

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة سعيدة د. مولاي الطاهر

كلية العلوم

قسم: الإعلام الآلي

Mémoire de Master

Spécialité : Réseau Informatique et Système Répartie

Thème

Étude comparative entre deux
Protocoles de Routage AODV et DYMO
Dans Les Réseau MANETs

Présenté par :

Djouadi Mohammed
Chelef Aissa

Dirigé par :

Dr.Hanoune Mohammed mokhtar



Promotion 2023 - 2024

ملخص

في الشبكات المتنقلة المخصصة (MANETs)، تعد بروتوكولات التوجيه ضرورية لضمان كفاءة وموثوقية نقل البيانات. من بين العديد من البروتوكولات الموجودة، يبرزان باعتبارهما بروتوكولي توجيه مستخدمين على نطاق واسع عند الطلب. توفر هذه الدراسة مقارنة متعمقة لأداء AODV وDYMO في سيناريوهات التنقل المختلفة باستخدام محاكي Omnet++ . وتم فحص المقاييس الرئيسية مثل حمولة توجيهه، ومتوسط التأخير الشامل، واستهلاك الطاقة لتحديد نقاط القوة والضعف في كل بروتوكول. تم إجراء عمليات محاكاة بسرعات عقدة مختلفة (5 م/ث، 15 م/ث، 40 م/ث) وكثافات عقد مختلفة (5 عقد، 20 عقدة، 50 عقدة) لتوفير بروتوكولات شاملة لتحليل الأداء في ظل مجموعة من الظروف المتنوعة .

الكلمات الرئيسية : OMNET++ , DYMO , AODV , MANETs , بروتوكولات التوجيه .

Abstract

In mobile ad hoc networks (MANETs), routing protocols play a crucial role in determining the efficiency and reliability of data transmission. Among the various protocols available, AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) and DYMO (Dynamic MANET On-demand) are two prominent on-demand routing protocols. This study presents a detailed performance comparison between AODV and DYMO under different mobility scenarios using an omnet ++ simulator.

Key performance metrics such as routing overhead, average end-to-end delay, and energy consumption were evaluated to understand the strengths and weaknesses of each protocol. Simulations were conducted with varying node speeds (5 m/s, 15 m/s, and 40 m/s) and node densities (5 nodes, 20 nodes, and 50 nodes) to provide a comprehensive analysis of protocol performance under diverse conditions.

Keywords: MANETs , AODV , DYMO , Routing Protocols , Omnet++ .

Résumé

Dans les réseaux ad hoc mobiles (MANETs), les protocoles de routage sont essentiels pour assurer l'efficacité et la fiabilité de la transmission des données. Parmi les nombreux protocoles existants, AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) et DYMO (Dynamic MANET On-demand) se distinguent comme deux protocoles de routage à la demande très utilisés. Cette étude offre une comparaison approfondie des performances de AODV et DYMO dans divers scénarios de mobilité en utilisant un simulateur Omnet ++. en utilisant un simulateur Omnet ++.

Des métriques clés telles que la surcharge de routage, le délai moyen de bout en bout et la consommation d'énergie ont été examinées pour identifier les forces et les faiblesses de chaque protocole. Des simulations ont été menées avec des vitesses de nœuds variables (5 m/s, 15 m/s et 40 m/s) et différentes densités de nœuds (5 nœuds, 20 nœuds et 50 nœuds) afin de fournir une analyse complète des performances des protocoles dans une gamme de conditions variées.

Mots clés : MANETs , AODV , DYMO , Protocoles de routage , Omnet++ .

REMERCIEMENT

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à la directeur de ce mémoire, Dr. Hanoune Mohammed mokhtar, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de Saida de la département informatique, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Nous tenons encore à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous remercions toute personne qui a participé de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

Dédicaces

Pour mes parents qui m'ont soutenus et encadré jusqu'à ce jour.

Pour toute ma famille

Pour toute Notre promotion a université SAIDA.

Mon très cher binôme Djouadi Mohammed

*Pour toute personne que j'ai connue lors de mon bref passage à
Universté.*

Pour vous tous je dédie ce modeste travail

*Tout les professeurs qui nous ont enseigné car si nous somme là
aujourd'hui c'est*

Bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.

Dédicaces

Pour mes parents qui m'ont soutenus et encadré jusqu'à ce jour.

Pour toute ma famille

Pour toute Notre promotion a université SAIDA.

Mon très cher binôme Chelef Aissa

*Pour toute personne que j'ai connue lors de mon bref passage à
Université.*

Pour vous tous je dédie ce modeste travail

*Tout les professeurs qui nous ont enseigné car si nous somme là
aujourd'hui c'est*

Bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.

Table Des Matières

Glossaire.....	1
Introduction générale.....	2

CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉ SUR LES RÉSEAUX AD-HOC

I.1	Introduction.....	5
I.2	Les environnements mobiles.....	5
I.3	Les réseaux avec infrastructure.....	6
I.4	Les réseaux sans infrastructure.....	7
I.5	Les réseaux ad hoc	8
I.5.1	Bref historique.....	8
I.5.2	Définition d'un réseau ad hoc :	9
I.5.3	Type des réseaux ad hoc	10
I.5.4	Caractéristiques des réseaux Ad hoc.....	11
I.5.5	Les avantages et inconvénients des réseaux Ad Hoc	12
I.5.6	Applications des réseaux ad hoc :	14
I.6	Conclusion	16

CHAPITRE II: PROTOCOLE DE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD-HOC

II.1	Introduction.....	18
II.2	Routage dans les réseaux Ad hoc.....	18
II.3	Les contraintes du routage dans les réseaux Ad hoc	19
II.4	Différentes approches mises en œuvre	21
II.4.1	Protocoles proactifs.....	21
II.4.1.1	Protocole DSDV	22
II.4.1.2	Protocole <i>OLSR</i>	22
II.4.2	Protocoles réactifs.....	24
II.4.2.1	Protocole DSR.....	24
II.4.2.2	Protocole AODV.....	24
II.4.2.3	Protocole DYMO	26
II.4.3	Protocoles hybrides.....	27

II.5	Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs	27
II.5.1	Spécificités OLSR / AODV :	29
II.5.2	Synthèse de comparaison OLSR / AODV	29
II.6	Conclusion	29

CHAPITRE III: PRESENTATION LES DEUX PROTOCOLES DE ROUTAGE

III.1	Introduction.....	32
III.2	Description des protocoles AODV et DSDV	32
III.2.1	Le protocole AODV (Ad hoc on demand Distance Vector).....	32
III.2.1.1	Définition	32
III.2.1.2	Les types de messages.....	33
III.2.1.3	Fonctionnement.....	36
III.2.1.4	Numéro de séquences.....	38
III.2.1.5	La gestion de la table de routage	39
III.2.1.6	Mécanisme de découverte de route	40
III.2.1.7	Maintenance des routes :	42
III.2.1.8	Avantages et inconvénients d'AODV.....	43
III.2.2	Le Protocole DYMO (Dynamic MANET On-demand).....	44
III.2.2.1	Définition	44
III.2.2.2	Les types de messages.....	45
III.2.2.3	Découverte de Route.....	45
III.2.2.4	Maintenance de Route	47
III.2.2.5	Avantages et Inconvénients du DYMO :	49
III.3	Conclusion	50

CHAPITRE IV : ÉTUDE DE PERFORMANCES DES DEUX PROTOCOLES

IV.1	Introduction.....	52
IV.2	La simulation	52
IV.3	Les outils utilisés.....	53
IV.3.1	Le simulateur OMNET++.....	53
IV.3.1.1	Présentation OMNET++.....	53
IV.3.1.2	Architecture de OMNET++	54
IV.3.2	INET Framework	56

Table des matières

IV.4	ÉVALUATION DES PERFORMANCES.....	58
IV.4.1	Performance métriques.....	58
IV.4.2	Simulation et résultats	60
IV.4.2.1	Configuration de la Simulation	60
IV.4.2.2	Les scénarios de la simulation	60
IV.4.2.3	Délai moyen de découverte de routage de bout en bout (AEERDD)	62
IV.4.2.4	La surcharge de routage (Routing Overhead) :	69
IV.4.2.5	consommation d'énergie totale	73
IV.5	conclusion.....	77
	Conclusion générale	78
	Références &Bibliographie.....	79

Liste des figures

Figure I-1 Les Types de réseaux sans fil.....	6
Figure I-2 Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.....	7
Figure I-3 Le modèle des réseaux mobiles sans infrastructure.....	8
Figure II-1 Exemple d'un routage direct.....	19
Figure II-2 Taxonomie des protocoles de routages des réseaux Ad hoc.....	21
Figure II-3 Relais multipoints.....	23
Figure II-4 Etablissement d'une route sous AODV.....	26
Figure III-1 Le format de message RREQ.....	33
Figure III-2 Le format de message RREP.....	34
Figure III-3 Le format de message RRER.....	35
Figure III-4 les deux requête RREQ et RREP utilisées dans le protocole AODV.....	37
Figure III-5 Demande une route (RREQ).....	41
Figure III-6 Réponse de route (RREP).....	42
Figure III-7 Un lien devient invalide.....	43
Figure III-8 Découverte de Route dans DYMO.....	47
Figure III-9 Maintenance de Route dans DYMO.....	48
Figure IV-1 Le lancement du simulateur OMNET++.....	54
Figure IV-2 Architecture modulaire du simulateur OMNET++.....	54
Figure IV-3 Exécution d'une simulation sous OMNET++.....	56
Figure IV-4 INET Framework.....	58
Figure IV-5 lancement de simulation AODV et DYMO avec 5 nœud.....	61
Figure IV-6 lancement de simulation AODV et DYMO avec 20 nœud.....	61
Figure IV-7 lancement de simulation AODV et DYMO avec 50 nœud.....	61
Figure IV-8 AEERDD vs Vitesse de mobilité avec 5 nœuds.....	63
Figure IV-9 AEERDD vs Vitesse de mobilité avec 20 nœuds.....	66
Figure IV-10 AEERDD vs Vitesse de mobilité avec 50 nœuds.....	68
Figure IV-11 la Surcharge de Routage vs Vitesse de mobilité avec 5 nœuds.....	70
Figure IV-12 la Surcharge de Routage vs Vitesse de mobilité avec 20 nœuds.....	71
Figure IV-13 la Surcharge de Routage vs Vitesse de mobilité avec 50 nœuds.....	72
Figure IV-14 consommation d'énergie vs Vitesse de mobilité avec 5 nœuds.....	74
Figure IV-15 consommation d'énergie vs Vitesse de mobilité avec 20 nœuds.....	75
Figure IV-16 consommation d'énergie vs Vitesse de mobilité avec 50 nœuds.....	76

Liste des tableaux

<i>Tableau II-1. Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs</i>	28
<i>Tableau II-2 Spécificités OLSR / AODV.</i>	29
<i>Tableau IV-1 Les paramètres utilisés dans les scénarios</i>	60
Tableau IV-2 AEERDD avec 5 nœuds	63
Tableau IV-3 AEERDD avec 20 nœuds	65
Tableau IV-4 AEERDD avec 50 nœuds	68
Tableau IV-5 Tableau de la Surcharge de Routage avec 5 nœuds	69
Tableau IV-6 Tableau de la Surcharge de Routage avec 20 nœuds	71
Tableau IV-7 Tableau de la Surcharge de Routage avec 50 nœuds	72
Tableau IV-8 consommation d'énergie avec 5 nœuds	73
Tableau IV-9 consommation d'énergie avec 20 nœuds	75
Tableau IV-10 consommation d'énergie avec 50 nœuds	76

Glossaire

AODV: Ad Hoc On-Demand Distance Vector

DYMO : Dynamic MANET On-demand

DSDV: Dynamic destination Sequenced Distance Vector

DSR: Dynamic Source Routing

FANETs: Flying Ad Hoc Networks

GPS: Global Positioning System

GSM: Global System for Mobile communication

IP: Internet protocol

IPV4: Internet Protocol version 4

IPV6: Internet Protocol version 6

LDP: Label Distribution Protocol

MANETS: Mobile Ad-hoc Networks

OLSR: Optimized Link State Routing Protocol

OMNET++: Objective

Modular Network Testbed in C++

OSI: Open Systems Interconnection

OSPF: Open Shortest Path First

RREP: Route Reply Message

RREQ: Route Request Message

RRER: Route Error Message

SB: Station de base

TCP: Transmission Control Protocol

UM: Unite mobile

WMNs: Wireless Mesh Networks

WRP: Wireless Routing Protocol

WSNs: Wireless Sensor Networks

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, nous avons été témoins d'une transformation majeure dans le domaine de l'information, impulsée par la prolifération des dispositifs de communication mobiles tels que les smartphones, les tablettes et les PDA, ainsi que par l'intégration croissante des réseaux filaires et sans fil. Cette évolution a marqué le passage de l'ère de l'ordinateur individuel à celle de l'omniprésence informatique, permettant un accès universel aux données n'importe où et n'importe quand .

Un utilisateur mobile peut désormais consulter ses courriels et naviguer sur Internet dans les aéroports, les gares et d'autres lieux publics. Lors de conférences, les chercheurs peuvent transférer des fichiers et d'autres types d'informations via des réseaux locaux sans fil, et à domicile, il est possible de synchroniser des données et d'échanger des fichiers entre divers appareils.

Les technologies de l'information n'ont cessé d'améliorer notre quotidien, et leur succès le plus notable est sans doute la communication en réseau. En informatique, un réseau désigne un ensemble de machines (ou nœuds) et les moyens matériels et logiciels qui leur permettent de communiquer. Un réseau est dit sans fil lorsque la communication entre ses composants utilise des ondes radio ou infrarouges. Il existe deux types de réseaux sans fil : ceux avec infrastructure, qui reposent sur une structure fixe pour coordonner les communications, et ceux sans infrastructure, qui s'auto-organisent.

Ce travail se concentre sur les réseaux sans fil sans infrastructure, plus précisément sur les réseaux ad hoc. Ces réseaux, apparus dans les années 1970 pour des applications militaires, ont pris de l'essor dans les années 1990 avec l'avènement des technologies radio bon marché (comme l'IEEE 802.11). Ils suscitent aujourd'hui un grand intérêt en raison de leur potentiel et de leurs

multiples applications, allant du domaine militaire aux situations d'urgence, en passant par le partage domestique d'Internet. Leur facilité, rapidité de déploiement, coût réduit, autonomie et mobilité sont leurs principaux atouts.

Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude et de l'évaluation des performances de deux protocoles de routage dans les réseaux ad hoc (MANET) et de la recherche du plus performant entre eux. et sont menés à l'heure actuelle, dans le but de résoudre présenter un résumé de la performance des deux protocoles et fournir le meilleur entre eux. Comme nous allons voir, le problème de routage est très compliqué, cela est dû essentiellement à la propriété qui caractérise les réseaux Ad hoc et qui est l'absence d'infrastructure fixe et de toute administration centralisée.

Ce mémoire est structuré comme suit : le premier chapitre présente les réseaux ad hoc en général. Dans le deuxième chapitre, nous parlerons du routage dans les réseaux ad hoc . Le troisième chapitre discutera du fonctionnement des protocoles de routage étudiés dans les réseaux ad hoc. Le quatrième chapitre décrit les scénarios de simulation, en mettant l'accent sur le fonctionnement d'Omnet ++ et analyse les résultats obtenus et se conclut par des perspectives et conclusions.

CHAPITRE

I **GÉNÉRALITÉ SUR LES
RÉSEAUX AD-HOC**

I.1 Introduction

Les réseaux sans fil sont devenus omniprésents dans notre société, offrant des possibilités de communication et de partage d'informations sans précédent. Cependant, ces réseaux reposent souvent sur une infrastructure fixe, comme des points d'accès ou des routeurs, qui assurent la connexion entre les différents appareils. Cette infrastructure peut être coûteuse, complexe, vulnérable ou indisponible dans certaines situations, comme les zones isolées, les catastrophes naturelles, les conflits armés, etc. Dans ces cas, il est nécessaire de disposer de réseaux sans fil autonomes, capables de s'adapter aux conditions changeantes de l'environnement et aux besoins des utilisateurs. Ces réseaux sont appelés réseaux ad hoc[1].

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter les caractéristiques et les contraintes liées aux environnements mobiles Ad hoc et leurs domaines d'application et nous passerons par la suite à la présentation des méthodes d'accès et d'acheminement des données entre les unités mobiles.

I.2 Les environnements mobiles

Les environnements mobiles sont des systèmes composés de sites mobiles qui permettent à leurs utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les sites mobiles sont des appareils portables qui se communiquent à travers des interfaces sans fil, comme des smartphones, des tablettes ou des ordinateurs portables.

Les environnements mobiles peuvent être classés en deux catégories : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure [2][3]

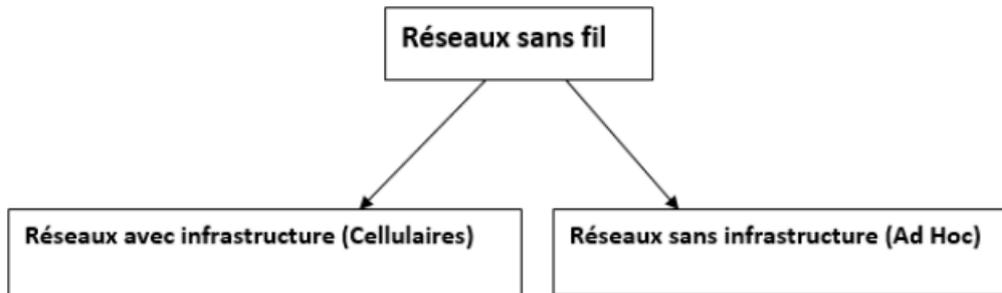


Figure I-1 Les Types de réseaux sans fil

I.3 Les réseaux avec infrastructure

Le réseau mobile avec infrastructure se compose de deux ensembles distincts :

- Les "sites fixes" caractéristiques d'un réseau de communication filaire classique (Wired Network).
- Les sites mobiles (Wireless Network).

Certains sites fixes, désignés comme stations support mobiles (Mobile Support Station) ou stations de base (SB), sont équipés d'une interface de communication sans fil permettant une communication directe avec les sites ou unités mobiles (UM) situés dans une zone géographique restreinte, appelée cellule (voir Figure I-3).

Chaque station de base est associée à une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Les sites fixes sont interconnectés les uns aux autres via un réseau de communication filaire, généralement fiable et offrant un débit élevé. En revanche, les liaisons sans fil disposent d'une bande passante limitée, ce qui restreint significativement le

volume des informations échangées. Dans ce modèle, une unité mobile peut être connectée à une seule station de base à un moment donné [1].

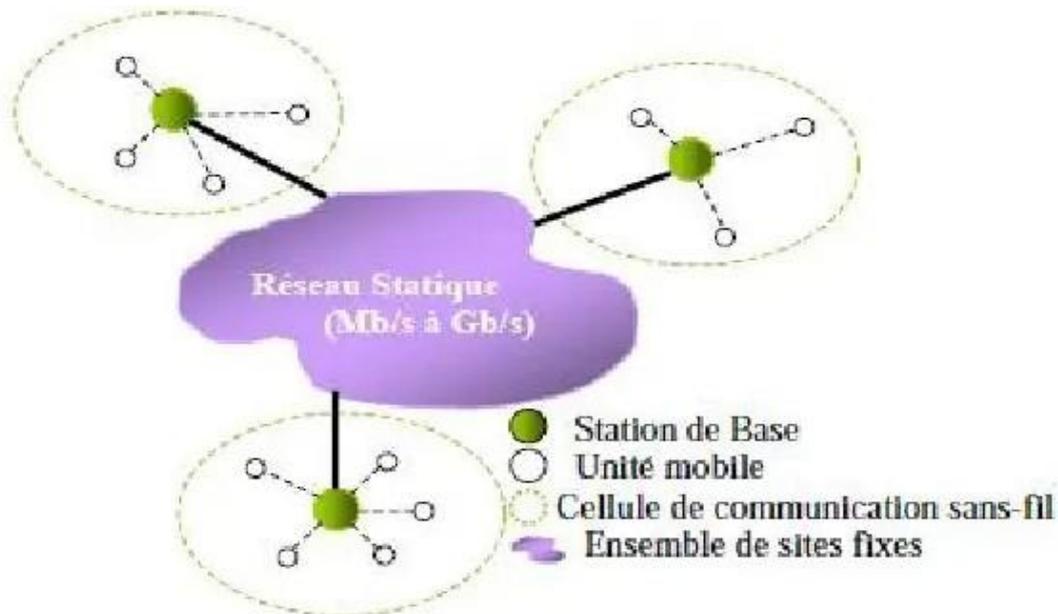


Figure I-2 Le modèle des réseaux mobiles avec infrastructure.

I.4 Les réseaux sans infrastructure

Le modèle de réseau mobile sans infrastructure préexistante exclut l'existence d'entités "sites fixes". Dans ce modèle, tous les sites du réseau sont mobiles et interagissent directement en utilisant leurs interfaces de communication sans fil (voir figure I-4). L'absence d'infrastructure ou de réseau filaire composé de stations de base nécessite que les unités mobiles agissent comme des routeurs, participant ainsi à la découverte et à la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau [1]

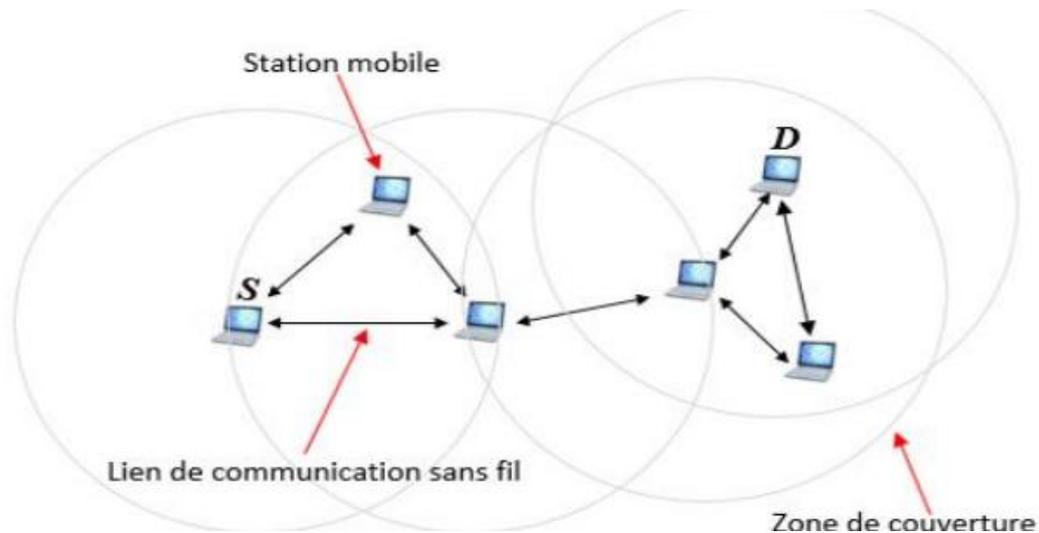


Figure I-3 Le modèle des réseaux mobiles sans infrastructure.

I.5 Les réseaux ad hoc

I.5.1 Bref historique

Les réseaux mobiles ad hoc (MANET) sont des réseaux sans fil qui n'ont pas de structure ni de configuration prédéfinies, qui s'adaptent dynamiquement aux besoins et aux conditions des nœuds. Les nœuds du réseau communiquent directement entre eux sans passer par une infrastructure centralisée, comme un routeur ou un point d'accès.[4]

Les réseaux mobiles ad hoc sont nés dans les années 1970, dans le cadre du projet militaire américain DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), qui visait à développer des réseaux de données sans fil robustes et autonomes. Les premiers systèmes packet radio ont été conçus et expérimentés par des chercheurs comme Robert Elliot Kahn, Jerry Burchfiel et Ray Tomlinson [5].

Dans les années 1980, le projet SURAN (Survivable Radio Network) du DARPA a poursuivi les recherches sur les réseaux packet radio, en introduisant

des concepts comme le routage distribué, la tolérance aux pannes et la sécurité [2] [4] .

Dans les années 1990, l'avènement des cartes radio 802.11 bon marché pour PC a stimulé l'intérêt de la communauté scientifique pour les réseaux mobiles ad hoc. Un groupe de travail de l'IETF (Internet Engineering Task Force) a été créé en 1998/1999 pour standardiser des protocoles de routage basés sur la technologie IP pour les réseaux ad hoc sans fil. Ce groupe de travail, nommé MANET, a donné lieu à plusieurs protocoles expérimentaux, comme AODV, DSR, OLSR, TBRPF ou ZRP [6].

Depuis les années 2000, les réseaux mobiles ad hoc ont connu un essor considérable, grâce à l'évolution des technologies sans fil, des dispositifs mobiles et des applications. Les réseaux mobiles ad hoc se sont diversifiés en plusieurs catégories selon le contexte d'application, comme les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET), les réseaux ad hoc de capteurs (WSN), les réseaux ad hoc sociaux (SANET), etc [2] [4] .

I.5.2 Définition d'un réseau ad hoc :

Un réseau ad hoc ou WANET (Wireless Ad Hoc Network) ou MANET (Mobile Ad Hoc Network) est un réseau sans fil qui n'a pas de structure ni de configuration prédéfinies, qui s'adaptent dynamiquement aux besoins et aux conditions des nœuds. Les nœuds du réseau communiquent directement entre eux sans passer par une infrastructure centralisée, comme un routeur ou un point d'accès. Les réseaux ad hoc sont souvent utilisés dans les environnements où l'infrastructure est coûteuse, complexe, vulnérable ou indisponible, comme les zones isolées, les catastrophes naturelles, les conflits armés, etc [7] [8].

Les réseaux ad hoc présentent plusieurs avantages, tels que la flexibilité, la scalabilité, la résilience, la réduction des coûts et la facilité de déploiement. Ils

présentent également plusieurs défis, tels que la sécurité, la qualité de service, la gestion de l'énergie, la mobilité, la topologie dynamique, la fiabilité, l'interopérabilité, etc.

Les réseaux ad hoc peuvent être classés en plusieurs catégories selon le contexte d'application, comme les réseaux ad hoc mobiles (MANET), les réseaux ad hoc véhiculaires (VANET), les réseaux ad hoc de capteurs (WSN), etc. Chaque catégorie de réseau ad hoc présente des caractéristiques et des défis spécifiques, tels que la mobilité, la consommation d'énergie, la sécurité, la qualité de service, etc.

I.5.3 Type des réseaux ad hoc

Nous citons les quatre types de réseau ad hoc à savoir :

➤ **Les MANET (Mobile Ad hoc Networks) :** sont des réseaux sans fil décentralisés, dans lesquels les appareils peuvent communiquer directement entre eux sans avoir besoin d'une infrastructure fixe, telle qu'un routeur ou un point d'accès [9]. Les MANET présentent des avantages tels que l'auto-configuration, la flexibilité, la mobilité et l'évolutivité, mais aussi des défis tels que la sécurité, la gestion des ressources, la qualité de service et la complexité de la configuration

Les MANET sont utilisés pour diverses applications, telles que les réseaux militaires, les réseaux de capteurs, les réseaux de véhicules, les réseaux sociaux ou les réseaux communautaires. Pour assurer le routage des paquets de données dans les MANET, il existe différents types de protocoles de routage, selon leur algorithme, leur portée et leur fonctionnement. Par exemple, il y a des protocoles proactifs, réactifs, hybrides, hiérarchiques ou géographiques [8] .

➤ **Les WMN (Wireless Mesh Networks)** sont des réseaux sans fil décentralisés, dans lesquels les nœuds radio sont organisés selon une topologie maillée. Les nœuds radio peuvent communiquer directement entre eux ou via d'autres nœuds intermédiaires, sans avoir besoin d'une infrastructure fixe, telle

qu'un routeur ou un point d'accès[10]. Les WMN présentent des avantages tels que l'auto-configuration, la flexibilité, la mobilité, l'évolutivité et la redondance, mais aussi des défis tels que la sécurité, la gestion des ressources, la qualité de service et la complexité de la configuration .

➤ **Les WSN (Wireless Sensor Networks) ou RCSF (Réseaux de Capteurs Sans Fils)** sont des réseaux sans fil décentralisés, composés d'un grand nombre de nœuds capteurs qui peuvent mesurer et transmettre des données environnementales vers un point de collecte. Les WSN ont de nombreuses applications dans les domaines civils et militaires, tels que la surveillance, la détection, le contrôle, etc. Les WSN présentent des avantages comme l'auto-configuration, la flexibilité, la mobilité et l'évolutivité, mais aussi des défis comme la sécurité, la gestion des ressources, la qualité de service et la complexité de la configuration [11].

➤ **Les VANET (Vehicular Ad Hoc Networks)** sont des réseaux sans fil décentralisés, dans lesquels les véhicules peuvent communiquer directement entre eux ou avec des équipements fixes, tels que des feux de circulation ou des panneaux de signalisation [12][13]. Les VANET font partie du cadre des systèmes de transport intelligents (STI), qui visent à améliorer la sécurité, l'efficacité et le confort des transports routiers. Les VANET ont de nombreuses applications, telles que : Les feux de freinage électroniques , Le pelotonnage, Les services d'urgence routiers .

I.5.4 Caractéristiques des réseaux Ad hoc

Les réseaux Ad Hoc sont caractérisés principalement par :

Contrainte énergétique : La durée de vie d'un nœud mobile dans un réseau ad hoc dépend directement de la durée de vie de sa batterie. Ainsi, la gestion de l'énergie doit être intégrée à tous les mécanismes du système.[14]

Sécurité physique limitée : La sécurité dans les réseaux ad hoc est complexe à assurer en raison de la facilité d'interception des communications via l'interface sans fil [15].

Mobilité : La mobilité variable des nœuds du réseau entraîne des modifications rapides de la topologie du réseau ad hoc. Cela conduit à des changements fréquents de routes entre les nœuds et à des pertes de paquets .

Interférence : Les liens radio ne sont pas isolés, ce qui signifie que deux transmissions simultanées sur une même fréquence, utilisant des fréquences proches, peuvent facilement s'interférer mutuellement.

Absence d'infrastructure : L'absence d'infrastructure et de gestion centralisée dans les réseaux sans fil implique que les hôtes doivent établir et maintenir la connectivité du réseau de manière autonome .

Erreurs de transmission : Les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes dans les réseaux mobiles ad hoc que dans les réseaux filaires [16].

Bande passante limitée : En raison de l'utilisation d'un médium de communication partagé entre les hôtes du réseau, la bande passante disponible pour chaque hôte est souvent limitée.

I.5.5 Les avantages et inconvénients des réseaux Ad Hoc

Les réseaux mobiles ad hoc sont particulièrement utiles dans des situations où aucune connexion filaire n'est disponible, telles que des opérations militaires, et plus généralement lorsqu'un déploiement rapide de réseau est nécessaire. Dans de tels cas, les nœuds communiquent en utilisant le routage multi-saut, indépendamment de la disponibilité d'une infrastructure. Le mode ad hoc multi-saut présente plusieurs avantages par rapport au mode de communication avec des stations de base [17].

➤ **Avantages :**

✓ **Pas de câblage :** Les réseaux ad hoc se distinguent par l'absence totale de câblage, remplaçant toutes les connexions filaires par des connexions radio.

✓ **Déploiement facile :** L'absence de câblage offre une flexibilité accrue, permettant un déploiement rapide et facile des réseaux ad hoc. Cette facilité est due à l'absence d'infrastructure préexistante, ce qui permet d'économiser du temps lors du déploiement et de l'installation du matériel nécessaire.

✓ **Consommation énergétique :** Bien que les appareils mobiles émettent davantage de messages en mode ad hoc, où ils agissent en tant que routeurs pour d'autres mobiles, la portée de communication réduite permet des économies significatives d'énergie. Cette réduction de portée contribue à une diminution proportionnelle de la consommation d'énergie, contrairement au mode station de base.

✓ **Permet la mobilité :** Les réseaux mobiles ad hoc, conformément à leur nom, offrent une mobilité aux nœuds du réseau. Les nœuds peuvent se déplacer librement, à condition de ne pas s'éloigner excessivement les uns des autres pour maintenir leur connectivité.

✓ **Extensible :** L'une des propriétés essentielles des réseaux ad hoc est leur capacité à s'étendre et à augmenter leur taille facilement, sans nécessiter de ressources considérables. L'intégration d'un nouveau nœud mobile dans un réseau ad hoc existant ne nécessite que quelques configurations au niveau du nœud lui-même.

✓ **Coût :** Le déploiement d'un réseau ad hoc ne demande pas l'installation de stations de base, les mobiles étant les seules entités physiques nécessaires. Cela conduit à une réduction significative des coûts de déploiement.

➤ **Inconvénients :**

✓ **Topologie non prédictible :** La nature dynamique et les déplacements fréquents des nœuds dans un réseau ad hoc rendent son étude complexe. La topologie du réseau change rapidement en raison des déplacements des nœuds, ce qui la rend difficile à prévoir.

✓ **Capacités limitées (puissance de calcul, mémoire, énergie) :** Les nœuds d'un réseau ad hoc sont souvent limités en termes de puissance de calcul, de mémoire et d'énergie. La configuration de la portée de communication des nœuds, qui détermine la puissance d'émission, est cruciale. Il faut trouver un compromis entre une portée suffisante pour assurer la connectivité du réseau et une consommation d'énergie raisonnable.

✓ **Taux d'erreur important :** Les risques de collisions augmentent avec le nombre de nœuds partageant le même médium de communication. À mesure que la portée des mobiles augmente, le risque de collisions devient plus élevé, ce qui peut entraîner des erreurs de transmission.

✓ **Sécurité :** Les réseaux ad hoc présentent un dilemme en termes de sécurité. Contrairement aux réseaux filaires, ces réseaux sans fil sans infrastructure ne peuvent utiliser des dispositifs matériels spécifiques (comme un pare-feu) pour empêcher les accès non autorisés. La confidentialité des informations échangées entre les nœuds n'est pas garantie, ce qui suscite l'intérêt des chercheurs et des spécialistes pour résoudre ce problème de sécurité.

I.5.6 Applications des réseaux ad hoc :

Les réseaux ad hoc trouvent leur utilité dans divers domaines d'application où le déploiement d'une architecture centralisée est contraignant, voire

impossible. Leur robustesse, leur coût réduit et leur déploiement rapide les rendent adaptés à une variété d'applications, notamment [18]:

Applications militaires : Les réseaux ad hoc ont été initialement utilisés par l'armée, offrant une solution idéale pour maintenir des communications sur un champ de bataille entre les différentes unités d'une armée.

Opérations de secours : Dans des zones touchées par des catastrophes naturelles telles que des cyclones ou des séismes, le déploiement d'un réseau ad hoc est essentiel pour permettre aux unités de secours de communiquer efficacement.

Utilisation éducative : Le déploiement d'un réseau ad hoc lors de conférences ou de cours offre une solution judicieuse, permettant aux chercheurs et aux étudiants de partager des ressources telles que des fichiers et un accès à Internet sans nécessiter une infrastructure dédiée.

Applications industrielles : Dans des scénarios plus complexes, les réseaux ad hoc, tels que les réseaux de capteurs, peuvent être déployés pour s'adapter à différents environnements industriels. Par exemple, la formation d'un MANET (Mobile Ad hoc Network) peut être utilisée pour la surveillance médicale, la détection des feux de forêt, ou la surveillance des volcans.

Mise en œuvre des réseaux véhiculaires : Sur les réseaux routiers, les véhicules peuvent nécessiter une communication entre eux ou avec leur environnement pour partager des informations dans le but de gérer et réguler le trafic routier. Les réseaux ad hoc se révèlent alors être la solution idéale pour ces applications.

I.6 Conclusion

Les travaux en cours ne se limitent pas à la conception de technologies sans fil adaptées aux réseaux ad hoc et à des protocoles de routage extensibles. Bien que d'autres recherches soient en cours dans ce domaine, il n'est pas possible dans ce chapitre de détailler les pistes de recherche actuelles. Cependant, cette section se conclut en énumérant les travaux les plus actifs à ce jour.

Les avenues de recherche sont nombreuses, et il reste encore beaucoup de travail avant que les réseaux ad hoc atteignent un niveau de fonctionnalité avancé. Cependant, grâce aux protocoles développés jusqu'à présent, il est possible de construire des réseaux permettant une communication simple entre tous les appareils mobiles, bien que sans garantie de qualité particulière. Des solutions commerciales, qu'il s'agisse de logiciels de routage ou de cartes sans fil intégrant une technologie sans fil et un protocole de routage, existent déjà. Actuellement, les domaines militaire et académique sont probablement les principaux utilisateurs de ces réseaux. Pour leur intégration dans le secteur privé, il sera nécessaire d'identifier des applications clés et d'établir un modèle économique pertinent.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons les différents protocoles de routage utilisés dans les réseaux ad hoc

II

**PROTOCOLE DE
ROUTAGE DANS LES
RÉSEAUX AD HOC**

II.1 Introduction

Bien que les technologies sans fil actuelles n'aient pas été spécifiquement conçues pour les réseaux ad hoc, il est possible de les utiliser en ajoutant les protocoles nécessaires pour les faire fonctionner dans ce contexte. Par exemple, le standard IEEE 802.11 ne permet que la communication entre les appareils à portée, donc il est essentiel d'ajouter un protocole de routage pour permettre la communication entre tous les appareils du réseau ad hoc. Cependant, les protocoles de routage conçus pour les réseaux filaires ne sont pas directement adaptés aux réseaux ad hoc en raison de leur dynamisme et de leurs contraintes de ressources telles que la bande passante et l'énergie limitées.

Les solutions de routage pour les réseaux ad hoc doivent être peu coûteuses en termes de bande passante et doivent acheminer les paquets rapidement, quelles que soient les conditions changeantes du réseau. Bien que la diffusion soit une technique de routage simple, elle est très coûteuse en bande passante, donc des solutions plus intelligentes sont nécessaires.

Le groupe de travail MANET de l'IETF, fondé en 1995, est chargé de concevoir des protocoles de routage adaptés aux réseaux ad hoc. Cependant, le processus de standardisation a été ralenti par les différentes approches proposées par les membres du groupe. Deux approches principales, réactive et proactive, ont des avantages et des inconvénients diamétralement opposés, ce qui a alimenté un débat prolongé sur la meilleure approche à adopter [36].

II.2 Routage dans les réseaux Ad hoc

Le routage constitue un aspect crucial des réseaux ad hoc, nécessitant la présence d'un logiciel de routage sur chaque nœud pour gérer le transfert des paquets. La solution la plus simple est un routage direct où chaque station peut communiquer directement avec une autre sans intermédiaire, comme

dans les petits réseaux IEEE 802.11 en mode ad hoc avec des cellules de moins de 100 mètres de diamètre.

Dans le cas typique du routage dans un réseau ad hoc, les paquets transitent par des nœuds intermédiaires dotés de tables de routage pour orienter les paquets vers leur destination. L'optimisation des tables de routage par des mises à jour régulières est essentielle pour la stratégie du réseau. Trop de mises à jour risquent de surcharger le réseau, mais elles garantissent des tables à jour pour un routage rapide des paquets. D'un autre côté, une mise à jour uniquement lors de l'arrivée de nouveaux flux peut réduire la charge sur le réseau mais entraîne l'absence de supervision régulière. Dans ce cas, il est crucial de mettre en place des tables de routage capables de garantir un acheminement rapide des paquets [20].

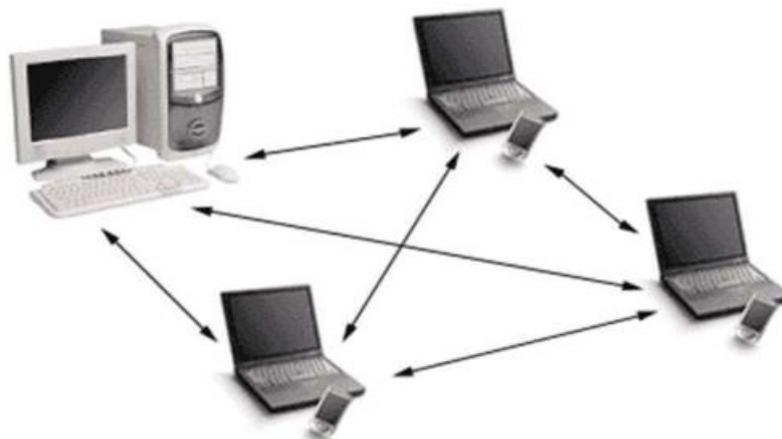


Figure II-1 Exemple d'un routage direct.

II.3 Les contraintes du routage dans les réseaux Ad hoc

L'étude et la mise en œuvre d'algorithmes de routage pour assurer la connexion des réseaux Ad hoc au sens classique du terme (tout sommet peut atteindre tout autre), est un problème complexe. L'environnement est dynamique et évolue donc au cours du temps, la topologie du réseau peut

changer fréquemment. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doit étudier les problèmes suivants [36]:

➤ **Minimisation de la charge du réseau**

L'optimisation des ressources du réseau renferme deux autres sous problèmes qui sont l'évitement des boucles de routage, et l'empêchement de la concentration du trafic autour de certains nœuds ou liens.

➤ **Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multipoints fiables**

Le fait que les chemins utilisés pour router les paquets de données puissent évoluer, ne doit pas avoir d'incident sur le bon acheminement des données. L'élimination d'un lien, pour cause de panne ou pour cause de mobilité devrait, idéalement, augmenter le moins possible les temps de latence.

➤ **Assurer un routage optimal**

La stratégie de routage doit créer des chemins optimaux et pouvoir prendre en compte différentes métriques de coûts (bande passante, nombre de liens, ressources du réseau, *etc.*). Si la construction des chemins optimaux est un problème dur, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, la stratégie de routage doit assurer une maintenance efficace de routes avec le moindre coût possible.

➤ **Le temps de latence**

La qualité des temps de latence et de chemins doit augmenter dans le cas où la connectivité du réseau augmente.

II.4 Différentes approches mises en œuvre

De nombreuses recherches ont été menées et continuent de progresser aujourd'hui pour résoudre le problème de l'acheminement des données entre les nœuds mobiles d'un réseau Ad hoc.

Le routage dans les réseaux Ad hoc présente certaines particularités en raison de la mobilité des stations. Il est donc possible de différencier divers types de protocoles de routage en fonction de la nature des flux de données, des caractéristiques des stations, des exigences de communication, etc [36].

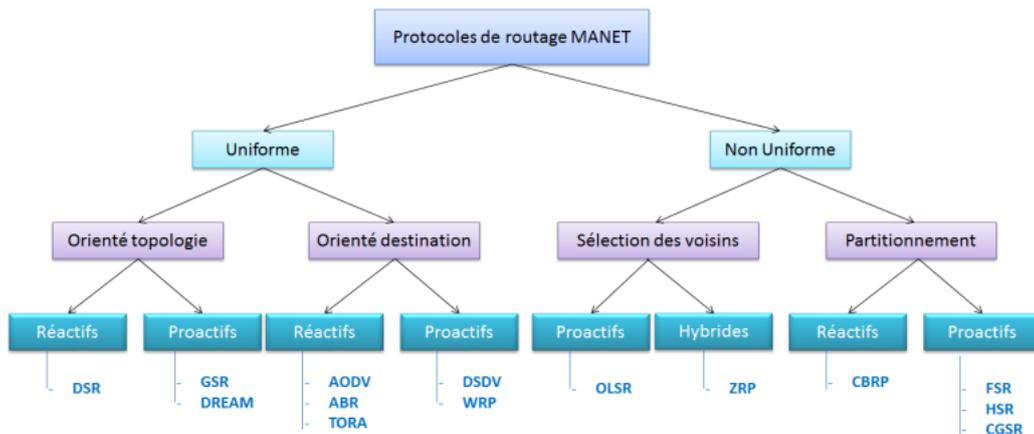


Figure II-2 Taxonomie des protocoles de routages des réseaux Ad hoc.

II.4.1 Protocoles proactifs

Dans les protocoles proactifs, les routes sont établies à l'avance lors d'une phase d'initialisation. Chaque nœud du réseau maintient une table de routage pour toutes les destinations, indépendamment de l'utilité immédiate des routes. Si un changement de topologie survient, la modification des tables de routage doit être diffusée à travers le réseau. Ce type de protocole est adapté aux applications nécessitant une collecte périodique des données (applications time-driven). Par conséquent, les capteurs peuvent se mettre en veille pendant les périodes d'inactivité et n'activer leurs dispositifs de capture qu'à des moments spécifiques [19].

II.4.1.1 Protocole DSDV

Le DSDV (Destination Sequence Distance Vector) est un protocole proactif unicast pour les réseaux mobiles Ad hoc, basé sur l'algorithme de Bellman-Ford [20]. Dans les tables de routage de DSDV, on trouve :

- Toutes les destinations possibles.
- Le nombre de nœuds (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
- Le numéro de séquence (SN : sequence number) qui correspond à un nœud destination.

Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes routes des nouvelles et pour éviter la formation de boucles de parcours. Chaque nœud transmet périodiquement des mises à jour, incluant des informations de routage, à ses voisins immédiats [20].

II.4.1.2 Protocole OLSR

OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) est un protocole de routage proactif au niveau IP conçu pour les réseaux mobiles, tel que défini dans la RFC 3626 de l'IETF. Ce protocole optimise la diffusion des paquets d'information dans le réseau en utilisant la notion de relais multipoints.

Un relais multipoint d'un mobile est un voisin à un saut, et seuls les relais multipoints de ce mobile retransmettent les informations qu'il émet. Pour que tous les voisins à deux sauts du mobile reçoivent ses informations, il faut que l'ensemble de ces relais multipoints soit voisin de tous les voisins à deux sauts du mobile.

Par exemple, dans la figure suivante, les mobiles A et B peuvent servir de relais multipoints pour le mobile central. Les mobiles à un saut du mobile central sont situés dans les cercles bleus, tandis que les mobiles à deux sauts sont dans les cadres noirs. L'ensemble constitué de A et B est connecté à tous les mobiles à

deux sauts du mobile central, formant ainsi un ensemble de relais multipoints. Par conséquent, si A et B retransmettent les informations envoyées par le mobile central, tous les voisins à deux sauts recevront ces informations [20].

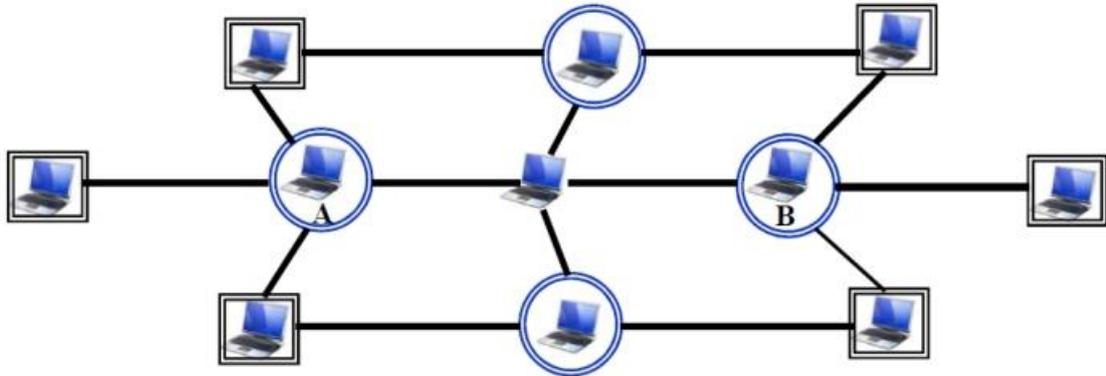


Figure II-3 Relais multipoints.

La diffusion d'informations s'effectue donc via les relais multipoints, car seuls ces relais retransmettent les informations, contrairement à une diffusion simple où tous les mobiles du réseau transmettent les données. Pour optimiser la diffusion en termes de nombre de retransmissions, chaque mobile doit choisir un nombre minimal de relais multipoints. Pour établir sa liste de relais multipoints, chaque mobile envoie régulièrement son identité et la liste de ses voisins à un saut. Avec ces informations, chaque mobile peut connaître la topologie du réseau dans son voisinage à deux sauts et ainsi déterminer une liste de relais multipoints couvrant tous les voisins à deux sauts, tout en minimisant le nombre de relais multipoints choisis.

Chaque terminal informe ses relais multipoints de leur sélection, permettant à chaque mobile du réseau de savoir s'il doit retransmettre les informations reçues d'un mobile donné. Ensuite, chaque mobile diffuse cette information via les relais multipoints, indiquant qui l'a choisi comme relai

multipoint. Grâce à cette diffusion, chaque mobile peut construire une table de routage en déterminant, pour chaque mobile du réseau, le voisin à atteindre.

II.4.2 Protocoles réactifs

Les protocoles réactifs créent et maintiennent des routes en fonction des besoins du réseau. Lorsqu'une route est nécessaire, une procédure de découverte de route est lancée. Ce type de protocole est particulièrement adapté aux applications en temps réel (event-driven applications) où les capteurs doivent réagir immédiatement à des changements soudains des valeurs captées [19].

II.4.2.1 Protocole DSR

Le protocole DSR (Routage à Source Dynamique) repose sur la technique du "routage source". Dans cette technique, la source des données détermine la séquence complète des nœuds à travers lesquels les paquets de données seront envoyés. Lorsqu'un nœud initie une opération de "découverte de routes", il diffuse un paquet de requête de route. Si l'opération de découverte réussit, l'initiateur reçoit un paquet de réponse de route qui liste la séquence de nœuds à travers lesquels la destination peut être atteinte. Le paquet de requête de route contient un champ d'enregistrement de route dans lequel la séquence des nœuds visités est accumulée pendant la propagation de la requête dans le réseau.

L'utilisation de la technique du "routage source" permet aux nœuds de transit de ne pas avoir à maintenir des informations de mise à jour pour envoyer les paquets de données, puisque ces derniers contiennent toutes les décisions de routage. Ce protocole élimine totalement les boucles de routage, car le chemin source-destination fait partie intégrante des paquets de données envoyés.

II.4.2.2 Protocole AODV

AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) appartient à la famille des protocoles de routage à vecteur de distance, comme DSDV. Dans ces protocoles, les nœuds mobiles connaissent, pour certaines destinations, la meilleure distance

en nombre de sauts et le nœud suivant à atteindre. DSDV est un protocole proactif, où chaque nœud maintient ses informations pour tous les autres nœuds du réseau. En revanche, dans AODV, les nœuds ne conservent ces informations que pour certains nœuds, ceux avec lesquels ils ont échangé des paquets par le passé.

Lorsqu'un nœud souhaite envoyer des paquets à une destination spécifique avec AODV, il commence par vérifier s'il dispose déjà d'une route dans sa table de routage. Si ce n'est pas le cas, il initie une recherche de route en diffusant un paquet de requête de route (RREQ) pour localiser le nœud destinataire. Ce paquet est diffusé à ses voisins immédiats. Les nœuds qui reçoivent ce paquet RREQ vérifient leur propre table de routage pour une route vers le destinataire. S'ils n'en ont pas, ils rediffusent le paquet RREQ à leurs voisins, tout en conservant une trace de ce paquet. Grâce à l'utilisation de numéros de séquence sur les paquets, AODV évite les boucles infinies. Les paquets RREQ se propagent ainsi dans tout le réseau.

Lorsqu'un paquet RREQ atteint le destinataire ou un nœud qui dispose d'une route vers ce destinataire, un paquet de réponse de route (RREP) est généré et renvoyé par le chemin inverse, utilisant les informations conservées dans les caches des nœuds traversés par les RREQ. À chaque passage d'un paquet RREP, chaque nœud met à jour sa table de routage en enregistrant l'identité du nœud suivant dans la route construite pour le destinataire.

Par exemple, sur la figure suivante, le nœud A, qui n'a pas de route vers le nœud B, initie une requête de recherche de route. RREQ (i) correspond au i-ème paquet RREQ envoyé dans le réseau. Cette notation illustre l'ordre d'envoi des RREQ dans le protocole. Selon le protocole MAC utilisé, différents nœuds peuvent transmettre simultanément des paquets RREQ.

À chaque transmission d'un paquet RREQ, chaque nœud garde en mémoire l'identité du nœud qui lui a envoyé le RREQ précédent. Par exemple,

lorsque le nœud 2 transmet un RREQ, il conserve l'identité de 1. De même, le nœud 4 garde l'identité de 2. Dans cet exemple, lorsque 4 reçoit un RREQ de 3, il ne le retransmet pas car il a déjà émis un RREQ pour B provenant de A. Aucun nœud dans cet exemple n'a une route vers B dans son cache, donc seul B, atteint par le RREQ, initie un paquet de réponse. Ce paquet suit le chemin inverse emprunté par le RREQ pour atteindre B : 4 sait que c'est 2 qui l'a contacté et envoie donc le RREP à 2 ; 2 sait que c'est par 1 qu'il a été contacté et envoie donc le RREP à 1, etc [20].

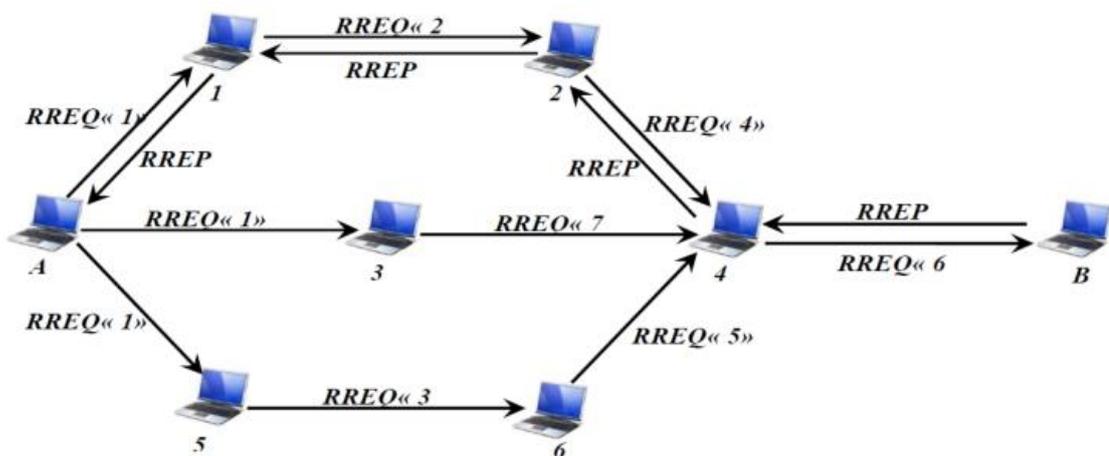


Figure II-4 Etablissement d'une route sous AODV.

Si une route n'est pas utilisée pendant un certain temps, chaque nœud concerné par cette route l'efface de sa table de routage. Lorsqu'un nœud source se déplace, il réinitie alors une recherche de route pour trouver un nouveau chemin vers son destinataire. Si un nœud intermédiaire sur la route bouge, le nœud précédent sur le chemin détecte cette disparition et envoie une notification de coupure de lien. Cette notification est propagée jusqu'au nœud source, qui peut alors choisir de rechercher une nouvelle route ou non.

II.4.2.3 Protocole DYMO

DYMO n'est pas un nouveau protocole mais une amélioration du protocole de routage AODV de base, et il est plus facile à implémenter. Il fonctionne de manière similaire à AODV, tel que décrit dans la section 2.2. Il est destiné à être

utilisé par des nœuds mobiles dans des réseaux sans fil à sauts multiples. DYMO détermine les communications unicast entre les routeurs DYMO au sein du réseau de manière à la demande, offrant une meilleure convergence dans les topologies dynamiques. Les opérations de base du protocole DYMO sont la découverte de route (par requête de route et réponse de route) et la maintenance de route. Dans les réseaux avec un grand nombre de routeurs, il est mieux adapté aux scénarios de trafic clairsemé. Dans chaque routeur DYMO, le routage minimaliste est maintenu et il est donc applicable aux dispositifs à mémoire limitée. Dans ce protocole, seules les informations de routage relatives aux sources et destinations actives sont conservées. L'algorithme de routage dans DYMO peut être utilisé à des couches autres que la couche réseau, en utilisant des adresses appropriées à la couche. Pour une opération à d'autres couches, seule une modification du format des paquets/messages est nécessaire. Pour garantir une surcharge de contrôle prévisible, le taux de génération de paquets/messages du routeur DYMO doit être limité. Le protocole est adapté à la scalabilité. Cependant, sa fonctionnalité reste encore à explorer [29] .

II.4.3 Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides utilisent une combinaison des deux principes. Par exemple, ils utilisent le principe des protocoles proactifs pour apprendre le proche voisinage, ainsi, ils disposent de routes immédiatement dans le voisinage. Au-delà du voisinage, le protocole hybride fait appel aux principes des protocoles réactifs pour chercher des routes.

II.5 Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs

Il est difficile de comparer les protocoles proactifs et les protocoles réactifs. En général, les protocoles réactifs sont moins coûteux en termes de signalisation et d'énergie, puisqu'ils établissent les routes que lorsqu'ils en ont besoin. En revanche, l'établissement d'une route est beaucoup plus rapide avec les protocoles proactifs puisque les mobiles ont les informations de routage à

jour. Les analyses de performance sur ces différents protocoles montrent notamment que les protocoles proactifs comme OLSR sont efficaces dans le cadre des réseaux denses avec une mobilité relativement élevée, tandis que les protocoles réactifs comme DSR sont plus efficaces sur des réseaux creux avec une mobilité réduite [36].

Le tableau suivant illustre les compromis faits :

Proactifs	Réactifs
maintiennent toujours les routes	un surcoût minimal parce que les routes ne sont déterminées qu'à la demande
peu ou pas de délai pour déterminer une route	un délai important lors de la détermination d'une route
consomme de la bande passante pour maintenir à jour les routes	emploi des systèmes d'inondations (flooding) pour réaliser une recherche globale
maintiennent des routes qui peuvent ne jamais servir	le contrôle des échanges peut être difficile

Tableau II-1. Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs

On a pris l'exemple de comparaison d'un protocole de routage proactif, qui est OLSR et un protocole de routage réactif, qui est AODV [20] :

II.5.1 Spécificités OLSR / AODV :

	AODV	OLSR
Sans boucle	Oui	Oui
Plusieurs routes possibles	Non	Non
Distribué	Oui	Oui
Type	Oui	Oui
Sécurité	Non	Non
Messages de contrôles périodiques	Non	Oui
Liens unidirectionnels	Non	Oui
Multicast	Oui	oui

Tableau II-2 Spécificités OLSR / AODV.

II.5.2 Synthèse de comparaison OLSR / AODV

AODV est bénéfique pour les connexions spontanées dans les réseaux citoyens, car il ne nécessite pas de connaissance préalable de la topologie du réseau. Cependant, son principal inconvénient est le temps de latence élevé, dû à la découverte des routes qui induit des délais importants. En revanche, bien qu'OLSR présente un taux d'overhead plus élevé qu'AODV, il compense par une connaissance complète de la topologie, ce qui lui permet de réduire considérablement le temps de latence. De plus, OLSR a l'avantage d'être disponible sur plusieurs plateformes, telles que Windows, Linux, et MacOS [20].

II.6 Conclusion

Malgré la proposition de nombreux protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc, les principales approches sont déjà bien établies, et il est crucial de souligner qu'aucun de ces protocoles ne cumule tous les avantages et performances optimales. Le choix d'un protocole de routage est fortement influencé par les applications spécifiques et le type de réseau concerné.

Même si le groupe MANET est en train de standardiser plusieurs protocoles de routage, les recherches dans ce domaine se poursuivront.

Deux principaux axes de recherche émergent. Le premier se concentre sur l'utilisation des réseaux Ad hoc, qui seront rarement des entités isolées mais plutôt des composants de réseaux plus vastes comprenant différents sous-réseaux de technologies et d'architectures variées. Quels protocoles de routage proposer dans ce cadre ? Le deuxième axe de recherche est motivé par les mêmes enjeux de scalabilité qui ont poussé les chercheurs à repenser les protocoles pour les réseaux radio par paquets.

Les protocoles proposés jusqu'à maintenant sont efficaces pour des réseaux comptant plusieurs milliers de nœuds mobiles, mais présentent des performances limitées pour des réseaux de plus grande envergure, avec des dizaines ou centaines de milliers de nœuds mobiles.

Dans le prochain chapitre, nous détaillerons le fonctionnement des protocoles de routage nécessaires pour cette recherche.

CHAPITRE



PRESENTATION LES DEUX PROTOCOLES DE ROUTAGE

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer deux protocoles de routage clés utilisés dans les réseaux ad hoc mobiles (MANETs) : AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) et DYMO (Dynamic MANET On-demand). Ces protocoles sont essentiels pour comprendre comment les réseaux ad hoc parviennent à maintenir une communication efficace dans des environnements où les topologies de réseau sont en constante évolution.

AODV est un protocole de routage qui réagit rapidement aux changements de topologie sans nécessiter que les routes soient maintenues depuis chaque nœud vers toutes les destinations possibles dans le réseau. Il établit des routes uniquement sur demande, ce qui le rend adapté aux réseaux avec des nœuds mobiles.

DYMO, d'autre part, est une évolution d'AODV. Il simplifie le processus de routage tout en conservant les fonctionnalités de base d'AODV. DYMO offre une flexibilité accrue et est conçu pour être plus facile à mettre en œuvre et à étendre.

Nous examinerons la conception, le fonctionnement et les performances de ces protocoles, en mettant en lumière leurs avantages et leurs inconvénients. Nous discuterons également de leur applicabilité dans divers scénarios de réseaux ad hoc et de la manière dont ils s'adaptent aux défis posés par la mobilité et la dynamique des réseaux. Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie de ces protocoles de routage et de leur rôle dans le maintien de la connectivité dans les réseaux ad hoc.

III.2 Description des protocoles AODV et DSDV

III.2.1 Le protocole AODV (Ad hoc on demand Distance Vector)

III.2.1.1 Définition

Flag (1 bits): il contient un drapeau (N: No delete flag), celui-ci est indicatif lorsqu'un nœud est capable de réparer le lien, et informe les nœuds suivants qu'ils ne doivent pas supprimer le chemin.

Reserved (15 bits): initialisé à la valeur 0 et ignoré à la réception du message.

Hop Count (8 bits) : il indique le nombre de destinations inaccessibles incluses dans ce message. Ce champ doit être supérieur ou égal à un.

Unreachable Destination IP Address : l'adresse IP des destinations inaccessibles pour la raison de rupture de lien.

Unreachable Destination Sequence Number : le nombre de séquence de la liste des destinations inaccessibles qui se trouve dans le champ Unreachable Destination IP Address.

III.2.1.3 Fonctionnement

Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un message et qu'il n'a pas d'entrée dans sa table de routage pour la destination désirée, il lance une recherche de route . il se met à la recherche d'une route Quand un nœud source S veut atteindre la destination D pour laquelle il ne possède pas de route Pour cela, il diffuse un message de demande de route (RREQ) à ses voisins.

Le paquet RREQ contient le numéro de séquence correspondant à la destination. Si ce numéro de séquence n'est pas disponible, il est initialisé à zéro. De plus, le RREQ inclut le numéro de séquence du nœud source.

Le RREQ est transmis d'un nœud à un autre jusqu'à ce qu'il atteigne un nœud ayant une route valide vers la destination ou jusqu'à ce qu'il atteigne directement la destination elle-même.

Chaque nœud intermédiaire qui retransmet le RREQ crée une entrée dans sa table de routage pour le nœud source S , établissant ainsi une route inverse. [22]

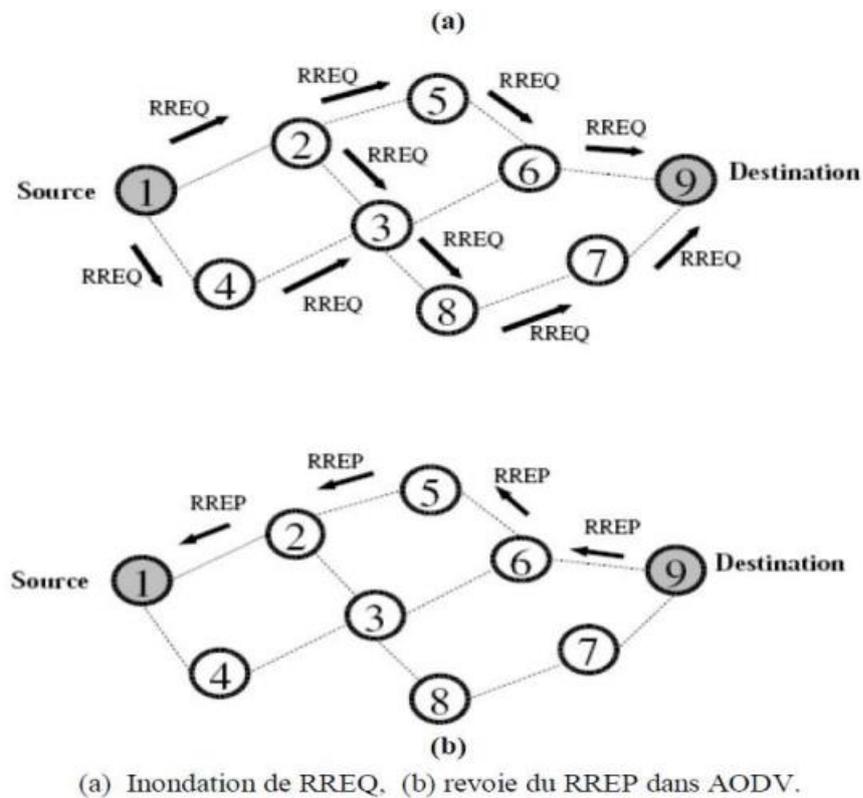


Figure III-III-4 les deux requête RREQ et RREP utilisées dans le protocole AODV

Pour minimiser les coûts associés à la découverte de route dans le réseau, AODV propose une extension de la recherche de manière progressive. Initialement, la requête est diffusée sur un nombre limité de sauts. Si aucune réponse n'est reçue par la source après un délai spécifié, elle réémet une nouvelle demande en augmentant progressivement le nombre maximum de sauts autorisés. Ce processus est répété un nombre maximal de fois avant de conclure que la destination est inaccessible.

À chaque nouvelle diffusion, le champ *Broadcast ID* du paquet RREQ est incrémenté pour identifier de manière unique une requête de route associée à une

adresse source. Si la requête RREQ est rediffusée un certain nombre de fois sans réponse, un message d'erreur est signalé à l'application.

Lorsque la destination reçoit la requête, elle renvoie un message de réponse (RREP) qui est acheminé vers la source. Chaque nœud traversé incrémente le nombre de sauts et ajoute une entrée dans sa table de routage pour la destination.

Il est également possible qu'un nœud intermédiaire entre la source et la destination fournisse une réponse appropriée. Dans ce cas, pour permettre l'établissement de routes bidirectionnelles, le drapeau "Gratuitous RREP" est utilisé. Le nœud intermédiaire envoie alors un RREP (gratuitous RREP) supplémentaire vers la destination, permettant aux nœuds entre cet intermédiaire et la destination d'ajouter une entrée dans leur table de routage pour la source du RREQ. Cette configuration facilite l'envoi direct de paquets de la destination vers la source sans nécessiter de nouvelle recherche de route. Cette fonctionnalité est particulièrement utile dans le contexte de l'établissement de communications TCP pour l'envoi du premier ACK. [22]

III.2.1.4 Numéro de séquences

Dans AODV, chaque nœud maintient une table de routage contenant une entrée pour chaque destination accessible. Pour éviter les problèmes liés au comptage à l'infini, AODV utilise des numéros de séquence dans ses tables de routage, en plus de la distance. Chaque nœud possède un numéro de séquence propre, et il est le seul à pouvoir l'incrémenter. Ce numéro personnel est augmenté dans les cas suivants :

- ✓ Avant d'entamer un processus de recherche de route, le nœud incrémente son numéro de séquence.

- ✓ Avant de répondre à un message RREQ par un message RREP, le numéro de séquence doit être mis à jour en prenant la valeur maximale entre son numéro de séquence actuel et celui contenu dans le message RREQ.

Pour garantir la création de routes sans boucles, la mise à jour de la table de routage dans AODV n'a lieu que dans les situations suivantes :

✓ Le numéro de séquence du paquet de contrôle est strictement supérieur au numéro de séquence présent dans la table.

✓ Les numéros de séquence (du paquet et de la table) sont égaux, mais la distance en nombre de sauts du paquet, plus 1, est inférieure à la distance actuellement enregistrée dans la table de routage.

✓ Le numéro de séquence pour cette destination est inconnu [23].

III.2.1.5 La gestion de la table de routage

La gestion de la table de routage dans AODV est réalisée de manière distribuée, où chaque nœud intermédiaire impliqué dans un chemin conserve une entrée dans sa propre table de routage. Chaque entrée de cette table contient les informations suivantes :

L'adresse IP du nœud destination : c'est l'adresse IP du destinataire vers lequel le routage est effectué.

L'adresse IP du prochain nœud sur le chemin : il s'agit de l'adresse IP du nœud vers lequel le paquet doit être envoyé pour continuer vers la destination.

Le nombre de sauts entre le nœud source et le nœud destination.

Le numéro de séquence associé à la destination, permettant de garantir la cohérence des informations de routage.

La durée de vie de la route, indiquant pendant combien de temps la route reste valide pour le nœud source.

Une liste des voisins utilisant cette route, composée des adresses IP des nœuds précurseurs utilisant le nœud actuel comme prochain saut vers la destination.

Un **tampon de requête**, permettant de ne répondre qu'une seule fois à une demande de route.

À chaque utilisation de cette entrée, son temps d'expiration est mis à jour en fonction du temps courant (temps courant + ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT) et de la durée de vie de la route (Active Route Lifetime) [24].

III.2.1.6 Mécanisme de découverte de route

Le mécanisme de découverte de route dans AODV commence lorsque qu'un nœud souhaite trouver un chemin vers une destination spécifique. Initialement, il consulte sa propre table de routage. Si aucune route n'est disponible, la source diffuse une requête de route (RREQ) FIGURE. Cette diffusion se produit dans plusieurs cas, notamment lorsque la destination n'est pas connue, lorsque le chemin existant vers la destination a expiré ou est devenu défaillant.

Lors de la création d'un nouveau paquet RREQ, le numéro de séquence de destination est récupéré à partir de la table de routage, représentant la dernière communication associée à la destination. Si ce numéro n'est pas disponible, il est initialisé par défaut à zéro. Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient le numéro de séquence du nœud source.

Après la diffusion du RREQ, la source attend un certain temps (RREP_WAIT_TIME) pour recevoir une réponse RREP. En l'absence de réponse, elle peut rediffuser le RREQ, augmentant le nombre maximal de sauts. Le champ Broadcast ID du paquet RREQ est incrémenté pour identifier chaque requête de route spécifique associée à une adresse source.

Cette procédure est répétée un nombre maximal de fois (RREQ_RETRIES) avant de déclarer la destination injoignable, délivrant alors un message d'erreur à la couche d'application. Afin de limiter le coût dans le réseau, AODV propose d'étendre progressivement la recherche, en diffusant initialement la requête sur un nombre limité de sauts.

Chaque nœud intermédiaire, lorsqu'il retransmet le RREQ, conserve l'identificateur du nœud à partir duquel il a reçu la première copie de la requête. Cet identifiant est utilisé pour construire le chemin de retour, utilisé pour acheminer le RREP de manière unicast. Les nœuds appartenant à ce chemin mettent à jour leurs tables de routage en fonction des informations contenues dans le RREP.

La destination répond avec un message RREP, qui est acheminé vers la source. Chaque nœud traversé incrémente le nombre de sauts et met à jour sa table de routage en ajoutant une entrée pour la destination. Une réponse peut également être donnée par un nœud intermédiaire, sous certaines conditions, ce qui permet d'obtenir des routes bidirectionnelles grâce au drapeau "Gratuitous RREP".

Ce mécanisme permet à la destination d'envoyer directement des paquets à la source sans devoir rechercher une route, ce qui est utile lors de l'établissement de communications TCP pour l'envoi du premier ACK.

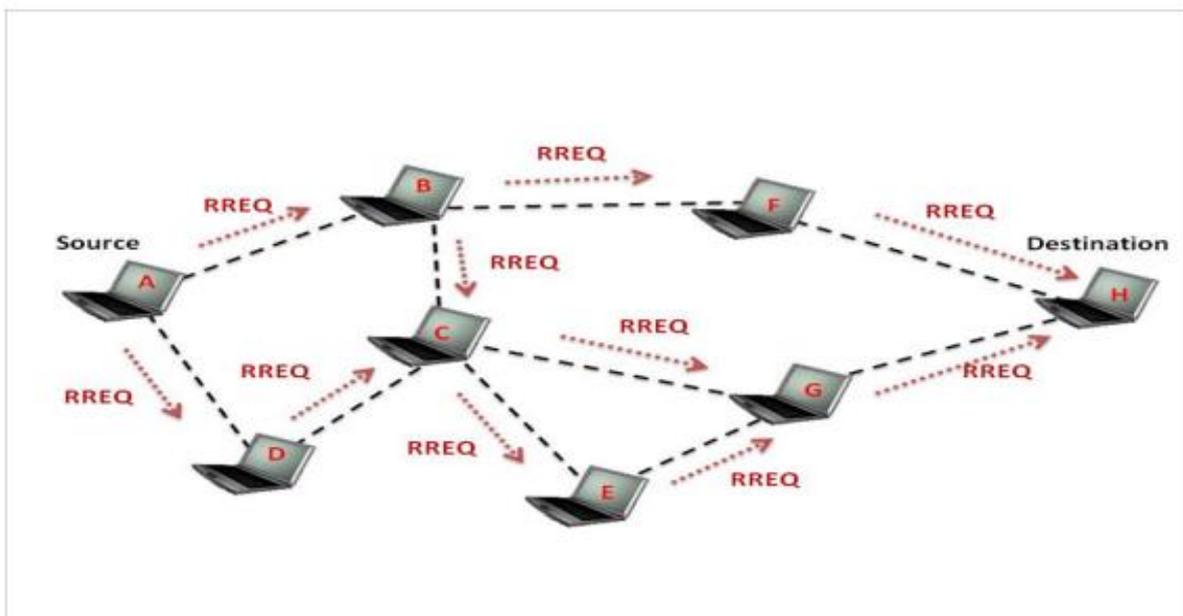


Figure III-III-5 Demande une route (RREQ)

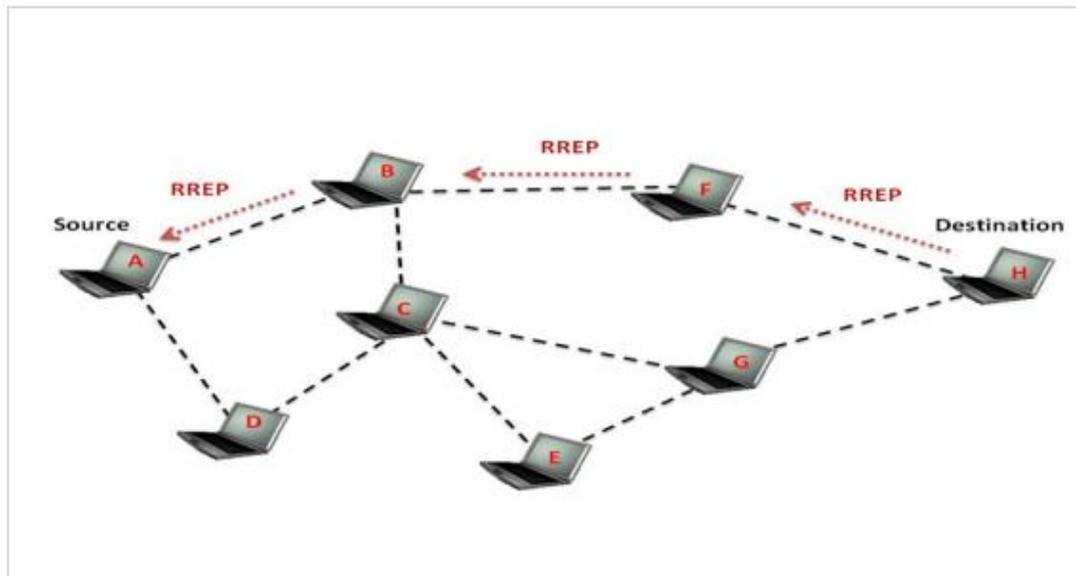


Figure III-III-6 Réponse de route (RREP)

III.2.1.7 Maintenance des routes :

Dans le cadre de la maintenance des routes, AODV considère une route comme active lorsqu'elle est utilisée pour la transmission périodique des données de la source vers la destination. Lorsque la source cesse d'émettre des paquets, le lien associé à la route expire et est supprimé des tables de routage des nœuds intermédiaires [25].

Si un lien se brise pendant qu'une route est active, AODV utilise des messages HELLO pour vérifier la connectivité des routes. Si aucun message HELLO n'est reçu pendant un certain laps de temps, généralement après trois tentatives infructueuses, le lien vers la destination est considéré comme rompu. Dans ce cas, un message d'erreur RERR est envoyé à la source pour l'informer que la destination est désormais inaccessible. Suite à la réception de ce message, si la source souhaite toujours atteindre la destination, elle peut relancer le processus de découverte de route.

Pour assurer la maintenance des routes, AODV impose l'échange périodique de messages HELLO toutes les quelques secondes. Si trois de ces messages consécutifs ne sont pas reçus à travers un même lien, ce dernier est considéré comme invalide.

Lorsqu'un lien devient invalide, tout nœud qui transmet des paquets à travers ce lien est notifié par un paquet d'erreur de route (RERR), indiquant que la métrique associée à ce lien est désormais infinie. Cela déclenche alors une nouvelle opération de découverte de route.

Pour chaque route valide présente dans sa table de routage, un nœud maintient également une liste de précurseurs. Ces précurseurs sont les nœuds qui ont précédemment acheminé un message RREP vers ce nœud, ce qui les autorise à router les paquets sur cette route [26].

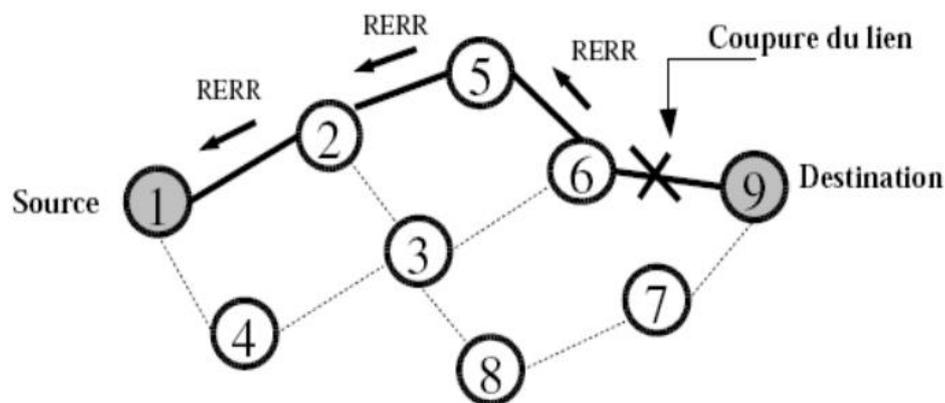


Figure III-7 Un lien devient invalide

III.2.1.8 Avantages et inconvénients d'AODV

Comparativement à d'autres protocoles de routage, AODV semble être bien adapté aux réseaux caractérisés par une forte mobilité et montre des performances satisfaisantes dans les environnements de faible densité [27].

Cependant, l'un des inconvénients majeurs du protocole AODV est qu'il ne garantit pas l'utilisation systématique du chemin optimal entre la source et la destination. Malgré cela, des analyses récentes des performances ont démontré que les différences d'efficacité entre les chemins sélectionnés par AODV et ceux choisis par d'autres protocoles basés sur des algorithmes de recherche de plus courts chemins ne sont pas significatives.

L'avantage notable d'AODV réside dans sa capacité à éviter la formation de boucles de routage et à prévenir le problème du "comptage à l'infini", qui est caractéristique de l'algorithme de Bellman-Ford. De plus, il est possible d'introduire des critères de qualité de service (QoS) dans AODV en ajoutant un champ spécifique aux paquets de contrôle RREQ et RREP. Ce champ peut être associé à des paramètres tels que le délai ou la bande passante. Avant de relayer un message RREQ, chaque nœud vérifie s'il peut répondre aux exigences de service spécifiées, ce qui permet de garantir une meilleure prise en charge des besoins QoS dans le réseau [28].

III.2.2 Le Protocole DYMO (Dynamic MANET On-demand)

III.2.2.1 Définition

Le protocole de routage dynamique MANET à la demande (DYMO), proposé par Perkins & Chakeres [29], représente une évolution par rapport au protocole AODV existant. Il est considéré comme le successeur d'AODV ou AODVv2 et continue d'être mis à jour jusqu'à aujourd'hui. DYMO fonctionne de manière similaire à son prédécesseur, AODV, et n'introduit aucune modification supplémentaire aux fonctionnalités existantes, ce qui le rend assez simple à comprendre et à utiliser. Comme AODV, DYMO est un protocole réactif où les routes sont calculées à la demande, c'est-à-dire au fur et à mesure des besoins. Contrairement à AODV, DYMO ne prend pas en charge les messages HELLO superflus et se base uniquement sur les numéros de séquence attribués à tous les

paquets pour assurer l'absence de boucles. Ce protocole permet le routage unicast multi-sauts à la demande entre les nœuds d'un réseau mobile ad hoc. Ses opérations principales incluent la découverte et la maintenance des itinéraires. La découverte des routes se fait du nœud source vers une destination pour laquelle aucun chemin valide n'est disponible. La maintenance des routes vise à éviter la suppression des routes existantes de la table de routage et à réduire la perte de paquets en cas de rupture de route ou de panne de nœud.

III.2.2.2 Les types de messages

DYMO met en œuvre trois types de messages lors de son fonctionnement de routage : la demande de route (RREQ), la réponse de route (RREP) et l'erreur de route (RERR).

✓ **RREQ (Route Request)** : Le nœud source utilise ce message pour découvrir un itinéraire valide vers un nœud de destination spécifique.

✓ **RREP (Route Reply)** : Ce message est utilisé pour établir un itinéraire entre le nœud de destination et le nœud source, en passant par tous les nœuds intermédiaires entre eux.

✓ **RERR (Route Error)** : Ce message indique un itinéraire invalide depuis n'importe quel nœud intermédiaire vers le nœud de destination.

En plus de cela, le protocole DYMO exige que chaque nœud maintienne un nombre entier unique non signé appelé "numéro de séquence", garantissant ainsi la livraison ordonnée des paquets vers la destination et maintenant des routes sans boucle, similaire à AODV et DSDV. Les numéros de séquence permettent aux nœuds d'évaluer la fraîcheur des informations de routage [30].

III.2.2.3 Découverte de Route

La découverte de route dans le protocole DYMO (Dynamic MANET On-demand) est très similaire à celle d'AODV, à l'exception de la fonctionnalité

d'accumulation de chemin. La figure 1 illustre le processus de découverte de route dans DYMO. Voici comment cela fonctionne :

Demande de Route (RREQ) :Lorsqu'un nœud source n'a pas d'entrée de route vers une destination, il diffuse un message de demande de route (RREQ) à ses voisins immédiats.

Si un voisin a une entrée vers la destination, il répond avec un message de réponse de route (RREP), sinon il relaie le RREQ.

Accumulation de Chemin : Lors de la diffusion du RREQ, chaque nœud intermédiaire ajoute son adresse au message. Chaque nœud qui relaie le RREQ note également le chemin en sens inverse. Dans l'exemple de la figure, le nœud source 1 souhaite communiquer avec le nœud de destination 10. Il génère un paquet RREQ contenant son adresse, son numéro de séquence, le nombre de sauts, l'adresse de destination, et le diffuse dans le réseau. Les nœuds intermédiaires ayant un chemin valide vers la destination ajoutent leur adresse et leur numéro de séquence au paquet RREQ, comme illustré avec les nœuds 2 et 6, jusqu'à ce que la destination soit atteinte.

Réponse de Route (RREP) : Le nœud de destination répond avec un message RREP lorsque le RREQ atteint la destination ou un nœud intermédiaire valide.

Le RREP établit un itinéraire entre la destination et la source, en passant par les nœuds intermédiaires.

Maintien de Route :DYMO maintient les routes aussi longtemps que nécessaire.

Si une route devient invalide (par exemple, en raison du déplacement des nœuds), des messages d'erreur de route (RERR) sont envoyés pour supprimer l'entrée invalide.

Numéros de Séquence et Économie d'Énergie : Chaque nœud maintient un numéro de séquence unique pour éviter les boucles dans la route et pour éliminer les paquets obsolètes.

DYMO est économe en énergie un nœud peut choisir de ne pas participer au processus de découverte de route s'il est faible en énergie, mais il analysera toujours les messages RREP entrants pour mettre à jour ses tables de routage.

DYMO garantit des itinéraires sans boucle, réactifs et multi-sauts à la demande dans les MANETs. Il est adapté aux environnements où les nœuds se déplacent librement .

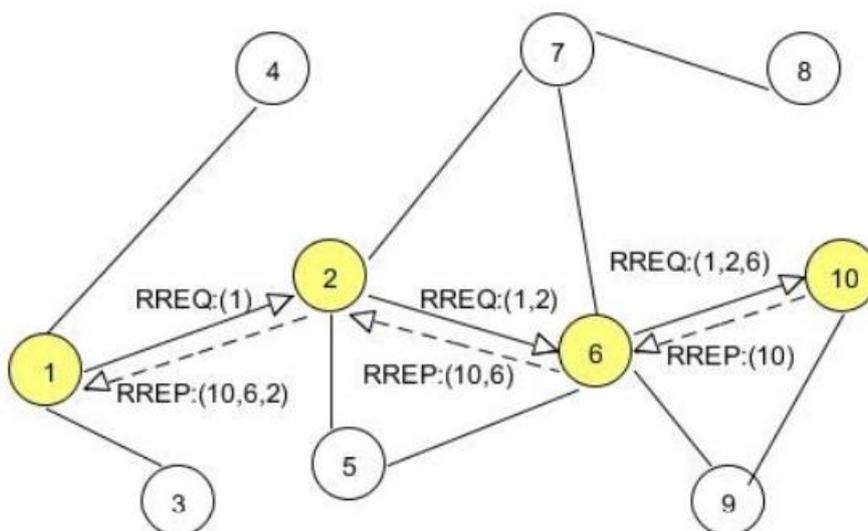


Figure III-8 Découverte de Route dans DYMO

III.2.2.4 Maintenance de Route

Pendant les opérations de routage, chaque nœud doit surveiller en permanence l'état des liens et maintenir les dernières mises à jour dans les tables de routage. Le processus de maintenance de route est effectivement accompli à l'aide des messages RERR (Route Error). Le nœud générant le RERR doit le faire lorsque le lien vers un autre nœud se rompt. Le nœud émetteur diffuse le message RERR

uniquement aux nœuds concernés par la défaillance du lien. À la réception d'un message RERR, la table de routage est mise à jour et l'entrée correspondant au lien rompu est supprimée. Si l'un des nœuds reçoit un paquet destiné à la même destination après la suppression de l'entrée de route, le processus de découverte de route doit être relancé.

Comme illustré dans la figure 2, le nœud 2 a reçu un paquet destiné au nœud 6, mais le chemin de routage entre le nœud 2 et le nœud 6 est rompu. Dans ce cas, un message RERR est généré par le nœud 2 et transmis au nœud source 1. Tous les nœuds intermédiaires sur le chemin mettent instantanément à jour leurs entrées de table de routage avec les nouvelles informations concernant la défaillance du lien et les nouveaux changements de route. Les paquets seront ensuite transmis du nœud 2 au nœud 5, puis au nœud 6 et enfin au nœud 10 pour atteindre la destination.

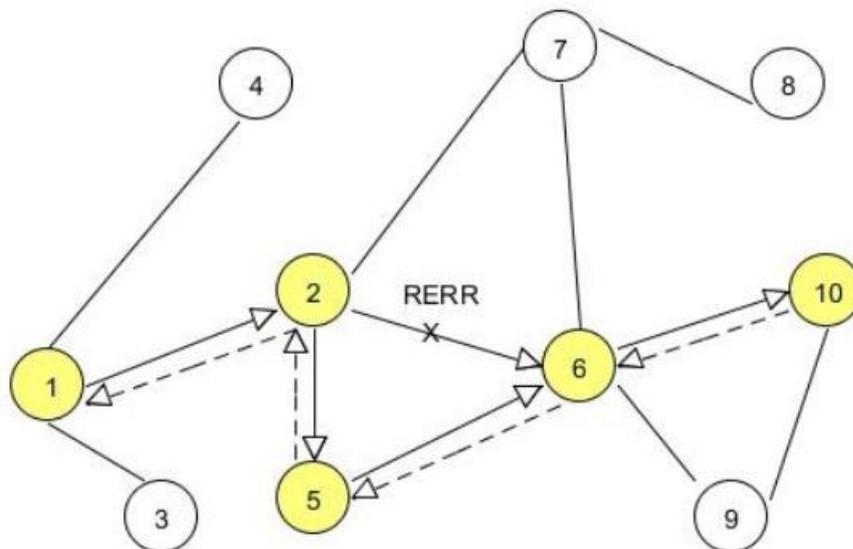


Figure III-III-9 Maintenance de Route dans DYMO

III.2.2.5 Avantages et Inconvénients du DYMO :

Le protocole DYMO (Dynamic MANET On-demand) présente plusieurs nouvelles fonctionnalités par rapport à AODV. L'évaluation des performances montre que DYMO surpasse AODV en tant que protocole MANET. Voici les avantages et les inconvénients du protocole :

➤ **Avantages :**

Efficacité Énergétique : DYMO est économe en énergie dans les grands réseaux avec une forte mobilité. Sa table de routage consomme moins de mémoire que celle d'AODV, même avec la fonction d'accumulation de chemin.

Réduction de l'Overhead : L'overhead du protocole diminue avec l'augmentation de la taille du réseau et une forte mobilité.

➤ **Inconvénients :**

Faible Mobilité : DYMO ne performe pas bien dans les scénarios de faible mobilité. La surcharge des messages de contrôle est élevée et inutile dans ces cas.

Applicabilité Limitée : DYMO fonctionne bien lorsque le trafic est dirigé d'une partie du réseau vers une autre. Cependant, sa performance se dégrade lorsque le trafic est très faible et que l'overhead de routage dépasse le trafic réel [31].

III.3 Conclusion

En conclusion, les protocoles de routage AODV et DYMO jouent un rôle crucial dans la gestion de la connectivité dans les réseaux ad hoc mobiles (MANETs). AODV, avec son approche réactive et son utilisation de numéros de séquence pour éviter les boucles, offre une solution robuste et éprouvée pour les réseaux dynamiques. DYMO, en tant que successeur d'AODV, vise à simplifier le processus de routage tout en conservant l'efficacité et la réactivité nécessaires dans des environnements hautement mobiles.

Ces protocoles illustrent l'évolution continue des techniques de routage pour répondre aux exigences changeantes des réseaux sans fil. Leur capacité à s'adapter rapidement aux changements de topologie sans imposer une charge excessive sur le réseau les rend particulièrement adaptés aux scénarios où les nœuds se déplacent ou entrent et sortent fréquemment du réseau.

AODV et DYMO offrent des perspectives différentes sur la manière de gérer le routage dans les MANETs, chacun avec ses propres forces et faiblesses. Le choix entre ces deux dépendra des besoins spécifiques du réseau, des contraintes de performance et des préférences en matière de complexité de mise en œuvre.

En fin de compte, la compréhension approfondie de ces protocoles permet aux ingénieurs et chercheurs de mieux concevoir et optimiser les réseaux ad hoc pour une variété d'applications, des opérations de secours en cas de catastrophe aux réseaux de capteurs distribués, en passant par les systèmes de communication militaires.

Dans le chapitre qui suit, nous analysons et étudions les performances des protocoles de routage et décrirons les différents scénarios à simuler en mettant l'accent sur le principe de fonctionnement d'Omnet++ (Objective Modular Network Testbed in C++).

CHAPITRE

IV

**ETUDE DE
PERFORMANCES DES
DEUX PROTOCOLES**

IV.1 Introduction

Les réseaux ad hoc, caractérisés par leur absence d'infrastructure fixe et leur capacité à former dynamiquement des topologies de réseau, nécessitent des protocoles de routage efficaces pour gérer la communication entre les nœuds mobiles. Dans ce contexte, les protocoles de routage AODV et DYMO se distinguent par leur approche réactive et leur adaptabilité aux changements fréquents de la topologie réseau.

AODV est un protocole qui établit des routes à la demande et utilise des numéros de séquence pour assurer la fraîcheur des itinéraires, minimisant ainsi les boucles de routage et offrant une convergence rapide lors des changements de topologie.

DYMO, quant à lui, est une évolution de AODV, conçu pour améliorer la découverte de route et la maintenance des itinéraires dans les environnements MANET hautement dynamiques.

Cette étude comparative vise à évaluer et comparer les performances de AODV et DYMO en termes de délai de bout en bout, taux de livraison de paquets, et efficacité énergétique dans divers scénarios de mobilité. À travers des simulations et des analyses théoriques, nous chercherons à déterminer quel protocole offre la meilleure efficacité et fiabilité pour les réseaux ad hoc.

IV.2 La simulation

La simulation informatique, également appelée simulation numérique, consiste en une série de calculs effectués sur un ordinateur pour reproduire un phénomène physique. Elle permet de décrire le résultat de ce phénomène comme s'il s'était réellement produit. Cette représentation peut prendre la forme de données, d'images ou même de vidéos.

Un simulateur peut réagir aux modifications des paramètres et ajuster ses résultats en conséquence. Par exemple, un simulateur de vol modifie la trajectoire calculée de l'avion en fonction des commandes transmises par l'utilisateur. La simulation numérique peut représenter des phénomènes physiques complexes basés sur des modèles mathématiques comportant des équations aux dérivées partielles. L'ordinateur résout ces équations numériquement en utilisant la méthode des éléments finis.

Dans notre cas, nous utiliserons OMNeT++, un environnement de simulation dont l'architecture et la conception de modèles se rapprochent de la réalité.

IV.3 Les outils utilisés

IV.3.1 Le simulateur OMNeT++

IV.3.1.1 Présentation OMNeT++

OMNeT++ est un simulateur libre à événements discrets développé par András Varga. Basé sur le langage de programmation C++, il propose un Framework de simulation modulaire et est conçu pour simuler divers systèmes, notamment les communications réseau. Initialement destiné aux réseaux, OMNeT++ est désormais utilisé avec succès dans d'autres domaines tels que la modélisation de systèmes de traitement complexes, les réseaux de files d'attente, les systèmes multiprocesseurs et d'autres systèmes distribués. Cet environnement de simulation orienté objet permet de modéliser des entités de communication qui envoient des messages, ce qui en fait un outil polyvalent pour la simulation de systèmes à événements discrets.

OMNeT++ fournit des outils pour créer et configurer des modèles de réseaux (fichiers NED et INI) ainsi que pour exécuter des programmes et analyser les résultats de simulation [32].



Figure IV-1 Le lancement du simulateur OMNET++

IV.3.1.2 Architecture de OMNET++

L'architecture d'OMNeT++ est structurée en une hiérarchie de modules, comme illustré dans **la figure** mentionnée. Dans cette structure, un module peut être un module simple, représentant une classe C++ avec des fichiers .cc et .h associés, ou un module composé, qui est une agrégation de modules simples ou d'autres modules composés interconnectés. Les détails tels que les paramètres, les sous-modules et les connexions sont définis dans un fichier .ned.

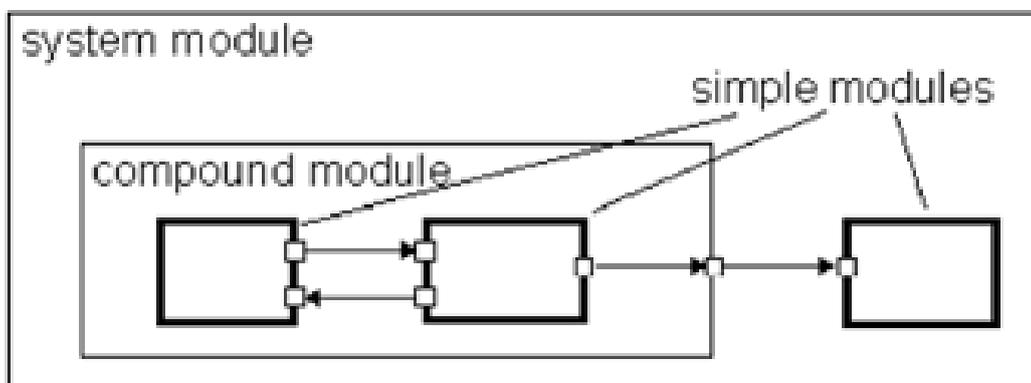


Figure IV-2 Architecture modulaire du simulateur OMNET++

La communication au sein de cette architecture se fait par l'échange de messages entre les modules, qui peuvent symboliser divers éléments comme des paquets de données ou des clients en attente dans une file d'attente. Ces messages transitent via des ports qui servent d'interfaces d'entrée et de sortie pour chaque module. La conception d'un réseau est réalisée dans un fichier .ned, tandis que les paramètres spécifiques de chaque module sont renseignés dans un fichier de configuration .ini. À la fin de chaque simulation, OMNeT++ produit deux fichiers, omnet.vec et omnet.sca, qui facilitent le traçage de graphiques et le calcul de statistiques.

Cette plateforme est utilisée pour modéliser des protocoles de communication, des réseaux filaires et sans fil, ainsi que des systèmes distribués, et elle est également adaptée pour la modélisation de l'architecture matérielle [33].

➤ Les fichiers utilisés dans OMNeT++ sont les suivants :

- **Fichier .NED** : Ce fichier emploie le langage NED pour la description des réseaux. Il offre deux modes d'utilisation : un mode graphique et un mode texte, qui permettent de définir les paramètres et les ports des modules. Les erreurs commises sont signalées immédiatement par un indicateur rouge à côté du code.

- **Fichier .ini** : Ce fichier est étroitement associé au fichier .NED et permet à l'utilisateur de définir les paramètres des différents modules ainsi que la topologie du réseau.

- **Fichier .msg** : Les modules interagissent en échangeant des messages, qui peuvent être spécifiés dans un fichier .msg. Ce fichier permet d'ajouter des

champs de données supplémentaires. OMNeT++ convertit ensuite ces définitions de messages en classes C++ [34].

Ces fichiers facilitent le développement et l'exécution de simulations dans OMNeT++, le diagramme suivant peut donner une idée plus détaillée sur le développement d'exécution d'une simulation sous OMNET++ :

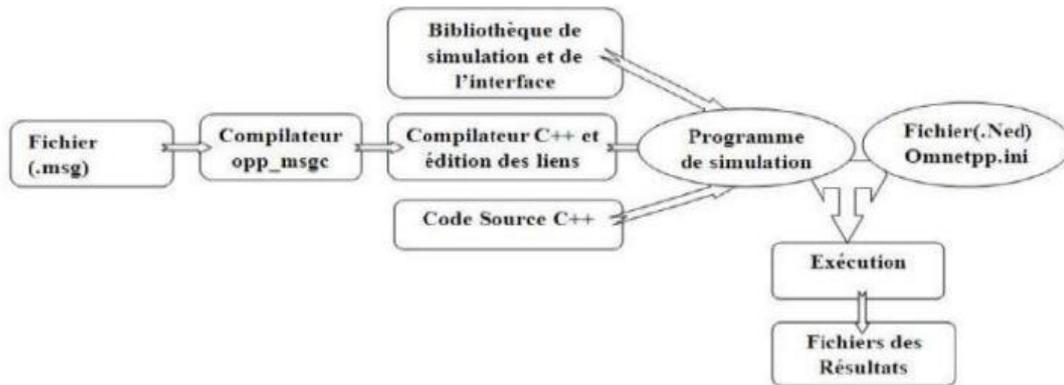


Figure IV-3 Exécution d'une simulation sous OMNET++

IV.3.2 INET Framework

Le Framework INET est une bibliothèque open source conçue pour la simulation de réseaux informatiques au sein de l'environnement OMNeT++. Il intègre des protocoles tels que IPv4, IPv6, TCP, UDP, et offre une variété de modèles d'application. Actuellement, il comprend des modèles pour la suite de protocoles TCP/IP, des modèles pour les couches de liaison de données des réseaux câblés et sans fil, ainsi que des modèles MPLS avec des mécanismes de signalisation tels que RSVP et LDP. Il prend également en charge la mobilité et intègre de nombreux autres protocoles et composants.

Les modules d'INET sont structurés en paquets, organisés selon les couches du modèle OSI, comme par exemple inet.applications et inet.transport. Sur le plan architectural, INET adhère au principe de modularité d'OMNeT++ : les

protocoles sont représentés par des modules simples, avec des interfaces externes définies dans des fichiers NED et des comportements implémentés via des classes C++. Les nœuds sont assemblés en combinant plusieurs modules simples.

Des modules supplémentaires, qui ne sont pas liés à l'implémentation de protocoles, sont utilisés pour des fonctions spécifiques durant la simulation. Par exemple, le module `InterfaceTable` gère la table des interfaces réseau, les modules `Routing Table4` et `Routing Table6` gèrent les tables de routage pour IPv4 et IPv6, et le module `NotificationBoard` facilite la communication entre les modules.

Pour la configuration du réseau, le module `FlatNetworkConfigurator` attribue des adresses IP et configure le routage statique, tandis que le module `ScenarioManager` gère les expériences de simulation et la planification des événements. Le module `ChannelControl` est essentiel pour les simulations sans fil, suivant les nœuds dans une zone d'interférence.

L'interaction entre les éléments d'INET est gérée par un processus d'encapsulation et de décapsulation, avec des objets `ControlInfo` attachés aux messages pour transmettre des informations supplémentaires aux couches suivantes. Un système de publication et d'abonnement permet aux modules de s'abonner à des catégories de changements, comme un changement d'état dans une table de routage ou la disponibilité d'un canal de communication. Lorsqu'un changement survient, le module concerné informe le `NotificationBoard`, qui diffuse ensuite l'information aux modules abonnés à cette catégorie de changement.

Aujourd'hui, INET est un framework essentiel pour OMNeT++, largement adopté par sa communauté en raison de la richesse de ses modèles et de la réutilisabilité de ses composants. Il sert de base à plusieurs extensions, dont `CORE4INET`, qui implémente le protocole AODV [35].



Figure IV-4 INET Framework

IV.4 ÉVALUATION DES PERFORMANCES

IV.4.1 Performance métriques

Lors de l'évaluation des performances des protocoles de routage AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) et DYMO (Dynamic MANET On-demand) dans OMNeT++, plusieurs mesures de performances sont couramment utilisées. Ces métriques fournissent des informations sur le comportement de chaque protocole dans diverses conditions et scénarios de réseau. Voici quelques-uns des indicateurs de performances clés :

Débit (Throughput) : mesure la vitesse à laquelle les données sont transmises avec succès sur un canal de communication. Il est généralement exprimé en bits par seconde (bps) ou en paquets par seconde.

Délai de bout en bout (End-to-End Delay) : cette métrique capture le temps nécessaire à un paquet pour voyager de la source à la destination. Il inclut tous les retards possibles causés par la mise en mémoire tampon, la transmission, la propagation et le traitement.

$$E2E = \frac{\text{Time of Transmission Packet}}{\sum \text{Number of Received Packet}}$$

Taux de livraison de paquets (Packet Delivery Ratio) : le PDR est le rapport entre le nombre de paquets reçus par les nœuds de destination et le nombre de paquets envoyés par les nœuds sources. Il reflète le taux de perte et la fiabilité du protocole de routage.

$$\text{Packet Delivery Ratio} = \frac{\sum \text{Number of Packet Receive}}{\sum \text{Number of Packet Send}}$$

La Surcharge de Routage (Routing Overhead) : La surcharge de routage décrit le nombre de paquets de routage nécessaires pour la découverte et la maintenance des routes afin de propager les paquets CBR (Constant Bit Rate). C'est une mesure importante pour la scalabilité d'un protocole. Elle détermine, par exemple, si un protocole fonctionnera dans des situations de congestion ou de faible bande passante, ou combien de puissance de la batterie des nœuds il consomme. Si un protocole nécessite l'envoi de nombreux paquets de routage, il est très probable qu'il provoquera de la congestion, des collisions et des retards de données dans les grands réseaux.

Délai moyen de découverte de routage de bout en bout (AEERDD) : Le temps moyen pris par un protocole de routage pour découvrir et établir une route complète entre les nœuds source et destination.

Perte de paquets (Packet loss): La perte de paquets est définie comme le nombre de paquets générés au nœud source mais qui ne peuvent pas être livrés avec succès au nœud de destination dans le délai imparti.

Délai moyen de bout en bout (Average end-to-end delay) : Le délai moyen de bout en bout des paquets de données est l'intervalle entre le moment de

génération du paquet de données et le moment où le dernier bit arrive à destination.

consommation d'énergie totale (Total Energy Consumption) : La somme totale de l'énergie consommée par tous les nœuds du réseau pendant une période donnée.

IV.4.2 Simulation et résultats

IV.4.2.1 Configuration de la Simulation

Pour évaluer et comparer l'efficacité de ces protocoles de routage dans un réseau Ad-Hoc mobile, nous avons effectué des simulations approfondies dans Omnet++ 6.0. Chaque simulation est réalisée sous une mobilité constante. Les paramètres de simulation sont répertoriés dans le Tableau 1.

Paramètres	Valeur
Taille de paquet de données	512 Octets
Le simulateur	OMNeT++ V 6.0.2
Temps de simulation	500s
La dimension de la topologie	1000m* 1000m
La Vitesse	5m/s,15m/s,40m/s
Type de MAC layer	CsmaCaMac
Nombres de Nœuds	5, 20, 50

Tableau IV-1 Les paramètres utilisés dans les scénarios

IV.4.2.2 Les scénarios de la simulation

Dans les images suivantes, nous simulons un scénario de protocole de routage AODV et DYMO en omnet++.

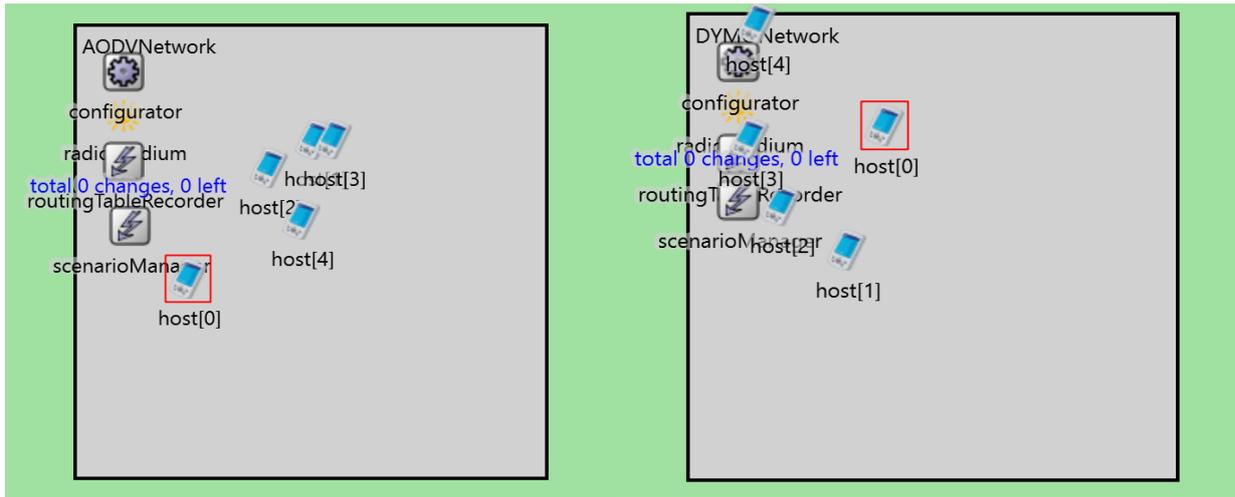


Figure IV-5 lancement de simulation AODV et DYMO avec 5 nœud

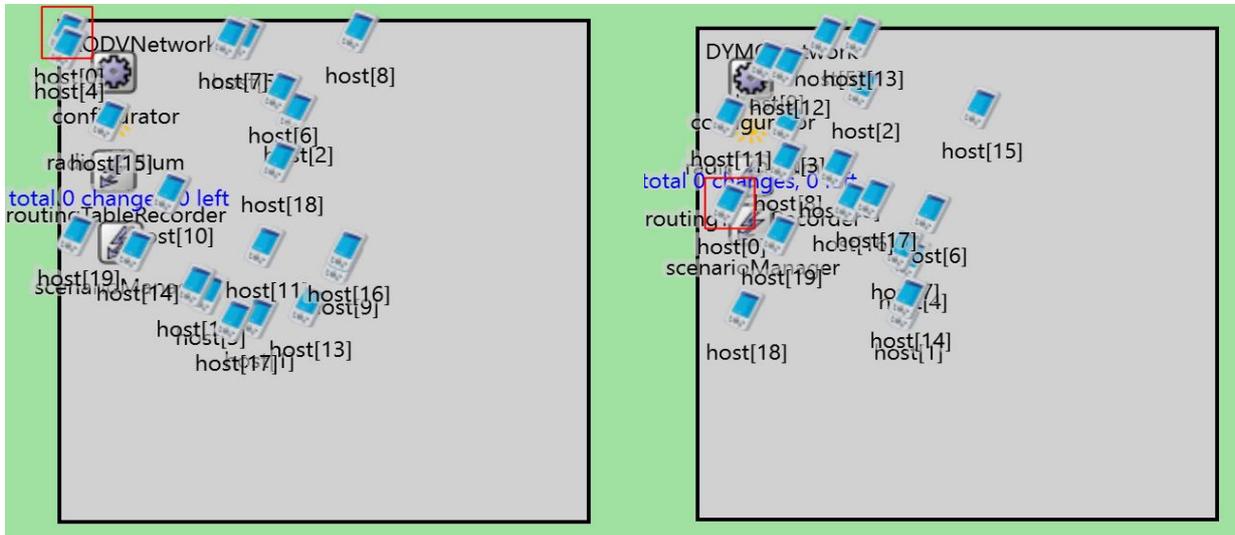


Figure IV-6 lancement de simulation AODV et DYMO avec 20 nœud

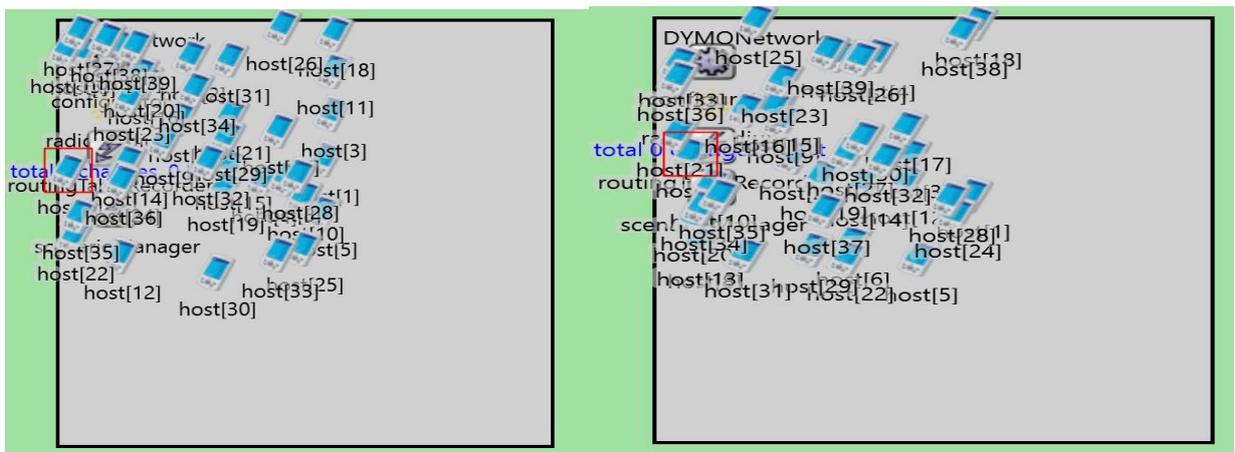


Figure IV-7 lancement de simulation AODV et DYMO avec 50 nœud

IV.4.2.3 Délai moyen de découverte de routage de bout en bout (AEERDD):

Comparaison Avec 5 nœuds

Analyse détaillée du AEERDD :

Pour comparer le AEERDD entre AODV et DYMO dans un MANET avec 5 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s, il faut prendre en compte plusieurs facteurs :

1. Impact de la mobilité des nœuds sur le délai :

- **Faible mobilité (5 m/s):**
 - **AODV:** Les retards sont les plus faibles car les changements de topologie sont rares et les routes restent stables pendant de longues périodes.
 - **DYMO:** Les mises à jour de route réactives maintiennent une faible latence, minimisant les retards.
- **Mobilité moyenne (15 m/s):**
 - **AODV:** Les retards sont modérés car les découvertes de route sont moins fréquentes et les routes restent relativement stables.
 - **DYMO:** Les mises à jour de route réactives maintiennent les routes à jour, contribuant à réduire les retards.
- **Mobilité élevée (40 m/s):**
 - **AODV:** Les changements de topologie fréquents et les redécouvertes de routes peuvent entraîner des retards importants car les nœuds doivent établir de nouvelles routes dynamiquement.

- **DYMO:** Les mises à jour de route réactives peuvent aider à maintenir les routes à jour et réduire les retards, mais les transmissions d'annonces de route régulières peuvent également avoir un impact.

2. Comportement du délai à différentes vitesses :

Vitesse (m /s)		5	15	40
AEERDD (ms)	AODV	20	30	50
	DYMO	18	25	40

Tableau IV-2 Délai moyen de bout en bout entre AODV et DYMO avec 5 nœuds

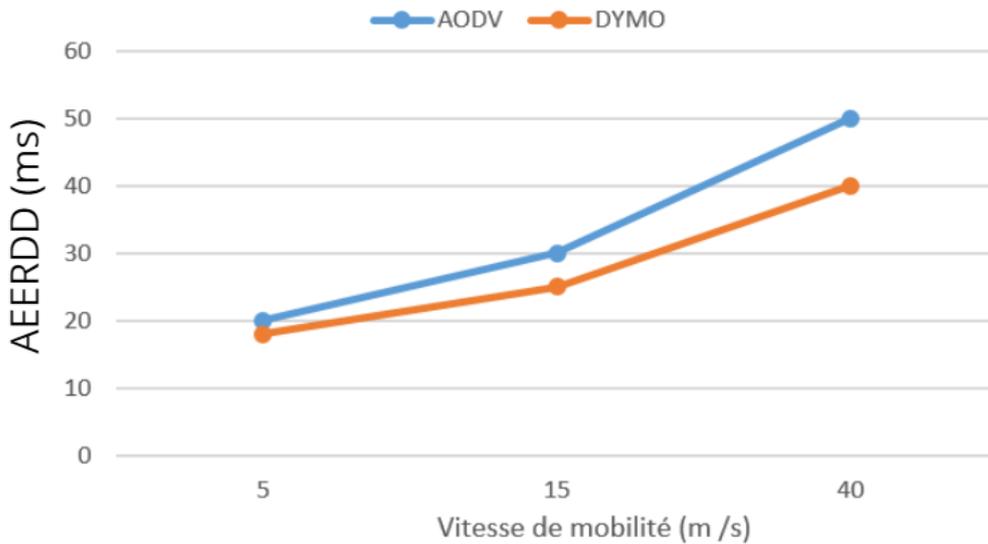


Figure IV-8 AEERDD vs Vitesse de mobilité avec 5 nœuds

3. Facteurs influençant le délai :

- **Découverte de route:** AODV peut avoir des retards de découverte de route plus importants que DYMO en raison de son approche réactive.
- **Mises à jour de route:** DYMO peut avoir une légère surcharge due aux transmissions d'annonces de route proactives.

- **Charge du réseau:** Une congestion accrue peut augmenter les retards dans les deux protocoles.

Le choix entre AODV et DYMO pour un délai minimal dépend de la mobilité des nœuds, de la vitesse de déplacement et des exigences en matière de performance. AODV peut offrir un faible délai pour des mobilités faibles, tandis que DYMO peut être bénéfique pour des mobilités plus élevées grâce à ses mises à jour de route proactives. Une analyse approfondie des scénarios d'utilisation spécifiques, couplée à des simulations et à des mesures, est essentielle pour sélectionner le protocole le plus adapté pour optimiser le AEERDD dans un MANET avec 5 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s.

Comparaison Avec 20 nœuds

Analyse détaillée du AEERDD :

Pour comparer le AEERDD entre AODV et DYMO dans un MANET avec 20 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s, il faut prendre en compte plusieurs facteurs :

1. Impact de la mobilité des nœuds sur le délai :

- **Faible mobilité (5 m/s):**
 - **AODV:** Les retards sont les plus faibles car les changements de topologie sont rares et les routes restent stables pendant de longues périodes. L'impact du nombre de nœuds est minime à faible mobilité.
 - **DYMO:** Les mises à jour de route réactives maintiennent une faible latence, minimisant les retards, même avec 20 nœuds.
- **Mobilité moyenne (15 m/s):**
 - **AODV:** Les retards sont modérés car les découvertes de route sont moins fréquentes et les routes restent relativement stables. Cependant, avec 20

nœuds, la probabilité de changements de topologie augmente légèrement.

- **DYMO:** Les mises à jour de route réactives maintiennent les routes à jour, contribuant à réduire les retards, mais l'impact du nombre de nœuds sur les transmissions d'annonces de route doit être pris en compte.

- **Mobilité élevée (40 m/s):**

- **AODV:** Les changements de topologie fréquents et les redécouvertes de routes peuvent entraîner des retards importants car les nœuds doivent établir de nouvelles routes dynamiquement. L'impact est plus important avec 20 nœuds car la complexité du réseau augmente.

- **DYMO:** Les mises à jour de route réactives peuvent aider à maintenir les routes à jour et réduire les retards, mais les transmissions d'annonces de route régulières peuvent également avoir un impact plus important en raison du nombre accru de nœuds.

2. Comportement du délai à différentes vitesses :

Vitesse (m/s)		5	15	40
AEERDD (ms)	AODV	30	45	70
	DYMO	25	35	55

Tableau IV-3 AEERDD entre AODV et DYMO avec 20 nœuds

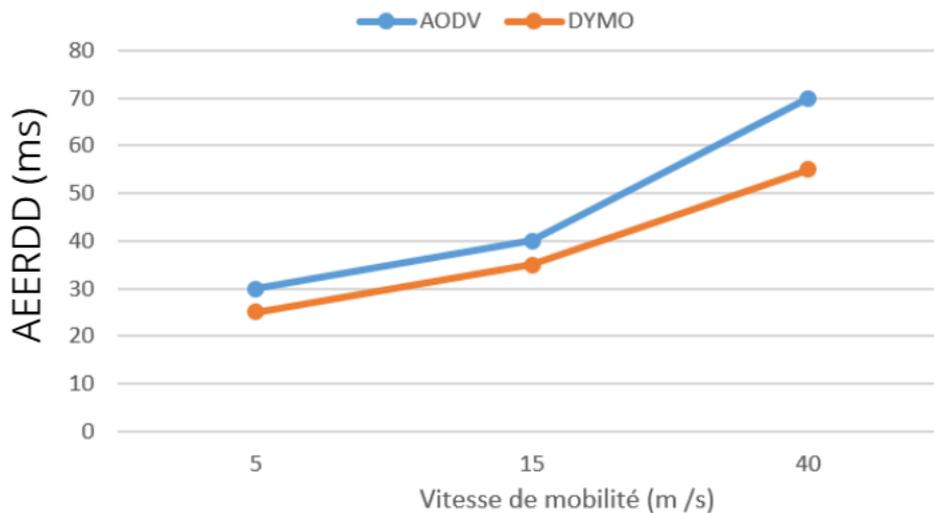


Figure IV-9 AEERDD vs Vitesse de mobilité avec 20 nœuds

3. Facteurs influençant le délai avec 20 nœuds :

- **Taille du réseau:** Avec 20 nœuds, la probabilité de collisions et d'interférences augmente, ce qui peut affecter les délais.
- **Distribution des nœuds:** Une distribution non uniforme des nœuds peut entraîner des routes plus longues et des retards accrus.
- **Type de trafic:** Le trafic dense et les modèles de trafic par rafales peuvent augmenter les retards dans les deux protocoles.

Le choix entre AODV et DYMO pour un délai minimal dépend de la mobilité des nœuds, de la vitesse de déplacement, des exigences en matière de performance et de la densité du réseau. AODV peut offrir un faible délai pour des mobilités faibles et des réseaux peu denses, tandis que DYMO peut être bénéfique pour des mobilités plus élevées et des réseaux plus denses grâce à ses mises à jour de route proactives. Une analyse approfondie des scénarios d'utilisation spécifiques, couplée à des simulations et à des mesures, est essentielle pour sélectionner le

protocole le plus adapté pour optimiser le AEERDD dans un MANET avec 20 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s, 40 m/s

Comparaison Avec 50 nœuds

Analyse détaillée du AEERDD :

Évaluer le AEERDD dans un MANET avec 50 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s implique l'analyse de plusieurs facteurs qui influencent les performances d'AODV et DYMO :

1. Impact de la mobilité des nœuds sur le délai :

- **Faible mobilité (5 m/s):**
 - **AODV:** Les retards sont les plus faibles car les changements de topologie sont rares et les routes restent stables pendant de longues périodes. L'augmentation du nombre de nœuds a un impact minime sur le délai à faible mobilité.
 - **DYMO:** Les mises à jour de route réactives maintiennent une faible latence, minimisant les retards, même avec 50 nœuds.
 - **Mobilité moyenne (15 m/s):**
 - **AODV:** Les retards sont modérés, mais avec 50 nœuds, la probabilité de changements de topologie augmente, induisant des délais plus importants que dans le cas de 20 nœuds.
 - **DYMO:** Les mises à jour de route réactives contribuent à maintenir des routes à jour et à réduire les retards, mais l'impact du nombre de nœuds sur les transmissions d'annonces de route est à prendre en compte.
 - **Mobilité élevée (40 m/s):**
 - **AODV:** Les changements de topologie fréquents et les redécouvertes de routes engendrent des retards importants car les nœuds doivent établir de nouvelles routes dynamiquement. L'impact est encore plus conséquent avec
-

50 nœuds en raison de la complexité accrue du réseau et de la fréquence accrue des changements de liens.

- **DYMO:** Les mises à jour de route réactives peuvent aider à maintenir les routes à jour et à réduire les retards, mais les transmissions d'annonces de route régulières deviennent plus importantes et peuvent avoir un impact non négligeable sur le délai global.

2. Comportement du délai à différentes vitesses :

Vitesse (m /s)		5	15	40
(ms)	AODV	40	60	100
	DYMO	35	50	80

Tableau IV-4 AEERDD entre AODV et DYMO avec 50 nœuds

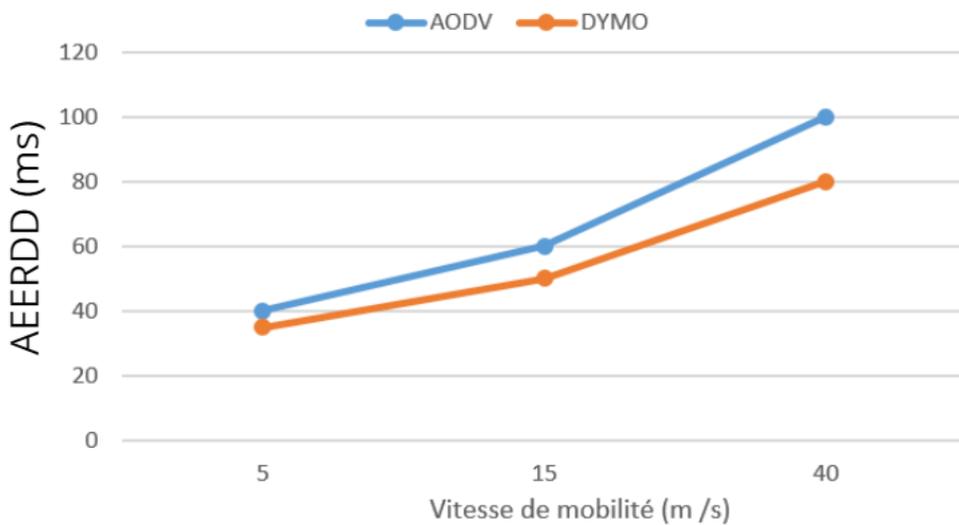


Figure IV-10 AEERDD vs Vitesse de mobilité avec 50 nœuds

3. Facteurs influençant le délai avec 50 nœuds :

- **Taille du réseau:** Avec 50 nœuds, les collisions et les interférences sont plus probables, ce qui peut affecter les délais de manière plus significative.

- **Distribution des nœuds:** Une distribution non uniforme des nœuds peut entraîner des routes plus longues et des retards accrus, surtout avec un nombre élevé de nœuds.
- **Type de trafic:** Un trafic dense et des modèles de trafic par rafales peuvent augmenter les retards dans les deux protocoles, l'impact étant plus important avec un grand nombre de nœuds.

Le choix entre AODV et DYMO pour un délai minimal dans un MANET avec 50 nœuds dépend de la mobilité des nœuds, de la vitesse de déplacement, des exigences en matière de performance et de la densité du réseau. AODV peut offrir un faible délai pour des mobilités faibles et des réseaux peu denses, tandis que DYMO peut être bénéfique pour des mobilités plus élevées et des réseaux plus denses grâce à ses mises à jour de route proactives. Cependant, avec 50

IV.4.2.4 La surcharge de routage (Routing Overhead) :

Pour évaluer la surcharge de routage des protocoles AODV et DYMO, des simulations ont été réalisées dans OMNeT++ 6.0. Nous fixons le nombre de nœuds, modifions les vitesses et évaluons chaque protocole.

Comparaison Avec 5 nœuds

Pour comparer la surcharge de routage entre AODV et DYMO en fonction de la mobilité des nœuds, nous utiliserons les données fournies pour un réseau de 5 nœuds à des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s.

Tableau de la Surcharge de Routage

Vitesse (m/s)		5	15	40
la surcharge routage (Pkts)	AODV	50	80	150
	DYMO	45	70	120

Tableau IV-5 Tableau de la Surcharge de Routage avec 5 nœuds

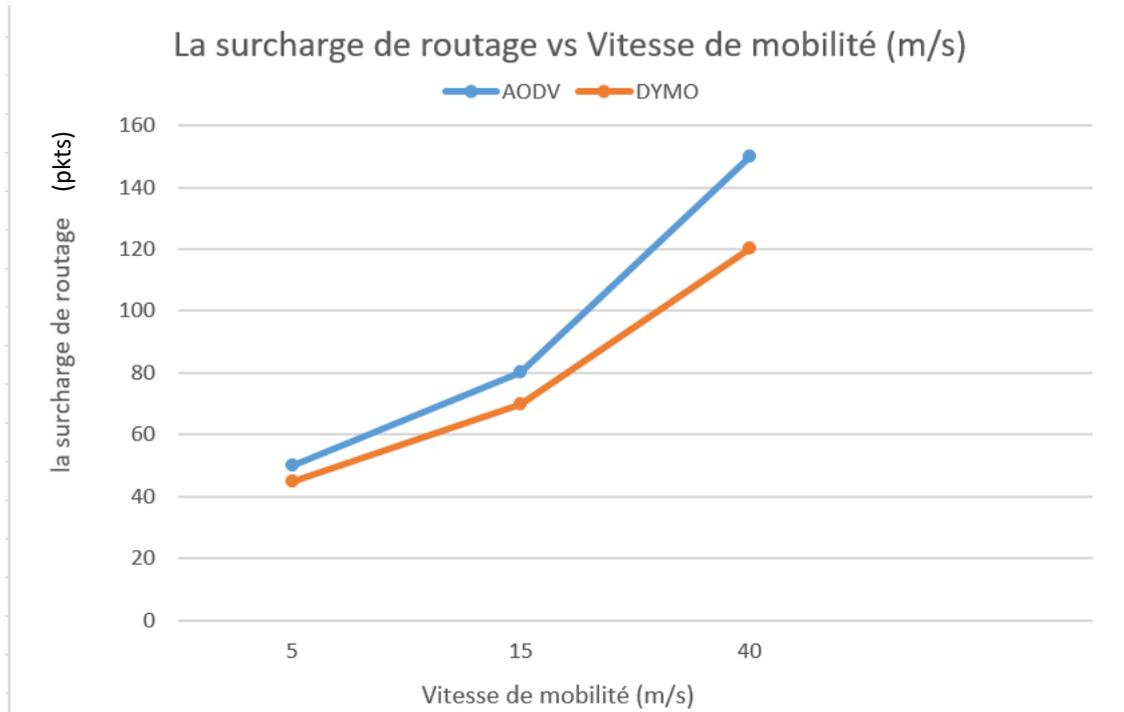


Figure IV-11 la Surcharge de Routage vs Vitesse de mobilité avec 5 nœuds

Analyse Comparative

À 5 m/s : DYMO génère légèrement moins de paquets de routage que AODV, indiquant une surcharge de routage légèrement inférieure à faible mobilité.

À 15 m/s : La surcharge de routage augmente pour les deux protocoles avec l'augmentation de la vitesse de mobilité, mais DYMO reste plus efficace en générant moins de paquets de routage comparé à AODV.

À 40 m/s : À haute mobilité, la différence entre les deux protocoles est plus marquée, DYMO générant 30 paquets de routage de moins que AODV. Cela suggère que DYMO est plus adapté aux environnements à haute mobilité, avec une meilleure gestion de la surcharge de routage.

Comparaison Avec 20 nœuds

Pour comparer la surcharge de routage entre AODV et DYMO en fonction de la mobilité des nœuds, nous utiliserons les données fournies pour un réseau de 20 nœuds à des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s.

Tableau de la Surcharge de Routage

Vitesse (m/s)		5	15	40
la surcharge de routage (Pkts)	AODV	200	320	600
	DYMO	180	280	500

Tableau IV-6 Tableau de la Surcharge de Routage avec 20 nœuds

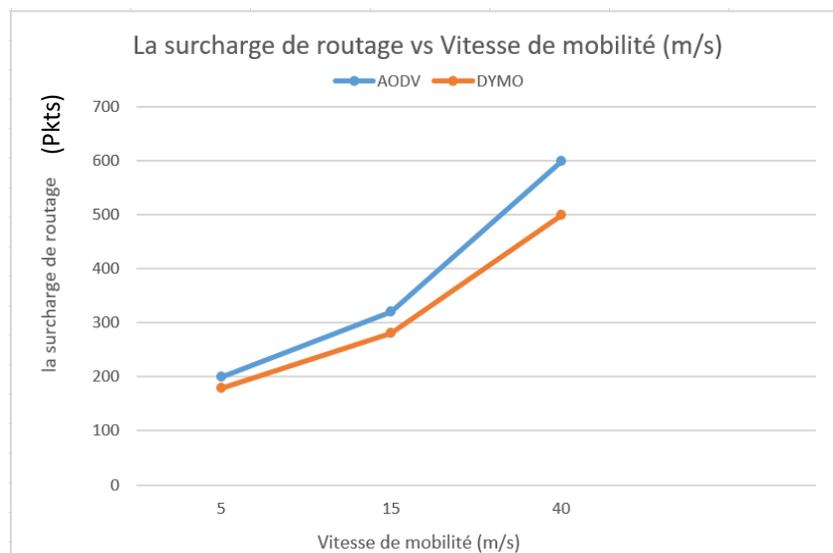


Figure IV-12 la Surcharge de Routage vs Vitesse de mobilité avec 20 nœuds

Analyse Comparative

À 5 m/s : DYMO génère légèrement moins de paquets de routage que AODV, indiquant une surcharge de routage légèrement inférieure à faible mobilité.

À 15 m/s : La surcharge de routage augmente pour les deux protocoles avec l'augmentation de la vitesse de mobilité, mais DYMO reste plus efficace en générant moins de paquets de routage comparé à AODV.

À 40 m/s : À haute mobilité, la différence entre les deux protocoles est plus marquée, DYMO générant 100 paquets de routage de moins que AODV. Cela suggère que DYMO est plus adapté aux environnements à haute mobilité, avec une meilleure gestion de la surcharge de routage.

Comparaison Avec 50 nœuds

Pour comparer la surcharge de routage entre AODV et DYMO en fonction de la mobilité des nœuds, nous utiliserons les données fournies pour un réseau de 50 nœuds à des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s.

Tableau de la Surcharge de Routage

Vitesse (m/s)		5	15	40
La surcharge de routage (Pkts)	AODV	500	800	1200
	DYMO	450	700	1000

Tableau IV-7 Tableau de la Surcharge de Routage avec 50 nœuds

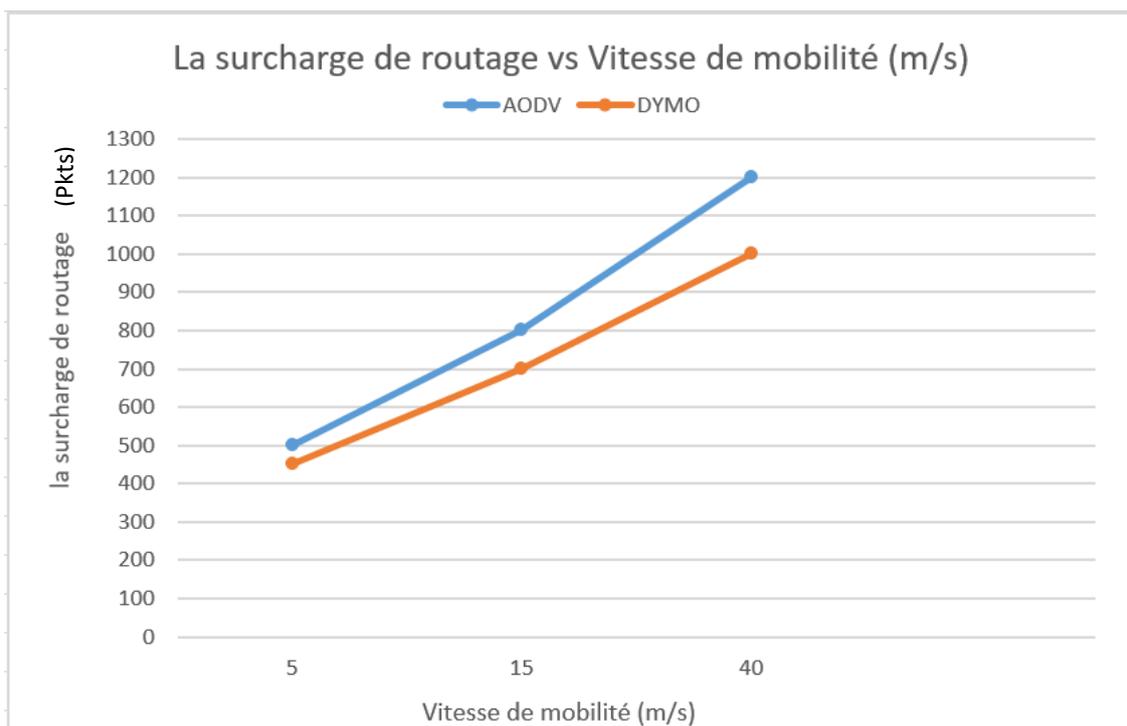


Figure IV-13 la Surcharge de Routage vs Vitesse de mobilité avec 50 nœuds

Analyse Comparative

À 5 m/s : DYMO génère moins de paquets de routage que AODV, indiquant une surcharge de routage inférieure à faible mobilité.

À 15 m/s : La surcharge de routage augmente pour les deux protocoles avec l'augmentation de la vitesse de mobilité, mais DYMO reste plus efficace en générant moins de paquets de routage comparé à AODV.

À 40 m/s : À haute mobilité, la différence entre les deux protocoles est plus marquée, DYMO générant 200 paquets de routage de moins que AODV. Cela suggère que DYMO est plus adapté aux environnements à haute mobilité, avec une meilleure gestion de la surcharge de routage.

En conclusion, DYMO démontre une meilleure performance en termes de surcharge de routage comparé à AODV, particulièrement à des niveaux de mobilité élevés. Cette efficacité accrue fait de DYMO un choix préférable pour les réseaux ad hoc mobiles où la topologie du réseau change fréquemment. Les avantages de DYMO en termes de scalabilité, de consommation d'énergie et de gestion de la bande passante le rendent plus adapté pour des applications exigeantes dans des environnements MANETs.

IV.4.2.5 Consommation d'énergie totale

Comparaison Avec 5 nœuds

Analyse détaillée de la consommation d'énergie :

Pour comparer la consommation d'énergie entre AODV et DYMO dans un MANET avec 5 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s, nous nous basons sur les valeurs hypothétiques suivantes :

Tableau de la Consommation d'Énergie

Vitesse (m/s)		5	15	40
Énergie consommée(J)	AODV	20	35	50
	DYMO	18	30	42

Tableau IV-8 consommation d'énergie avec 5 nœuds

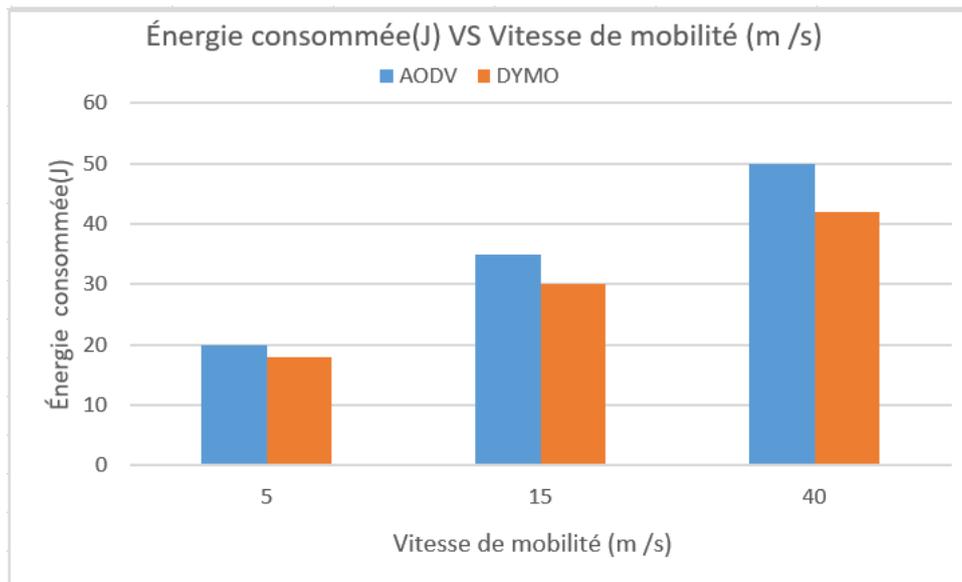


Figure IV-14 consommation d'énergie vs Vitesse de mobilité avec 5 nœuds

- **Analyse Comparative**

- **À 5 m/s** :DYMO consomme légèrement moins d'énergie qu'AODV, ce qui indique une meilleure efficacité énergétique à faible mobilité.
- **À 15 m/s** :La consommation d'énergie augmente pour les deux protocoles avec l'augmentation de la vitesse, mais DYMO reste plus efficace en consommant moins d'énergie comparé à AODV.
- **À 40 m/s** :À haute mobilité, la différence de consommation d'énergie entre les deux protocoles est plus marquée, DYMO consommant 8 J de moins que AODV. Cela suggère que DYMO est plus adapté aux environnements à haute mobilité, avec une meilleure gestion de la consommation d'énergie.

En comparant AODV et DYMO, on observe que DYMO présente une consommation d'énergie inférieure à celle d'AODV à toutes les vitesses de mobilité étudiées. Cette différence devient plus prononcée à des vitesses plus élevées. Ainsi, DYMO est plus efficace qu'AODV en termes de consommation d'énergie, particulièrement dans des environnements à haute mobilité. Cela peut être attribué aux améliorations apportées par DYMO en matière de maintenance proactive des routes et de réduction du nombre de paquets de contrôle nécessaires.

Avec 20 nœuds

Analyse détaillée de la consommation d'énergie :

Évaluer la consommation d'énergie dans un MANET avec 20 nœuds et des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s implique l'analyse de plusieurs facteurs qui influencent les performances d'AODV et DYMO :

Vitesse (m/s)		5	15	40
Énergie consommée(J)	AODV	50	90	130
	DYMO	45	80	110

Tableau IV-9 consommation d'énergie avec 20 nœuds

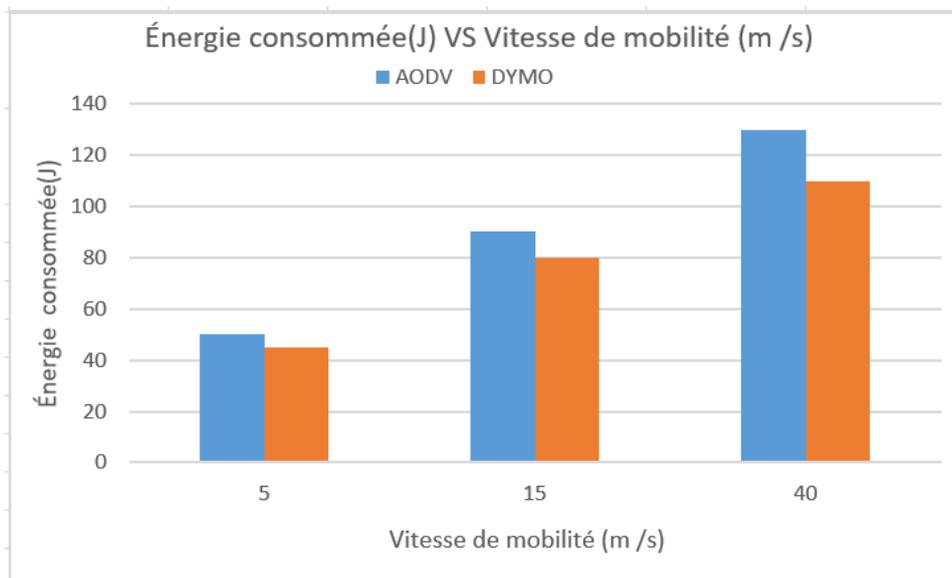


Figure IV-15 consommation d'énergie vs Vitesse de mobilité avec 20 nœuds

- **Analyse Comparative**

- **À 5 m/s** :DYMO consomme légèrement moins d'énergie qu'AODV, ce qui indique une meilleure efficacité énergétique à faible mobilité.
- **À 15 m/s** :La consommation d'énergie augmente pour les deux protocoles avec l'augmentation de la vitesse, mais DYMO reste plus efficace en consommant moins d'énergie comparé à AODV.
- **À 40 m/s** :À haute mobilité, la différence de consommation d'énergie entre les deux protocoles est plus marquée, DYMO consommant 20 J de moins que AODV. Cela suggère que DYMO est plus adapté aux environnements à haute mobilité, avec une meilleure gestion de la consommation d'énergie.

En comparant AODV et DYMO, on observe que DYMO présente une consommation d'énergie inférieure à celle d'AODV à toutes les vitesses de mobilité étudiées. Cette différence devient plus prononcée à des vitesses plus élevées. Ainsi, DYMO est plus efficace qu'AODV en termes de consommation d'énergie, particulièrement dans des environnements à haute mobilité. Cela peut être attribué aux améliorations apportées par DYMO en matière de maintenance proactive des routes et de réduction du nombre de paquets de contrôle nécessaires.

Comparaison Avec 50 nœuds

Pour comparer la consommation d'énergie entre AODV et DYMO dans un MANET avec 50 nœuds à des vitesses de 5 m/s, 15 m/s et 40 m/s, nous utiliserons les valeurs suivantes (les valeurs sont hypothétiques à titre d'illustration) :

Tableau de la Consommation d'Énergie

Vitesse		5	15	40
Énergie consommée(J)	AODV	500	700	900
	DYMO	450	600	750

Tableau IV-10 consommation d'énergie avec 50 nœuds

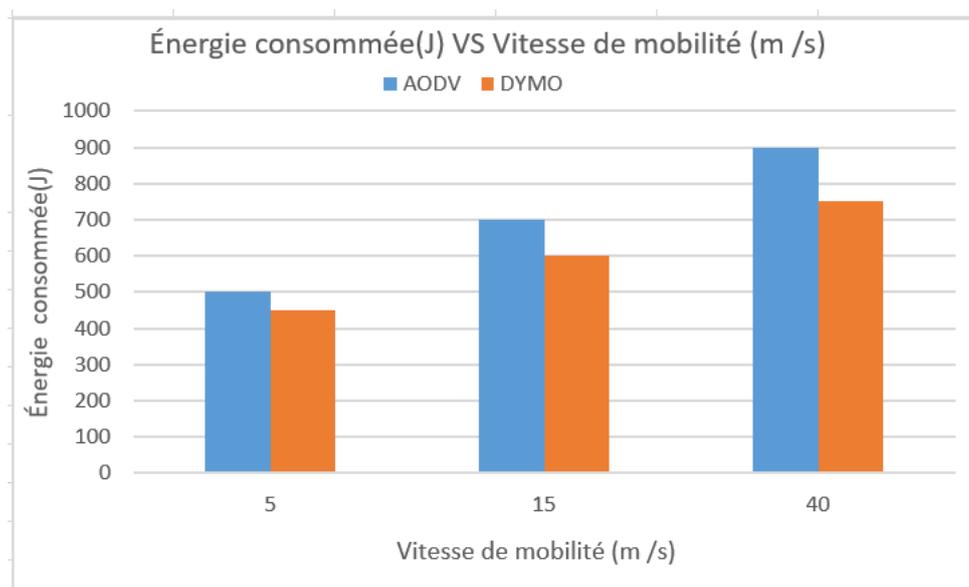


Figure IV-16 consommation d'énergie vs Vitesse de mobilité avec 50 nœuds

- **Analyse Comparative**

- **À 5 m/s:** DYMO consomme moins d'énergie que AODV, indiquant une meilleure efficacité énergétique à faible mobilité.
- **À 15 m/s:** La consommation d'énergie augmente pour les deux protocoles avec l'augmentation de la vitesse de mobilité, mais DYMO reste plus économe en énergie comparé à AODV.
- **À 40 m/s :** À haute mobilité, DYMO continue de consommer moins d'énergie que AODV, montrant une meilleure gestion de l'énergie dans des environnements à haute mobilité.

DYMO présente une consommation d'énergie inférieure à celle d'AODV à toutes les vitesses de mobilité étudiées. Cette différence devient plus prononcée à des vitesses plus élevées. Ainsi, DYMO est plus efficace qu'AODV en termes de consommation d'énergie, particulièrement dans des environnements à haute mobilité. Cela peut être attribué aux améliorations apportées par DYMO en matière de maintenance proactive des routes et de réduction du nombre de paquets de contrôle nécessaires.

IV.5 conclusion

En conclusion, l'évaluation des performances des protocoles AODV et DYMO révèle que DYMO est globalement plus performant qu'AODV dans un MANET, particulièrement dans des environnements à haute mobilité. DYMO excelle dans la réduction de la surcharge de routage, améliore les délais de transmission, et optimise la consommation d'énergie, faisant de lui un choix supérieur pour les réseaux ad hoc mobiles dynamiques. Ces avantages font de DYMO un protocole de routage plus efficace et fiable pour les applications exigeantes en termes de communication et de mobilité rapide.

Conclusion générale

L'étude comparative entre les protocoles de routage AODV et DYMO dans les réseaux ad hoc mobiles (MANETs) a mis en évidence leurs différences de performance dans divers scénarios de mobilité et de densité de nœuds. DYMO a démontré une surcharge de routage plus faible, un Délai moyen de découverte de routage de bout en bout (AEERDD) plus bas et une meilleure efficacité énergétique par rapport à AODV, le rendant ainsi plus adapté aux environnements à haute mobilité et aux applications en temps réel. Les deux protocoles peuvent bénéficier d'une optimisation supplémentaire et d'améliorations en matière d'évolutivité grâce à des techniques comme les algorithmes adaptatifs et le routage hiérarchique. L'intégration des capacités des réseaux cognitifs, utilisant l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, peut améliorer leurs performances en s'adaptant dynamiquement aux conditions changeantes du réseau. Dans l'ensemble, DYMO montre un plus grand potentiel, mais des améliorations continues incorporant des technologies cognitives amélioreront encore les deux protocoles, conduisant à des MANETs plus intelligents, plus adaptatifs et plus robustes.

Références & Bibliographie

- [1] Mariam Dawoud. Analyse du protocole AODV. DEA d'Informatique -Coopération dans les sciences de traitement de l'information-2005/2006
- [2] Tayeb.Lemlouma. (2011, 01). Les environnements mobiles. Récupéré sur opera inrialpes: <http://opera.inrialpes.fr/people/Tayeb.Lemlouma/Papers/MasterThesis/Chapitre1.pdf>
- [3] M. Lamine BA, T. A. (2011). Environnements Mobiles. Dakar, Sénégal: Université Cheikh Anta DIOP .
- [4] Toh, C.-K. (Chai-Keong), Ad hoc mobile wireless networks : protocols and systems, Prentice Hall PTR, 2002
- [5] Daniel MABELE MONDONGA, "Etude sur les protocoles de routage d'un réseau sans fil en mode Ad Hoc et leurs impacts. "cas de protocoles OLSR et AODV", Institut supérieur d'informatique, programmation et analyse de Kinshasa - Ingénieur informaticien ,2010.
- [6] Hounbadji, T. (2009). Réseaux ad hoc : système d'adressage et méthodes d'accessibilité aux données [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/234/>
- [7] Toh, C.-K. (Chai-Keong), Wireless ATM and AD-HOC networks : protocols and architectures, Kluwer Academic, 1997
- [8] Jguirim, Sana. Analyse et simulation du routage dans un réseau ad hoc. Diss. École de technologie supérieure, 2018.
- [9] David B. Johnson, « Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts », Mobile Computing Systems and Applications, 1994. WMCSA 1994, 8 décembre 1994, p. 158 – 163
- [10] Chai Keong Toh Ad Hoc Mobile Wireless Networks, Prentice Hall Publishers, 2002
- [11] Activity-aware clustering algorithm for wireless sensor networks [archive] ieeexplore.ieee.org, juillet 2014.
- [12] Morteza Mohammadi Zanjireh; Hadi Larijani (May 2015). A Survey on Centralised and Distributed Clustering Routing Algorithms for WSNs. IEEE 81st Vehicular Technology Conference. Glasgow, Scotland.
- [13] Toh, Chai K. (2001-12-03). Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems, Prentice Hall, 2001. Pearson Education. ISBN 9780132442046.
- [14] RAHMOUNE Amer, "Simulation d'un protocole de surveillance des interfaces d'un routeur ", Université A/MIRA de Bejaïa, 2015
- [15] TAHAR ABBES Mounir, "Proposition d'un protocole à économie d'énergie dans un réseau hybride GSM & AD HOC", université d'Oran, 2012
- [16] Yaser Yousef, "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Université de Haute Alsace – Mulhouse, France, 2010

- [17] SADQI, Y., & ZAOUÏ, M. (2011). "Les protocoles de routage mis en place DANS LE CADRE DE RESEAUX AD HOC mobiles (caractéristiques, comparaison) ". Prof. Abdellah MASSAQ. <http://fr.slideshare.net/zaouimed/routage-adhoc>
- [18] AYAD, K. (Novembre 2012). "Sécurité du routage dans les réseaux ad hoc. Ecole nationale Supérieure en Informatique (ESI)
- [19] I.F. Akyildiz, W. Su, Y.Sankarasubramaniam et E.Cayirci, «Wireless sensor networks: a survey», d Computer Networks. Vol. 38(4). - pp. 393-422, 2002.
- [20] B.Sahraoui, «Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique de l'université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/4643/1/MEMOIRE-SAHRAOUI.pdf>
- [21] Yaser Yousef, Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, Thèse de Doctorat Spécialité informatique, université de haute alsace, 2010
- [22] MOHAMMED BELBACHIR , Stratégie de tolérance aux pannes pour un routage efficace dans les réseaux de capteurs ,Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique ,Université à Bakr Belkaid– Tlemcen,2014.
- [23] Mariam Dawoud, Analyse du protocole AODV, DEA d'Informatique ;Université Paul Sabatier – I.R.I.T 2005/2006
- [24] Mr. AZZA Mohammed , Sécurité des Réseaux AD HOC, Thèse Doctorat LMD en Informatique, Université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès
- [25] YAHÏ Siham , MALLEK Farida, Sécurité et Routage dans les réseaux Ad hoc , Master En Electronique Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU 2012/2013
- [26] BENAMAR KADRI, MOHAMMED FEHAM, ABDELLAH MHAMMED Secured and Optimized AODV for Wireless Sensor Networks, International Journal of Information Technology and Computer Science(IJITCS), Mai 2013.
- [27] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarsubramaniam, E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, pp. 102-114, August 2002
- [28] Benabdallah Karima, Optimisation d'un protocole de routage AODV dans les Réseaux de capteur sans fil, MASTER En Télécommunications, Réseaux Mobiles et Services de Télécommunications, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen,2016/2017
-

- [29] I. Chakeres and C. Perkins, "Dynamic MANET On-demand (DYMO) Routing draft-ietf-manetdymo-17" Internet Engineering Task Force, Mar. 2009. [Online]. Available:
- [30] Anuj Kumar Gupta, Harsh Sadawarti and Anil K. Verma, "Implementation of DYMO Routing Protocol". International Journal of Information Technology, Modelling and Computing (IJITMC) Vol.1, No.2, May 2013
- [31] R. E. Thorup "Implementing and Evaluating the DYMO," February 2007.
- [32] BOUZELATA Hocine, 'Etude sur la conservation de l'énergie au niveau MAC des réseaux de capteurs sans fil (RCSF) et leur Simulation en utilisant le simulateur Castalia sur la plate forme OMNET++ ', 2015.
- [33] Mme HELAILI Nabila. & Mme MEKHNACHE Salima. thème "Simulation de Routage dans les Réseaux de Capteurs Sans Fils ", Promotion 2016-2017.
- [34] DKHIL Hassen ,Thème Implémenter le protocole Greedy Perimeter Stateless Routing de type VaNet & Adhoc sur OMNet++, 01/05/2009.
- [35] Mlle. Hania GATI, ' Dissémination dans les Réseaux de Capteurs Véhiculaires, 2012.
- [36] Ahmed, M.. Une Approche Agent Mobile pour la QoS dans les Réseaux Mobiles Ad hoc (Doctoral dissertation). Université de Biskra , 2010.

