكة Ad Hoc ومدا توافقها مع Flying Ad Hoc Network ، هذا النوع من الشبكات الذي له ميزاته الخاصة. ولتعزيز عملنا ، قمنا بإجراء مقارنة بين بروتوكولين من عائلتين مختلفين بروتوكول DSDV الاستباقي والبروتوكول التفاعلي AODV باستخدام نماذج تنقل مختلفة لتقييم أداء البروتوكولين. تم إجراء المحاكاة باستخدام أداة محاكاة شبكة OMNET .

الكلمات المفتاحية : مركبة جوية بدون طيار، FANET، شبكة أقران، توجيه بروتوكول :

DSDV و AODV والمحاكي OMNET.

Table des Matières

INRODUCTION GENERAL	0
Introduction Général.....	1
Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux sans fils	1
I. Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux sans fils	2
1. Introduction.....	2
2. Les réseaux sans fils.....	2
2.1. Définition.....	2
2.2. Les Catégories des réseaux sans fils.....	2
2.3. Les environnements mobiles.....	3
2.3.1. Les réseaux avec infrastructure (cellulaire).....	4
2.3.2. Les réseaux sans infrastructure (Ad Hoc).....	4
3. Réseaux Ad Hoc.....	5
3.1. Définition.....	5
3.2. Type des réseaux Ad Hoc.....	6
3.3. Les caractéristiques des réseaux Ad Hoc.....	6
3.4. Applications des réseaux Ad Hoc.....	8
3.5. Avantages et Inconvénients des réseaux Ad Hoc.....	9
4. Réseaux MANET.....	10
4.1. Définition.....	10
4.2. Mobilité.....	11
4.3. Routage dans les Réseaux MANET.....	11
5. Conclusion.....	12
Chapitre 2: Aéronefs sans Pilote (drones) ET Flying Ad-hoc network	14
II. Chapitre 2: Aéronefs sans Pilote (drones) ET Flying Ad-hoc network	15
1. Introduction.....	15
2. Unmanned Aerial Vehicles (UAV).....	16
2.1. Définition.....	16
2.2. Types et application.....	16
2.2.1. UAV HTOL et VTOL.....	16
2.2.2. Tilt-rotor, tilt-wing, tilt-body, et ducted fan UAVs.....	17
2.2.3. Helicopter et Heli-wing UAVs.....	18
2.2.4. Unconventional UAVs.....	18
2.3. Technologie de communication.....	19

3.	Unmanned Aerial System (UAS)	19
3.1.	Définition	19
3.2.	Composants	20
4.	Flying Ad hoc Networks (FANETs)	21
4.1.	Définition	22
4.2.	FANET Architecture	22
4.3.	FANET Applications	24
4.4.	FANET Caractéristiques	25
4.5.	FANET Modèles de mobilité	27
5.	Conclusion	29
	Chapitre 3 : Protocoles de routage pour les réseaux FANET	30
III.	Chapitre 3 : Protocoles de routage pour les réseaux FANET	31
1.	Introduction	31
2.	Protocoles de rouage	33
2.1.	Routage Basé sur la topologie	34
2.1.1.	Routage statique	34
2.1.2.	Protocoles de routage proactifs	34
2.1.3.	Protocoles de routage réactifs	34
2.1.4.	Les protocoles de routage hybrides	35
2.2.	Routage hiérarchique	35
2.3.	Routage basé sur la position (routage géographique)	35
2.3.1.	Greedy Forwarding	36
2.3.2.	Routage géographique prédictif	36
2.3.3.	Protocoles de routage réactifs	36
2.4.	Routage basé sur l'intelligence en essaim (intelligence distribuée)	37
2.5.	Protocoles hétérogènes	37
.3	Conclusion	38
	Chapitre 4 : Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs	39
IV.	Chapitre 4 : Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs	40
1.	Introduction	40
2.	La simulation	40
3.	Les simulateurs réseaux	42
4.	Framework INET	45
5.	Description des protocoles AODV et DSDV	46
5.1.	Le protocole AODV (Ad hoc On demand Distance Vector)	46

5.1.1.	Définition	46
5.1.2.	Le type des messages	46
5.1.3.	Fonctionnement du protocole	47
5.2.	Le protocole DSDV (Dynamic destination Sequenced Distance Vector)	48
5.2.1.	Définition	48
5.2.2.	Fonctionnement du protocole	48
6.	Métriques de la simulation	49
7.	Etude de performances des deux protocoles	49
7.1.1.	Packet Delivery Ratio (PDR) :	50
7.1.2	End-to-End Delay (EED)	52
7.1.3	Consommation d'énergie (Energie Balance) :	53
8.	Conclusion.....	54
CONCLUSION GENERAL		56
Conclusion Général		57
Références		59

Liste des Figures

Figure I.1 : Les catégories du réseau sans fil. _____	3
Figure I.2 : Classement des réseaux sans fils selon la portée _____	3
Figure I. 3 : Les catégories des réseaux mobiles. _____	3
Figure I.4 : Le modèle de réseaux mobile avec infrastructure. _____	4
Figure I. 5 : Le modèle de réseaux mobile sans infrastructure. _____	5
Figure I. 6 : Réseau Ad Hoc. _____	5
Figure I. 7 : Changement de la topologie d'un réseau Ad Hoc. _____	7
Figure I. 8 : Champs de bataille. _____	8
Figure I. 9 : Les opérations de secours. _____	8
Figure I. 10 : Applications commerciales mode Ad Hoc. _____	9
Figure II. 1 : Différents types de UAVs. _____	18
Figure II. 2 : Composants principaux d'un système d'UAV. _____	21
Figure II. 3 : FANETs. _____	22
Figure II. 4 : (a) unmanned aerial vehicle (UAV) ad-hoc network ; (b) multi-group UAV ad-hoc network ; (c) multi-layer UAV ad-hoc network. _____	24
Figure II. 5 : Multi-UAV communication network. _____	25
Figure II. 6 : Modèles de mobilité dans FANET _____	29
Figure III. 1 : Taxonomie des protocoles de routage FANET. _____	33
Figure IV. 1 : types de simulation _____	41
Figure IV. 2 : Connexion du module OMNeT ++ _____	45
Figure IV. 3 : RREQ (Route Request Message). _____	47
Figure IV. 4 : RREP (Route Reply Message). _____	47
Figure IV. 5 : RERR (Route Error Message) _____	47
Figure IV. 6 : Packet Delivery Ratio vs. Topologies (Linear Mobility) _____	51
Figure IV. 7 : Packet Delivery Ratio vs. Topologies (Circle Mobility). _____	51
Figure IV. 8 : Packet Delivery Ratio vs. Topologies (Facing Mobility). _____	51
Figure IV. 9 : End-to-End Delay vs. Topologies (Linear Mobility). _____	52
Figure IV.10 : End-to-End Delay vs. Topologies (Circle Mobility). _____	52
Figure IV.11 : End-to-End Delay vs. Topologies (Facing Mobility). _____	53
Figure IV.12 : Consommation d'énergie vs. Topologies (Linear Mobility). _____	53
Figure IV.13 : Consommation d'énergie vs. Topologies (Circle Mobility). _____	54
Figure IV.14 : Consommation d'énergie vs. Topologies (Facing Mobility) _____	54

Liste des Tableaux

Tableau IV.1 : Réglages des Paramètres de simulation. _____	50
---	----

Liste des Abréviations

AODV : Ad Hoc On-Demand Distance Vector
BGP : Border Gateway Protocol
CBLADSR : Cluster-Based Location-Aided Dynamic Source Routing
DCR : Data Centric Routing
DPTR : Distributed Priority Tree-Based Routing Protocol
DSDV : Dynamic destination Sequenced Distance Vector
DSR : Dynamic Source Routing
EPLA : Energy-Efficient Packet Load Algorithm
ETX : Expected Transmission Count
FANETs : Flying Ad Hoc Networks
GloMoSim : Global Mobile Simulator
GM : Gauss Markov
GPMOR : Geographic Position Mobility Oriented Routing
GPS : Global Positioning System
GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing
GS : Ground Station
HTOL : Horizontal Take-Off and Landing
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
MANETs : Mobile Ad-hoc Networks
MLHR : Multilevel Hierarchical Routing
MP : Mission Plan
MPCA : Mobility Prediction Clustering Algorithm
MPLS : Multi-Protocol Label Switching
MUDOR : MULTipath DOppler Routing
NetBIOS : NETwork Basic Input Output System
Ns-x : Network Simulator
OLSR : Optimized Link State Routing Protocol
OPNET : Optimum Network Performance
OSI : Open Systems Interconnection
OSPF : Open Shortest Path First
PBM : Pheromone Based Model
PPP : Partenariat Public-Privé
PPRZM : Paparazzi Mobility Model
RGR : Reactive-Greedy-Reactive protocol
RREP : Route Reply Message
RREQ : Route Request Message

RRER : Route Error Message
RSVP-TE : ReSerVation Protocol - Traffic Engineering
RWP : Random Way Point
SRC : Semi Random Circular
TCP : Transmission Control Protocol
TORA : Temporairement Ordered Routing Algorithm
UAS : Unmanned Aerial System
UAV : Unmanned Aerial Vehicle
UDP : User Datagram Protocol
VANET : Vehicular Ad-Hoc Network
VTOL : vertical Take-Off and Landing
WMNs : Wireless Mesh Networks
WSNs : Wireless Sensor Networks
ZRP: Zone Routing Protocol

A decorative orange scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the main body of the scroll.

INRODUCTION GENERAL

Introduction Général

Les récents progrès de la technologie sans fil ont été observés dans notre vie quotidienne, notamment en raison de la grande disponibilité d'interfaces radio Wi-Fi à bas prix et d'autres appareils comme le GPS, les capteurs, les ordinateurs micro-embarqués, etc. Tous ces appareils innovants ont ouvert la voie pour le développement de petits véhicules volants intelligents, par exemple, les véhicules aériens sans pilote (UAV), conduisant à la création d'un nouveau type de réseau appelé Flying Ad hoc Network (FANET). Depuis l'introduction du FANET, différents types d'applications civiles et militaires ont vu le jour, comme la coordination des équipes de secours sur le terrain, la surveillance des frontières et le suivi autonome. En outre, il existe également de nombreuses applications civiles telles que la surveillance agricole et de chantier, la découverte de champs pétrolifères et même la réalisation des films. Ces types applications nécessitent un soutien sérieux de plusieurs domaines de recherche, qui nécessitent d'attirer l'attention et l'intérêt des scientifiques. Cependant, plusieurs problèmes de mise en réseau complexes ont rendu assez difficile la conception des protocoles de routage dédiés exclusivement au FANET. En effet, de nombreuses caractéristiques doivent être prises en compte, telles que le degré élevé de mobilité, les distributions aléatoires des nœuds aériens et le changement rapide de la topologie du réseau.

Tout en considérant les progrès de la mise en réseau ad hoc, il peut être explicitement prévu que les drones joueront un rôle intéressant dans la mise en place de réseaux hautement mobiles pour élargir le théâtre de l'opération. Par conséquent, le but de ce mémoire est de présenter les défis, les modèles de mobilité et les protocoles de routage des réseaux Ad hoc avec une possibilité d'adaptation pour mise en réseau dans FANET, et de présenter quelques questions ouvertes et opportunités futures pour les chercheurs sur ce sujet.

Dans ce qui suit, des informations générales sur les réseaux sans fils et des concepts sur réseaux Ad Hoc et MANET sont données dans le premier chapitre.

Ensuite le deuxième chapitre concerne les aéronefs sans pilote et les Flying Ad hoc network qui sont considérés comme catégorie du MANET avec des Particularités.

Alors que le troisième chapitre présente des différents types de protocoles de routage utilisés dans les réseaux ad hoc des drones.

Dans le chapitre numéro 4 nous avons fait 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 différents modèles de mobilité pour évaluer les performances des deux protocoles vis-à-vis les réseaux FANET.

Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux sans fils

I. Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux sans fils

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. Les réseaux mobiles Ad Hoc constituent un nouveau type de réseaux basés sur cette technologie.

Ce chapitre a pour but de présenter l'environnement mobile, et les principaux concepts liés à ce nouvel environnement. Pour cela, nous détaillons quelque principales notions nécessaires à la compréhension de ce système.

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, Mobilité et le routage dans ce type des réseaux. En fin nous présentons les différents types des réseaux Ad Hoc et nous étudions les caractéristique des réseaux Ad Hoc et aussi les domaines d'applications et quelque avantages et inconvénients de ces derniers.

2. Les réseaux sans fils

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. [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 se mémoire, nous étudions deux de ces

classifications à savoir, la classification selon la portée des sites et selon l'infrastructure utilisé.

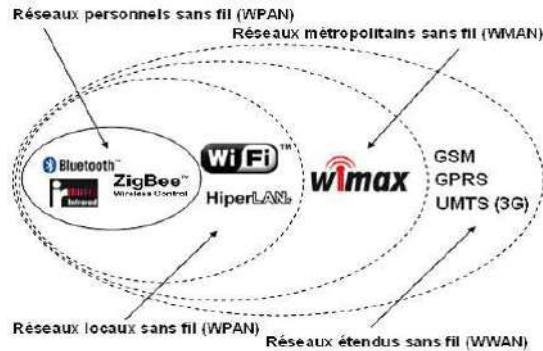


Figure I.1 : Les catégories du réseau sans fil.

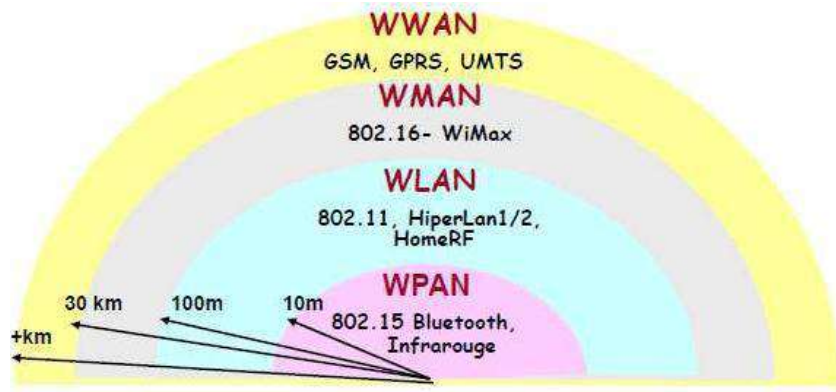


Figure II.2 : Classement des réseaux sans fils selon la portée

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.

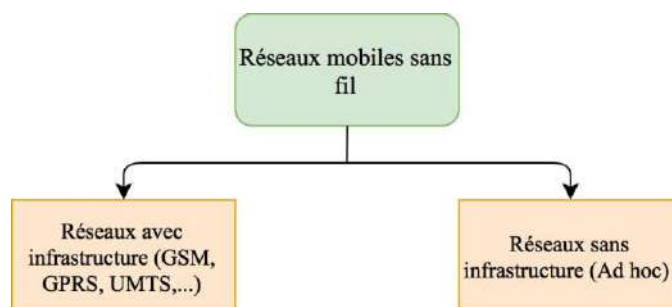


Figure III. 3 : Les catégories des réseaux mobiles.

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. [2]

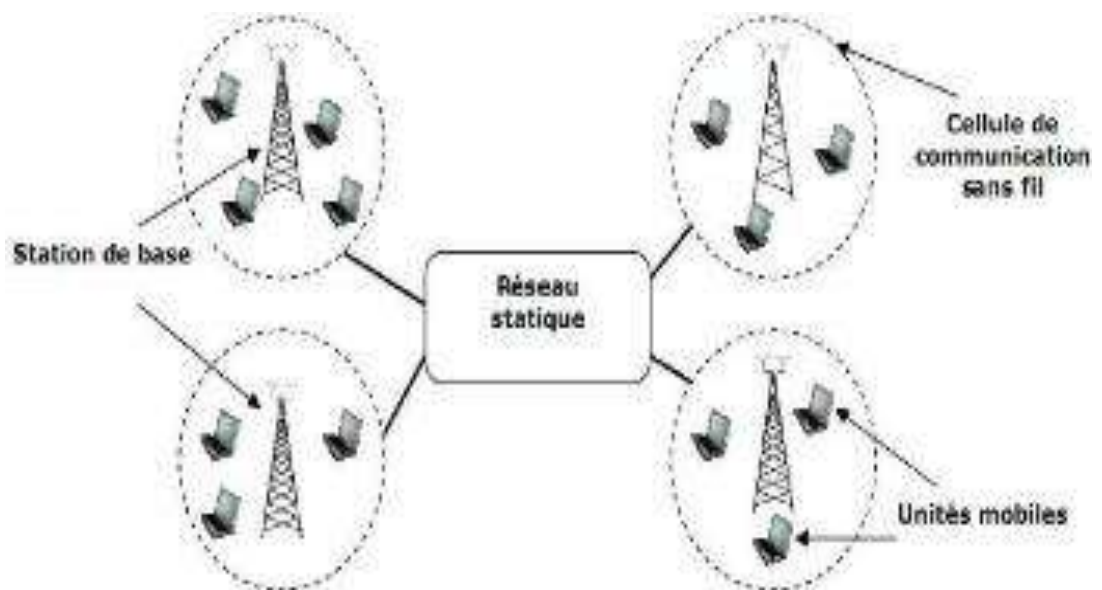


Figure IV.4 : Le modèle de réseaux mobile avec infrastructure.

2.3.2. Les réseaux sans infrastructure (Ad Hoc)

- Le réseau mobile sans infrastructure également appelé réseau adhoc 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. [2]

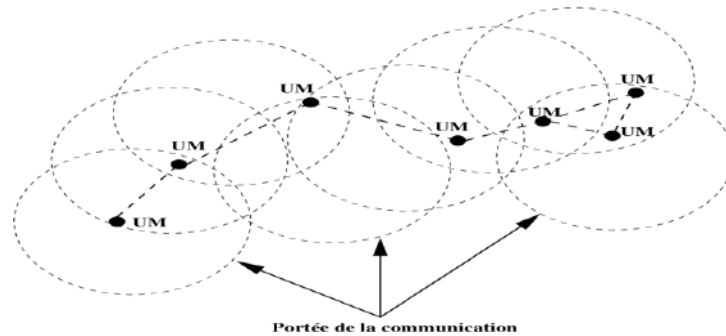


Figure V. 5 : Le modèle de réseaux mobile sans infrastructure.

3. Réseaux Ad Hoc

3.1. Définition

Un réseau ad hoc est une collection d'hôtes équipés par des interfaces Sans fil qui peuvent communiquer entre eux sans aucune administration centralisée, en utilisant une technologie de communication sans fil comme Wifi, Bluetooth, etc.

A l'opposé des réseaux filaires ou uniquement certains nœuds dits "routeurs" sont responsables de l'acheminement des données, dans un réseau ad hoc tous les nœuds sont à la fois routeurs et terminaux. Le choix des nœuds qui vont assurer une session de communication dans un réseau Ad-hoc se fait dynamiquement selon la connectivité du réseau, d'où l'appellation "Ad Hoc"[3]. La figure I.6 représenter un Réseau Ad Hoc.

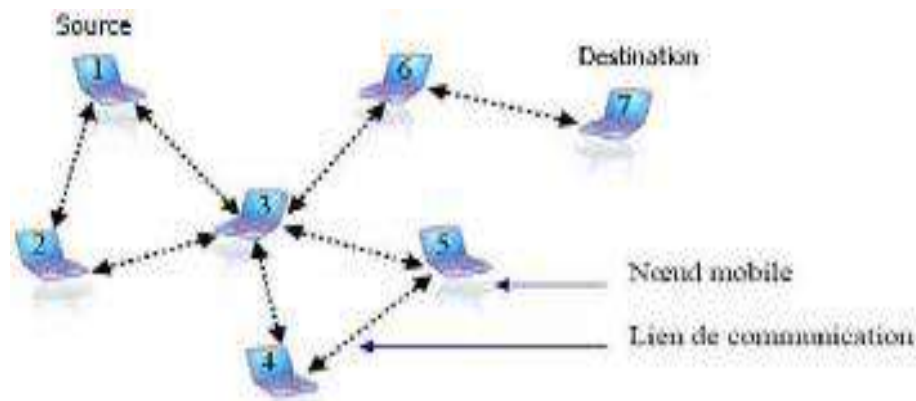


Figure VI. 6 : Réseau Ad Hoc.

3.2. Type des réseaux Ad Hoc

On distingue trois types de réseau Ad-hoc : les réseaux mobiles Ad-hoc (MANETs), les réseaux de captures (WSNs) et les réseaux maillés (WMNs).

Bien que les MANETs et les WSNs présentent plusieurs caractéristiques Communes, mais ils se diffèrent en plusieurs aspects [4] :

- ✓ La Mobilité est la principale caractéristique des nœuds MANET, tandis que les nœuds capteurs dans un WSN sont statiques.
- ✓ La densité est plus faible dans les MANETs par rapport aux WSNs.
- ✓ Dans les MANETs la communication peut s'effectuer entre des nœuds quelconques du réseau, tandis que dans un WSN la communication est toujours initiée vers ou à partir des nœuds puits ; de plus les communications capteur-à-capteur sont rares, mais les transmissions multicast et broadcast sont communes.
- ✓ Dans un MANET tous les nœuds sont égaux, de ce fait la panne de N'importe quel nœud a la même importance, tandis qu'un WSN est plus sensible à la panne des nœuds puits qu'à celle des capteurs.
- ✓ Les réseaux WMNs sont conceptuellement similaires aux MANETs dans le sens où la communication entre les mesh-routeurs s'effectue en mode multi-sauts. Cependant, ils ont les particularités suivantes :
 - Les mesh-routeurs dans un WMNs sont statiques.
 - La consommation d'énergie dans les WMNs n'est plus un problème, car les routeurs sont directement alimentés en électricité.

3.3. Les caractéristiques des réseaux Ad Hoc

Les réseaux Ad-hoc sont caractérisés par :

- **Bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé (ondes radio). Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste. [5]

- **Topologie dynamique :** Les unités mobiles du réseau se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Par conséquent, la topologie du réseau peut changer à des instants imprévisibles, d'une manière rapide et aléatoire. Voir la figure I.7

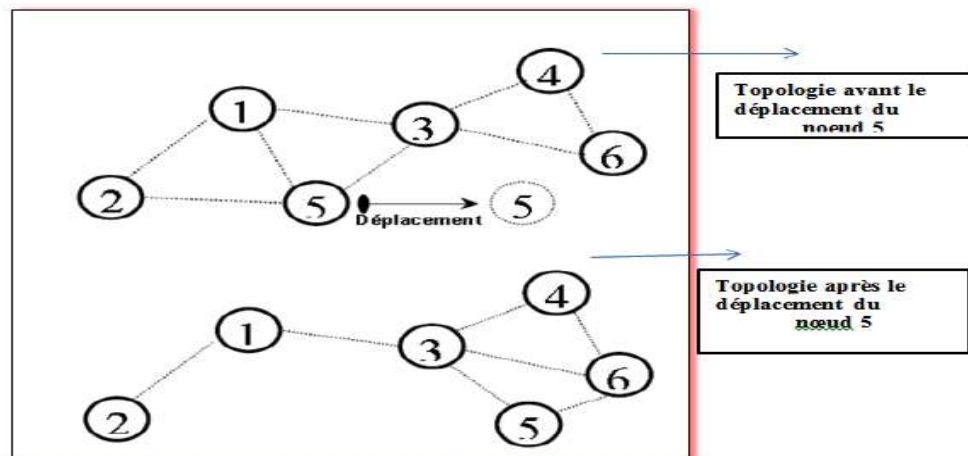


Figure VII. 7 : Changement de la topologie d'un réseau Ad Hoc.

- **Contraintes d'énergie :** Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.
- **Erreur de transmission :** Les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes que dans les réseaux filaires.
- **Sécurité physique limitée :** Les réseaux mobiles Ad Hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.
- **Interférences :** Les liens radios ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou, utilisant des fréquences proches peuvent interférer.
- **Absence d'infrastructure :** Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

3.4. Applications des réseaux Ad Hoc

Les domaines d'applications des réseaux sans fils Ad-hoc sont nombreux et très riches, et nous pouvons citer les applications suivantes :

- **Applications militaires :** Les réseaux ad hoc ont été utilisés la première fois par l'armée. En effet, ce type de réseaux est la solution idéale pour maintenir une communication sur un champ de bataille, entre les différentes troupes unités d'une armée. La figure (I.8) représente un Champ de bataille.

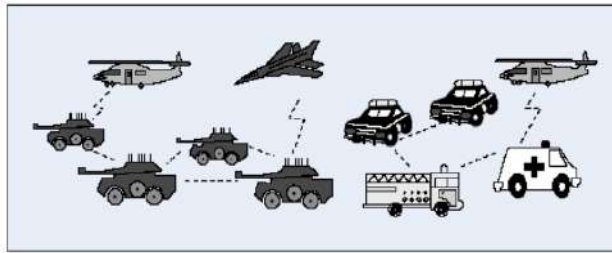


Figure VIII. 8 : Champs de bataille.

- **Les opérations de secours :** Dans les zones touchées par les catastrophes naturelles cyclones, séismes, etc., le déploiement d'un réseau Ad hoc figure (I.9) est indispensable, pour permettre aux unités de secours de communiquer.

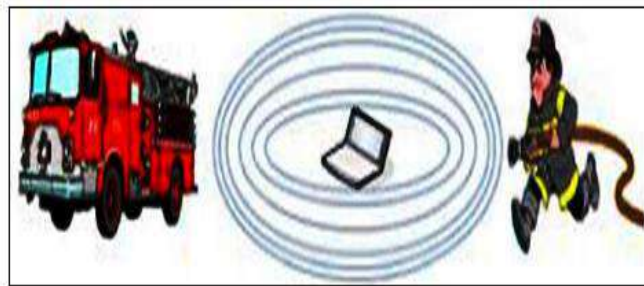


Figure IX. 9 : Les opérations de secours.

- **Applications industrielles :** Des scénarios plus complexes dans le domaine industriel appelés réseaux de capteurs (Sensor Networks), peuvent former un MANET pour s'adapter à différents environnements. Un exemple, d'une telle Application, est la formation d'un MANET pour la surveillance médicale, la détection des feux de forêt, la surveillance des volcans . . . etc.
- **Mise en œuvre des réseaux véhiculaires :** sur un réseau routier, les véhicules peuvent avoir besoin de communiquer entre eux ou avec leur environnement,

afin de partager des informations dans le but de gérer et de réguler le trafic routier. Les réseaux ad hoc sont alors, la solution idéale.

- **Applications commerciales :** pour un paiement électronique distant (taxi) ou pour l'accès mobile à Internet. figure (I.10).

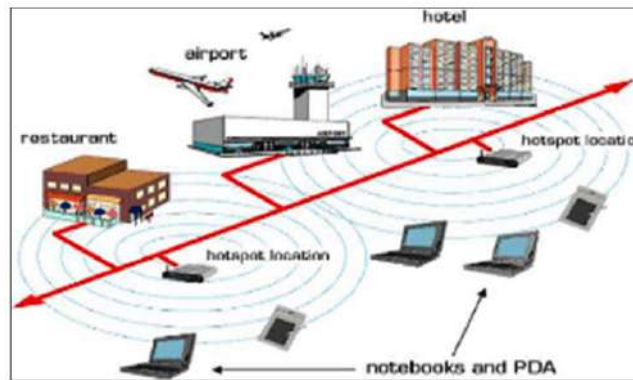


Figure X. 10 : Applications commerciales mode Ad Hoc.

3.5. Avantages et Inconvénients des réseaux Ad Hoc

➤ **Les Avantages :**

Les avantages de cette technologie sont inhérents au fait qu'il n'y est pas besoin d'infrastructure préexistante :

- ✓ Les réseaux Ad Hoc peuvent être déployés dans un environnement quelconque.
- ✓ Le cout d'exploitation du réseau est faible : aucune infrastructure n'est à mettre en place initialement et surtout aucun entretien n'est à prévoir.
- ✓ Le déploiement d'un réseau ad hoc est simple : ne nécessite aucun pré-requis puisqu'il suffit de disposer d'un certain nombre de terminaux dans un espace pour créer un réseau ad hoc, et rapide puisqu'il est immédiatement fonctionnel des que lesterminaux sont présents.
- ✓ La souplesse d'utilisation : est un paramètre très important puisque les seuls éléments pouvant tombes en panne sont les terminaux eux-mêmes. Autrement dit, il n'y a pas de panne " pénalisante " de manière globale (une station qui sert au routage peut être remplacée par une autre si elle tombe en panne). [6]

➤ **Les inconvénients :**

Même si les perspectives pour les réseaux Ad Hoc sont prometteuses, plusieurs contraintes restent encore à traiter.

- ✓ La connectivité limite les possibilités de communication. Ainsi, deux stations ne sont joignables que s'il existe un ensemble de stations pouvant assumer la fonction de routeur afin de faire suivre les paquets de données échangées entre les deux stations.
- ✓ Les liens entre les stations ne sont pas isolés les uns des autres et polluent le voisinage, par diffusion, lors de chaque émission ou réception de données. Par conséquent, tout paquet de diffusion émis vers une station en cours de communication va altérer la communication de cette station. La diffusion est un facteur qui alourdit aussi d'autres paramètres tels que la bande passante et la consommation de batterie.
- ✓ La sécurité dans les réseaux Ad Hoc est difficile à contrôler, notamment parce que dans l'interface air l'écoute clandestine est très simple à réaliser.
- ✓ Enfin, la faible autonomie des batteries constitue un frein à une utilisation longue du terminal et à la mise en place de nouveaux services, c'est une contrainte qui existe dans les réseaux avec infrastructure, mais qui est plus forte dans les réseaux Ad Hoc, puisque les ressources énergétiques sont utilisées pour les besoins des routages. [6]

4. Réseaux MANET

4.1. Définition

Un réseau ad hoc mobile (MANET : Mobile Ad hoc Network), est considéré comme un système autonome dynamique, composé des nœuds mobiles interconnectés par des liens sans fil, sans l'utilisation d'une infrastructure fixe et sans administration centralisée. Les nœuds sont libres de se déplacer aléatoirement et s'organisent arbitrairement. Par conséquent, la topologie du réseau peut varier de façon rapide et surtout imprévisible. [7]

4.2. Mobilité

Les nœuds peuvent se repositionner en quelques secondes, rendant le modèle de mobilité des nœuds non déterministes. Ce schéma de mobilité a eu un effet majeur sur la formation de grappes au sein du réseau. Cette mobilité et cette nature sans fil sont l'une des principales caractéristiques des réseaux Ad Hoc et l'aide à être déployé sur n'importe quel type de terrain. [8]

4.3. Routage dans les Réseaux MANET

Dans un MANET, tous les nœuds coopèrent pour assurer le service du routage. L'approche la plus intuitive dans la conception des protocoles de routage consiste en l'adaptation des protocoles de routage traditionnels (à vecteur de distances ou à états de liens) au contexte des MANETs, ce qui a donné naissance à la classe de protocoles de routage dits « proactifs ». D'autres protocoles de routage reposent sur des approches complètement nouvelles. Elles consistent à Calculer les chemins à la demande, à exploiter les informations de géo-localisation ou à définir une topologie logique au-dessus de celle physique.

Le routage consiste pour un réseau dont les arcs, les nœuds et les capacités sur les arcs sont fixes à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance.

Toutefois dans les réseaux MANETs, cette architecture n'est pas fixe, d'où le routage devient un mécanisme clé dans ce type de réseaux. C'est grâce au mécanisme de routage que les stations formant le réseau vont pouvoir communiquer, même si elles ne sont pas à une portée directe de communication.

Pour être opérationnel dans un environnement mobile, le protocole de routage prend en compte trois phases : [9]

- *Découverte de l'information de routage* : cette étape permet de connaître les éléments nécessaires sur la topologie utilisée pour choisir un chemin qui peut atteindre le nœud de destination. En fonction de la quantité d'informations échangées, les nœuds obtiennent une vue plus précise de la topologie du réseau. Le


protocole de routage est dans l'obligation d'optimiser l'envoi de ces informations, car elles sont fortement consommatrices en bande passante et en énergie.

- *Choix du chemin* : Après la collecte des informations de routage obtenues, le protocole de routage peut choisir une route en fonction de certains critères. Un des premiers critères est le nombre minimum de sauts dans la route, le protocole choisit la route ayant le plus petit nombre de nœuds à traverser. Parmi les critères on trouve aussi, le critère d'économie d'énergie. Toutefois, la présence de boucles rend le chemin choisi inexploitable parce que le paquet ne pourra pas atteindre la destination en consommant inutilement de la bande passante et l'énergie. Un protocole de routage peut créer deux sortes de boucles : les boucles provisoires et les boucles permanentes. Les premières ont lieu pendant le temps transfert d'un message de routage ; Durant ce temps, des stations peuvent être mises à jour et d'autres non, d'où la possible apparition d'une boucle. Elle dure au maximum la durée de traversée du réseau par un message de routage. Quant aux boucles permanentes, elles sont dues au phénomène du bouclage à l'infini.
- *Maintenance des routes* : La topologie du réseau Ad Hoc n'arrête pas d'évoluer dans le temps. Vu la nature mobile des nœuds, les routes sont dynamiquement variables. Le protocole de routage doit prendre en considération ces changements et met à jour les routes qui viennent de subir des ruptures de liens.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué l'étude sur les réseaux sans fils, nous avons présenté la classification des environnements mobiles (avec infrastructure et sans infrastructure) et nous avons vu les trois phases de routage pour être opérationnel dans un environnement mobile (découverte de l'information de routage, choix de chemin, maintenance des routes), tout ça nous a permis de connaître leurs différentes caractéristiques (absence d'infrastructure, topologie dynamique, bande passante limitée, sécurité physique limitée, contrainte d'énergie...etc.), et ainsi

constater que leur apparition a certes facilité la mise en œuvre d'applications mobiles et ne supportant pas d'infrastructure préexistante (telle que les applications militaires).

An orange scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

**Chapitre 2: Aéronefs sans Pilote (drones) ET Flying
Ad-hoc network**

II. Chapitre 2: Aéronefs sans Pilote (drones) ET Flying Ad-hoc network

1. Introduction

Au cours des dernières années, Des drones (aéronefs sans pilote ni passager à bord) performants et abordables sont apparus sur le marché. Associés à des équipements variés (appareils photo, caméras thermiques, GPS, ...), ils peuvent déjà répondre à de nombreuses tâches sur chantier. La technologie est en pleine explosion avec des potentialités énormes [10]. D'importants progrès ont été réalisés dans le domaine des UAV compacts et polyvalents. UAV Applications offre un «avant-goût» des applications possibles du domaine civil et du domaine public dans lesquelles un ou plusieurs drones peuvent être utilisés [11]. Ces véhicules peuvent exécuter des tâches qui sont trop coûteuses pour être exécutées par des véhicules à conduite humaine ou trop dangereuses pour la vie humaine .ils faciliter le travail du professionnel du bâtiment (possibilité d'inspecter des zones difficilement accessibles, réalisation de modèles 3D de terrain, par exemple) Pour cette raison, la demande pour ces véhicules est croissante dans les applications militaires et civiles telles que la surveillance des traffic, la sécurité aux frontières, l'inspection des pipelines et des lignes électriques.

Un Flying Ad hoc Networks (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 déployable, 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. Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

2.1. Définition

UAV est l'acronyme des termes en anglais Unmanned Aerial Vehicle, 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 [12], L'appellation UAV regroupe tous les aéronefs non occupés et plus ou moins intelligents, voire complètement autonomes. On parle aussi parfois simplement de 'Unmanned Aircraft' (UA) [13].

2.2. Types et application

Différentes exigences de mission ont créé différents types d'UAV. Pour cette raison, il est souvent utile de classer les drones en fonction de leurs capacités de mission [14]. Les drones peuvent être considérés comme HTOL (décollage horizontal à l'atterrissage), VTOL (décollage vertical à l'atterrissage), modèle hybride (à voilure inclinée, à rotor inclinable, à corps inclinable et à ventilateur gainable), hélicoptère, hélicoptère et types non conventionnels [15].

2.2.1. UAV HTOL et VTOL

Après de nombreuses années de développement dans les drones HTOL, il existe quatre configurations pour ces UAV, qui sont spécifiées par la portance / l'équilibre de masse et par la stabilité et le contrôle. Il s'agit de l'empennage arrière, de l'empennage avant, de la queue arrière sur les flèches et des drones sans ailes ou volant. Les configurations mentionnées peuvent avoir les systèmes de propulsion à l'arrière du fuselage (voir Fig. 2 (a)) ou à l'avant du drone. Les drones VTOL à voilure fixe utilisent souvent un système de propulsion verticale à l'avant de leur fuselage, comme le montre la figure 2 (b), et ont des ailes croisées. Ce type de drones peut décoller et atterrir verticalement et n'a pas besoin de piste pour décoller [15].

2.2.2. Tilt-rotor, tilt-wing, tilt-body, et ducted fan UAVs

Pour le mode (Hovering flight), les drones VTOL sont plus efficaces que les drones HTOL. Ils ont des limitations de vitesse de croisière en raison du décrochage des pales en retrait, mais habituellement pour les missions à plus longue portée, des UAV avec vitesse de croisière plus élevée sont nécessaires [16]. Un UAV à (tilt-rotor/flying-wing) est choisi pour ses capacités VTOL/stationnaire, sa vitesse de croisière à haute altitude et ses capacités de transport de fret . Cependant, la capacité de prise verticale et d'atterrissage est précieuse. En raison de ces limites, l'idée d'avoir un type de drone qui combine la capacité des deux types de VTOL et HTOL a été introduite [17], Par conséquent, de nos jours, il existe différents types de drones hybrides, y compris les drones tilt-rotor, tilt-wing, tilt-body, and ducted fan UAV (voir Fig. 2 (a)).

Dans les UAV à tilt-rotor, en premier lieu, les rotors sont verticaux dans le vertical vol, mais pour la croisière vol ils s'inclinent vers l'avant à travers 90°. Dans les UAV inclinables, les moteurs sont généralement fixés aux ailes et inclinés avec les ailes. mais l'UAV à tilt-rotor était le plus efficace en vol stationnaire et l'UAV à tilt-wing était le plus efficace en croisière [15], l'UAV à corps inclinable à ailes libres (wing tilt-body) est un nouveau type de drone, distinct des ailes fixées et des ailes rotatives. Il ne s'agit ni d'une aile fixe ni d'une aile rotative, ni d'une combinaison des deux. Dans ce type de drones, l'aile est entièrement libre de pivoter en tangage et le fuselage est un corps de levage. [19-22]. Le Tilt-Body est un nouveau type d'avion, distinct des ailes fixes (depuis les Wrights en 1903) et des ailes rotatives (depuis Sikorsky). Ce n'est pas un "mariage forcé" des deux, comme les autres avions à vecteur de poussée. Ce n'est ni une voilure fixe, ni une voilure tournante, ni aucune combinaison des deux. Le Freewing Tilt-Body est vraiment deux innovations en une. En bref, l'aile est placée sur des roulements de sorte qu'elle est complètement libre de tourner en tangage [23].

Ducted fan UAVs with vertical takeoff and landing provide many advantages to their equivalent fixed- and open-wing counterparts. When it comes to safety, payload, and scalability, the ducted fan UAV is incomparable [24].

2.2.3. Helicopter et Heli-wing UAVs

Les hélicoptères sans pilote ou Unmanned helicopters sont des aéronefs sans pilote qui utilisent les mêmes principes de vol que les hélicoptères avec pilote et qui utilisent des rotors rotatifs pour générer de la portance et de la poussée. La configuration de rotor la plus courante utilise un seul rotor principal, plus un rotor de queue qui fournit un contre-couple. Il existe également des UAV pour hélicoptère Tiltrotor, qui sont munis de rotors montés sur des goussets de moteur rotatives et qui changent d'angle pour assurer la portance verticale ou le vol vers l'avant[18]. Les drones à voilure hélicoïdale (Heli-wing UAVs) sont d'autres types de drones qui utilisent une aile rotative comme lame. Ils peuvent fly comme un hélicoptère verticalement et aussi voler comme un drone à voilure fixe, (la Fig. 2(h)) [25,26].

2.2.4. Unconventional UAVs

Les UAV qui ne peuvent pas être placés dans des catégories antérieures sont considérés comme des UAV non conventionnels. Les robots volant d'inspiration biologique sont généralement placés dans ce groupe. Par exemple, le FESTO Airjelly [27] qui a été inspiré de (jellyfish), comme le montre la Fig. 2(i),



Figure II. 1 : Différents types de UAVs.

2.3. 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 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 [28].

3. Unmanned Aerial System (UAS)

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 [29]. 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 [30].

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 [31] :

- **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 [32].

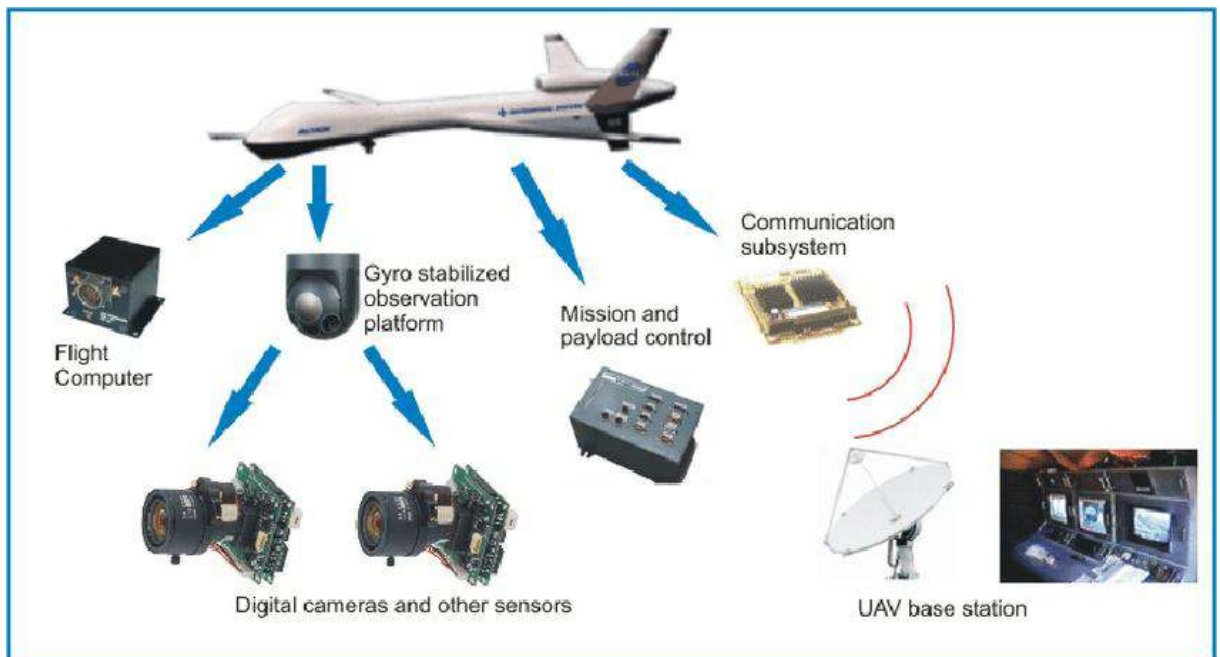


Figure II. 2 : Composants principaux d'un système d'UAV.

4. Flying Ad hoc Networks (FANETs)

Plus récemment, en raison de la vulgarisation et de la réduction des coûts des véhicules aériens sans pilote (UAV), des réseaux ponctuels volants (FANET) ont émergé, qui sont des réseaux composés uniquement d'appareils aériens qui peuvent communiquer entre un UAV et un UAV et d'autres dispositifs terrestres UAV. Selon les UAV peuvent être divisés en UAV de haute altitude et à longue portée et à moyenne portée, de petits drones et de mini-drones, les deux premiers étant militaires. Les FANETs peuvent fonctionner soit indépendamment, soit en transmettant le flux reçu des appareils terrestres à un serveur distant.

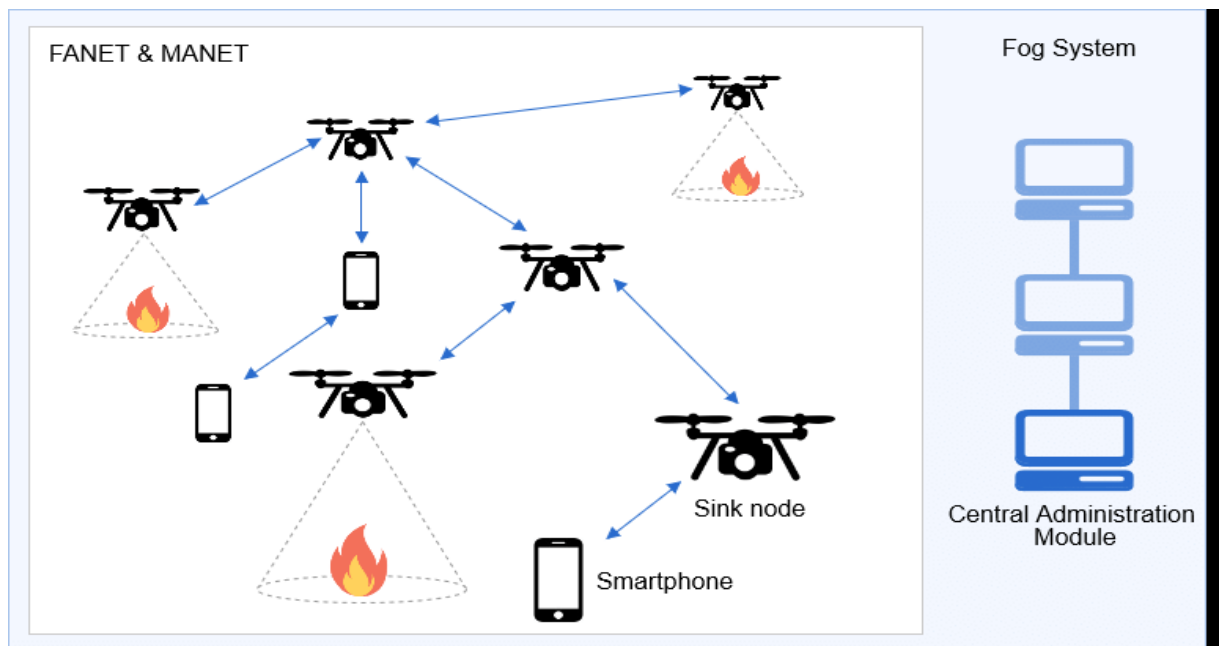


Figure II. 3 : FANETs.

4.1. Définition

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-AV 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 [33].

4.2. FANET Architecture

Une architecture de communication détermine comment l'échange d'information entre la station de base et un UAV ou entre les UAV. Dans l'architecture FANETs, 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 [34]. Plusieurs architectures de communication différentes sont proposées pour multi-UAV systèmes, dans lequel nous introduisons trois architectures de communication pour FANETs.

- **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 FANETs. 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 figure 5(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 [35]. 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-Layer 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 figure 5(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 [36]. 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 [35].
- **Multi-Group UAV Ad hoc Network:** La figure 5(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 [36]. En résumé, une architecture de communication décentralisée est l'architecture la plus appropriée pour connecter une équipe d'UAV [35], tandis qu'un réseau ad hoc d'UAV multicouches est plus approprié pour FANETs.

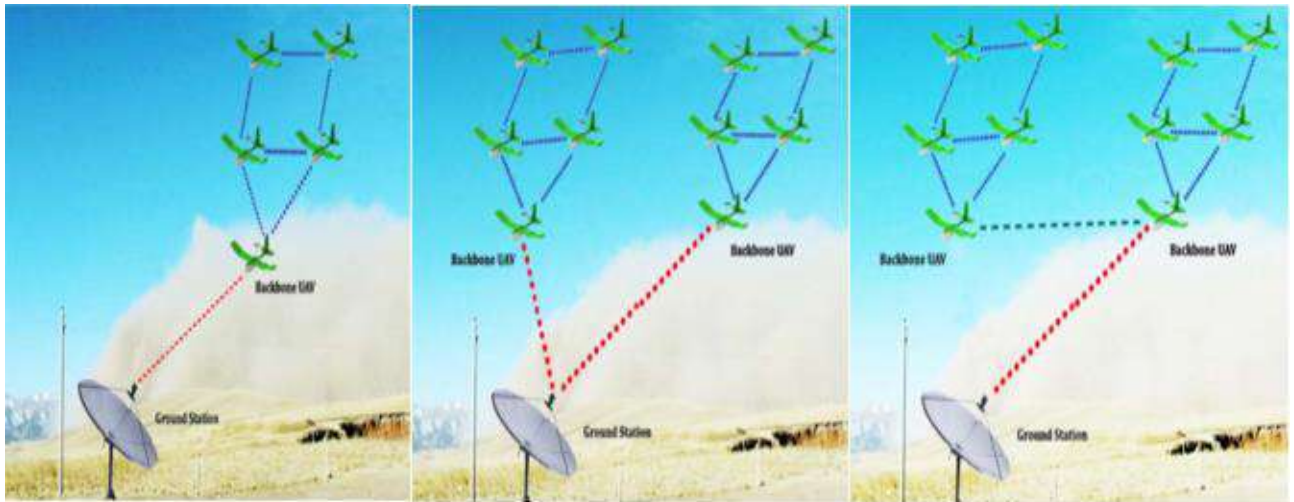


Figure II. 4 : (a) unmanned aerial vehicle (UAV) ad-hoc network ; (b) multi- group UAV ad-hoc network ; (c) multi-layer UAV ad-hoc network.

4.3. FANET Applications

Trois types d'applications peuvent être distingués dans FANETs comme suit : Multi-UAV coopération, UAV-to-Ground tâches, et UAV-to -VANET collaborations.

- **Multi-UAV coopération** : Certaines tâches particulières exigent une coopération entre plusieurs UAV dans un certain délai. Plus le nombre d'UAV dans chaque tâche est élevé, plus les résultats obtenus seront précis et moins le temps de la tâche est réduit. Ce mécanisme décentralisé est plus robuste puisqu'il n'est lié à aucune infrastructure fixe sur le terrain. De nombreux types d'applications sont basés sur la coopération Multi-UAV120, comme la détection des cibles, la localisation géographique précise, le suivi et la surveillance en cas de catastrophe, et les situations d'urgence [37].

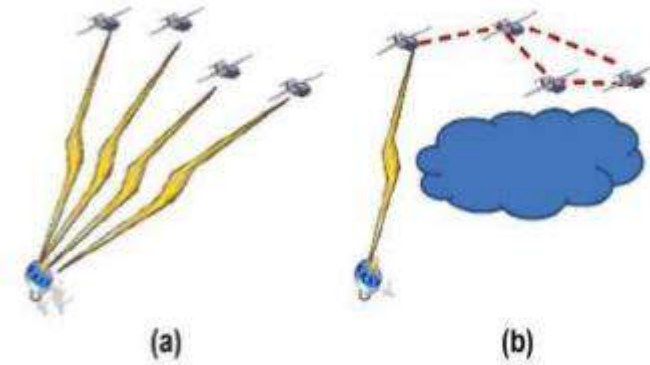


Figure IXI. 5 : Multi-UAV communication network.

- **UAV-to-Ground tâches** : Des informations importantes doivent être communiquées entre les UAV et l'opérateur humain situé sur le terrain afin de prendre les bonnes décisions dans des scénarios différents tels que les missions de recherche et sauvetage, la surveillance militaire et d'autres applications civiles [37].
- **UAV-to -VANET collaborations** : Jusqu'à présent, la coopération UAV-à-VANET peut être utilisée dans diverses applications telles que l'exploration des traffic routiers, la livraison de paquets de données, l'amélioration du routage, la surveillance traffic, le guidage routier, etc. Et maintenant, un nouveau type de communication sans fil a émergé entre les UAV et les véhicules au sol coopérant en mode ad hoc les uns avec les autres afin d'accomplir certaines tâches. Cela crée une nouvelle possibilité de problèmes de recherche potentiels dans les communications UAV-à-VANET, et par conséquent, peut être bénéfique de concevoir plus d'applications dans un proche avenir.

4.4. FANET Caractéristiques

En tant que classe spéciale de MANET, FANET est différenciée par ses propriétés uniques qui caractérisent les nœuds et l'environnement environnant. Diverses caractéristiques principales peuvent être utilisées pour caractériser FANET : densité d'UAV, modèle de propagation, topologie, évolutivité

et localisation. D'autres caractéristiques sont également distinguées dans ce type de réseaux, qui sont décrits et discutés comme suit :

- **Network topologie** : Dans les réseaux FANET, la topologie du réseau change fréquemment en raison du degré de mobilité plus élevé des drones [38].
- **Mobilité des nœuds** : La principale différence frappante entre FANET et les autres réseaux ad hoc est liée à la mobilité des nœuds. Dans MANET, la mobilité des nœuds est généralement modérée si elle est comparée à VANET. L'étendue de la mobilité des nœuds est significativement élevée dans FANET contrairement à VANET et MANET [29].
- **Densité des nœuds** : Dans les réseaux FANET, les nœuds doivent être dispersés dans le ciel avec de grandes distances entre eux, selon la nature du vol [42]. Par conséquent, la densité des nœuds dans FANET est beaucoup plus faible que dans MANET et VANET.
- **Modèle de propagation radio** : Les contrastes entre FANET et les autres conditions de travail en réseau ad hoc influencent les attributs de propagation radio. Les nœuds MANET et VANET sont étonnamment près du sol et ainsi, les signaux radio sont pour la plupart subjectifs à la structure géologique du territoire. Néanmoins, les nœuds FANET étant éloignés du sol et la plupart des drones possèdent une propagation en ligne de visée [39].
- **Localisation** : Il est difficile de déterminer la position exacte des UAV dans la FANET en raison de leur degré de mobilité élevé. Les données de localisation doivent être à jour dans des intervalles de temps plus petits [40].
- **Consommation d'énergie** : dans FANET, le matériel de communication utilisé est alimenté par une source d'énergie UAV. Les réseaux FANET utilisant de gros UAV ne sont pas sensibles à la puissance, contrairement aux réseaux MANET. Toutefois, ce n'est pas le cas des mini-UAV, leur capacité élémentaire est très limitée [40].

4.5. FANET Modèles de mobilité

Les modèles de mobilité sont utilisés pour simuler le mouvement des nœuds mobiles réels (UAV) et pour imiter l'environnement FANET réaliste. Ils représentent le mouvement du nœud des UAV et la façon dont leur position, leur accélération et leur vitesse varient au fil du temps. Ces modèles sont utilisés pour vérifier si un protocole donné (par exemple un protocole de routage) est utile dans une situation particulière. Dans cette partie nous présentons ci-dessous une brève description des principaux modèles de mobilité utilisés dans FANET.

- **Random Way Point (RWP)** : modèle de mobilité est basé sur trois actions, tourner à droite, tourner à gauche et aller tout droit. Chaque nœud choisit au hasard la destination se déplace avec une vitesse aléatoire et le temps de pause. Lorsque le temps de pause expire, sélectionnez un autre emplacement et déplacez-vous avec une autre valeur de vitesse aléatoire. Les nœuds volants décident de leurs mouvements selon les probabilités fixées. Le RWP est le modèle de mobilité le plus utilisé dans les scénarios de simulation. Malheureusement, ce modèle ne peut pas convenir aux réseaux FANET, principalement, parce que les UAV ne changent pas rapidement de vitesse et de direction et ne peuvent pas rester un instant à la même position [40].
- **Pheromone Based Model (PBM)** : modèle est proposé en fonction de la carte de phéromone. Il prend en considération la zone spécifique pour chaque nœud volant et les phéromones guident les développements de nœud. Chaque nœud marque la zone qu'il vérifie sur la carte, et le partage en diffusant à d'autres nœuds. La carte de phéromone est utilisée pour guider les nœuds. Les UAV échangent des informations sur leur zone scannée, et selon ce qu'ils décident, ils tournent à droite, à gauche ou tout droit. Afin d'étendre la couverture, les nœuds UAV préfèrent le mouvement à travers la zone avec faible odeur de phéromone [40].

- **Gauss Markov (GM)** : le modèle de mobilité utilise un paramètre de réglage pour modifier le degré de hasard. Initialement, chaque UAV est réglé sur une direction et une vitesse spécifique. Après cela, à chaque période de temps, l'action actualisera la direction et la vitesse des nœuds. La direction et la vitesse sont données en fonction de la dernière position [40].
- **Mission Plan (MP)** : dans ce modèle de mobilité, l'ensemble de la trajectoire flight est généralement prédéterminée, et l'UAV en est conscient. Il implique que les UAV se déplacent de manière cohérente le long de la trajectoire prévue, là où l'information sur la position potentielle de la cible est accessible. Les fichiers de mobilité sont créés et rafraîchis fréquemment lorsqu'une certaine période de temps est terminée.
- **Semi Random Circular (SRC)** : ce modèle est créé pour un mouvement circulaire autour d'une zone fixe. Il peut être utilisé dans des applications de recherche et de sauvetage où une victime perdue devrait servir de zone d'encerclement [37].
- **Paparazzi Mobility model (PPRZM)** : ce modèle est considéré comme un modèle de mobilité stochastique qui a cinq mouvements possibles pour les nœuds tels que, rester à (le nœud plane sur une position fixe), huit (la trajectoire du nœud a la forme 8 autour de deux zones fixées), etc.

En générale, le succès des exigences et des caractéristiques mentionnées repose sur le choix du modèle de mobilité adéquat. Les plans de parcours des modèles de mobilité tels que PPRZM, SRCM sont considérés comme les plus préférés pour FANETs en raison de la nature de la mission de ce type de réseaux.

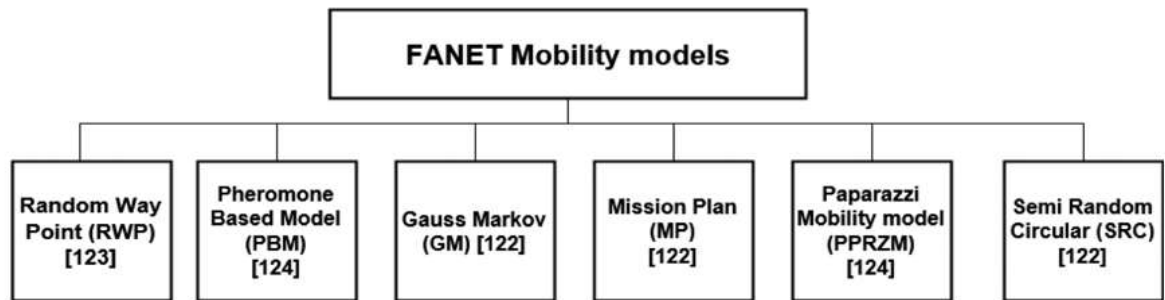



Figure II. 6 : Modèles de mobilité dans FANET

5. Conclusion

Les FANETs sont devenus un domaine de recherche émergent, qui se compose d'un groupe de petits drones connectés en mode ad hoc. 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. Les avantages considérables des drones ont conduit à une myriade d'études pour se concentrer sur l'optimisation et l'amélioration des performances de ces drones. Selon les caractéristiques mentionnées, les drones bénéficiaient de la possibilité d'effectuer une variété d'opérations, y compris la recherche et le sauvetage, la protection de l'environnement, le courrier et la livraison, l'exploration spatiale. Les FANETs seront une technologie omniprésente à l'avenir.

A decorative orange scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

Chapitre 3 : Protocoles de routage pour les réseaux FANET

III. Chapitre 3 : Protocoles de routage pour les réseaux FANET

1. Introduction

Le routage est une composante fondamentale de la gestion des réseaux. C'est le principe qui permet à des paquets de quitter le brin local pour atteindre une machine qui se trouve au-delà d'un routeur ou d'une passerelle.

On distingue les techniques d'acheminement de paquets qui fonctionnent par routage de celles qui fonctionnent par commutation (X. 25 par exemple). Les techniques de commutation maintiennent des états associés à un circuit virtuel qui réalise une ouverture de communication de bout en bout. Les éléments d'interconnexion de routage, eux, ne doivent fournir qu'un service minimum : router du mieux qu'ils peuvent (best effort).

Avec le temps, il s'avère que le mode routé est plus robuste que le mode point à point connecté : en effet, si un relais tombe en panne, les voisins du relais IP recalculent les tables de routage et acheminent les paquets suivants par une nouvelle route. Dans la technologie point à point, si le circuit est rompu, la connexion est avortée.

Le routage IP est donc dynamiquement adaptatif : il est effectué de saut en saut (next hop) depuis la source jusqu'à destination, et à chaque saut il y a prise de décision autonome afin de sélectionner la route qui acheminera le datagramme. À chaque étape, un relais n'a qu'une connaissance partielle du routage.

Un protocole de routage constitue donc le système par lequel un routeur va pouvoir acheminer un paquet vers un autre réseau.

Un protocole routé, lui, désigne un protocole qui possède une spécification équivalente à celle de la couche trois du modèle OSI et qui définit un adressage logique permettant le routage. C'est le cas par exemple du protocole IP ; ce n'est pas le cas du protocole NetBIOS.

L'objectif de protocole de routage peut se résumer en cinq points :

- Découvrir dynamiquement les routes vers les sous réseaux d'un réseau et les inscrire dans une table de routage ;
- S'il existe plusieurs routes vers un sous réseau, inscrire la route la meilleure (la plus courte) ;
- Détecter les routes qui ne sont plus valides et les supprimer de la table ; si le réseau dont le chemin est supprimé peut-être accédé par le biais d'un autre routeur, inscrire ce nouveau chemin dans la table en remplacement du chemin supprimé.
- Ajouter le plus rapidement possible de nouvelles routes, ou mettre à jour le plus vite possible les routes considérées comme meilleures : le temps qui s'écoule entre la perte d'une route et la découverte d'une autre route s'appelle le temps de convergence.
- Empêcher les boucles de routage.

Un réseau ad hoc sans fil (WANET) ou un réseau ad hoc mobile (MANET) est un type de réseau sans fil décentralisé. Le réseau est ad hoc car il ne repose pas sur une infrastructure préexistante, telle que des routeurs dans des réseaux câblés ou des points d'accès dans des réseaux sans fil gérés (infrastructure). Au lieu de cela, chaque nœud participe au routage en transférant des données pour d'autres nœuds, de sorte que la détermination des nœuds qui transmettent les données est effectuée de manière dynamique sur la base de la connectivité réseau et de l'algorithme de routage utilisé.

Les réseaux ad hoc volants (FANET) sont composés de véhicules aériens sans pilote, permettant une grande mobilité et assurant la connectivité aux zones reculées.

Véhicule aérien sans pilote, est un avion sans pilote à bord. Les drones peuvent être contrôlés à distance (c'est-à-dire pilotés par un pilote à un poste de contrôle au sol) ou peuvent voler de manière autonome en fonction de plans de vol préprogrammés. L'utilisation civile des UAV comprend la modélisation de terrains 3D, la livraison de colis (Amazon), etc.

Les drones ont également été utilisés par l'US Air Force pour la collecte de données et la détection de situation, sans risquer le pilote dans un environnement étranger hostile. Grâce à la technologie de réseau ad hoc sans fil intégrée aux UAV, plusieurs UAV peuvent communiquer entre eux et travailler en équipe, en collaboration pour accomplir une tâche et une mission. Si un UAV est détruit par un ennemi, ses données peuvent être rapidement déchargées sans fil vers d'autres UAV voisins. Le réseau de communication ad hoc UAV est également parfois appelé réseau de ciel instantané UAV.

2. Protocoles de rouage

Les protocoles de routage MANET et VANET existants sont préférés et étudiés pour les FANET. Cependant, en raison des caractéristiques spécifiques des UAV, tels que le changement de la topologie rapide, la qualité des liaisons et les déplacements rapides dans l'espace 3D, le routage réseau devient une tâche cruciale et la plupart des protocoles de routage MANET et VANET ne s'appliquent pas directement aux FANET. Pour acquérir cette nouvelle famille de réseaux ad-hoc, certains protocoles de réseau ad-hoc antérieurs ont été modifiés et des nouveaux ont été proposés pour le routage FANET. Ces protocoles de routage sont classés en plusieurs grandes catégories, comme la figure ci-après montre.

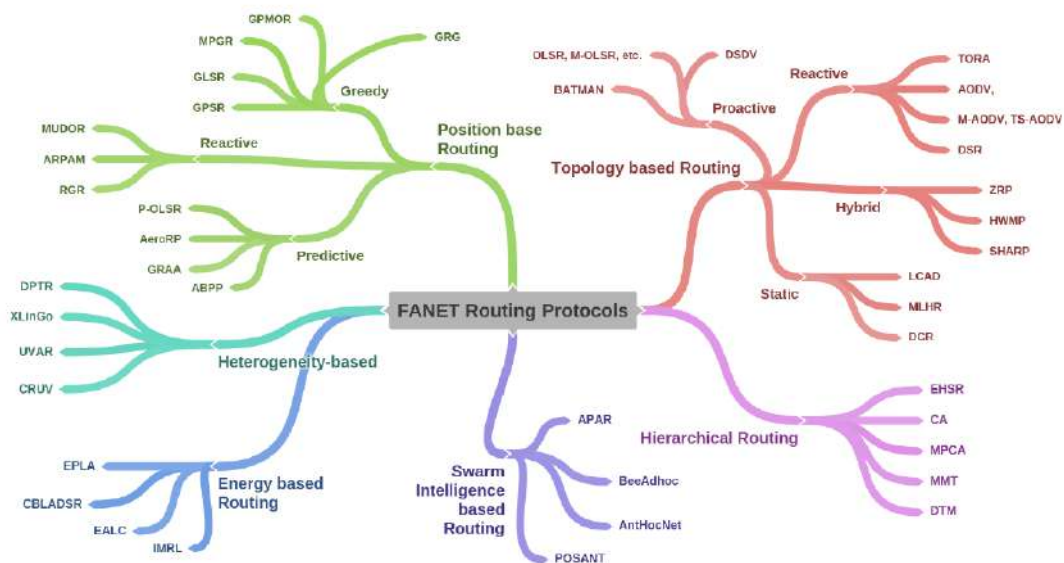


Figure III. 1 : Taxonomie des protocoles de routage FANET.

2.1. 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 vers la destination. Cette catégorie de protocoles de routage exploite les adresses IP pour définir les nœuds et utilise les informations de liaison existantes dans le réseau pour transmettre les paquets via le chemin approprié. Il est divisé en quatre sous-classes, routage statique, réactif, proactif et hybride :

2.1.1. Routage statique

Dans un routage statique chaque UAV du réseau a une table de routage fixe qui n'est pas mise à jour pendant toute la mission. Ces protocoles de routage est souhaitable dans les cas où la topologie du réseau ne change pas, ces protocoles ne sont pas tolérants aux pannes car en cas d'échec de la mise à jour de la table de routage, il est obligatoire d'attendre la fin de la mission. LCADR (Load Carry and Deliver Routing), MLHR (Multilevel Hierarchical Routing) et DCR (Data Centric Routing) sont des exemples de routage statique.

2.1.2. Protocoles de routage proactifs

Dans les protocoles de routage proactifs, chaque nœud gère périodiquement une ou plusieurs tables indiquant la topologie complète du réseau. ils ont l'avantage d'avoir un itinéraire immédiatement accessible en cas de besoin. Cependant, la productivité du réseau peut être influencée par l'envoi inutile de messages de contrôle. DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) et OLSR (Optimized Link State Routing) sont des exemples de protocoles de routage proactifs.

2.1.3. Protocoles de routage réactifs

Pour les protocoles de routage réactifs - également appelés protocole de routage à la demande - la table de routage est mise à jour lorsqu'il y a des données à envoyer, sinon il n'est pas nécessaire de calculer une route entre les nœuds. Deux types de messages sont échangés qui sont Route Request et Route Reply. Les principaux inconvénients de ces protocoles sont un temps de latence élevé dans la

recherche d'itinéraire et une inondation excessive peut entraîner un colmatage du réseau. Nous pouvons citer AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) et Power-Aware DSR-based comme exemples de protocoles de routage réactif.

2.1.4. Les protocoles de routage hybrides

En prenant les meilleures fonctionnalités et en dépassant les limites des protocoles réactifs et proactifs, de ce principe est née l'idée de protocoles hybrides. Les protocoles hybrides sont particulièrement adaptés aux grands réseaux et sont basés sur les concepts de zones, où ils utilisent le routage proactif dans la même zone et le routage réactif est utilisé entre les zones. Pour ce type de protocole de routage, on peut trouver ZRP (Zone Routing Protocol).

2.2. Routage hiérarchique

Les protocoles de routage hiérarchique sont principalement déterminés avec des itinéraires planifiés de manière proactive, puis facilite l'interrogation des nœuds déclenchés via un protocole réactif à des niveaux inférieurs. Les principaux inconvénients de ce protocole sont la complexité et le schéma d'adressage de la réponse à la demande de trafic et, par conséquent, les facteurs d'interconnexion. Pour l'algorithme hiérarchique, nous pouvons trouver l'algorithme de clustering de prédiction de mobilité MPCA et l'algorithme de clustering du réseau UAV

2.3. Routage basé sur la position (routage géographique)

Les protocoles de routage basés sur la position supposent que la connaissance des informations de position géographique des UAV permet un routage efficace. Pour ce type de protocole, le nœud source connaît la position physique du destinataire et envoie un message sans trouver de route. Le routage géographique peut être divisé en trois catégories, greedy (gourmande), prédictif et réactif.

2.3.1. Greedy Forwarding

Cette technique est utilisée lorsqu'un FANET conventionnel est densément déployé. Le but de Greedy Forwarding est de minimiser le nombre de sauts que peut effectuer un paquet de données pendant sa transition vers la destination cible. Le principe est de sélectionner le nœud géographiquement le plus proche de la destination cible comme nœud de relais et ainsi de suite jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination. Cette technique présente aussi ses inconvénients, comme le problème de l'optimum local, dans lequel le processus est bloqué à un nœud considéré comme le plus proche de la destination et ne trouve aucun nœud relais pour l'atteindre. Dans ce cas, une combinaison d'autres techniques doit être utilisée pour garantir la fiabilité de cette technique. GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) et GPMOR (Geographic Position Mobility Oriented Routing) sont des exemples de protocoles de routage basé sur cette technique.

2.3.2. 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, où 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 [41].

2.3.3. Protocoles de routage réactifs

La technique réactive est la technique la plus utilisée dans les protocoles de routage FANET. En effet, lorsqu'il n'y a pas de route vers la destination cible, le

nœud source doit établir un chemin à la demande afin de démarrer une communication avec la destination cible. De nombreux protocoles de routage réactif sont proposés pour les FANET comme le protocole RGR(Reactive-Greedy-Reactive protocol) et le protocole MUDOR (MULTipath DOppler Routing).

2.4. Routage basé sur l'intelligence en essaim (intelligence distribuée)

L'intelligence en essaim (SI) ou l'intelligence distribuée est un système auto-organisé et a d'abord été utilisé pour le système robotique cellulaire. Le SI peut être considéré comme un algorithme d'optimisation en théorie de l'intelligence. La mise en œuvre d'un tel système est basée sur des algorithmes d'essaim. Pour réaliser 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 la solution appropriée pour des problèmes d'optimisation complexes. Ces algorithmes visent à trouver une solution qui optimale pour la mission cible. En tant que protocoles de routage basés sur des essaims, qui sont dédiés aux FANET, nous distinguons BeeAdhoc et APAR (Ant colony optimization based Polymorphism-Aware Routing algorithm)

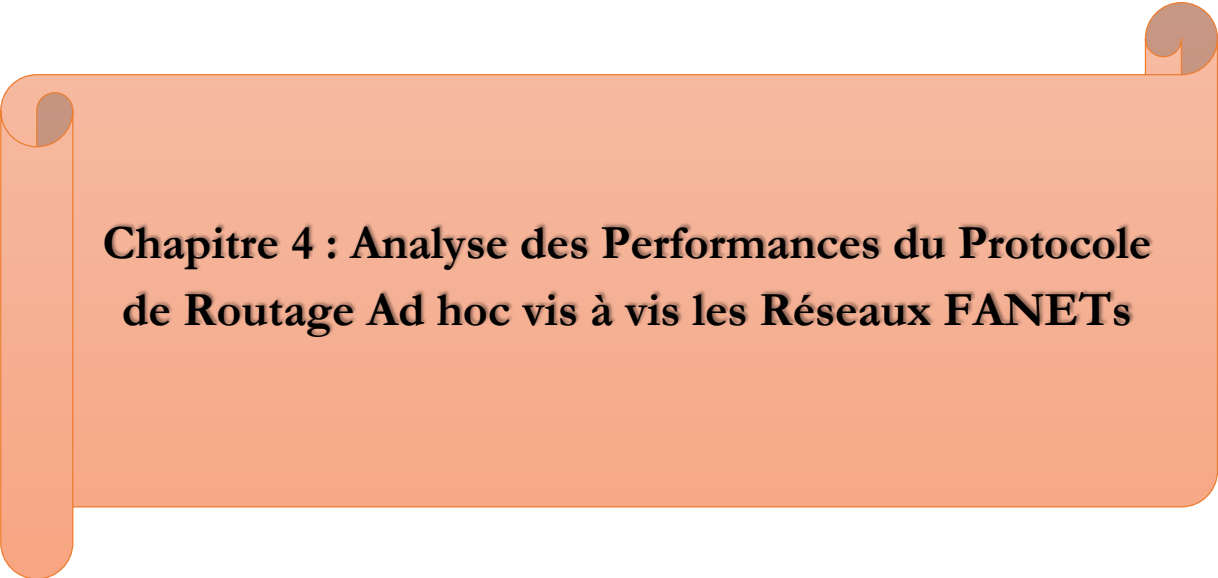
2.5. Protocoles hétérogènes

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 basé sur la consommation d'énergie comme les protocoles EPLA (Energy-Efficient Packet Load Algorithm) et CBLADSR (Cluster-Based Location-Aided Dynamic Source Routing) [42] , autres protocoles a hétérogénéité générale comme XLinGo

(Cross-layer Link quality and Geographicalaware beacon-less opportunistic routing protocol) et DPTR (Distributed Priority Tree-Based Routing Protocol)[42].

3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié un grand nombre de 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 basés sur Swarm, (3) Protocoles de routage basés sur la position, (4) protocoles de routage hiérarchiques, et (5) Protocoles hétérogènes.

An orange scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

**Chapitre 4 : Analyse des Performances du Protocole
de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs**

IV. Chapitre 4 : Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

1. Introduction

L'étude des trois premiers chapitres précédents nous a permis de comprendre en détails les réseaux FANETS, ainsi que les deux protocoles de routage de différentes familles qui sont : le protocole proactif DSDV et le protocole réactif AODV

Ce chapitre a pour but d'appliquer et tester ces deux protocoles dans un environnement de réseau mobile sans fil, et suivre le comportement de chaque protocole pour pouvoir analyser ses performances et faire des comparaisons entre ces deux protocoles.

Une manière plus pratique et moins couteuse à utiliser un simulateur qui est capable de représenter les principales caractéristiques d'un réseau ad hoc, et d'intégrer les protocoles de routage, ainsi qu'il peut réaliser plusieurs scénarios avec Trois différents modelés de Mobilité on va utiliser le simulateur OMNET++ version 5.6.2.

2. La simulation

La simulation est un processus qui consiste à concevoir un modèle du système (réel) étudié, mener des expérimentations sur ce modèle (et non pas des calculs), Interpréter les observations fournies par le déroulement du modèle et formuler des décisions relatives au système. Le but peut être de comprendre le comportement dynamique du système, de comparer des configurations, d'évaluer différentes stratégies de pilotage, d'évaluer et d'optimiser des performances.

On distingue deux catégories de simulation sur ordinateur, simulations discrètes et simulations continues. Dans les simulations continues, les quantités sont représentées par des variables continues, alors que dans les systèmes des simulations discrètes les quantités d'intérêt sont représentées par des valeurs à des variables discrètes [4-1].

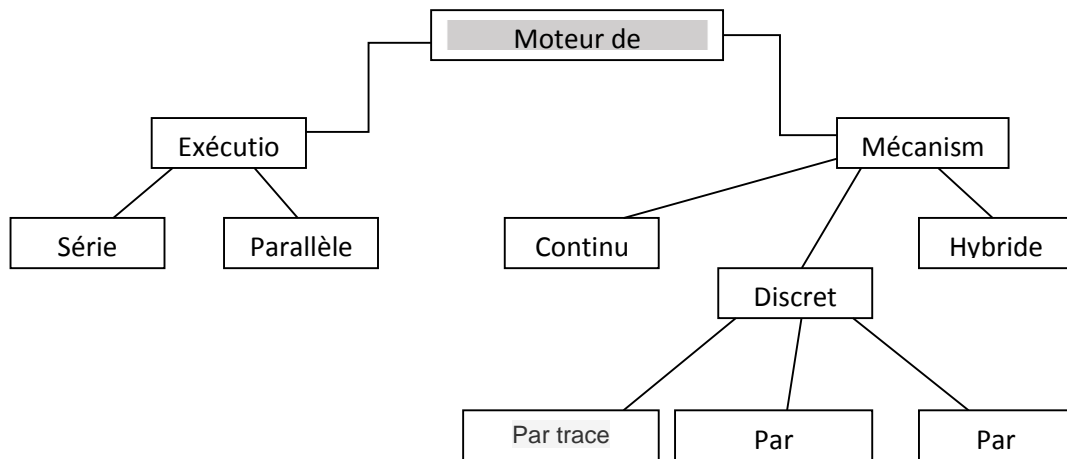


Figure IV. 1 : types de simulation

La dynamique d'une simulation discrète peut être considérée comme une séquence d'événements à des moments discrets. Comme un troisième type de simulation, la simulation de Monte Carlo est liée à la simulation à événements discrets, qui est couramment utilisée pour modéliser des systèmes stochastiques. "Méthodes de Monte Carlo sont une classe largement utilisée des algorithmes de calcul pour simuler le comportement de divers systèmes physiques et mathématiques, et pour d'autres calculs", Monte Carlo les simulateurs font habituellement appel à des nombres aléatoires pour modéliser des pièces non déterministes afin de simuler le système. Ils calculent leurs résultats en répétant un échantillonnage aléatoire un grand nombre de fois. La loi des grands nombres est souvent utilisée comme justification pour l'exactitude des résultats.

Des simulations continues sont mises en application comme ensemble d'équations. Le programme de simulation résout toutes les équations périodiquement par évaluation numérique.

Pour des simulations à grande échelle, les approches hybrides sont émergées en tant que solutions viables, où des parts importantes sont mises en application en tant que simulations discrètes et d'autres parts moins importantes en tant que simulations continues. Les stratégies de simulation hybride sauf des quantités significatives de ressources informatiques sont comparées aux simulations discrètes.

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

Les différents types de simulation peuvent être exécutés en parallèle ou en série. L'exécution parallèle des simulations fournit des temps d'exécution plus courts, mais augmente la complexité de l'exécution du modèle de simulation, aussi bien que sa vérification.

La simulation d'un réseau informatique en général est une tâche difficile et pas facile à manipuler. Le principal problème est le fait que le réseau informatique est composé de nombreux nœuds tels que les routeurs, les commutateurs et les hôtes, ce qui rend la partie modélisation du processus de simulation d'une tâche triviale. Il ya certaines décisions à faire au début du processus de simulation:

- Quels sont les faits que la simulation doit montrer ou prouver?
- Quels sont les éléments importants qui devraient être étudiés?
- Quel simulateur fournit les meilleures possibilités pour modéliser le système?
- Quelle est la simulation assez précise pour pouvoir utiliser les résultats pour la recherche?

3. Les simulateurs réseaux

Les simulateurs de réseaux couramment utilisés soutiennent multiples protocoles et fournissent donc des avantages considérables tels que:

- une meilleure validation des protocoles existants
- une infrastructure pour le développement de nouveaux protocoles
- la comparaison plus facile des résultats

OPNET (Optimum Network Performance) est un outil de simulation de réseaux très puissant et très complet. Basé sur une interface graphique intuitive, son utilisation et sa prise en main est relativement aisée. OPNET dispose de trois niveaux hiérarchiques imbriqués : *le network domain*, *le node domain* et *le process domain*. *Network domain* est le niveau le plus élevé de la hiérarchie d'OPNET. Il permet de définir la topologie du réseau en y installant des routeurs, des hôtes, des équipements tels que des switches, reliés entre eux par des liens. Chaque

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

entité de communication (appelée nœud) est entièrement configurable et est définie par son modèle. *Le Nodedomain* permet de définir la constitution des nœuds (routeurs, stations de travail, hub, ...). Le modèle est défini à l'aide de blocs appelés modules. C'est au niveau *de processdomain* que l'on définit le rôle de chaque module programmable. OPNET fournit des mécanismes permettant à tous les processus créés à l'intérieur d'un processdomain de communiquer entre eux, via un bloc de mémoire partagée, ou l'ordonnancement d'interruptions logicielles. Le rôle d'un module est déterminé par son process model, que l'on décrit sous forme d'une machine à états finis (FSM). Les actions à effectuer sont décrites en langage C, et OPNET fournit une bibliothèque de plus de 400 fonctions propriétaires spécifiques à l'usage des réseaux (création, envoi et réception de paquets, extraction de valeurs contenues dans les différents champs d'une entête...). OPNET permet de gérer deux autres types d'objets relatifs aux réseaux : les liens et les formats de paquets.

GloMoSim (Global Mobile Simulator) est une bibliothèque logicielle de simulation à grande échelle pour les réseaux sans fil et filaires. Il a été conçu en utilisant la capacité de la simulation parallèle fournie par Parsec.

En 2006, GloMoSim peut simuler un réseau purement sans fil. Dans le futur, des nouvelles versions pourront simuler un réseau filaire aussi bien qu'un réseau hybride. La plupart des systèmes réseaux sont construits en utilisant une approche basée sur les couches qui est semblable à l'architecture à sept couches de la norme OSI.

Des APIs standards sont utilisées entre les différentes couches de simulateur. Ceci autorisera l'intégration rapide et facile des modèles développés aux différentes couches par différents développeurs.

Ns-x (network simulator) est le nom d'une série de simulateurs de réseau à événements discrets, en particulier ns-1, ns-2 et ns-3. Tous sont des simulateurs de réseau informatique à événements discrets, principalement utilisés dans la recherche et l'enseignement.

Ns-3 est construit en utilisant C++ et Python avec des capacités de script. La bibliothèque Ns est enveloppée par Python grâce à la bibliothèque pybindgen qui

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

délègue l'analyse des en-têtes ns C ++ à castxml et pygccxml pour générer automatiquement la glu de liaison C ++ correspondante. Ces fichiers C ++ générés automatiquement sont finalement compilés dans le module ns Python pour permettre aux utilisateurs d'interagir avec les modèles C ++ ns et le noyau via des scripts Python. Le simulateur ns dispose d'un système intégré basé sur les attributs pour gérer les valeurs par défaut et par instance des paramètres de simulation.

OMNet++ est un simulateur d'évènement basé sur le langage C++, destiné principalement à simuler les protocoles réseau et les systèmes distribués. Il est totalement programmable, paramétrable et modulaire. C'est une application open source et sous licence GNU, développée par Andras Varga, chercheur à l'université de Budapest. OMNet++ est destiné avant tout à un usage académique et est l'intermédiaire entre des logiciels de simulation comme NS, destiné principalement à la recherche et OPNET qui est une alternative commerciale de OMNet++. Le fonctionnement d'OMNet++ repose entièrement sur l'utilisation de modules qui communiquent entre eux par le biais de messages. Ces modules sont organisés hiérarchiquement. Les modules de base sont appelés les modules simples. Ceux-ci sont regroupés en modules composés. Ces modules peuvent eux mêmes être regroupés en modules composés. Le nombre de niveau hiérarchique n'est pas limité. Ils sont codés en C++ et sont des instances du type de base module. L'architecture est construite de telle sorte que les modules simples sont à la fois les émetteurs et destinataires des messages. Les modules composés se contentent de relayer les messages aux modules simples de façon transparente. On peut attribuer différents paramètres aux connexions reliant les modules: des délais de propagation, des débits de données, des taux d'erreur, etc.

Voici un bref aperçu de la manière d'utilisation de OMNeT ++:

- Un modèle OMNeT ++ est construit à partir de composants (modules) qui communiquent en échangeant des messages. Les modules peuvent être imbriqués, c'est-à-dire que plusieurs modules peuvent être regroupés pour

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

former un module composé. Lors de la création du modèle, vous devez mapper votre système dans une hiérarchie de modules communicants.

- Définissez la structure du modèle dans le langage NED. Vous pouvez modifier NED dans un éditeur de texte ou dans l'éditeur graphique de l'IDE de simulation OMNeT++ basé sur Eclipse.
- Les composants actifs du modèle (modules simples) doivent être programmés en C++, en utilisant le noyau de simulation et la bibliothèque de classes.
- Fournissez un omnetpp.ini approprié pour contenir la configuration et les paramètres OMNeT++ de votre modèle. Un fichier de configuration peut décrire plusieurs exécutions de simulation avec différents paramètres.
- Construisez le programme de simulation et exécutez-le. Vous allez lier le code au noyau de simulation OMNeT++ et à l'une des interfaces utilisateur fournies par OMNeT++. Il existe des interfaces utilisateur en ligne de commande (batch) et des interactions graphiques.
- Les résultats de la simulation sont écrits dans des fichiers vectoriels de sortie et des fichiers scalaires de sortie. Vous pouvez utiliser l'outil d'analyse dans l'EDI de simulation pour les visualiser. Les fichiers de résultats sont basés sur du texte, vous pouvez donc également les traiter avec R, Matlab ou d'autres outils.

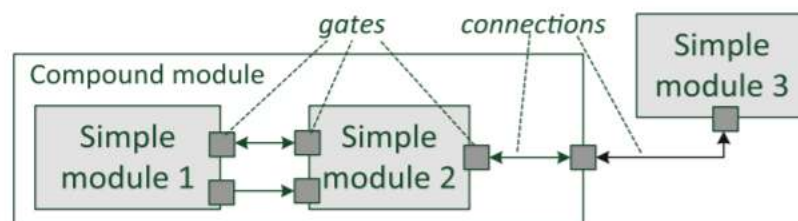


Figure XIIV. 2 : Connexion du module OMNeT++

4. Framework INET

INET Framework est une bibliothèque de modèles open source pour l'environnement de simulation OMNeT++. Il fournit des protocoles, des agents et

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

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.

Plusieurs autres cadres de simulation prennent INET comme base et l'étendent dans des directions spécifiques, telles que les réseaux véhiculaires, les réseaux de superposition / peer-to-peer ou LTE.

5. Description des protocoles AODV et DSDV

5.1. Le protocole AODV (Ad hoc On demand Distance Vector)

5.1.1. Définition

Un des protocoles les plus connus dans la catégorie des protocoles réactifs est le protocole AODV qui n'est en réalité qu'une combinaison entre les deux protocoles DSDV et DSR. En effet, c'est une combinaison de la demande de base de la découverte et le maintien de route de DSR et le routage de saut par saut et des numéros de séquence de DSDV. La route retenue est bidirectionnelle et correspond au plus court chemin (en nombre de sauts) entre la source et la destination. Chaque nœud maintient une table de routage dont les entrées mémorisent, pour une destination :

- L'identifiant de cette destination.
- L'identifiant du prochain nœud vers cette destination.
- Le nombre de nœuds jusqu'à cette destination

5.1.2. Le type des messages

Le protocole AODV fonctionne à partir de trois types de messages :

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANET's

- Les messages de demande de route RREQ : Route Request Message.
- Les messages de réponse de route RREP : Route Reply Message.
- Les messages d'erreur de route RERR : Route Error Message.

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																																							

Figure IV. 3 : RREQ (Route Request Message).

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																																							

Figure XIIIIV. 4 : RREP (Route Reply Message).

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									H	Reserved									Hop Count																				
Unreachable Destination IP Adress (1)																																							
Unreachable Destination Sequence Number (1)																																							
Additional Unreachable Destination IP Addresses (if needed)																																							
Additional Unreachable Destination Sequence Numbers (if needed)																																							

Figure XIVV. 5 : RERR (Route Error Message)

5.1.3. Fonctionnement du protocole

Quand un nœud source S veut atteindre la destination D pour laquelle il ne possède pas de route, il inonde le message de demande de route **RREQ** à ses voisins. Le paquet **RREQ** contient le numéro de séquence pour cette destination, si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut, il contient aussi la valeur du numéro de séquence du nœud source. Le **RREQ** sera propagé jusqu'à ce que le paquet atteigne un nœud qui a une route à la destination. Chaque nœud intermédiaire expédie la demande et crée une route inversée vers S (mémoire

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

une route vers la source). Quand un nœud intermédiaire a une route vers D , il produit une réponse **RREP** qui contient le nombre de saut et le numéro de séquence pour D (le plus récent). Les nœuds qui portent la réponse vers S créent une route vers D mais seulement avec le prochain saut et non pas la route toute entière. Cependant, **AODV** maintient les chemins d'une façon distribuée en gardant une table de routage au niveau de chaque nœud de transit appartenant au chemin recherché. Pour la mise à jour des routes, le protocole **AODV** exige des messages **HELLO** toutes les quelques secondes. Un lien est considéré invalide si trois messages **HELLO** consécutifs ne sont pas reçus (à travers ce même lien). Quand un lien devient invalide, tout nœud expédiant à travers celui-ci est informé par un paquet Route Error **RERR** avec une métrique égale à l'infini. Ce qui conduit au lancement d'une opération de découverte de route.

5.2. Le protocole DSDV (Dynamic destination Sequenced Distance Vector)

5.2.1. Définition

Est un protocole proactif, uniforme et orienté destination. Chaque nœud possède en permanence dans sa table de routage le chemin le plus récent découvert vers chaque nœud du réseau. Parmi plusieurs chemins possibles, DSDV privilégie le chemin le plus court. Chaque nœud maintient une table de routage dont les entrées mémorisent pour une destination :

- L'identifiant du prochain nœud vers cette destination.
- Le nombre de nœud jusqu'à cette destination (la distance).
- Le plus grand numéro de séquence reçu pour cette destination.

5.2.2. 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

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

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.

6. Métriques de la simulation

Les métriques de performance analysées que nous avons choisies pour faire une évaluation de performance pour les protocoles de routage qui ont été inclus dans cette étude sont :

- **Packet Delivery Ratio (PDR)** : le nombre de paquets qui ont été livrés avec succès à destination. Le rapport entre le nombre de colis provenant des sources CBR «application layer» et le nombre de colis reçus par le puits CBR à la destination finale,
$$\text{PDR} = \frac{\sum \text{Number of packets received}}{\sum \text{number of packets sent}}$$
- **End-To-End Delay EED (sec)** : il est défini comme le temps mis par le paquet pour atteindre la destination. C'est un terme courant dans la surveillance de réseau IP, et diffère du temps d'aller-retour (RTT) en ce que seul le chemin dans une direction de la source à la destination est mesuré.
- **Consommation d'énergie** : (Energy Balance) c'est une valeur négative qui représente la quantité d'énergie consommée.

7. Etude de performances des deux protocoles

Pour notre travail, nous avons utilisé les paramètres de simulation et de configuration suivants :

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

Paramètres	Spécifications
Système d'exploitation	Ubuntu V 18.04
Le simulateur	OMNeT++ V 5.6.2
Type de modèle de mobilité :	-Linear Mobility -Circular Mobility -facing Mobility
La dimension de la topologie	1000m * 1000m
La Vitesse	Entre(200m/s,300m/s)
Type de MAC layer	CsmaCaMac
Nœuds mobiles	5, 9, et 10

Tableau 1 : Réglages des Paramètres de simulation.

Dans cette section, nous avons évalué le résultat des performances du simulateur OMNeT ++ étudiées avec les protocoles de routage AODV, DSDV et comparés en termes de taux de livraison de paquets, de délai moyen de bout en bout et de consommation d'énergie avec des différents modèles de mobilité.

7.1.1. Packet Delivery Ratio (PDR) :

Les figures (IV-6, 7, 8) montrent les résultats de PDR avec un nombre variable de nœuds dans le simulateur OMNeT. Ce sont les moyennes arithmétiques des résultats obtenus après avoir essayé dans les cinq topologies réalisées en simulation OMNeT. Il a fourni un meilleur PDR pour le protocole de routage AODV par rapport au protocole de routage DSDV sur les trois modèles de mobilité. Sauf dans le modèle de mobilité (Circular Mobility), le protocole DSDV donne des résultats mieux que le protocole AODV dans la topologie numéro deux.

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANET's

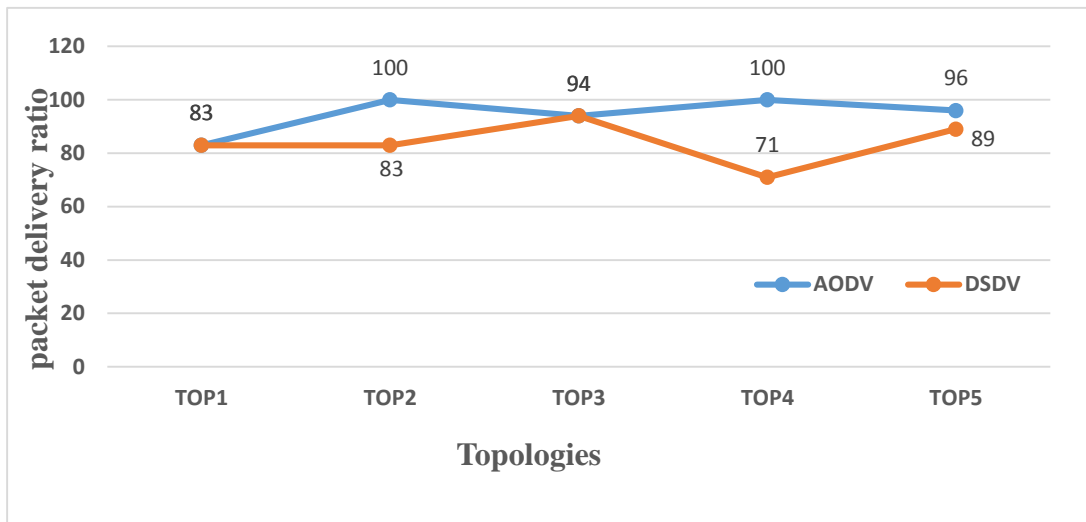


Figure XVV. 6 : Packet Delivery Ratio vs. Topologies (Linear Mobility)

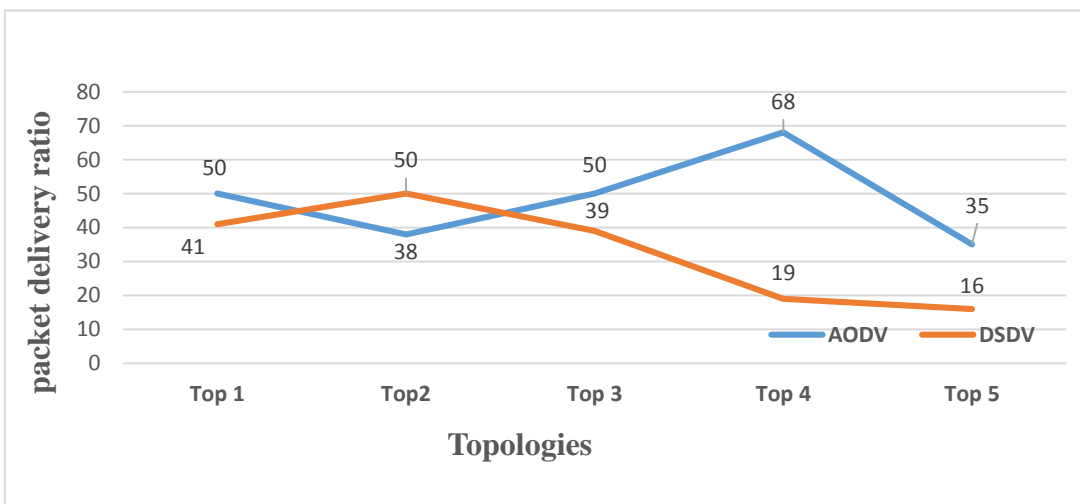


Figure XIV. 7 : Packet Delivery Ratio vs. Topologies (Circle Mobility).

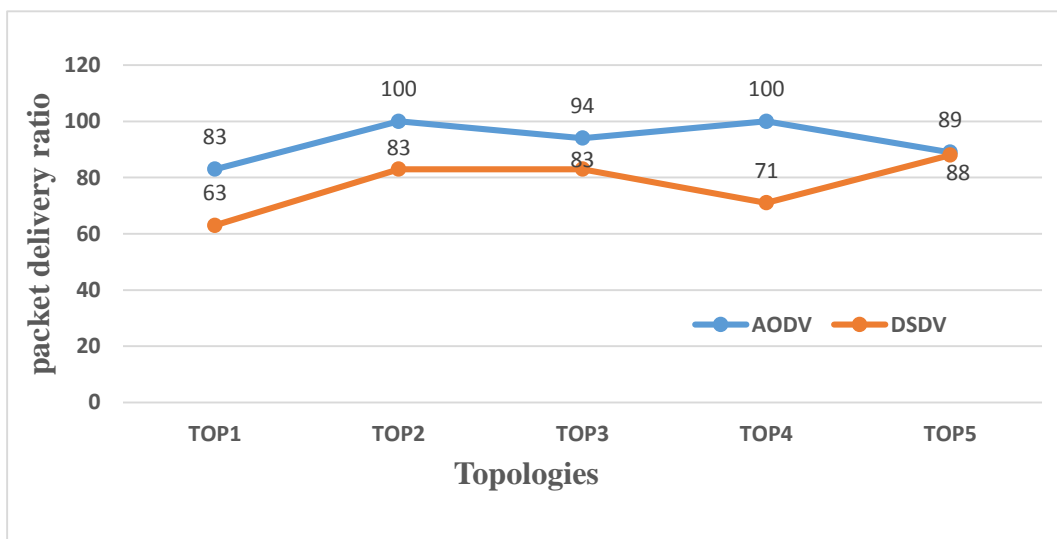


Figure XVII. 8 : Packet Delivery Ratio vs. Topologies (Facing Mobility).

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANET's

7.1.2 End-to-End Delay (EED)

Les figures (IV-9, 10, 11) illustre le EED par différent topologies, cela montre que les protocoles AODV et DSDV obtiennent des résultats proches sauf dans la Topo 4 en à regarder que le protocole DSDV donnée des résultats mieux que le protocole AODV, alors que lorsque le nombre des nœuds augmenté le délai de bout en bout élevé et les partitions réseau sont plus susceptible de se produire.

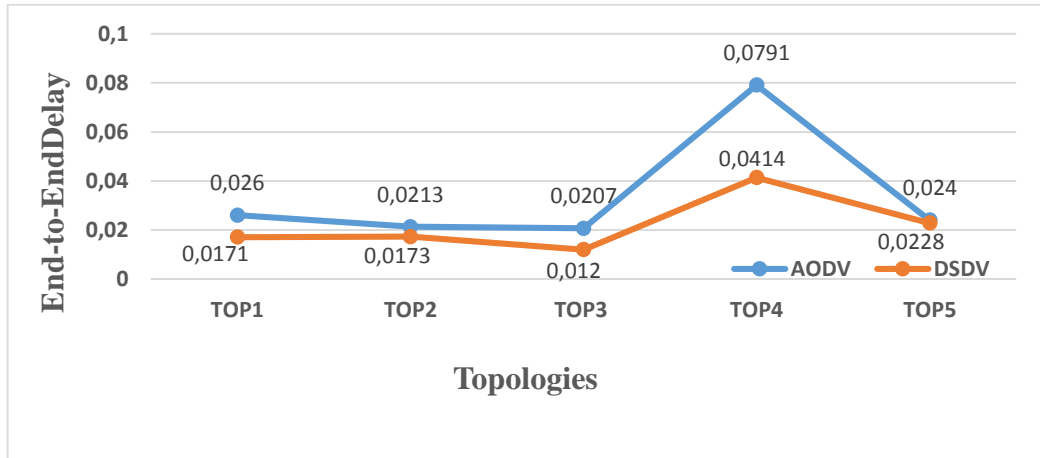


Figure XVIII.9 : End-to-End Delay vs. Topologies (Linear Mobility).

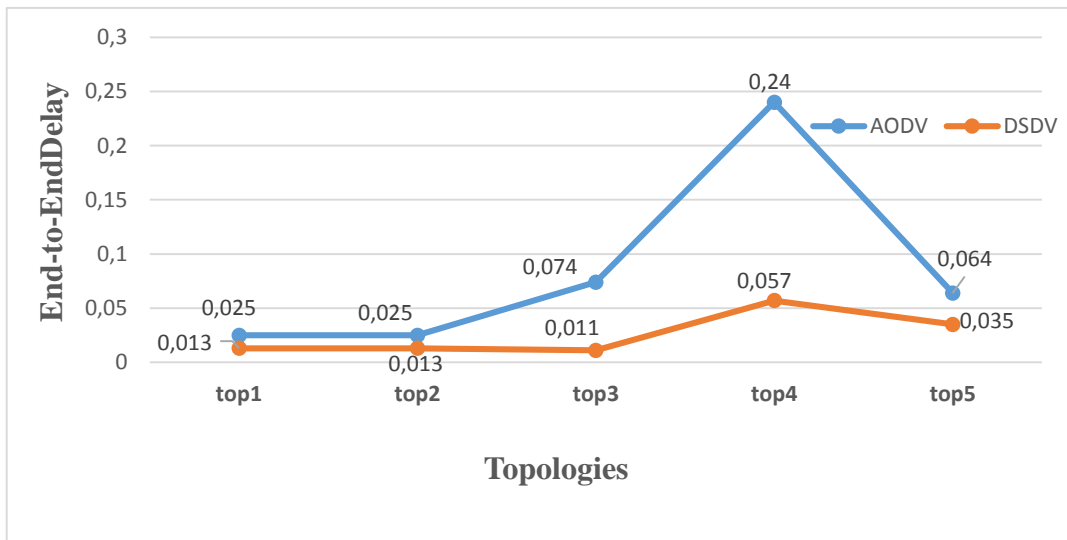


Figure XIX.10 : End-to-End Delay vs. Topologies (Circle Mobility).

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

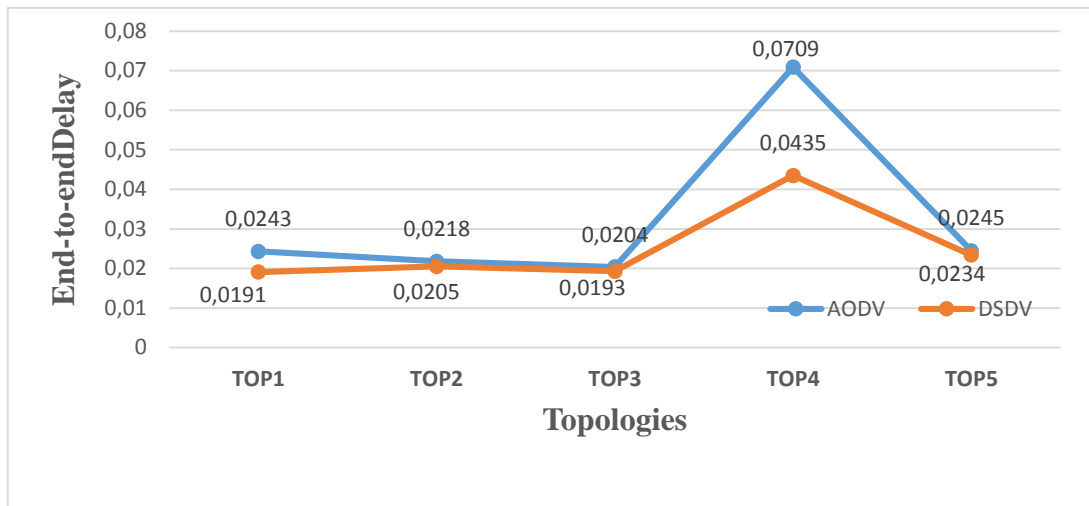


Figure XXV.11 : End-to-End Delay vs. Topologies (Facing Mobility).

7.1.3 Consommation d'énergie (Energie Balance) :

D'après les figures (IV-12, 13, 14), 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. En résumé AODV obtient de meilleurs résultats que DSDV dans les trois modèles de mobilité.

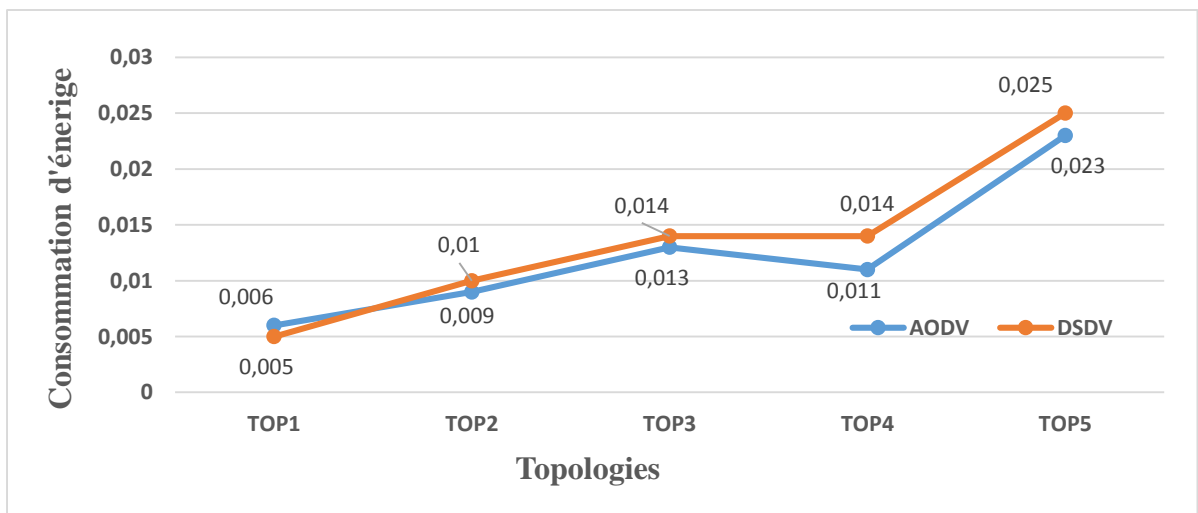


Figure XXIV.12 : Consommation d'énergie vs. Topologies (Linear Mobility).

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANET's

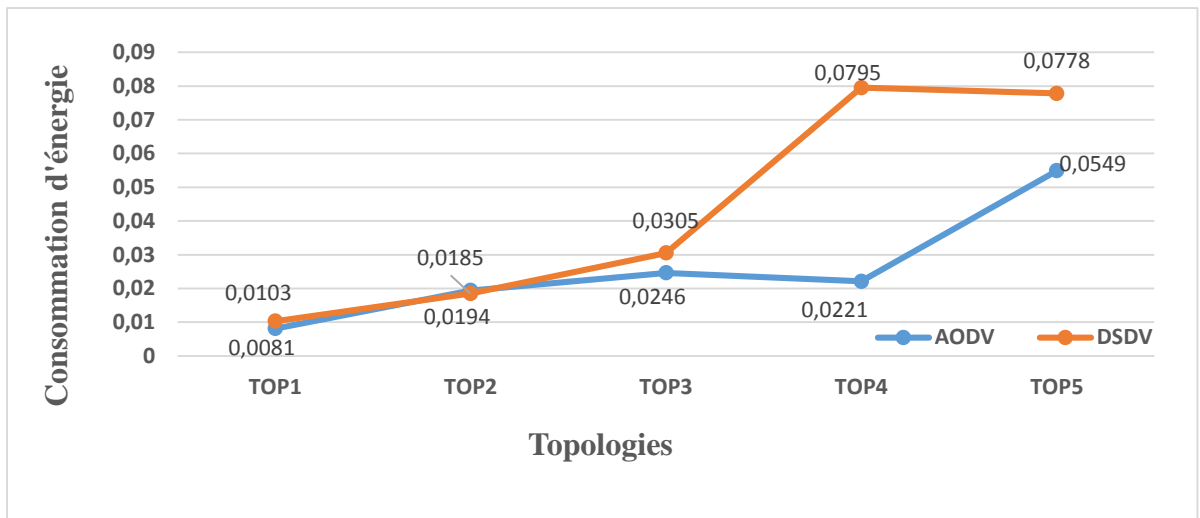


Figure XXIIV.13 : Consommation d'énergie vs. Topologies (Circle Mobility).

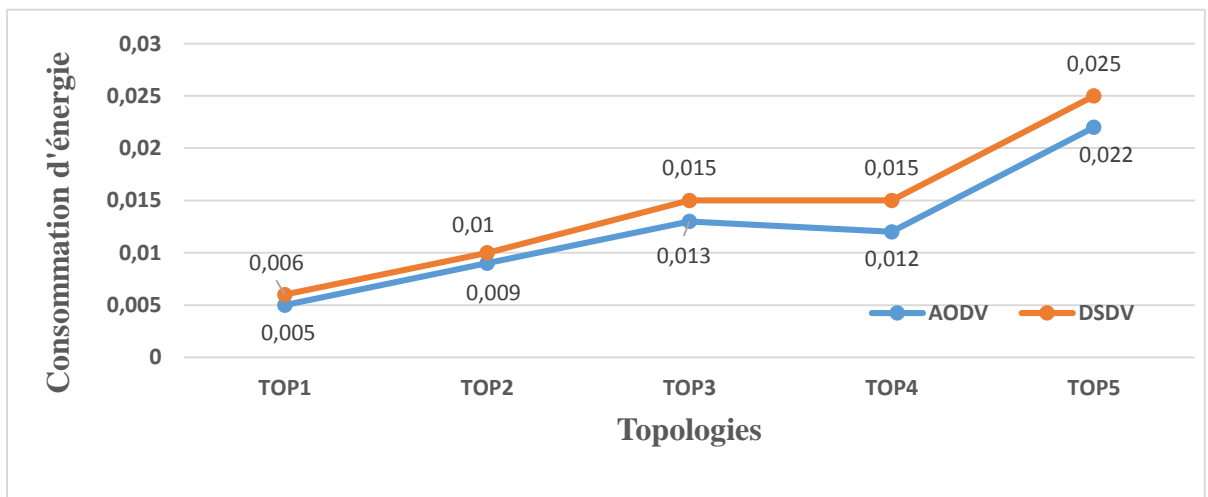


Figure XXIIIIV.14 : Consommation d'énergie vs. Topologies (Facing Mobility)

8. Conclusion

Dans ce travail actuel, nous avons présenté une performance de deux protocoles de routage en cas de routage multi-sauts, ces protocoles un proactif DSDV et l'autre réactif AODV. Nous avons utilisé trois métriques qui sont le taux de livraison de paquets (Packet Delivery Ratio PDR), un délai de bout en bout (End-to-End Delay EED) et Consommation d'énergie (Energie Balance) avec différents scénarios pour évaluer la performance de chacun d'eux, individuellement, puis comparée les résultats entre eux. Dans les trois premiers scénarios, nous avons utilisé le même nombre des drones égal à cinq (5) mais dans le quatrième scénario en utilise neuf (9)

Analyse des Performances du Protocole de Routage Ad hoc vis à vis les Réseaux FANETs

et dans le cinquième scénario dix (10) drones, les deux protocoles mentionnés sont configurés dans chaque scénario afin de se comparer.

Les modèles de mobilité (linear, circular, facing) implémenté dans tous scénarios. Après collecte et analyse des résultats nous concluons que : malgré l'échange de mobilité speed qui égal (200 mps et 300 mps) AODV atteint toujours les meilleurs résultats, on peut conclure que AODV accompli une bonne performance par rapport au DSDV dans toutes les métriques données et surtout dans le modèle linéaire de mobilité.

An orange scroll graphic with a vertical strip on the left side and rounded corners. The text "CONCLUSION GENERAL" is centered on the scroll.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion Général

Au cours de ce mémoire, notre objectif est la comparaison des deux protocoles de routages, le protocole réactif AODV et le protocole prédictif DSDV dans les réseaux FANET, après avoir définie les réseaux FANET, ainsi leur caractéristiques (topologie dynamique, bande passante limitée, contraintes d'énergie, . . .etc.), et d'écrit les types de UAV et les différences entre eux. Et on a constaté que leur rôle prometteur dans une grande zone d'opérations avec des missions compliquées. Pour la région raisonnablement isolée du sol et pour accomplir des tâches complexes.

Par la suite, on a présente les classes des protocoles de routage existants, le but de ces classes est d'essayer d'adapter aux contraintes imposées par les réseaux ad hoc, et cela par la proposition des méthodes qui soit moindre coût en ressources, et qui garantit la survivabilité du routage en cas de panne de liens ou de nœuds.

Durant ce travail on a concentré sur les deux protocoles qui nous intéressent, pour ceci on a d'écrit en d'détail les mécanismes et le principe de fonctionnement pour qu'ils assurent l'acheminement des données entre un nœud source et un nœud destination dans des différents conditions pour chacun de ces protocoles.

Pour atteindre notre objectif on a utilisé le simulateur OMNeT++, qui nous présenter des bons résultats de la simulation, afin de comparer entre les deux protocoles dans cinq scénarios proposes, et étudiées de performances dès les deux protocoles AODV et DSDV, comparés en termes de taux de livraison de paquets, de délai moyen de bout en bout et de consommation d'énergie avec des différent modelé de mobilité.

Quelques perspectives :

- Dans un proche avenir, un nouveau protocole de routage basé sur l'approche Swarm Intelligence serait proposé pour réduire les frais généraux dans FANET afin de fournir une communication de haute qualité.
- Des travaux supplémentaires seraient effectués pour le rendre hautement sécurisé.
- L'extension de nos simulations aux autres protocoles de routage du groupe FANET à savoir les protocoles hybrides, afin de comparer les trois classes.

Références

- [1]-<https://www.commentcamarche.net/contents/1309-reseaux-sans-fil-wireless-networks>, date 04/03/2020, heur 21 : 14.
- [2]- Boukhamla. A, "Réseaux mobile", Support de cours M1, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2017.
- [3]- A. Souad, T. C. Rahma, " Etude Comparative entre AODV et AOMDV dans le Cadre des Réseaux Ad Hoc ", mémoire de fin de cycle Master Administration et Sécurité des Réseaux, page : 3, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [4]- S.L. Wu, Y.C. Tseng, " Wireless Ad Hoc Networking : Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks ", USA, Auerbach publications.
- [5]- B. Abdelkrim, S. Hassiba, "Balancement de charges dans les réseaux Ad Hoc", Mémoire de fin d'études Master en Informatique Réseaux et Systèmes Distribués (R.S.D), page : 16/17, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2012.
- [6]- B. Aldja, B.Siham, " Routage et simulation dans les réseaux mobiles ad hoc", mémoire de fin de cycle Master Administration et Sécurité des Réseaux, page : 9/10, Université A/Mira de Bejaïa, 2016.
- [7]- T. Abdelghani, I. Fatah, " Sécurité dans les réseaux Ad Hoc Wormhole", Mémoire de fin D'études Master Administration et Sécurité des Réseaux ", page : 16, Université A/Mira de Bejaïa, 2013.
- [8]- H. Nassir, " Mobile Ad Hoc Networks Routing Protocol Setting Optimization and Selection Using Heuristic Approaches ", Thesis For Doctor of Sciences Degree, page : 10, Ferhat Abbas University – Setif 1,2018.
- [9]- A. Mahamed Abdelmadjid, " Ingénierie et contrôle du trafic dans les réseaux sans fil ", Thèse de Doctorat en sciences option : Ingénierie des logiciels et réseaux, page : 23/24, Université Med Boudiaf Oran, 2018.
- [10]-https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-90-481-9707-1_151 ,date 10/03/2020, heur 13 : 14.
- [11]- Ertugrul CETINSOY, Efe SIRIMOGLU, Kaan Taha ONER, Cevdet HANCER, Mustafa UNEL, Mahmut Faruk AKSIT, Ilyas KANDEMIR, Kayhan GULEZ, Conception et développement d'un tilt-wing UAV, Faculté d'ingénierie, Turk J Elec Eng & Comp SCI, Vol.19, No.5, doi :10.3906/elk-1007-621, 2011.
- [12]-<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/aeronautique-drone-6174/> , date 10/03/2020, heur 22 : 30.

- [13]- Samuel Dubois, Michael de Bouw, Yves Vanhellemont, Les drones au service de la construction (Technologies, enjeux et perspectives), CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION(CSTC), Bruxelles-Capitale,2019.
- [14]- S.W. Gee, S.R. Brown, Essais en vol Radio-Controlled Airplane modèle avec configuration Free-Wing, Free-Canard, NASA TM-72583
- [15]- A. Abdelkef, M. Hassanalain, Classifications, applications et défis de conception des drones, New Mexico State Université, Las Cruces, No. 88003, 2017.
- [16]- R. Austin, Unmanned Aircraft Systems: UAVS Conception, développement et déploiement 54, John Wiley & Sons, 2011.
- [17]- https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_Boeing_V-22_Osprey date 30/04/2020, heur 15 : 52.
- [18]- K. Ro, W. Park, K. Kuk, J.W. Kamman, Essais en vol d'un avion à corps inclinable à voilure libre, In AIAA Infotech@ Aerospace, Atlanta, Georgia, 20–22 April 2010, 2010.
- [19]- R.F. Porter, R.G. Luce, J.H. Brown, Évaluation des caractéristiques d'atténuation des rafales et des qualités de maniement d'un aéronef à voilure libre, NASA CR-1523, July, 1970.
- [20]- R.F. Porter, R.G. Luce, J.H. Brown, Enquête sur l'application du principe de l'aile libre aux aéronefs légers de l'aviation générale, NASA CR-2046, June, 1972.
- [21]- R.F. Porter, D.W. Hall, Brown, Jr., J.H., G.M. Gregorek, Étude analytique du concept de coupe-bordures à aile libre, NASA CR-2946, février/1978.
- [22]- C.G. Spratt, U.S. Patent No. 2623712, Décembre, 1952.
- [23]-<http://www.freewing.com/TiltingBody/>, date 15/03/2020, heur 14 : 44.
- [24]-<http://www.avidaerospace.com/technology/ducted-fans>, date 01/04/2020, heur 14 : 04.
- [25]- S. Pace, X-planes: Pousser l'enveloppe du vol, Zenith Imprint, 2003.
- [26]- V. Singh, S.M. Skiles, J. Krager, C.C. Seepersad, K.L. Wood, D. Jensen, Génération de concepts et techniques de calcul appliquées à la conception pour la transformation, IDETC/CIE in: Actes de la 32e Design Automation Conférence, Philadelphie, PA, 10–13 Septembre, 2006.
- [27]-<https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/platforms/unmanned-helicopter/>, date 04/04/2020, heur 23 : 07.
- [28]- 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.
- [29]- Michael E. Goebel, Wayne L. Perryman, Jefferson T. Hinke, Douglas J. Krause, Nancy A. Hann, Steve Gardner, Donald J. LeRoi, Un petit système aérien sans pilote pour estimer l'abondance et la taille des prédateurs antarctiques, DOI 10.1007/s00300-014-1625-4, Polar Biol (2015) 38:619–630.
- [30]- 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.
- [31]- Spitzer, C., Digital Avionics Systèmes : Principes et pratique 2e édition, Blackburn Press, 2001.

- [32]- 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.
- [33]- Ilker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, Samil Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANETs)”, Turkey (Istanbul),2013.
- [34]- 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.
- [35]- Alamgir Safi, Inam Ullah Khan, Ijaz Mansoor 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.
- [36]- Muhammad Asghar Khan, Fahimullah Khanzada, Ijaz Mansoor Qureshi, “Un système de communication hybride pour un Déploiement à faible coût du futur Flying Ad-Hoc (FANET)“, Islamabad 44000, Pakistan, 2019.
- [37]- Abderrahmane Lakas, Fen Zhou, Mesut Guînes, Mohamed Bachir Yagoubia, Omar Sami Oubbati, “Une enquête sur les protocoles de routage basés sur la position pour les réseaux ad hoc volants (FANET)“, Algeria,2017.
- [38]- A. Purohit, F. Mokaya, P. Zhang, Résumé de démonstration : Détection intérieure collaborative avec le réseau de capteurs aériens SensorFly, dans : Proceedings of the ACM / IEEE 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), IEEE, 2012, pp. 145–146.
- [39]- Aditi Agrawal, Assistant Professor, Krishna Kumar Kashyap, Research Scholar, “FANET : Enquête sur les défis de conception, application Scénario et protocoles de communication“, Inde, 2018.
- [40]- Amira Chriki , Farouk Kamounb, Haifa Touati, Hichem Snoussi, “FANET: Communication, modèles de mobilité et problèmes de sécurité“, Tunisia,2019.
- [41]-S. Sharma, "P-OLSR: Position-based optimized link state routing for mobile ad hoc networks," 2009 IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, Zurich, 2009.
- [42]-O.S.Oubbati, M.Atiquzzaman, P.Lorenz, et M.S.Hossain'Routing in Flying Ad Hoc Networks: Survey, Constraints, and Future Challenge Perspectives',IEEE ACCESS 2019