

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj
Faculté des Mathématiques et d'Informatique
Département d'informatique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme
Master en informatique
Spécialité : Réseaux & multimedias

THEME

Routage avec qualité de service dans les réseaux FANET.

Présenté par :

Hansali Achouak.

Khouloufi Rayane.

Soutenu publiquement le : 14/09/2023

Devant le jury composé de :

Président : Attia Abdelouahab.

Examineur : Senoussi Oussama

Encadreur : Dr - Moussaoui Ali.

2022/2023

Remerciement

En premier lieu, nous exprimons notre gratitude envers **ALLAH** Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force et la persévérance nécessaires pour accomplir cette tâche avec succès.

Nous tenons à exprimer notre gratitude particulière à notre encadrant Dr- MOUSSAOUI ALI pour son précieux soutien, sa patience et ses encouragements. Sa vision avisée a grandement contribué à rationaliser notre travail et à améliorer la qualité de chaque domaine.

Nous espérons notre profonde gratitude envers les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en consacrant leur temps à lire et à évaluer ce travail.

Enfin, nous désirons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, que ce soit directement ou indirectement, à la réalisation de ce projet.

Dedicace

À nos chers parents,

À nous-mêmes,

À nos sœurs et frères,

À tous nos amis.

Merci.

Rayane & Achouak.

Résumé

FANET (Flying Ad-Hoc Network) est un ensemble de véhicules aériens sans pilote et qui communiquent les uns avec les autres en créant un réseau ad-hoc. Dans ce travail, nous proposons un nouveau mécanisme pour établir des itinéraires avec qualité de service dans les réseaux FANET. Nous avons appliqué ce mécanisme au protocole OLSR (Optimal Link State Routing) en modifiant la sélection des MPRs (Multipoint Relay) en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds. Notre protocole baptisé ENOLSR (Energy OLSR) réduit de manière significative les interruptions de communication entre les communicants et diminue le taux de perte de paquets de données. Les résultats de la simulation montrent clairement que ENOLSR peut améliorer de manière efficace le débit du réseau et réduire la perte des données.

Mots clés : FANET (Réseau Ad-Hoc volant), QOS (qualité de service), ENOLSR (Énergie OLSR).

Abstract

FANET (Flying Ad-Hoc Network) is a collection of unmanned aerial vehicles that communicate with each other by creating an ad-hoc network. In this work, we propose a new mechanism for establishing quality-of-service routes service in FANET networks. We have applied this mechanism to the OLSR (Optimal Link State Routing) protocol by modifying the selection of MPRs (Multipoint Relay) based on the residual energy of the nodes. Our protocol ENOLSR (Energy OLSR) protocol significantly reduces communication between communicators and reduces the rate of packet loss. packet loss. Simulation results clearly show that ENOLSR can effectively improve network throughput and reduce data loss.

Keywords : FANET (Flying Ad-Hoc Network), QOS (quality-of-service), ENOLSR (Energy OLSR).

ملخص

(شبكة الطيران المخصصة) عبارة عن مجموعة من المركبات الجوية بدون طيار التي تتواصل مع بعضها البعض من خلال إنشاء شبكة مخصصة. في هذا العمل، نقترح آلية جديدة لإنشاء مسارات ذات جودة الخدمة في شبكات FANET. لقد طبقنا هذه الآلية على بروتوكول OLSR (توجيه حالة الارتباط الأمثل) عن طريق تعديل اختيار MPRs (مرحل متعدد النقاط) وفقاً للطاقة المتبقية للعقد. يعمل بروتوكولنا المسمى ENOLSR (طاقة-توجيه حالة الارتباط الأمثل) على تقليل انقطاع الاتصال بين جهات الاتصال بشكل كبير ويقلل من معدل فقدان حزم البيانات. تظهر نتائج المحاكاة بوضوح أن ENOLSR يمكنه تحسين إنتاجية الشبكة بشكل فعال وتقليل فقدان البيانات

كلمات مفتاحية : شبكة الطيران المخصصة، جودة الخدمة، طاقة-توجيه حالة الارتباط

الأمثل .

Table des matières

Liste des abréviations	x
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Liste des Algorithmes	xiii
1 Généralités sur les réseaux ad hoc.	4
1.1 Introduction	4
1.2 Réseaux sans fils	4
1.2.1 Définition	4
1.2.2 Les catégories des réseaux sans fil	5
1.2.3 Classification des réseaux sans fil	7
1.3 Réseaux mobile Ad hoc(MANET)	9
1.3.1 Historique et évolution des réseaux ad hoc mobiles	9
1.3.2 Définition	9
1.3.3 Modes de Communication dans les MANETs	10
1.3.4 Caractéristiques des réseaux MANET	11
1.3.5 Applications des réseaux mobiles ad hoc	12
1.4 Conclusion	13
2 Les Réseaux de drones ad hoc ou FANETs.	14
2.1 Introduction	14
2.2 Définition	14
2.3 Modes de communication dans les FANETs	15

2.3.1	UAV à UAV	15
2.3.2	UAV à Infrastructure	15
2.4	Caractéristiques des réseaux FANETs	16
2.5	Modèles de mobilité dans FANET	18
2.6	Applications des réseaux de drones ad hoc	20
2.6.1	Coopération multi-UAV	20
2.6.2	Tâches UAV-sol	20
2.6.3	Collaborations UAV-VANET	20
2.7	Comparaison entre MANET, VANET et FANET	20
2.8	Conclusion	22
3	Etude des Protocoles de Routage dans les Réseaux FANET	23
3.1	Introduction	23
3.2	Problème du routage dans les réseaux ad hoc	23
3.3	Classification des protocoles de routage dans les réseaux FANETs	24
3.3.1	Les protocoles Proactifs	25
3.3.2	Les protocoles réactifs	28
3.3.3	Les protocoles hybrides	32
3.4	Choix du protocole de routage OLSR	32
3.5	conclusion	33
4	La qualité de service (QOS)	34
4.1	Introduction	34
4.2	Définition	34
4.3	Les Métriques de la qualité de service	35
4.4	Qualité de service dans les réseaux ad hoc	36
4.4.1	Le besoin en QoS des applications	36
4.4.2	Objectifs de la qualité de service	37
4.5	Solutions de qualité de service dans les réseaux ad hoc	38
4.6	Conclusion	39
5	Implémentation et Réalisation	40
5.1	Introduction	40
5.2	Environnement de travail	40

5.2.1	Environnement Matériel	40
5.2.2	Environnement logiciel	41
5.2.3	Langage de programmation	41
5.3	Notre Proposition	42
5.3.1	Mécanisme de sélection les MPRs	42
5.4	Évaluation des performances	45
5.5	Résultats de simulation	46
5.6	Conclusion	48
	Références	50
	A Préparation de l'Environnement d'Implémentation	56
1.1	Installation de NS3 (ns-3.36.1)	56

Table des figures

1.1	Hiérarchie des réseaux sans fil.[1]	5
1.2	Les catégories des réseaux sans fil[2].	7
1.3	Les classes des réseaux sans fil(mobiles)[3]	7
1.4	Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.[4].	8
1.5	Le modèle des réseaux mobiles sans infrastructure.[3].	9
1.6	Exemple d'un réseau MANET[5].	10
1.7	Modes de communication dans le réseau MANET[6].	11
2.1	Exemple d'un réseau FANET[7].	15
2.2	Modes de communication dans le réseau FANET[6].	16
2.3	Quelques modèles de mobilité dans FANET[8].	18
2.4	MANET, VANET et FANET[9].	21
3.1	Classification des protocoles de routage dans les FANETs[10].	25
3.2	Format de message Hello standard[11].	26
3.3	Format de message TC standard[11].	27
3.4	Sélection des MPRs dans OLSR.	28
3.5	Recherche,installation et maintenance de route dans AODV[12].	29
3.6	La transmission de RREQ[13].	31
3.7	Renvoi du chemin par DSR[13].	31
4.1	Besoin en délai et bande passante des applications[14].	37
4.2	Solutions de QoS pour les réseaux ad hoc[14].	38
5.1	noeuds sans energie.	43
5.2	noeuds avec energie.	44

5.3	Comparaison entre ENOLSR et OLSR-Standard.	47
5.4	Taux de réception du packets.	48
1.1	Le message Bonjour Simulateur.	57

Liste des tableaux

2.1	Différences entre FANET, VANET et MANET[15],[16].	21
3.1	Avantages et inconvénient des différentes catégories de protocoles de routage[17][18].	32
5.1	spécifications de l'appareil	40
5.2	Sélection les MPRs dans OLSR	44
5.3	Sélection les MPRs dans ENOLSR	45
5.4	Paramètres de simulation.	45

Liste des abréviations

MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
WIMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communication</i>
VANET	<i>Vehicular Ad hoc NETWORK</i>
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i>
AODV	<i>On Demand Distance Vector</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
DSDV	<i>Destination Sequence-Distance Vector</i>
QOS	<i>Quality of Service</i>
API	<i>Application Programming Interfaces</i>
NS3	<i>Network Simulator 3</i>
HiperLAN2	<i>High Performance Radio LAN 2.0</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>

AP	<i>Access Point</i>
DS	<i>Distribution System</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
ESS	<i>Extended Service Set</i>
ESSID	<i>ESS Identifier</i>
MPR	<i>Multipoint Relay</i>
TC	<i>Topology Control</i>
MID	<i>Multiple Interface Déclaration</i>
HNA	<i>Host and Network Association</i>
FANET	<i>Flynig Ad hoc Network</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
IOT	<i>Internet of things</i>
ENOLSR	<i>Energy-OLSR</i>
N1H	<i>Neighbor One Hop</i>
N2H	<i>Neighbor Two Hop</i>

Introduction Générale

Les réseaux ad hoc mobiles MANET (Mobile Ad hoc Network) se distinguent par leur capacité à permettre la communication entre des nœuds en mouvement dynamique, sans nécessiter d'infrastructure préétablie. Les réseaux ad hoc de drones FANET (Flying Ad hoc Network) étendent cette notion en intégrant des drones autonomes comme nœuds mobiles au sein du réseau, ouvrant ainsi la voie à une gamme variée et passionnante d'applications.

La gestion des itinéraires joue un rôle fondamental au sein de ces réseaux, assurée par des protocoles de routage tels qu'OLSR (Optimized Link State Routing), AODV (On Demand Distance Vector) et DSR (Dynamic Source Routing). Chacun de ces protocoles adopte une approche unique pour déterminer les chemins optimaux entre les nœuds, optimisant ainsi la communication dans un environnement dynamique en perpétuel changement.

La garantie de la qualité de service QoS (Quality of Service) revêt une importance cruciale pour garantir des performances fiables et efficaces au sein de ces réseaux. En particulier, les mécanismes QoS axés sur la gestion de l'énergie jouent un rôle essentiel dans la gestion efficace de la consommation limitée des nœuds, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie du réseau.

OLSR (Optimized Link State Routing) est un protocole de routage proactif qui est très réputé et utilisé dans les réseaux ad hoc. Cependant, il présente une lacune en ce qui concerne la qualité de service (QoS) qui n'est pas correctement pris en compte dans ce protocole. Afin de résoudre cette problématique, nous proposons une version améliorée de l'OLSR, baptisée ENOLSR (Energy OLSR), qui intègre des mécanismes spécifiques visant à garantir une QoS supérieure. Nous avons utilisé le simulateur NS3 pour mener des expériences et démontrer les avantages de ENOLSR en termes de performances et de qualité de service par rapport à l'OLSR standard.

Ce mémoire est organisé comme suite :

- **Le premier chapitre** fournit des informations générales sur les réseaux sans fil, ainsi que des concepts liés aux réseaux Ad Hoc et MANET.
- **Le deuxième chapitre** traite des aéronefs sans pilote et des réseaux Ad Hoc volants, qui sont classés comme une catégorie au sein des MANET et présentent des caractéristiques spécifiques.
- Le troisième chapitre présente certains types de protocoles de routage utilisés dans les réseaux ad hoc de drones.
- **Le chapitre numéro 4** traite de la qualité de service dans le contexte des réseaux ad hoc.
- **Le dernier chapitre**, nous avons mis en œuvre et testé notre proposition.

Chapitre 1

Généralités sur les réseaux ad hoc.

1.1 Introduction

Les réseaux sans fil se sont imposés de façon indéniable en raison de leur commodité, de leur flexibilité et de leur capacité à répondre aux besoins croissants des utilisateurs en matière de connectivité. Parmi les technologies récentes de communication sans fil sont les réseaux mobiles (MANET), offrent des avantages significatifs dans des scénarios spécifiques où la connectivité fiable et flexible est essentielle. Leur capacité à fonctionner sans infrastructure préexistante les rend adaptés à une variété d'applications.

Dans ce chapitre, nous explorerons les généralités sur les réseaux ad hoc. Nous commencerons par définir les réseaux sans fil, puis nous nous concentrerons sur les réseaux mobiles ad hoc (MANET), leur histoire, leur définition, les modes de communication et leurs caractéristiques distinctives.

1.2 Réseaux sans fils

1.2.1 Définition

Un réseau sans fil (en anglais Wireless Network) est un réseau informatique dans lequel au moins deux terminaux sont connectés sans liaison filaire. Autre façon de faire communiquer un ensemble d'équipements, c'est l'utilisation des ondes radio (radio ou infrarouge) à la place des

câbles de transmission. Les réseaux sans fil constituent avant tout une alternative aux réseaux câblés, surtout que ces derniers sont devenus très coûteux et difficiles, voire impossibles, de les mettre en place dans certaines situations[19].

La Figure 1.1 montre la hiérarchie des réseaux sans fil en ce qui concerne l'intégration des réseaux de drones ad hoc (FANET) dans les réseaux de véhicules ad hoc (VANET) au sein des réseaux mobiles ad hoc (MANET), avec MANET inclus dans les réseaux mobiles, et enfin, les réseaux mobiles intégrés dans les réseaux sans fil.

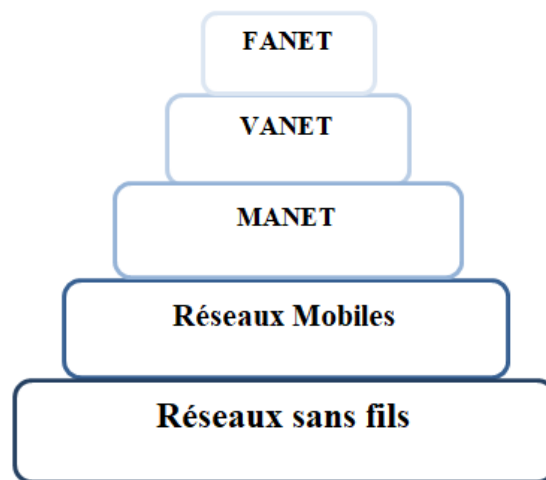


FIGURE 1.1 – Hiérarchie des réseaux sans fil.[1]

1.2.2 Les catégories des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur portée géographique. On peut distinguer les quatre types suivants :

1.2.2.1 Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Le WPAN (Wireless Personal Area Network), également connu sous le nom de réseau personnel sans fil, est un type de réseau à portée limitée qui s'étend sur une distance d'environ une dizaine de mètres. Son objectif est de connecter des périphériques personnels tels que des imprimantes, des téléphones portables, etc. Ce type de réseau est également désigné par d'autres termes tels que réseau domestique ou réseau individuel[20]. Les WPAN utilisent plusieurs technologies, notamment Bluetooth et ZigBee, etc.

1.2.2.2 Réseaux locaux sans fil (WLAN)

Les WLAN (Wireless Local Area Network), également connu sous le nom des réseaux locaux sans fil, sont des réseaux privés qui opèrent à l'intérieur d'un seul bâtiment ou à proximité, tels que des maisons, des immeubles de bureaux ou des usines. Leur utilisation est courante pour connecter des ordinateurs personnels et des équipements électroniques grand public, tels que des imprimantes, afin de faciliter le partage de ressources et l'échange d'informations entre ces appareils[20]. Différentes technologies utilisent les WLAN comme : Wifi, hiper LAN2 (High Performance Radio LAN 2.0)... etc.

1.2.2.3 Réseaux métropolitains sans fil (WMAN)

Les WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), également connu sous le nom des réseaux métropolitain sans fil, Ces réseaux peuvent couvrir des connexions entre les bureaux de différentes entités dans une ville ou être déployés sur un campus universitaire, par exemple. Ils offrent une connectivité étendue à des utilisateurs situés dans une zone géographique spécifique[21]. Le WiMAX est le nom commercial de ce type de réseau.

1.2.2.4 Réseaux étendus sans fil (WWAN)

Le réseau étendu sans fil WWAN (Wireless Wide Area Network), également connu sous le nom de réseau cellulaire mobile, est le type de réseau sans fil le plus répandu, étant donné que tous les téléphones mobiles y sont connectés[20]. Les principales technologies utilisées dans les réseaux WWAN comprennent : GSM, GPRS et UMTS(3G).

Ces quatre catégories des réseaux sans fils peuvent être schématisée dans la Figure 1.2 suivante :

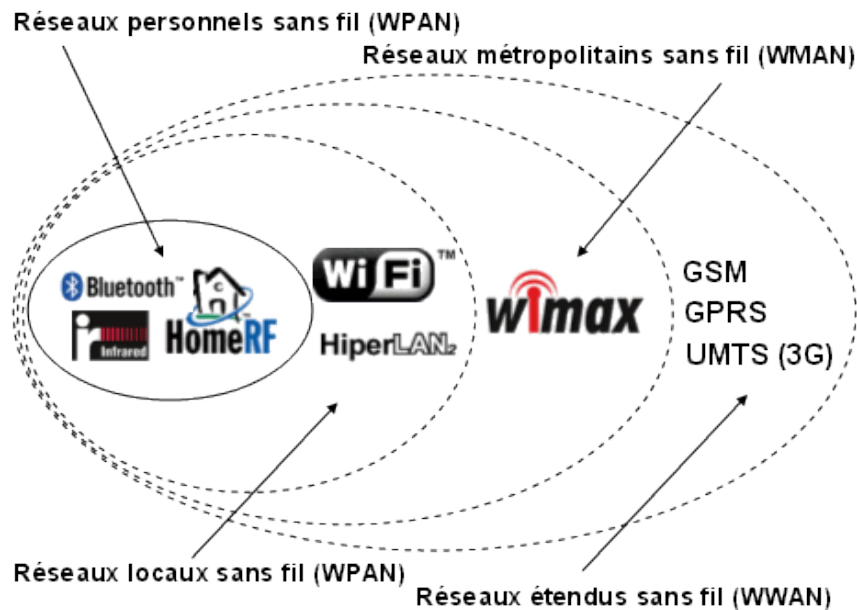


FIGURE 1.2 – Les catégories des réseaux sans fil[2].

1.2.3 Classification des réseaux sans fil

Les réseaux sans fil peuvent être catégorisés en deux classes distinctes en fonction de leur infrastructure : le mode avec infrastructure et le mode sans infrastructure, comme illustré dans la figure 1.3.

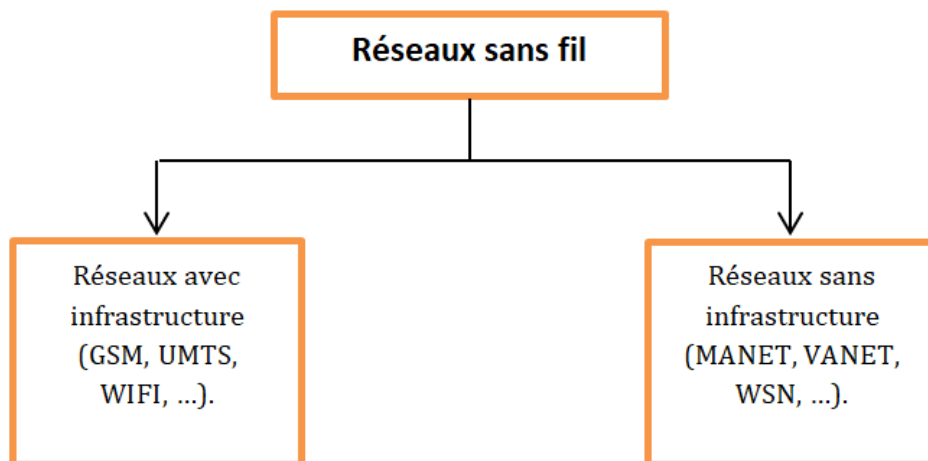


FIGURE 1.3 – Les classes des réseaux sans fil(mobiles)[3]

1.2.3.1 Mode avec infrastructure

Un réseau avec infrastructure est un réseau sans fil basé sur un point d'accès. Dans ce mode de réseau les nœuds de réseau communiquent par des infrastructures (point d'accès). Prenons

la figure 1.4 suivante, On y retrouve :

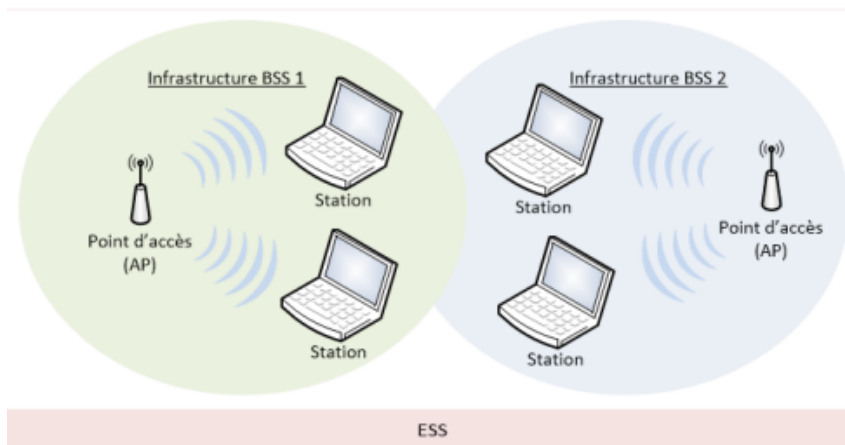


FIGURE 1.4 – Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.[4].

- Aucune communication directe n'est autorisée dans un BSS, toutes les communications transitent via l'AP.
- Basic Service Set(BSS) contient :
 1. Stations mobiles.
 2. Un point d'accès (Station de base).
- Les BSS sont reliés par un système distribué (DS : distribuutin system).
- ESS (Extended Service Set) : plusieurs points d'accès serant le même réseau WIFI et reliés par un autre réseau.
- DS (distribuutin system) : réseau de connexion des points d'accès :
 1. peut être filaire (par exemple Ethernet).
 2. Sans fil : on parle de WDS (Wireless DS).
- ESSID (ESS Identifier) défini un ESS (32 caractères en ASCII) → nom du réseau.
- ESSID souvent abrégé SSID.

1.2.3.2 Mode sans infrastructure(Ad-hoc)

Un réseau sans infrastructure est également appelé réseaux Ad-hoc. Dans ce mode de réseau la notion de points d'accès n'existe pas (Figure 1.5). Cela signifie que chaque nœud est responsable de trouver le chemin approprié pour faire parvenir les données à leur destination, Les nœuds proches effectuent une communication directe entre eux, tandis que les autres nœuds jouent le rôle d'intermédiaire pour transporter le message jusqu'à sa destination finale[21].

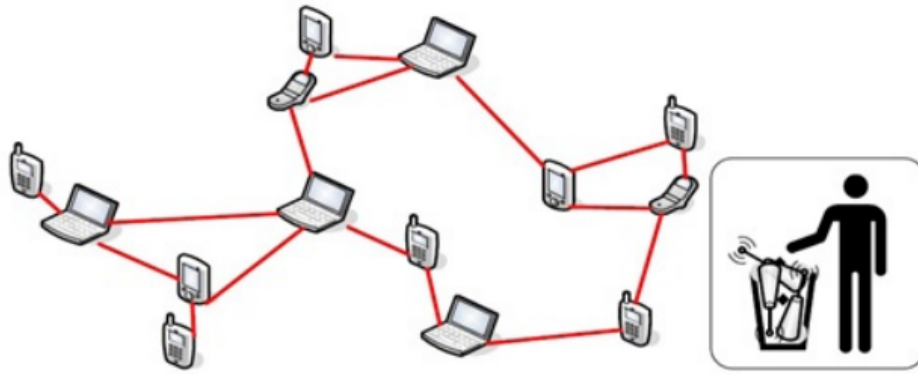


FIGURE 1.5 – Le modèle des réseaux mobiles sans infrastructure.[3].

1.3 Réseaux mobile Ad hoc(MANET)

1.3.1 Historique et évolution des réseaux ad hoc mobiles

Les travaux de recherche sur les réseaux mobiles ad hoc, également connus sous le nom de MANET (Mobile Ad-Hoc Networks), ont débuté au début des années 70 grâce au DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Le projet PRNets (Packet Radio Networks) a été créé par le DARPA, consistant en plusieurs terminaux sans fil dotés d'une architecture distribuée et partageant un canal de diffusion grâce aux protocoles ALOAH et CSMA, leur permettant de communiquer entre eux sur un champ de bataille. Par la suite, en 1983, les SURAN (Survivable Radio Networks) ont été développés par la DARPA dans le but de surpasser les limitations des PRNets. Ces réseaux étaient conçus pour gérer un grand nombre de nœuds, garantir la sécurité, gérer l'énergie et offrir des capacités de calcul suffisantes pour prendre en charge des protocoles avancés[22]. Les recherches sur ces types de réseaux étaient principalement axées sur des applications militaires. Les applications civiles ou généralisées de ces réseaux, connus sous le nom de réseaux ad hoc, ont émergé beaucoup plus tard, vers la fin des années 1990[21].

1.3.2 Définition

Un réseau mobile ad hoc, généralement appelé MANET (Mobile Ad hoc Network), est un système autonome de nœuds mobiles connectés par des liaisons sans fil et formant un réseau temporaire à topologie variable. MANET fonctionne sans infrastructures fixes préexistantes et sans administration centralisée[23].

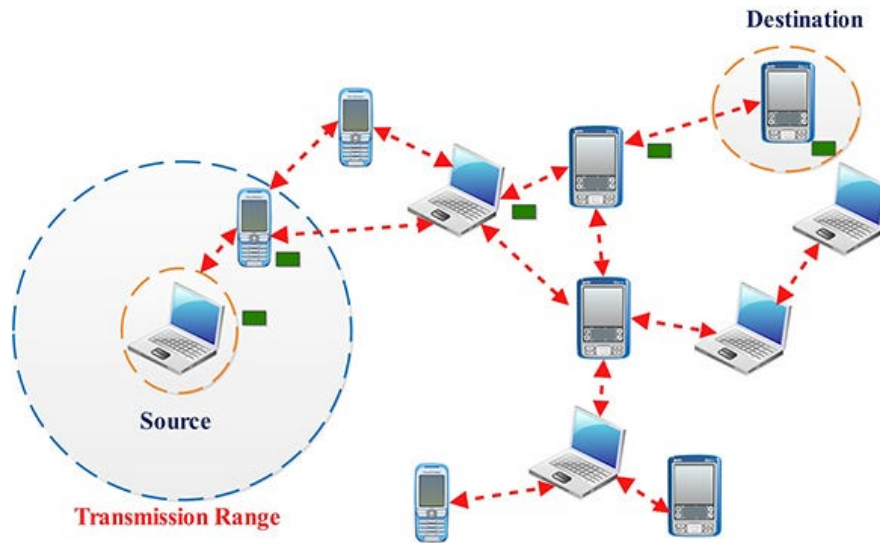


FIGURE 1.6 – Exemple d’un réseau MANET[5].

Les nœuds se déplacent d’une façon aléatoire dans le réseau et par conséquent, la topologie du réseau peut changer rapidement et de manière imprévisible.

1.3.3 Modes de Communication dans les MANETs

Dans les réseaux ad hoc, les unités mobiles utilisent généralement trois modes de communication principaux[6] :

- Le mode de communication **Unicast** ou point à point.
- Le mode de communication **Multicast** ou multi-points.
- La diffusion ou **Broadcast**.

Ces trois modes de communication peuvent être schématisée dans la Figure 1.7 suivante :

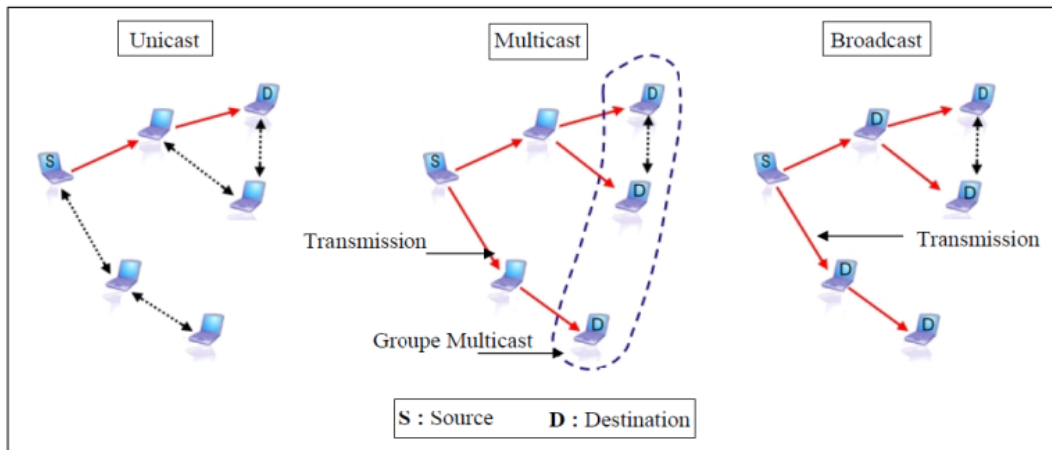


FIGURE 1.7 – Modes de communication dans le réseau MANET[6].

1.3.4 Caractéristiques des réseaux MANET

Les réseaux ad hoc sont caractérisés par :

1. **Absence d'infrastructure** : Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par leur caractéristique principale, à savoir l'absence d'infrastructures préexistantes et de toute forme d'administration centralisée. Dans ces réseaux, les nœuds mobiles jouent un rôle actif en établissant et en maintenant la connectivité du réseau. Ils agissent à la fois en tant que routeurs pour relayer les communications entre les nœuds et en tant que générateurs de leurs propres données. Cela permet aux réseaux ad hoc de fonctionner de manière autonome et de s'adapter à des environnements où une infrastructure fixe n'est pas disponible ou pratique[24].
2. **Une topologie dynamique** : Les nœuds des réseaux ad hoc sont libres de se déplacer de manière arbitraire, ce qui implique que la topologie du réseau peut changer de manière aléatoire, rapide et imprévisible[21].
3. **Routage par relais** : Chaque nœud dans un réseau ad hoc a la capacité de communiquer directement avec les terminaux qui se trouvent à sa portée. Cependant, lorsque la destination souhaitée n'est pas directement accessible, le nœud peut jouer le rôle d'un relais ou d'un routeur. Dans ce cas, il reçoit les données de la source et les transmet à travers le réseau pour atteindre la destination finale qui se trouve en dehors de sa propre portée. Ainsi, les nœuds dans un réseau ad hoc peuvent agir en tant qu'intermédiaires pour faciliter la transmission des données, assurant ainsi la connectivité entre les terminaux même lorsque la communication directe n'est pas possible[24].

4. **Une bande passante limitée** : Une caractéristique primordiale des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Cette notion de partage signifie que la bande passante disponible pour chaque hôte (nœud) est limitée. Étant donné que plusieurs nœuds peuvent accéder au même médium pour transmettre leurs données, la bande passante disponible pour chaque nœud est réduite. Cela signifie que chaque nœud doit partager équitablement et efficacement la bande passante afin d'assurer des communications fluides dans le réseau. La gestion de cette bande passante limitée est un défi important dans les réseaux sans fil[25].
5. **Hétérogénéité des nœuds** : Un nœud mobile peut être équipé d'une ou plusieurs interfaces radio avec des capacités de transmission variées, opérant dans des plages de fréquences différentes. Cette hétérogénéité de capacité peut entraîner des liens asymétriques au sein du réseau, où certains nœuds peuvent avoir des capacités de transmission plus élevées que d'autres. De plus, les nœuds peuvent présenter des différences en termes de capacité de traitement (CPU, mémoire), de logiciel et de mobilité (lente ou rapide). Ces variations de capacité et de mobilité entre les nœuds ajoutent une complexité supplémentaire à la gestion des communications et du routage dans les réseaux ad hoc[25].
6. **Une sécurité physique limitée** : Effectivement, il est relativement facile d'espionner un canal radio de manière passive dans les réseaux ad hoc. Les protections physiques sont souvent limitées, ce qui signifie qu'il peut être difficile d'empêcher quelqu'un de placer une antenne réceptrice sensible à proximité et d'intercepter les communications[21].
7. **La contrainte d'énergie** : Les équipements mobiles, tels que les smartphones, tablettes et assistants numériques personnels (PDA), sont équipés de batteries dont la capacité est limitée. Dans certains cas, comme les PDA, la capacité de la batterie peut être très réduite. Par conséquent, ces appareils ont une durée de traitement limitée avant que la batterie ne soit épuisée[22].

1.3.5 Applications des réseaux mobiles ad hoc

Effectivement, les réseaux ad hoc ont été initialement développés pour répondre aux besoins de communication militaire, où la flexibilité et la résilience étaient des critères importants. Cependant, avec les avancées dans le domaine des réseaux et l'émergence des technologies sans

fil, les réseaux ad hoc ont trouvé des applications dans divers domaines. Ils sont caractérisés par l'absence d'une infrastructure préexistante. Une liste des applications est donnée ci-dessous :

- **Domaine militaire** : l'utilisation des réseaux ad hoc permet à l'armée de bénéficier des avantages offerts par les réseaux conventionnels tout en préservant la connectivité des informations entre les véhicules, les forces armées et les quartiers généraux.
- Dans le domaine du paiement électronique distant, les réseaux ad hoc peuvent être utilisés pour faciliter les transactions sécurisées entre les commerçants et les clients. Par exemple, un commerçant peut utiliser un dispositif mobile équipé d'une technologie ad hoc pour accepter les paiements sans fil de la part des clients. Ces transactions peuvent être effectuées de manière sécurisée en utilisant des protocoles de cryptographie pour garantir la confidentialité des informations financières[26].
- Les réseaux ad hoc ont été largement utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks - WSN). Les réseaux de capteurs sont des systèmes composés de nombreux nœuds autonomes et peu coûteux, équipés de capteurs qui collectent des données environnementales telles que la température, l'humidité, la pression, la lumière, etc. Ces réseaux ont trouvé des applications dans de nombreux domaines, notamment le domaine commercial et environnemental[27].
- les réseaux VANET (Vehicular Ad hoc Networks) sont un exemple de réseau ad hoc dans lequel les nœuds mobiles sont des véhicules qui communiquent entre eux. Les VANET sont conçus pour faciliter la communication entre les véhicules, ainsi qu'entre les véhicules et les infrastructures routières, dans le but d'améliorer la sécurité et l'efficacité du transport[28].

1.4 Conclusion

Dans cette première section, nous avons exposé les bases théoriques des réseaux MANET, en les définissant et en présentant les modes de communication tels que unicast, multicast et broadcast. Nous avons également abordé leurs caractéristiques ainsi que leurs applications.

Chapitre 2

Les Réseaux de drones ad hoc ou FANETs.

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre consiste à introduire le monde aérien et les concepts clés associés à ce nouvel environnement. À cette fin, nous examinons en détail quelques idées fondamentales essentielles à la compréhension de ce système. Nous amorçons en apportant une définition des FANETs, en détaillant leurs modes de communication ainsi que leurs caractéristiques. Par la suite, nous présentons les différents modèles de mobilité. Enfin, nous offrons une table comparative entre les trois réseaux MANETs, VANETs et FANETs.

2.2 Définition

Les réseaux de drones ad hoc, également connus sous le nom de FANETs (acronyme de "Flying ad hoc networks"), sont une catégorie spécifique au sein des VANETs (Vehicular Ad hoc Networks)[29]. Les FANETs sont apparus pour assurer la communication entre les petits drones volants, connus sous le nom d'UAV (Véhicules Aériens Sans Pilote), équipés d'une caméra, de capteurs et d'un système de communication[15]. La figure 2.1 Montre un exemple d'un réseau FANET.

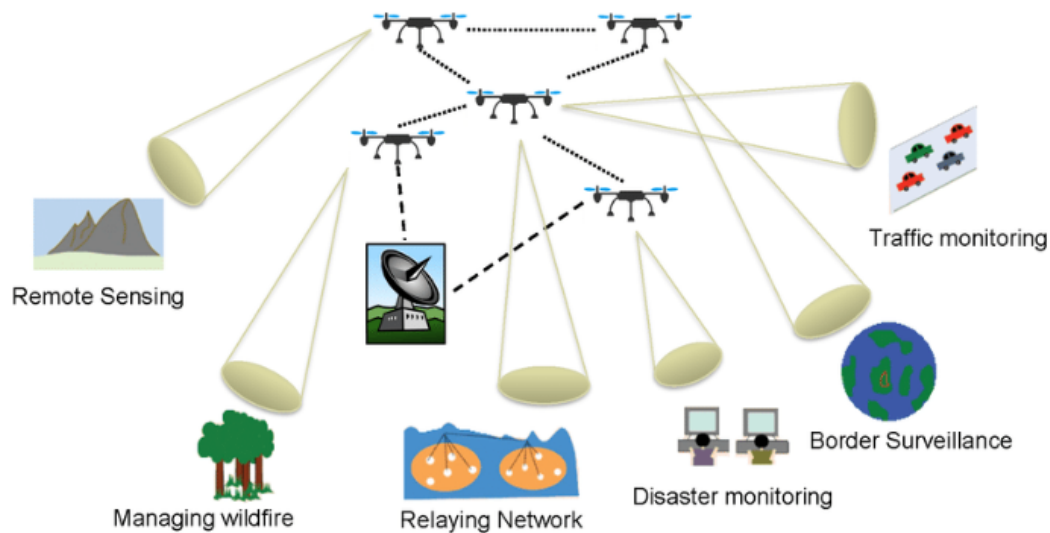


FIGURE 2.1 – Exemple d’un réseau FANET[7].

2.3 Modes de communication dans les FANETs

Dans les réseaux de drones ad hoc, les unités UAVs utilisent généralement deux modes de communication principaux[6] :

2.3.1 UAV à UAV

Les données sont transférées directement entre les UAV en utilisant divers algorithmes de routage. Étant donné que la topologie des FANETs change fréquemment en raison de l’ajout ou de la suppression d’UAV, le maintien de la communication entre les UAV entraîne la nécessité d’explorer plusieurs directions[10].

2.3.2 UAV à Infrastructure

La communication entre les drones et l’infrastructure est établie grâce à un sous-groupe d’UAV qui interagit avec cette infrastructure, qu’il s’agisse d’une station satellite ou terrestre. Ce mode de communication permet de transmettre des informations concernant des tâches prévues à une échelle plus vaste et requiert l’échange de données plus importantes[30].

Ces deux modes de communication peuvent être schématisés dans la Figure 2.2 suivante :

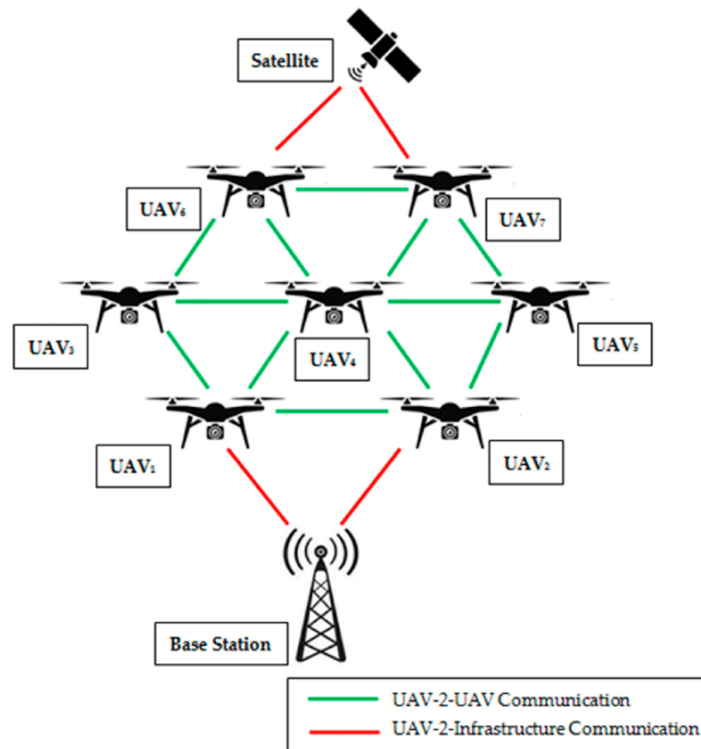


FIGURE 2.2 – Modes de communication dans le réseau FANET[6].

2.4 Caractéristiques des réseaux FANETs

Tout comme dans les MANETs, l'architecture des FANETs repose sur un réseau sans infrastructure, où plusieurs nœuds sont mobilisés pour acheminer les paquets de données. Parmi les autres caractéristiques, on compte les capacités d'auto-organisation, la gestion distribuée des données, ainsi que l'implication des nœuds en tant que points de communication et de coopération pour la transmission des données. Cependant, les FANETs possèdent également des caractéristiques spécifiques qui les distinguent des MANETs et des VANETs.

- **Véhicules aériens sans pilote (UAV) :**

Au sein des FANETs, les nœuds évoluent à une altitude élevée dans le ciel, bénéficiant d'une liberté de mouvement. Ces nœuds prennent la forme de drones ou d'UAV et opèrent sans nécessiter d'intervention humaine. En conséquence, la topologie des FANETs est sujette à des changements dynamiques. Cette dynamique peut engendrer des défaillances au niveau des connexions entre les nœuds[31].

- **Topologie du réseau :**

Au sein des FANETs, le degré de mobilité des nœuds est plus élevé, ce qui conduit à des changements fréquents et aléatoires dans la topologie du réseau[31].

- **Localisation :**

Dans certains cas, la vitesse des UAV est élevée, et dans d'autres cas, elle peut même être imprévisible. Les vitesses élevées et les topologies changeantes fréquemment nécessitent une localisation à de courts intervalles de temps. Dans cette méthode, la localisation peut se baser sur la position en fonction du réseau pour l'échange de paquets, ainsi que sur la position en fonction de l'altitude des UAV pour déterminer leur hauteur[15].

- **Couverture :**

Les FANETs sont particulièrement adaptés pour couvrir de vastes zones, comme dans les scénarios de cartographie ou de surveillance. Les drones utilisent diverses techniques de positionnement afin d'assurer une couverture efficace[31].

- **Densité de nœud :**

La quantité moyenne d'UAV dans une zone spécifique est appelée densité de nœuds au sein d'un réseau. La densité des nœuds des drones peut varier de faible à très dense en fonction de l'objectif de la mission. Les drones sont équipés pour des transmissions à la fois longue portée et courte portée. Dans le contexte des FANETs, leur arrangement doit répartir la densité sur des plages appropriées en les séparant conformément à l'essence du vol[32].

- **Consommation d'énergie :**

La contrainte énergétique dans les FANETs est modérée par rapport aux MANETs (qui ont la contrainte énergétique la plus élevée) et aux VANETs (qui ont la contrainte énergétique la plus faible). La disponibilité d'énergie a un impact sur la durée de vie des itinéraires, et par conséquent, les petits UAV doivent économiser de l'énergie pour soutenir des vols longs. Dans les VANETs, les véhicules sont généralement alimentés par une batterie de véhicule avec une contrainte énergétique moins stricte[33].

- **Modèle de propagation radio :**

Les particularités entre les FANET et les autres environnements d'opération de réseaux ad hoc influencent les caractéristiques de propagation des ondes radio. Les nœuds des MANET et des VANET se trouvent de façon marquée à proximité du sol et, fréquemment, la visibilité directe fait défaut entre l'émetteur et le récepteur. Par conséquent, les signaux radio subissent principalement l'impact de la configuration géographique du terrain. En opposition, dans le contexte des FANET, les nœuds peuvent occuper des altitudes plus élevées et, dans la plupart des cas, une ligne de visée est possible entre les UAVs[16].

2.5 Modèles de mobilité dans FANET

Les modèles de mobilité sont employés pour simuler les déplacements des nœuds mobiles réels, à savoir les UAVs, et pour reproduire un environnement réaliste au sein des FANET. Ils décrivent les mouvements des nœuds UAV ainsi que la manière dont leurs positions, accélérations et vitesses évoluent au fil du temps. Ces modèles servent à évaluer la pertinence d'un protocole donné (par exemple, un protocole de routage) dans une situation spécifique. Dans cette section[34], La Figure 2.3 présente les modèles de mobilité clés employés au sein des FANETs.

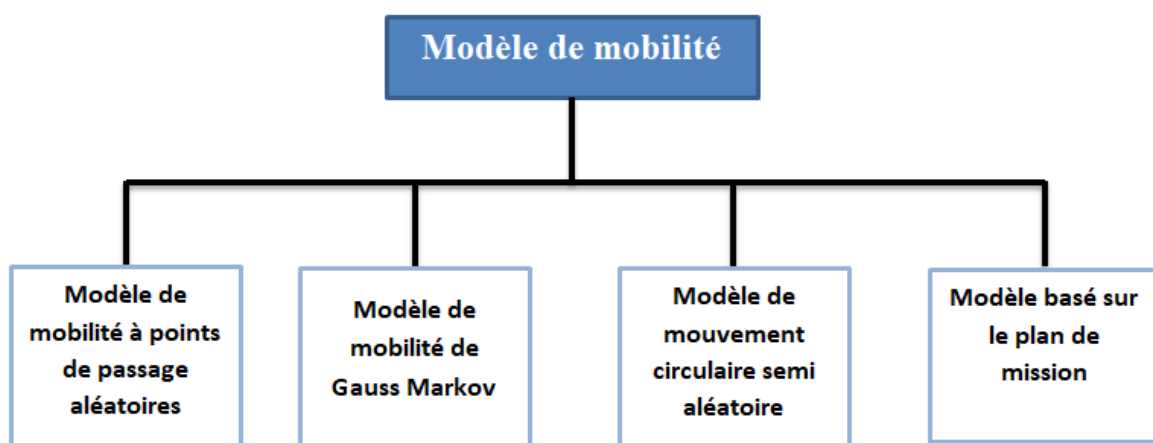


FIGURE 2.3 – Quelques modèles de mobilité dans FANET[8].

- **Random Way Point Mobility Model(RWP) :**

Ce modèle fait appel à des intervalles de temps aléatoires pour les déplacements et les pauses, et des valeurs aléatoires pour les vitesses et les directions. Il prend son origine au commencement de la simulation et s'achève à la clôture de celle-ci. Ce modèle joue un rôle crucial dans des scénarios concrets tels que les réseaux de capteurs sans fil, les zones de balayage, ainsi que les opérations de recherche et de sauvetage[35].

- **Gauss Markov Mobility Model (GMM) :**

Le modèle de mobilité utilise un paramètre ajustable pour moduler le degré d'aléatoire. Initialement, chaque UAV est configuré avec une direction et une vitesse précises. À chaque intervalle de temps subséquent, l'action réactualise la direction et la vitesse des nœuds. Ces valeurs sont déterminées en se basant sur la position précédente[31].

- **Semi Random Circular Movement Model(SRCM) :**

Ce modèle est conçu pour les drones dont les trajectoires suivent des courbes. Il est utilisé pour simuler le mouvement d'UAV lorsqu'ils collectent des données sur des zones spécifiques en effectuant une rotation autour de ces zones. De cette manière, chaque drone surveille une partie de la zone où l'objet de recherche est localisé[35].

- **Mission Plan-Based Model(MPB) :**

Dans le modèle MPB, les informations du plan de vol sont préétablies, ce qui permet aux avions de suivre ce plan. Cela signifie que l'avion suit la trajectoire prévue à chaque itération, couvrant l'espace de la mission où il peut se déplacer, et les données de localisation potentielles sont accessibles. Dans le modèle de mobilité MPB, une fois que le temps s'est écoulé, les enregistrements de mobilité sont créés et actualisés. Pour chaque avion, les points de départ et d'arrivée sont choisis de manière arbitraire, tandis que la vitesse et le temps de vol sont spécifiés. Si un avion atteint sa destination avant la fin du temps de vol, il démarre un nouveau vol en changeant de direction et en continuant son vol[36].

2.6 Applications des réseaux de drones ad hoc

Trois catégories d'applications peuvent être identifiées au sein des FANETs, comme suit :

2.6.1 Coopération multi-UAV

De nombreuses applications reposent sur la coopération multi-UAV, telles que la détection de cibles, la localisation géographique précise, le suivi et la surveillance en cas de catastrophe ainsi que les situations d'urgence, et également pour [37] :

- Le transport de charges en exploitant la capacité de charge utile combinée de plusieurs UAV pour transporter des charges plus lourdes.
- La détection et la surveillance des incendies de forêt.
- Les missions de surveillance aérienne, en particulier dans les domaines de la sécurité et de la sûreté.

2.6.2 Tâches UAV-sol

Des informations cruciales doivent être échangées entre les UAV et l'opérateur humain se trouvant sur le terrain, afin de prendre les décisions appropriées dans divers scénarios tels que les missions de recherche et de sauvetage, la surveillance militaire et diverses applications civiles[34].

2.6.3 Collaborations UAV-VANET

La coopération entre les UAV et les VANETs est une tendance émergente et peut être exploitée dans diverses applications telles que l'exploration du trafic routier, l'amélioration du routage, la livraison de colis de données, la surveillance du trafic, le guidage d'itinéraire, et bien d'autres[37].

2.7 Comparaison entre MANET, VANET et FANET

Les distinctions les plus notables entre les réseaux FANET et d'autres réseaux ad hoc tels que MANET et VANET résident principalement dans la topologie changeante du réseau, la vitesse des nœuds et leur mobilité. En outre, FANET se distingue de MANET et VANET en termes de

TABLE 2.1 – Différences entre FANET, VANET et MANET[15],[16].

Critère de comparaison	MANET	VANET	FANET
Mobilité des nœuds	Bas	Haute	Très haute
Modèle de mobilité	Aléatoire	Régulier	Régulier/Aléatoire
Localisation	GPS	GPS,AGPS	GPS,AGPS
Puissance de calcul	Limité	Moyen	Très grand
changements de topologie	lente	rapide	rapide
Densité	Faible	Haute	Très faible

connexions, de qualité de service, de fonctionnalités de déplacement des nœuds et de distribution des données. Une comparaison exhaustive entre MANET, VANET et FANET selon divers critères est présentée dans le Tableau 2.1. Les nœuds FANET (UAV) sont employés comme collecteurs mobiles pour récupérer des données provenant de l’Internet des objets (IoT). En effet, chaque UAV au sein de FANET peut jouer un rôle clé dans l’écosystème IoT, lequel comprend des dispositifs munis de petits capteurs et de batteries à faible capacité. Ces dispositifs ont généralement des limitations en termes d’autonomie énergétique, ce qui restreint leur portée sur de longues distances. Par conséquent, les drones se déplacent de manière dynamique vers les appareils IoT, collectent les données et les transfèrent à d’autres UAV du réseau FANET situés en dehors de la portée de communication des dispositifs IoT[30].

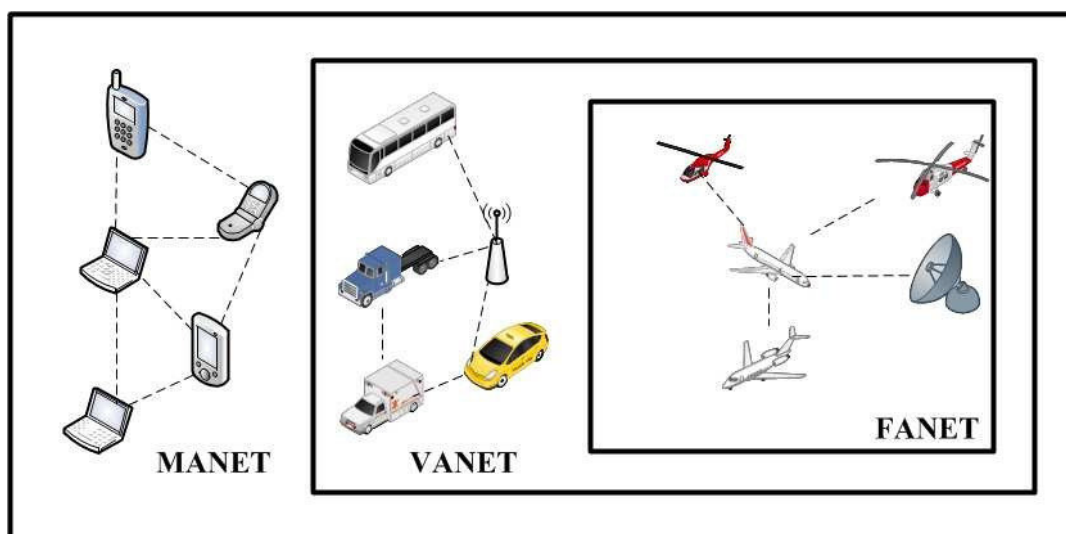


FIGURE 2.4 – MANET, VANET et FANET[9].

2.8 Conclusion

Les FANETs ont émergé en tant que domaine de recherche en plein essor, consistant en un ensemble de petits drones interconnectés en mode ad hoc. Ces réseaux se distinguent par leur grande mobilité, leurs changements de topologie fréquents et le déplacement tridimensionnel des nœuds, ce qui engendre des défis en matière de mise en réseau. Pour surmonter ces obstacles, le choix d'une architecture de communication adéquate et de protocoles de routage que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Etude des Protocoles de Routage dans les Réseaux FANET

3.1 Introduction

Le routage joue un rôle crucial dans les réseaux ad-hoc en facilitant l'échange de données entre les nœuds mobiles grâce à l'utilisation de protocoles appropriés. Dans ce chapitre, nous aborderons le problème du routage dans les réseaux ad hoc. Ensuite, nous présenterons plusieurs protocoles de routage spécifiquement développés pour les réseaux de drones dédiés, en les comparant selon des critères préalablement définis. Parmi ces protocoles, nous accorderons une attention particulière au protocole de routage OLSR, qui constitue la base de notre étude.

3.2 Problème du routage dans les réseaux ad hoc

Dans les réseaux ad hoc, le routage des données est essentiel pour assurer la connectivité entre une source et une destination à travers un réseau. Étant donné l'absence d'infrastructure fixe dans ces réseaux, les dispositifs mobiles doivent prendre en charge le routage des données par eux-mêmes. Lorsque la destination est hors de portée directe de la source, les nœuds mobiles agissent en tant que relais, transmettant les données les uns aux autres jusqu'à ce qu'elles atteignent leur destination finale. Cependant, en raison de la mobilité des nœuds, les chemins de routage peuvent devenir instables, ce qui pose un défi majeur pour assurer une connectivité

fiable. De plus, les ressources radio limitées, telles que le débit variable et la bande passante limitée, ajoutent une contrainte supplémentaire à la stratégie de routage dans ces réseaux.

Les protocoles de routage assurent le transfert de données d'un dispositif mobile à un autre via des routes multi-sauts. Les liens radio dans ces réseaux sont dynamiques et sujets à des changements fréquents. Les connexions se forment et se dissipent en raison des déplacements des dispositifs mobiles. Les protocoles de routage doivent s'adapter à ces changements de manière efficace. De plus, ils doivent tenir compte des contraintes des ressources limitées qui sont caractéristiques des réseaux ad hoc. Le protocole de routage doit garantir que les données sont acheminées via des routes disposant des ressources nécessaires, même en présence de changements fréquents de chemins. Le groupe de travail MANET de l'Internet Engineering Task Force (IETF) a normalisé plusieurs protocoles de routage qui seront décrits dans la suite de ce chapitre.

3.3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux

FANETs

Les protocoles de routage existants pour les réseaux MANET et VANET sont souvent privilégiés et examinés en vue de leur application aux FANET. Cependant, en raison des caractéristiques spécifiques des drones, tels que les changements rapides de topologie, la qualité variable des liaisons et les mouvements rapides dans l'espace tridimensionnel, le routage au sein de ces réseaux devient une tâche cruciale. De nombreux protocoles de routage conçus pour les réseaux MANET et VANET ne sont pas directement applicables aux FANET en raison de ces particularités. Pour répondre aux besoins de cette nouvelle catégorie de réseaux ad hoc, certains protocoles de routage ad hoc existants ont été adaptés, tandis que de nouveaux protocoles spécifiques au routage dans les FANET ont été développés. Ces protocoles de routage sont généralement regroupés en plusieurs catégories majeures, comme illustré dans la figure 3.1 ci-dessous.

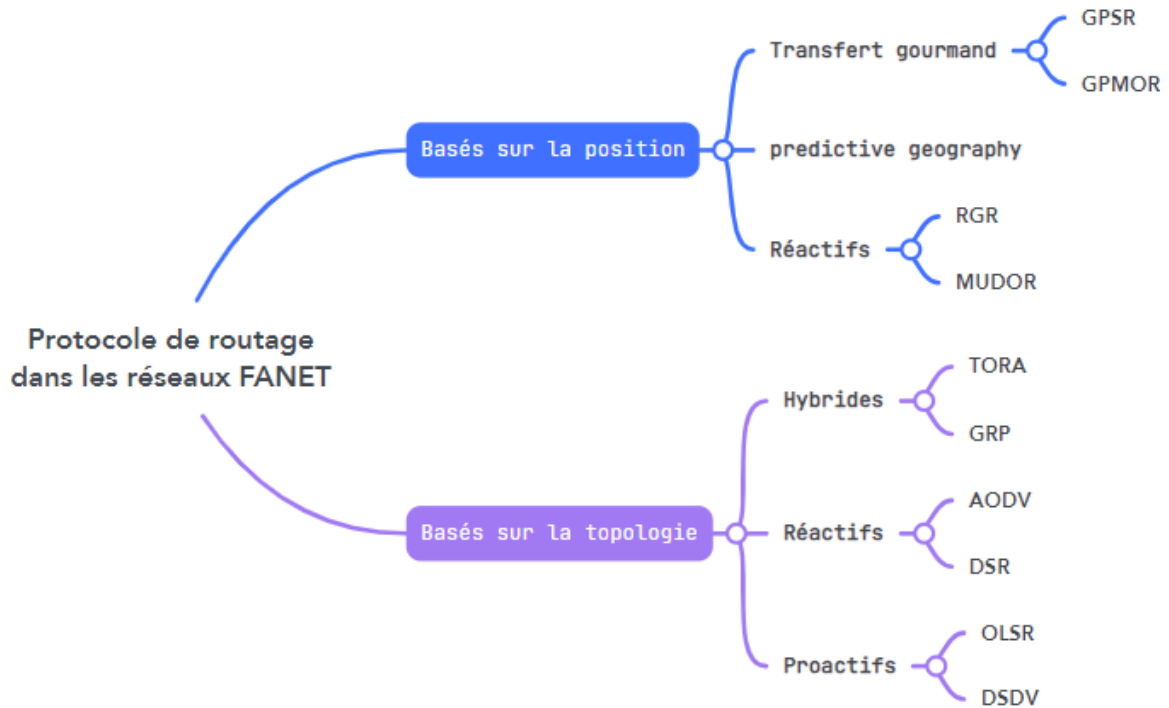


FIGURE 3.1 – Classification des protocoles de routage dans les FANETs[10].

3.3.1 Les protocoles Proactifs

Un protocole proactif est un protocole qui construit les tables de routage avant que la demande de routage ne soit effectuée. Ces protocoles proactifs sont basés sur les mêmes principes que les protocoles de routage utilisés dans les réseaux filaires. Ils utilisent généralement deux principales méthodes : la méthode de l'état de lien (Stat Link), où chaque nœud diffuse dans le réseau des informations sur ses voisins, et la méthode du vecteur de distance (Distance Vector), qui propage des informations sur sa distance à tous les nœuds du réseau. Ces deux méthodes nécessitent une mise à jour régulière des données de routage et cherchent à trouver le chemin le plus court entre l'émetteur et le récepteur en utilisant des algorithmes de routage.

Actuellement, il existe plusieurs protocoles de routage proactifs tels que DSDV, FSR, HSR, et OLSR. Dans la suite, nous allons décrire le protocole OLSR, qui est l'un des protocoles les plus importants de cette classe.

3.3.1.1 Le protocoles OLSR (Optimized Link State Routing)

a. Définition :

Le protocole OLSR est un protocole proactif proposé par l'équipe projet HIPERCOM-INRIA. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un protocole basé sur l'état de liens qui utilise un mécanisme d'inondation optimisée pour limiter la diffusion de messages de contrôle dans le réseau[38]. Il offre des chemins optimaux en termes du nombre de sauts dans le réseau en utilisant des relais multipoints. Cette approche implique la sélection d'un sous-ensemble de voisins, appelés relais multipoints (MPR - Multi Point Relay), pour chaque nœud. Les nœuds choisis comme MPR sont ceux qui se trouvent à une distance de deux sauts de la source. Les relais multipoints sont utilisés dans le but de minimiser le trafic généré par la diffusion des messages de contrôle dans le réseau[25].

Pour mettre à jour les tables de routage, le protocole OLSR utilise des messages de contrôle périodiques, car il est de nature proactive. Quatre types de messages principaux sont utilisés :

1. **Hello** : Les nœuds utilisent les messages "HELLO" pour la détection des voisinages[6].

Le schéma ci-dessous (Figure 3.2) illustre le format de message Hello :

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
Reserved										Htime					Willingness																
Link Code					Reserved					Link message size																					
Neighbor interface address																															
Neighbor interface address																															
.....																															
....																															

FIGURE 3.2 – Format de message Hello standard[11].

Les champs du message Hello sont définis comme suit :

- **Reserved** : Ce champ doit contenir « 0000000000000000 ».
- **Htime** : Intervalle d'émission des messages HELLO.
- **Willingness** : permet de forcer le passage d'un nœud en MPR.
- **Link Code** : Code identifiant le type de lien (pas d'information, symétrique, asymétrique, etc.) entre l'expéditeur et les interfaces listées « Neighbor Interface Address ».

2. **TC (Topology Control)** : utilisés pour diffuser les informations de topologie dans le protocole OLSR[12]. La figure 3.3 illustre le format de message TC.

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
ANSN										Reserved																					
Advertised Neighbor Main Address																															
Advertised Neighbor Main Address																															
.....																															
.																															

FIGURE 3.3 – Format de message TC standard[11].

3. **HNA (Host and Network Association)** : utilisés pour déclarer les sous-réseaux et les hôtes qui sont joignables par un nœud jouant le rôle de passerelle[6].

4. **MID (Multiple Interface Déclaration)** : utilisés pour publier la liste des interfaces de chaque nœud[12].

b. Fonctionnement du protocole OLSR :

Chaque nœud diffuse périodiquement un message HELLO qui contient la liste de ses voisins directs, l'état et le type des liens avec ces voisins, ainsi que la liste de ses nœuds MPR. Les messages HELLO ne sont pas relayés et servent à détecter les voisins à un et deux sauts et à calculer les MPR. Les MPR d'un nœud correspondent à un sous-ensemble de ses voisins à un saut, choisis de manière à couvrir tout son voisinage à deux sauts. Les messages HELLO permettent donc à chaque nœud de déterminer l'ensemble de ses nœuds MPR et, pour chaque MPR, de maintenir la liste des nœuds sélecteurs qui l'ont choisi comme relais multipoints[38].

Les messages TC sont diffusés périodiquement dans tout le réseau pour permettre aux nœuds d'obtenir et de mettre à jour la représentation complète de la topologie du réseau. Ces messages sont diffusés à une fréquence inférieure à celle des messages HELLO. Afin de minimiser les retransmissions des messages TC, seuls les nœuds MPR ont pour charge de générer et relayer les paquets TC. La procédure utilisée pour l'élection des MPR garantit que tous les nœuds du réseau reçoivent les paquets TC sauf à défaut de liaison radio. Chaque MPR spécifie dans le

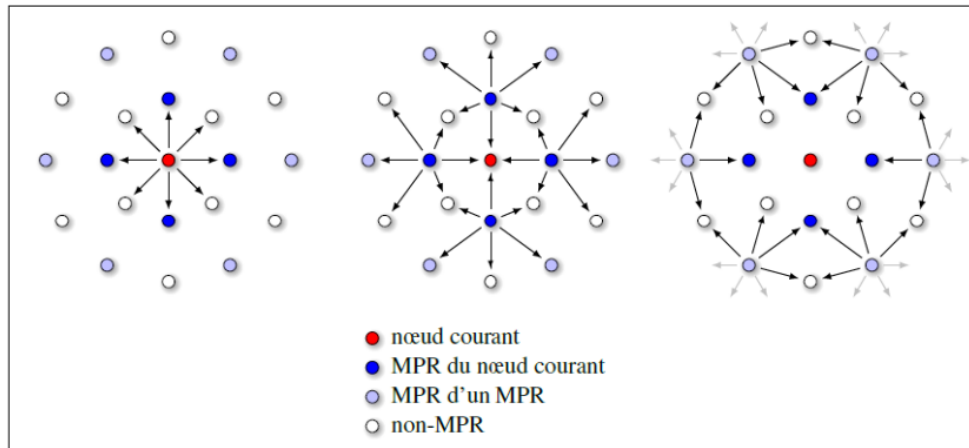


FIGURE 3.4 – Sélection des MPRs dans OLSR.

message TC qu'il génère la liste de ses voisins sélecteurs qui l'ont choisi comme relai multi-points et l'état des liens avec ses voisins. Les informations contenues dans les paquets TC sont utilisées par tous les nœuds pour la construction des tables de routage. Pour l'envoi et l'acheminement des données, les nœuds favorisent les routes avec le nombre de sauts minimum[38].

3.3.2 Les protocoles réactifs

Un protocole réactif est un protocole qui construit une table de routage lorsqu'un nœud en fait la demande. Il n'a pas connaissance de la topologie du réseau et détermine le chemin à emprunter pour accéder à un nœud du réseau lorsqu'il en est sollicité. Les protocoles réactifs utilisent des algorithmes classiques tels que le routage par vecteur de distance. Les routes sont établies uniquement sur demande et seules les routes en cours d'utilisation sont maintenues. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer des paquets, une étape de découverte de route est initiée par la diffusion d'un message de recherche de route. Tout nœud recevant ce message et ne disposant pas d'informations sur la destination le diffuse à son tour. Ce mécanisme est appelé mécanisme d'inondation[39]. Parmi les protocoles basés sur ce principe, on retrouve AODV, DSR, ABR, SSA. Dans la suite de ce paragraphe, nous allons décrire plus en détail les protocoles AODV et DSR.

3.3.2.1 Le protocole AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing)

AODV (On Demand Distance Vector) est un protocole de routage réactif; dans lequel les chemins sont découverts et maintenus à la demande lorsqu'un nœud souhaite envoyer des données à un nœud destinataire.

Lorsqu'un nœud source souhaite envoyer un message à un nœud destinataire dont il ne connaît pas la route, il utilise une procédure de découverte de route pour y parvenir. Il diffuse un paquet appelé "RREQ" (Route Request) à ses voisins, qui le diffusent également à leurs propres voisins, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il atteigne le destinataire ou un nœud possédant une route valide. Dans ce cas, l'un de ces nœuds transmet un paquet appelé "RREP" (Route Reply) vers la source. Une fois que la source reçoit un "RREP", elle commence à transmettre ses données. Si ultérieurement, la source reçoit un "RREP" avec un nombre de sauts inférieur au premier "RREP", elle met à jour la route et utilise cette dernière car elle est meilleure. Le protocole AODV supprime les routes qui ne sont pas actives. Une route est considérée active si elle est utilisée périodiquement pour transmettre des données de la source vers la destination. Lorsque la source cesse d'émettre des données via cette route, le lien est considéré comme expiré et est effacé des tables de routage des nœuds intermédiaires. Si un lien est rompu, un paquet d'erreur de route appelé "RERR" (Route Error) est envoyé à la source pour l'informer que la destination n'est plus accessible.[25]. En outre, AODV déclenche périodiquement des paquets de contrôle "HELLO" pour s'assurer de la validité des liens. La Figure 3.5 illustre le fonctionnement du protocole AODV.

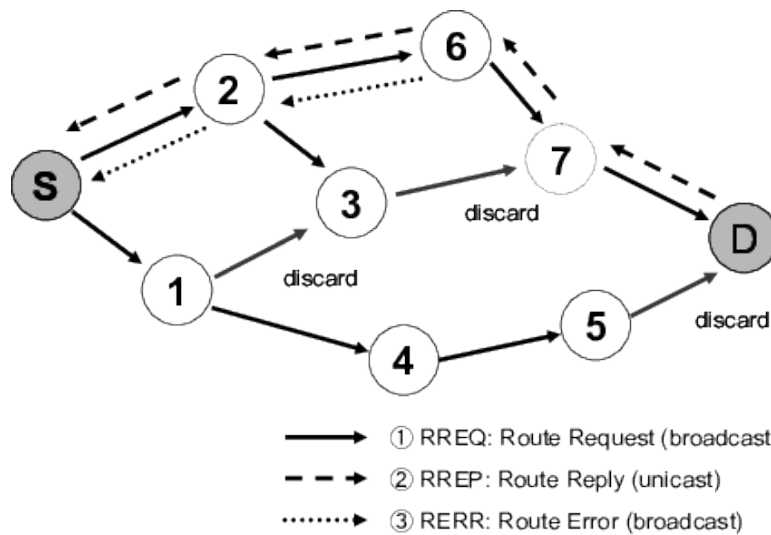


FIGURE 3.5 – Recherche, installation et maintenance de route dans AODV[12].

3.3.2.2 Le protocole DSR (Dynamic Source Routing)

a. Définition :

C'est un protocole réactif qui évite tout échange périodique d'informations de contrôle, et seules les routes actives sont conservées dans les tables de routage. DSR fonctionne de manière similaire à AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector). La principale différence entre ces deux protocoles réside dans la façon dont la route est établie. Dans AODV, la route est déterminée de proche en proche, c'est-à-dire que chaque nœud transmet le paquet de routage jusqu'à atteindre la destination. En revanche, DSR utilise une technique de routage basée sur la source. Cela signifie que chaque paquet contient l'historique complet du chemin parcouru depuis la source jusqu'à la destination. Ainsi, lorsqu'un nœud reçoit un paquet, il peut extraire l'information sur la route à suivre directement à partir du paquet lui-même, sans avoir besoin de consulter une table de routage.[40]. Dans cette technique la source détermine la séquence complète des nœuds à travers lesquels les paquets de données seront envoyés[25].

Effectivement, DSR propose deux mécanismes fondamentaux : la découverte de route et la maintenance de route.

b. Découverte de route :

Dans le cas où le destinataire n'est pas présent dans le cache du nœud source, une procédure de découverte de route est initiée. Les paquets de découverte de route contiennent les adresses source et destination, ainsi qu'un identifiant permettant aux nœuds intermédiaires de savoir s'ils ont déjà traité ces paquets. Le chemin vers la destination est créé dans le paquet de recherche de route. Chaque nœud qui reçoit ce paquet ajoute son adresse à la route préexistante contenue dans le paquet. Lorsqu'un paquet de recherche de route atteint sa destination ou un nœud qui possède une route valide vers la destination, ce nœud répond à la source initiale.

Cependant, étant donné que ce nœud ne possède a priori pas de route vers la source initiale (dans le cas où les liens ne sont pas bidirectionnels), une nouvelle recherche de route doit être entreprise. Pour éviter une boucle infinie de recherches de route, la route construite est ajoutée à la nouvelle recherche de route. Cela permet au nœud source de disposer d'une route valide pour recevoir la réponse[17]. La figure 3.6 suivante illustre le processus de la découverte de la route par DSR :

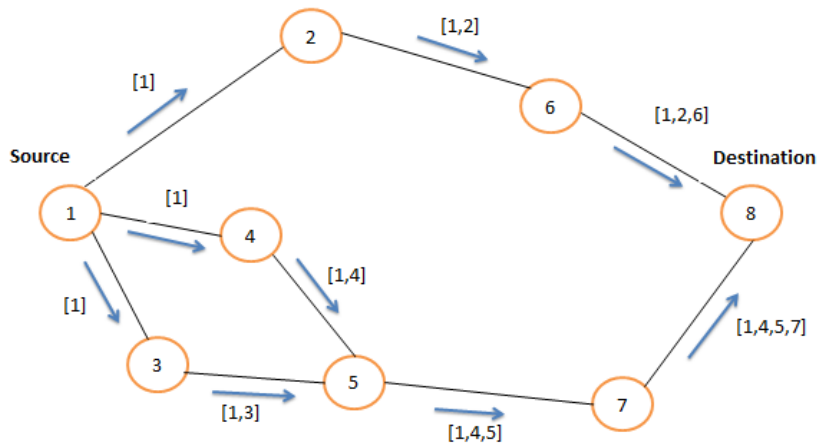


FIGURE 3.6 – La transmission de RREQ[13].

Une fois le paquet atteint sa destination, il retourne à la source un paquet Route Reply (RREP), voire la Figure 3.7. **c. Maintenance de route :**

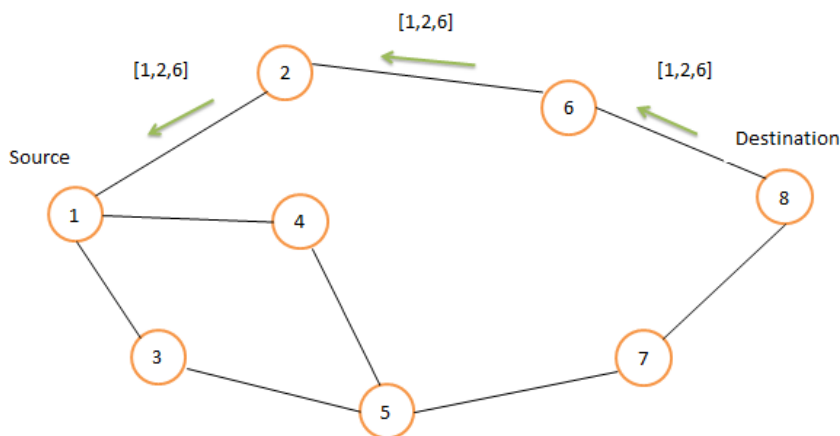


FIGURE 3.7 – Renvoi du chemin par DSR[13].

Pour assurer la validité des chemins utilisés, DSR exécute une procédure de maintenance de routes. Lorsqu'un nœud détecte un problème fatal de transmission grâce à sa couche de liaison, un message RERR (Route error) est envoyé à l'émetteur original du paquet. Le message d'erreur contient l'adresse du nœud qui a détecté l'erreur et celle du nœud qui le suit dans le chemin. Lors de la réception du paquet d'erreur par l'hôte source, le nœud concerné par l'erreur est supprimé du chemin enregistré, et tous les chemins qui contiennent ce nœud deviennent invalides à ce stade. Par la suite, une nouvelle opération de découverte de routes vers la destination est initiée par l'émetteur.[17].

3.3.3 Les protocoles hybrides

Les protocoles de routage hybrides combinent les caractéristiques des protocoles de routage réactifs et proactifs afin d'optimiser les performances du réseau. Dans un protocole de routage hybride, le réseau est décomposé en un ensemble de zones. Le routage à l'intérieur des zones est assuré par un protocole de routage proactif alors que le routage entre les zones est assuré par un protocole de routage réactif. Les protocoles de routage hybrides ont l'avantage de scalabilité, car la taille des tables de routage est réduite à la taille des zones. De plus, ils permettent un temps de réponse plus court que les protocoles de routage purement réactifs[17]. Parmi les protocoles les plus connus, on peut citer : GRP et TORA.

La Table 3.1 suivante montre les différents avantages et inconvénients pour les trios protocoles Proactifs, Réactifs et Hybrides.

TABLE 3.1 – Avantages et inconvénient des différentes catégories de protocoles de routage[17][18].

Protocoles	Avantages	Inconvénients
PrOactifs	<ul style="list-style-type: none">-La latence est minimale.-Ils conviennent aux réseaux denses de taille moyenne.	<ul style="list-style-type: none">-La capacité d'échange du réseau est limitée.-La consommation énergétique est plus élevée.
Réactifs	<ul style="list-style-type: none">-Optimiser l'utilisation de la bande passante et de l'énergie.-Générer du trafic de contrôle uniquement lorsque cela est nécessaire.	<ul style="list-style-type: none">-Inondation de messages en très peu de temps.-engendrer des temps de latence.
Hybrides	<ul style="list-style-type: none">-Les routes sont disponibles jusqu'à n sauts.-Optimiser l'utilisation de la bande passante.	<ul style="list-style-type: none">-Recherche des routes complexes.-Inondation de messages en très peu de temps.

3.4 Choix du protocole de routage OLSR

Après une étude des différents protocoles de routage existants dans les réseaux ad hoc, nous sommes intéressés à choisir un. Nous avons finalement opté pour OLSR comme choix de protocole.

3.5 conclusion

Dans Ce chapitre Nous avons souligné le problème du routage dû à la mobilité, nous a permis de comprendre la classification des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc. Nous avons exploré les protocoles proactifs, réactifs et hybrides, en examinant leurs mécanismes de fonctionnement et leurs avantages respectifs. Comprendre ces différentes catégories de protocoles de routage est essentiel pour choisir le protocole le plus approprié en fonction des besoins spécifiques d'un réseau ad hoc donné. Dans le prochain chapitre, nous allons expliquer la notion de qualité de service (QoS) .

Chapitre 4

La qualité de service (QoS)

4.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies de communication a conduit à une demande croissante d'une expérience utilisateur de haute qualité dans les réseaux. C'est là qu'intervient la qualité de service (QoS), un concept fondamental qui vise à garantir des performances spécifiques et fiables pour répondre aux besoins des utilisateurs et des applications.

Dans cette chapitre, nous aborderons la définition de la qualité de service, les métriques associées, ainsi que son application dans les réseaux ad hoc. Nous discuterons également des solutions de qualité de service dans ces réseaux.

4.2 Définition

Dans le domaine des télécommunications, l'objectif de la qualité de service (QoS) est d'améliorer les performances de la communication, en veillant à ce que le contenu soit correctement acheminé et que les ressources du réseau soient utilisées de manière optimale. La QoS peut être définie comme le niveau de satisfaction d'un utilisateur vis-à-vis des services fournis par un système de communication. Selon la définition donnée dans, la QoS correspond à la capacité d'un élément du réseau (tel qu'un routeur, un nœud ou une application) à garantir un certain niveau de performance dans le transport des données. Le RFC 2386 caractérise quant à lui la QoS comme un ensemble d'exigences à respecter par le réseau pour assurer le transport du

trafic d'une source vers une destination[41].

4.3 Les Métriques de la qualité de service

Pour quantifier la qualité de service (QoS) et la mesurer, différentes métriques ont été définies afin de garantir la QoS et répondre aux besoins implicites et explicites des utilisateurs. Ces métriques peuvent être regroupées en différentes catégories[27] :

- Les métriques additives, telles que le délai de transmission de bout en bout, qui est calculé en sommant les délais de transmission à travers chaque saut nécessaires pour atteindre la destination.
- Les métriques concaves, comme la bande passante, qui correspond à la bande passante minimale offerte par les différents liens de transmission.
- Les métriques multiplicatives, comme la probabilité de perte des paquets, qui est le produit des probabilités de perte des paquets le long du chemin de transmission .

La RFC 2386 définit la QoS comme un ensemble de besoins que le réseau doit satisfaire pour le transport du trafic d'une source vers une destination. Ces besoins peuvent être traduits en un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables tels que :

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

Dans la suite, nous présenterons brièvement quelques-unes de ces métriques de QoS.

1. **Bande passante** : La bande passante représente la capacité du réseau à transmettre des données de bout en bout, et correspond à la largeur de bande en fréquence allouée pour un service donné. La gestion de la bande passante est un élément essentiel pour garantir la qualité de service.
2. **Délai de bout en bout** : Le délai de bout en bout mesure le temps nécessaire pour qu'un paquet soit envoyé par un émetteur et atteigne sa destination. Ce délai englobe plusieurs éléments, notamment le délai de propagation lié à la topologie du réseau, la distance entre l'émetteur et le récepteur, le délai de traitement des paquets lors de leur

passage par les nœuds du réseau, et le délai de transmission qui dépend du volume d'informations transmises, de la charge du réseau et du partage de la bande passante. Garantir ce critère de délai implique la mise en place de mécanismes assurant l'efficacité du traitement et de la transmission des données de bout en bout, en prenant en compte les trois critères mentionnés ci-dessus.

3. **Gigue (variation du délai) :** La gigue est liée à la variation du délai de transmission de bout en bout. Elle est principalement due aux différences de performance des équipements du réseau dans le traitement des paquets. Cette variation nuit à la qualité de service requise et nécessite la mise en œuvre de mécanismes d'ordonnement des paquets à la réception.
4. **La perte des paquets :** La métrique de perte des paquets permet d'évaluer le taux de paquets perdus dans le réseau, ce qui se traduit par la non-livraison des données contenues dans ces paquets. Cette situation se produit généralement en raison d'erreurs d'intégrité des données, souvent causées par une congestion du réseau.

4.4 Qualité de service dans les réseaux ad hoc

La problématique de la qualité de service (QoS) a été largement étudiée dans le contexte des réseaux filaires. Dans ce type de réseaux, des équipements tels que les routeurs peuvent prendre en charge le contrôle de la QoS. Cependant, la situation est complètement différente dans les réseaux ad hoc sans fil. En effet, il n'y a aucun élément centralisé dans le réseau capable de gérer seul la QoS. Cette fonction doit donc être distribuée entre les nœuds du réseau. De plus, les conditions de transmission dans un réseau sans fil ad hoc sont constamment changeantes, avec des facteurs tels que la mobilité des nœuds et un milieu radio peu fiable. Les ressources du réseau sont également plus limitées que celles des réseaux filaires, notamment en ce qui concerne la bande passante. Par conséquent, il n'est pas possible de répondre aux mêmes besoins que dans le cas des applications des réseaux filaires[14].

4.4.1 Le besoin en QoS des applications

Au début de l'émergence des réseaux mobiles ad hoc, l'objectif principal était d'assurer la communication entre les nœuds en utilisant le service "best effort" (meilleur effort). Cependant, pour des applications telles que le multimédia, la téléphonie, les jeux interactifs, les applications

critiques, etc, ce service n'est pas suffisant, car ces applications ont des exigences spécifiques en termes de critères (comme la bande passante, le délai, etc.)[14].

Les besoins en qualité de service varient en fonction du type d'application. Par exemple, pour les applications en temps réel telles que la voix et la vidéo, il est essentiel que le délai de bout en bout d'un paquet soit borné, sinon le paquet devient inutile. D'autre part, les applications non temps réel comme le transfert de fichiers ou la messagerie se concentrent davantage sur la fiabilité des communications. La figure 4.1 illustre un exemple des besoins de quelques applications en termes de qualité de service, en mettant particulièrement l'accent sur deux métriques : la bande passante et le délai de bout en bout[14].

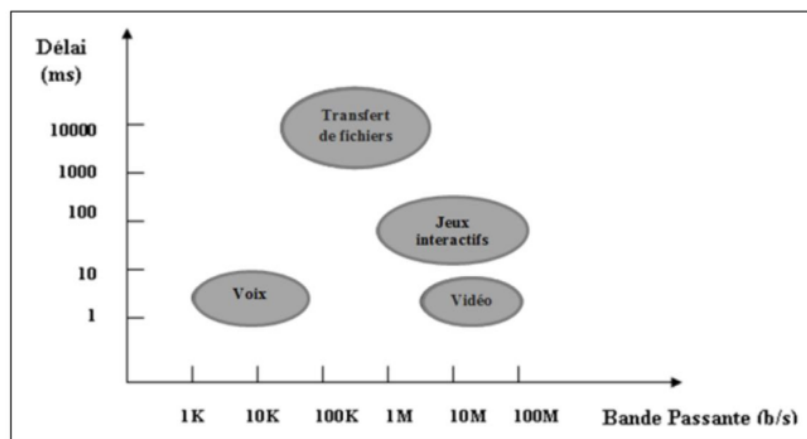


FIGURE 4.1 – Besoin en délai et bande passante des applications[14].

4.4.2 Objectifs de la qualité de service

Dans les réseaux de télécommunication, l'objectif de la qualité de service (QoS) est d'améliorer le comportement global des communications, en assurant un acheminement adéquat du contenu et en optimisant l'utilisation des ressources du réseau. Dans le cas des réseaux ad hoc, la QoS nous permet de :

- Offrir des traitements adaptés aux différentes applications.
- Permettre une gestion plus fine du réseau.
- Assurer un partage équitable des ressources.
- Optimiser les coûts des réseaux.

Il est important de noter que dans les réseaux ad hoc, l'objectif d'un support de QoS n'est pas de garantir une QoS stricte, mais plutôt de s'efforcer de fournir une QoS proche des exigences demandées, tout en assurant une utilisation efficace des ressources et en acceptant un nombre important de flux.

4.5 Solutions de qualité de service dans les réseaux ad hoc

Les solutions de qualité de service (QoS) pour les réseaux mobiles ad hoc peuvent être regroupées en quatre catégories, comme illustré dans la figure 4.2 :

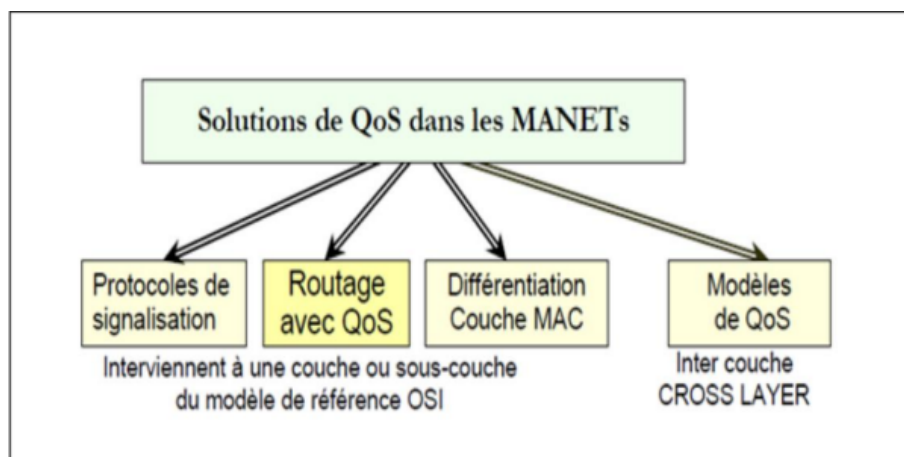


FIGURE 4.2 – Solutions de QoS pour les réseaux ad hoc[14].

1. Modèles de qualité de service : Ces modèles définissent des architectures spécifiques visant à garantir une certaine qualité de service.
2. Différenciation des services au niveau de la couche MAC : Ces solutions fournissent un ensemble d'outils permettant de mettre en œuvre des règles de qualité de service au niveau de la couche MAC (Medium Access Control). Cela permet de différencier le traitement des différents types de trafic et d'appliquer des politiques de QoS.
3. Mécanismes de réservation (protocoles de signalisation) : Ces mécanismes définissent des messages de contrôle qui sont utilisés pour réserver des ressources dans le réseau. Ils permettent de garantir une allocation adéquate des ressources pour les flux de données prioritaires.
4. Protocoles de routage avec qualité de service : Ces protocoles sont responsables de la recherche de routes qui répondent à certains critères de qualité de service. Ils permettent

de sélectionner les chemins les plus appropriés pour acheminer les données en tenant compte des exigences de QoS.

Il est important de souligner que ces solutions ne sont pas indépendantes les unes des autres. Pour construire un modèle de qualité de service efficace, les composants de QoS tels que le routage QoS, le protocole de signalisation et le protocole MAC avec QoS doivent coopérer et se compléter mutuellement. En particulier, le protocole MAC avec QoS joue un rôle essentiel dans la QoS des réseaux ad hoc, car toutes les couches supérieures (routage QoS et protocole de signalisation) en dépendent.

4.6 Conclusion

La qualité de service (QoS) est un aspect essentiel dans la conception et la gestion des réseaux de communication. Dans cette discussion, nous avons exploré plusieurs aspects clés de la QoS, notamment sa définition, les métriques utilisées pour l'évaluer, son application dans les réseaux ad hoc.

Dans les réseaux ad hoc, où les nœuds sont autonomes et la topologie est dynamique, la QoS présente des défis supplémentaires. Des mécanismes spécifiques, tels que les protocoles de routage QoS-aware, la gestion des ressources et la planification des transmissions, sont nécessaires pour garantir des performances optimales dans ces environnements.

En conclusion, la qualité de service joue un rôle critique dans la fourniture d'une expérience utilisateur satisfaisante dans les réseaux de communication. Comprendre les définitions, les métriques et les solutions associées à la QoS est essentiel pour concevoir et gérer des réseaux performants et fiables.

Chapitre 5

Implémentation et Réalisation

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'environnement de simulation, la configuration des paramètres d'entrée et les critères d'évaluation. Enfin, nous aborderons l'interprétation des résultats des simulations.

5.2 Environnement de travail

Nous avons adapté notre simulation avec :

5.2.1 Environnement Matériel

La simulation a été réalisée sur un ordinateur ASUS X550CC avec les spécifications suivantes :

TABLE 5.1 – spécifications de l'appareil .

Système d'exploitation	Processeur	Mémoire	Type
Windows 10 Professionnel	Intel(R) Core(TM) i3-3217U CPU @ 1.80GHz 1.80 GHz	8,00 Go	Système d'exploitation 64 bits processeur x64

5.2.2 Environnement logiciel

Notre simulation a été réalisée en utilisant l'environnement logiciel suivant :

5.2.2.1 VIRTUALBOX

VB (Virtualbox) est un logiciel open-source de virtualisation pour l'architecture informatique x86. Il fonctionne comme un hyperviseur en permettant la création de machines virtuelles (VM), où les utilisateurs peuvent exécuter d'autres systèmes d'exploitation[42].

5.2.2.2 UBUNTU

Ubuntu est un système d'exploitation open source basé sur Linux qui offre une large gamme d'applications. Il peut être utilisé sur des ordinateurs de bureau, des serveurs et même des objets connectés à Internet. Sa polyvalence permet de l'exécuter aussi bien localement que dans le cloud, offrant ainsi une solution complète pour répondre aux besoins informatiques modernes[43].

5.2.2.3 NS3 (Network Simulator)

ns-3 est un simulateur de réseau à événements discrets conçu principalement pour la recherche et l'utilisation pédagogique dans les systèmes Internet. Il s'agit d'un logiciel libre et open-source, distribué sous la licence GNU GPLv2, et il est entretenu par une communauté mondiale d'utilisateurs et de contributeurs[44].

5.2.3 Langage de programmation

5.2.3.1 C++

Le langage C++ est apparu au début des années 90 et est aujourd'hui l'un des langages les plus largement utilisés dans le monde. Il est utilisé tant pour les applications scientifiques que pour le développement de logiciels. En tant qu'évolution du langage C, le C++ se distingue par son efficacité. De plus, il offre des fonctionnalités puissantes, telles que la notion de classe, qui permet l'application des techniques de la programmation orientée objet. Cette approche permet de structurer le code de manière modulaire, favorisant la réutilisation, la flexibilité et la maintenabilité du logiciel. Le C++ offre ainsi un large éventail de fonctionnalités pour répondre aux besoins de développement logiciel modernes[45].

En C++, un programme est généralement composé de deux types de fichiers :*

1. *Fichier d'en-tête* « .h : Ce sont des fichiers qui déclarent les classes, les fonctions, les constantes et les autres éléments de programmation utilisés dans le code source. Les fichiers d'en-tête servent à fournir une interface pour utiliser les fonctionnalités du code source sans révéler les détails de son implémentation.
2. *Fichier source* « .cc : Ce sont les fichiers contenant le code source écrit en langage C++. Ils contiennent les définitions des classes, des fonctions, des variables et d'autres éléments de programmation nécessaires pour implémenter la logique du programme.

5.3 Notre Proposition

Dans le contexte de l'amélioration de la qualité de service au sein des réseaux de communication ad hoc aériens (FANET). Nous avons introduit ENOLSR, une adaptation du mécanisme de sélection MPR du protocole OLSR. L'ENOLSR autorise un nœud à former un ensemble MPR en prenant en considération l'énergie résiduelle maximale de chaque nœud voisin à une distance d'un saut. De ce fait, les nœuds disposant de la plus grande réserve d'énergie sont pris en compte dans la sélection.

5.3.1 Mécanisme de sélection les MPRs

Ce passage détaille la méthode de sélection des MPRs (MultiPoint Relays). Nous débutons en exposant le processus de sélection classique des MPR, puis nous décrivons le mécanisme de sélection spécifique aux MPR de ENOLSR.

5.3.1.1 Sélection les MPRs dans OLSR standard

L'heuristique pour le calcul standard du MPR se décompose comme suit :

1. Sélection des nœuds de N1h, l'ensemble des nœuds voisins à une distance de 1 saut, en tant que membres d'un ensemble MPR, à condition que leur volonté N soit égale à WILL_ALWAYS.
2. Calcul du degré D(y) pour tous les nœuds voisins à 1 saut, pour chaque nœud y appartenant à N1h.

3. Inclusion des nœuds de N1h dans l'ensemble MPR, uniquement s'ils fournissent des liens vers des nœuds de N2h (l'ensemble des nœuds voisins à 2 sauts) et suppression des nœuds de N2h qui ont un lien avec les nœuds de l'ensemble MPR.
4. Si tous les nœuds de N2h ne sont pas couverts par des nœuds de l'ensemble MPR :
 - a) Pour chaque nœud de N1h qui n'est pas un nœud MPR, calcul du nombre de nœuds de N2h couverts par chaque nœud de N1h.
 - b) Sélection des nœuds de N1h ayant la plus grande volonté N et une accessibilité non nulle en tant que nœuds MPR. En cas de plusieurs nœuds dans N1h, on choisit ceux ayant la plus grande accessibilité. En cas d'égalité, le nœud ayant le plus grand degré $D(y)$ est retenu, et si cela demeure égal, le nœud avec la plus grande accessibilité est sélectionné.
5. Pour l'optimisation, les nœuds peuvent être retirés de l'ensemble MPR si les nœuds restants dans cet ensemble continuent de couvrir tous les nœuds voisins à une distance de 2 sauts.

La Figure 5.2 illustre un exemple de sélection de MPR.

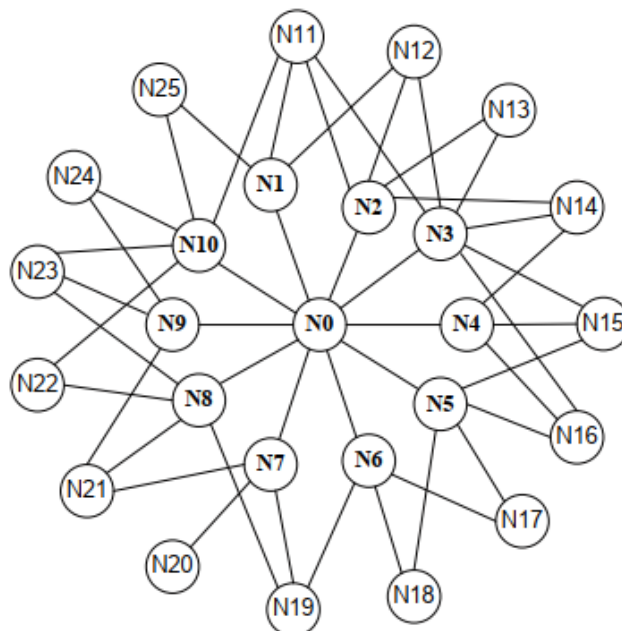


FIGURE 5.1 – noeuds sans energie.

Conformément à la méthode décrite précédemment, les nœuds MPR sont choisis de la manière comme présenté dans le Tableau 5.2.

TABLE 5.2 – Sélection les MPRs dans OLSR .

Node	MPR
N0	N3,N5,N7,N10

5.3.1.2 Sélection les MPRs dans ENOLSR

Comme illustré dans la Figure 5.3, nous introduisons désormais des contraintes énergétiques pour les nœuds. Lorsque le nœud 0 (N0) établit sa table de routage vers le nœud de destination 15 (N15) en utilisant les critères MPR standard, il choisira un itinéraire $N0 \rightarrow N3 \rightarrow N15$. La réserve d'énergie du nœud MPR (N3) est de 6 joules. Cependant, comme le met en évidence la Figure , le chemin optimal en tenant compte des contraintes énergétiques entre N0 et N15 est $N0 \rightarrow N4 \rightarrow N15$, où l'énergie résiduelle du nœud relais (N4) est de 8 joules. Cette illustration démontre que dans le mécanisme de sélection MPR, il est essentiel de prendre en considération les nœuds avec une réserve d'énergie plus élevée.

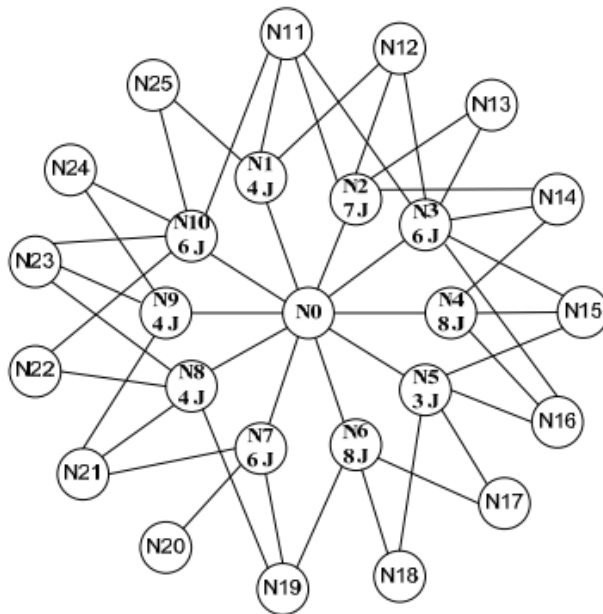


FIGURE 5.2 – noeuds avec energie.

TABLE 5.3 – Sélection les MPRs dans ENOLSR .

Node	MPR
N0	N2,N4,N6,N7,N10

Nous introduisons une heuristique pour la sélection des MPR dans ENOLSR, en prenant en considération la contrainte de puissance des nœuds voisins à une distance d'un saut. Cette heuristique privilégie la réserve d'énergie maximale des nœuds à un saut de distance plutôt que d'autres critères tels que la volonté, la connectivité ou le degré. Lorsque tous les nœuds à deux sauts ne sont pas encore couverts par au moins un nœud dans l'ensemble des MPR, cette méthode choisira un nœud symétrique à un saut (qui n'est pas membre des MPR et possède une accessibilité non nulle) en tant que nœud MPR, en se basant sur sa réserve d'énergie la plus élevée, plutôt que sur sa volonté. De plus, cette heuristique tient compte du nombre d'opportunités d'accessibilité de chaque nœud en cas d'égalité lors de la sélection du nœud avec la plus grande réserve d'énergie. L'énergie résiduelle des nœuds est prise en compte en premier lieu. Ensuite, en cas de plusieurs nœuds ayant la même accessibilité maximale, le nœud présentant le degré le plus élevé est choisi comme nœud MPR. Par conséquent, l'heuristique de ENOLSR modifie l'étape 4-b) de la sélection MPR standard de manière à privilégier la sélection d'un nœud avec le degré le plus élevé en tant que nœud MPR lorsque plusieurs nœuds ont la même réserve d'énergie maximale. Ainsi, selon la Figure 5.3 et la méthode ENOLSR, le calcul de la sélection MPR est illustré dans le Tableau 5.3.

5.4 Évaluation des performances

Pour évaluer l'heuristique MPR modifiée d'ENOLSR, nous avons mené des expériences de simulation en utilisant le simulateur de réseau NS3.36. Les détails des paramètres de simulation sont répertoriés dans le Tableau 5.4.

TABLE 5.4 – Paramètres de simulation.

Paramètres	Valeur
Modèle de mobilité	Random waypoint
Nombre de nœuds	50
Temps de simulation	200.0(s)
énergie initiale	10.0(J)
Puissance de transmission	7.5(dBm)

5.5 Résultats de simulation

La Figure 5.4 présente le nombre de paquets reçus en fonction du temps de simulation, avec une énergie initiale fixée à 10,0 joules pour chaque nœud. Il est clairement visible que le nombre de paquets reçus reste null jusqu'à 100 secondes. Les variations dans le nombre de paquets reçus commencent à se manifester à mesure que le temps de simulation augmente. Comme cela a été expliqué dans la section 5.4, ENOLSR sélectionne ses nœuds MPR en utilisant l'énergie résiduelle comme principale métrique, contrairement à la méthode classique d'OLSR qui se base sur la volonté. Cette approche réduit le risque d'épuisement rapide de l'énergie des nœuds MPR pendant la transmission de paquets. En conséquence, le nombre de paquets reçus par ENOLSR dépasse celui du protocole OLSR standard.

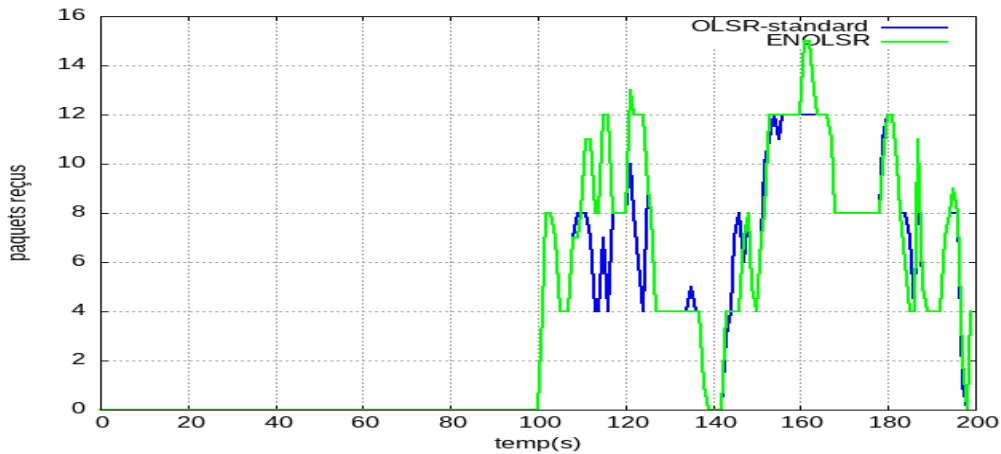


FIGURE 5.3 – Comparaison entre ENOLSR et OLSR-Standard.

Nous avons entrepris une étude visant à évaluer l’impact du nombre de nœuds sur les performances d’ENOLSR, en se basant sur le nombre de paquets reçus et le taux de réception, dans le cadre de trois scénarios distincts :

- ENOLSR20 : Impliquant 20 nœuds.
- ENOLSR50 : Engageant 50 nœuds.
- ENOLSR100 : Faisant intervenir 100 nœuds.

Cette étude permet de comparer les performances d’ENOLSR dans des configurations de réseau de différentes tailles, fournissant ainsi des informations essentielles sur son comportement et son efficacité dans diverses conditions.

La Figure 5.5 présente l’évolution du taux de réception en fonction du temps pour chaque nœud. Il est notable que lorsque le temps est inférieur à 100 secondes, le taux de réception est nul pour tous les scénarios. Une observation essentielle est que le scénario le plus performant en termes de taux de réception est clairement ENOLSR100, suivi de près par ENOLSR50, tandis qu’ENOLSR20 affiche les résultats les moins favorables.

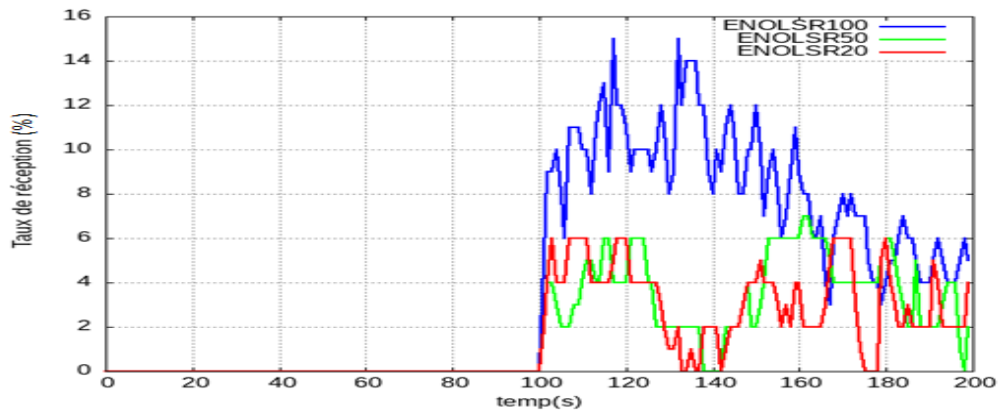


FIGURE 5.4 – Taux de réception du packets.

5.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté ENOLSR, une modification du mécanisme de sélection des nœuds MPR dans le protocole OLSR. ENOLSR permet à un nœud de créer un ensemble de MPR en prenant en considération la quantité maximale d'énergie résiduelle de chaque nœud voisin symétrique à une distance de 1 saut. Ainsi, les nœuds disposant d'une réserve d'énergie plus élevée sont privilégiés. La performance d'ENOLSR a été évaluée à l'aide de NS3.36 et analysée à l'aide de Gnuplot. Les résultats de la simulation démontrent qu'ENOLSR parvient à atteindre un débit supérieur par rapport à la méthode de sélection MPR standard.

Conclusion générale

Au cours de ce mémoire, notre objectif principal réside dans la comparaison des protocoles de routage, en l'occurrence le protocole prédictif OLSR et ENOLSR, au sein des réseaux FANET. Cette démarche s'inscrit dans le contexte de la définition des réseaux FANET, de leurs caractéristiques intrinsèques telles qu'une topologie dynamique, une bande passante limitée, des contraintes d'énergie, et bien d'autres encore. De plus, nous avons abordé les différents types de UAV (véhicules aériens sans pilote) et mis en évidence leurs distinctions. Nous avons également constaté l'importance de leur rôle prometteur dans des zones d'opérations étendues où des missions complexes sont requises. Ce constat s'applique particulièrement aux régions isolées du sol où l'exécution de tâches exigeantes devient essentielle.

Pendant cette étude, nous avons exposé les différentes catégories de protocoles de routage existants. Dans le contexte de notre recherche, nous avons procédé à une analyse approfondie des protocoles de routage existants, en mettant en lumière leurs points forts et leurs lacunes. Cette analyse a constitué le point de départ pour le développement de notre amélioration du protocole OLSR.

Pour ce faire, nous avons procédé à une description détaillée des mécanismes et du principe de fonctionnement du protocole OLSR, en mettant l'accent sur son amélioration dans le contexte des réseaux ad hoc, en accordant une attention particulière à la gestion de l'énergie. Notre objectif principal était de concevoir un protocole de routage plus efficace qui sélectionne les Multipoint Relays (MPR) en fonction de la disponibilité optimale d'énergie dans les réseaux mobiles ad hoc, étant donné que les ressources y sont souvent limitées.

Afin d'atteindre notre objectif, nous avons utilisé le simulateur NS3, dont les résultats de simulation se sont révélés prometteurs. Notre contribution à l'amélioration du protocole OLSR

se traduit par une meilleure efficacité énergétique, une caractéristique cruciale pour les réseaux volants ad hoc. Cette recherche pose des fondations solides pour de futures avancées dans le domaine des protocoles de routage économes en énergie, ouvrant ainsi la voie à des réseaux plus durables et plus efficaces sur le plan énergétique.

Références

- [1] M. Benadda, “Le cloud computing pour une gestion intelligente du trafic urbain : Proposition d’un service de prise en charge et de coopération pour la gestion de personnes victimes de malaise pendant la conduite,” March 2019.
- [2] “Réseaux sans fil - wireless networks,” <https://web.maths.unsw.edu.au/lafaye/CCM/wireless/wlintro.htm>, (Visité le : 14/07/2023).
- [3] A. Kout, “Contributions à la résolution du problème de routage dans les réseaux mobiles ad-hoc par les méthodes bio-inspirées,” Ph.D. dissertation, Université Abdelhamid Mehri - Constantine 2, 2017.
- [4] S. DUVAL, J. VANHEE, O. BONAVENTURE, C. PECHEUR, and Q. DE CONINCK, “Estimation de la qualité des réseaux wi-fi,” 2016.
- [5] “Mode ad hoc de quoi s’agit-il, à quoi sert-il et quels sont les avantages de son utilisation ?” <https://www.informatique-mania.com/linternet/ad-hoc-en-mode/>, (Visité le : 28/08/2023).
- [6] Y. Siham and M. Farida, “Sécurité et routage dans les réseaux ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [7] “Flying ad-hoc network (fanet).” https://www.researchgate.net/figure/Flying-Ad-hoc-Network-FANET_fig1_338257918, (Visité le : 20/07/2023).
- [8] K. Kumari, B. Sah, and S. Maakar, “A survey : different mobility model for fanet,” *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 5, no. 6, 2015.
- [9] “Manet, vanet and fanet.” <https://www.researchgate.net/figure/MANET-VANET-and->

FANET_{fig1300337987}, (Visite : 25/07/2023).

- [10] “Les réseaux ad-hoc de drones (fanet),” <https://drive.google.com/file/d/1ZI7Ubr97519DpoVgGtB286GLH7MI> (Visité le : 25/07/2023).
- [11] S. A. H. Belkhira, S. Boukli Hacene, P. Lorenz, M. Belkheir, M. Gilg, and M. Bouziani, “Wre-olsr, a new scheme for enhancing the lifetime within ad hoc and wireless sensor networks,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 11, p. e3975, 2019.
- [12] Y. Sakurai and J. Katto, “Aodv multipath extension using source route lists with optimized route establishment,” Ph.D. dissertation, Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS AD-HOC NETWORKS (IW-WAN) 2004, page 2.
- [13] A. Gaye, “Proposition d’algorithmes sécurisés pour renforcer la coopération dans le routage des réseaux mobiles ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université Alioune DIOP de Bambey, March 2016.
- [14] Y. Sebahi, N. Yessad, D. Boulahrouz *et al.*, “Routage avec qualité de service dans les réseaux mobiles ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université abderrahmane mira béjaia, 2013.
- [15] H. Ilyas and Z. Sofiane, “Evaluation and comparison study of transport layer protocols for data transmission in flying ad-hoc networks,” 2021.
- [16] “Flying ad-hoc networks (fanets) : a survey,” https://www.researchgate.net/publication/253954782_Flying_ad-hoc_networks_FANETS_survey, 20/07/2023.
- [17] A. Aloui, A. Bessaih, S. Bouchakel *et al.*, “Routage et simulation dans les réseaux mobiles ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université de bejaia, 2016-2017.
- [18] A. Gaye, “Proposition d’algorithmes sécurisés pour renforcer la coopération dans le routage des réseaux mobiles ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2016.
- [19] B. Abderrahmane, “Conception et intégration d’une solution distribuée pour collecter les informations de trafic routier afin d’améliorer les performances du protocole de routage a-rtip.” Ph.D. dissertation, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2018/2019.
- [20] C. Faouzi and A. Messaoud, “Vers un réseau vanet programmable par l’utilisation du sdn

- (software-defined network),” Ph.D. dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2021.
- [21] A. MOUSSAOUI, “Routage qos et prédiction de rupture de route dans les réseaux ad hoc,” p. 16, 2005/2006.
- [22] A. Boudaa, A. Boukerram *et al.*, “Routage avec qos dans les réseaux mobiles ad-hoc,” Ph.D. dissertation, Université de Béjaia, 2009.
- [23] K. Z. S. M. Ali Moussaoui, Fouzi Semchedine, “Cry olsr : Crypto optimized link state routing for manet,” September 2016.
- [24] B. H. et BOUIZEM Yasmina, “Impact des modèles de mobilités sur les performances des protocoles de routage en milieu urbain réaliste dans les réseaux vanet (v2v),” 2014-2015.
- [25] O. Lekadir, L. Meddas, S. Meziani *et al.*, “Evaluation des performances d’un noeud dans un réseau ad hoc via les réseaux de pétri,” Ph.D. dissertation, Université abderrahmane mira de Béjaia, 2017/2018.
- [26] Y. Siham and M. Farida, “Sécurité et routage dans les réseaux ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [27] S. A. H. Belkhira, “Optimisation de la qos dans les réseaux adhoc mobiles,” Ph.D. dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse ; Université Djillali Liabès (Sidi Bel . . . , 2020.
- [28] S. Naimi, “Gestion de la mobilité dans les réseaux ad hoc par anticipation des métriques de routage,” Ph.D. dissertation, Université Paris Sud-Paris XI ; École nationale d’ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2015.
- [29] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, “Flying ad-hoc networks (fanets) : A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [30] N. Djenidi, “Analyse de la sélection dynamique des chefs de cluster pour fanet,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.
- [31] A. CHERADID *et al.*, “Etude comparative du protocole de routage basé sur la position pour les réseaux multi-uav (fanet)(gpsr, dsdv),” Ph.D. dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.

- [32] R. BABELHADJ and R. SEDRATI, “Routage dans les réseaux fanet, etude comparative,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.
- [33] M. F. Khan, K.-L. A. Yau, R. M. Noor, and M. A. Imran, “Routing schemes in fanets : A survey,” *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 38, 2019.
- [34] D. Souad Imane and H. Ibtihal, “Evaluation des performances des différents protocoles de routage des réseaux ad hoc pour les réseaux multi-uav (fanet) etude comparative des protocoles dsdv et aodv,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA.
- [35] G. QasMarrogy, “Evaluation of flying ad hoc network topologies, mobility models, and iee standards for different video applications,” *Aro-the Scientific Journal of Koya University*, vol. 9, no. 1, pp. 77–88, 2021.
- [36] M. B. Yassein, N. Alhuda *et al.*, “Flying ad-hoc networks : Routing protocols, mobility models, issues,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, no. 6, 2016.
- [37] A. LAHRECHr *et al.*, “Nouveau modèle de mobilité pour le réseau de communication de véhicule aérien sans pilote approche basée sur les processus décisionnels de chaîne de markov,” Ph.D. dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [38] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing (olsr) rfc 3626,” October 2003.
- [39] Z. F. Z. et KHOUALDIA Billel, “Simulation des protocoles des routages aodv et olsr dans les réseaux ad-hoc via opnet,” 2019-2020.
- [40] K. A. Ali, “Modélisation et étude de performances dans les réseaux vanet,” Ph.D. dissertation, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2012.
- [41] C. Boulkamh, “Prise en compte de la qos par les protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad hoc,” Ph.D. dissertation, Université de Batna 2, 2008.
- [42] “Virtualbox open-source du logiciel de virtualization,” <https://www.virtualbox.org/>, (visité le : 02/07/2023).
- [43] “Ubuntu : Entreprise open-source and linux,” <https://ubuntu.com/>, (visité le : 23/06/2023).

[44] “a discrete-event network simulator for internet systems,” <https://www.nsnam.org/>, (visité le : 23/06/2023).

[45] “About : Standard c++,” <https://isocpp.org/about>, (Visité le : 17/07/2023).

Annexe A

Préparation de l'Environnement d'Implémentation

1.1 Installation de NS3 (ns-3.36.1)

Alors ouvrez un terminal et lancer les commandes suivantes :

Etape 1 : Prérequis

```
1 $ sudo apt update // pour le mise à jour
```

Dans les packages suivants, toutes les dépendances requises sont prises en charge et vous pouvez installer tous ces packages pour une utilisation complète de ns3.

```
1 $ sudo apt install g++ python3 python3-dev pkg-config sqlite3 cmake  
python3-setuptools git qtbase5-dev qtchooser qt5-qmake qtbase5-dev-  
tools gir1.2-gocanvas-2.0 python3-gi python3-gi-cairo python3-  
pygraphviz gir1.2-gtk-3.0 ipython3 openmpi-bin openmpi-common  
openmpi-doc libopenmpi-dev autoconf cvs bzip2 unrar gsl-bin libgsl-dev  
libgslcblas0 wireshark tcpdump sqlite3 libsqlite3-dev  
libxml2 libxml2-dev libc6-dev libc6-dev-i386 libclang-dev llvm-dev  
automake python3-pip libxml2 libxml2-dev libboost-all-dev
```

Etape 2 : Télécharger NS3-3.36.1 d'après le site : <https://www.nsnam.org/releases/ns-3-29/download/>.

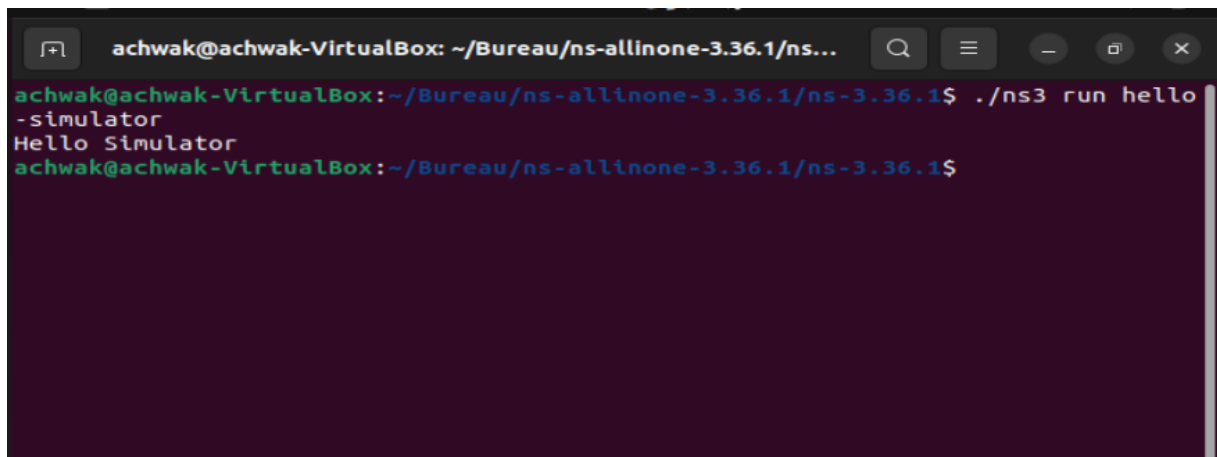
Etape 3 : Décompressez le contenu du fichier ci-dessus dans le dossier d'accueil

(dans mon cas, c'est /Home/ACHWAK/Bureau) - Vérifiez votre dossier d'accueil et faites-le en conséquence. Pour décompresser, utilisez l'interface graphique avec un clic droit et extrayez et sélectionnez le dossier /Home/ACHWAK/Bureau.

Etape 4 : Accédez au dossier

```
1 $ cd ns-allinone-3.36.1/  
2  
3 $ ./build.py --enable-examples --enable-tests
```

Une fois l'installation effectuée. Vous pouvez exécuter l'exemple comme indiqué dans la Figure 5.1 suivant :



```
achwak@achwak-VirtualBox: ~/Bureau/ns-allinone-3.36.1/ns...  
achwak@achwak-VirtualBox:~/Bureau/ns-allinone-3.36.1/ns-3.36.1$ ./ns3 run hello  
-simulator  
Hello Simulator  
achwak@achwak-VirtualBox:~/Bureau/ns-allinone-3.36.1/ns-3.36.1$
```

FIGURE 1.1 – Le message Bonjour Simulateur.