

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Université Saad Dahleb - Blida 1 -

Faculté des sciences



Mémoire

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master**

En : Informatique

Option : Systèmes Informatiques et Réseaux

Thème

**Comparaison des performances des réseaux mobiles ad-hoc (MANETs)
en fonction de différents protocoles de routage**

Réalisé par : GUERNINA Sarah

BELLAT Yasmine

Encadré par : Dr. BENYAHIA Mohamed

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

C'est avec une joie immense que nous dédions ces quelques mots en témoignage de notre gratitude et reconnaissance à tous ceux qui ont participé, directement ou indirectement, à la réalisation de ce livre.

Avant tout, nous tenons à remercier le bon Dieu, le Très-Haut, qui nous a offert la force nécessaire pour poursuivre nos études et l'audace pour surmonter tous les obstacles.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus chaleureux à notre superviseur Mr. BENYAHIA Mohamed pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils avisés tout au long de ce travail.

Nous souhaitons aussi exprimer notre reconnaissance envers les membres du jury pour le temps qu'ils ont dédié à l'examen de cette thèse et pour leur attention portée à nos recherches.

Un grand merci à tous nos enseignants du département d'informatique de l'Université Saad Dahleb de Blida. Leur expertise, leur engagement envers l'enseignement et le partage des connaissances ont joué un rôle important dans notre développement académique.

Pour finir, nous souhaitons exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont participé de manière directe ou indirecte à l'accomplissement de ce projet. Votre soutien, vos encouragements et vos remarques ont eu une valeur inestimable tout au long de cette aventure. Nous vous sommes profondément reconnaissants pour votre collaboration précieuse et votre appui constant.

Dédicace

Dévoué à mes parents, mes soutiens indéfectibles, ma mère, une entité radieuse qui a constamment été ma réserve inestimable d'affection, de puissance et d'orientation. Chaque étape de mon parcours a été nourrie par tes sacrifices sans fin, ta bienveillance inébranlable et ta sagesse illuminée. L'inébranlable confiance de mes parents et leur soutien constant ont constitué le socle de mon existence, me donnant la force de poursuivre mes aspirations avec ténacité. À mes deux frères qui ont été mes complices dans toutes mes aventures depuis l'enfance, Je consacre cette thèse à votre attention. Votre soutien, vos échanges passionnés et votre présence attentionnée ont rendu mon parcours universitaire riche en moments précieux et en souvenirs inoubliables. Vous êtes ma famille, mes amis et mes plus grands soutiens, et je suis immensément reconnaissante de vous avoir avec moi tout au long de cette extraordinaire aventure.

Guernina Sarah

Je dédie ce travail à mes chers parents, les véritables architectes de ma vie. Votre amour inconditionnel, vos sacrifices innombrables et votre soutien indéfectible ont toujours été la force motrice derrière mes aspirations. Maman, ta bienveillance et ta sagesse ont éclairé mon chemin, tandis que Papa, ta présence rassurante a été ma boussole. Je vous suis éternellement reconnaissante pour tout.

À mon merveilleux frère, Ilyas, mon complice de toujours et mon plus fidèle confident. Ce travail est aussi le fruit de nos innombrables discussions, de nos rires partagés et de ton soutien inébranlable à chaque étape de mon parcours. Je pense également à mes tantes, mes oncles et mes chères cousines, dont l'affection a toujours réchauffé mon cœur. Enfin, à mes incroyables amis et amies : Leila, Merieme, Noussaiba, Yousra, Rayane, Moncef, Djamel et Safouane. Vous avez rendu mes années universitaires riches en moments inoubliables, entre entraide précieuse et éclats de rire. Votre amitié est un trésor. À vous tous, ma famille et mes amis, qui avez fait de cette aventure une expérience extraordinaire, je vous exprime ma gratitude la plus sincère

Yasmine Bellat

Résumé

Les réseaux mobiles Ad Hoc appelés généralement MANET (Mobile Ad Hoc Network) sont devenus de plus en plus populaires ces dernières années, en raison de l'importance des domaines d'application des réseaux Ad Hoc. Ils sont un nouveau type de réseaux basés sur la technologie sans fil. Les réseaux Ad Hoc sont des systèmes autonomes qui communiquent avec des ondes radio sans infrastructure. La communication entre les nœuds de réseaux MANET nécessite des protocoles de routage à cause de topologie dynamique et l'absence d'administration centrale.

Dans ce mémoire, nous avons étudié les performances de trois protocoles de routage : AODV, OLSR et DSR, à l'aide du simulateur ns-3. L'objectif principal de ce travail est de comparer les performances de ces protocoles en fonction de différents critères d'évaluation, afin de déterminer lequel est le plus adapté à divers scénarios. L'évaluation a été réalisée selon plusieurs scénarios de mobilité (statique, moyenne, élevée) et basée sur des métriques de performance.

Mots clés : Réseaux MANET, Protocoles de Routage, AODV, OLSR, DSR, ns-3.

Abstract

Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) have become increasingly popular in recent years due to the importance of their application domains. These are wireless networks where nodes communicate autonomously via radio waves without a centralized infrastructure. Communication within MANETs requires routing protocols due to the dynamic topology and the absence of central management.

In this thesis, we studied the performance of three routing protocols: AODV, OLSR, and DSR, using the ns-3 simulator. The primary objective was to compare the performance of these protocols based on various evaluation criteria, to determine the most suitable one for different scenarios. The evaluation was conducted across several mobility scenarios (static, medium, high), and based on performance metrics.

Keywords: MANETs, Routing Protocols, AODV, OLSR, DSR, ns-3, Mobility.

ملخص

تُعد الشبكات المتنقلة اللاسلكية المخصصة، والمعروفة باسم MANET (Mobile Ad Hoc Network)، من التقنيات التي أصبحت شائعة بشكل متزايد في السنوات الأخيرة نظرًا لأهمية مجالات استخدامها. تعتبر هذه الشبكات نوعًا جديدًا من الشبكات اللاسلكية حيث تتواصل العقد بشكل مستقل عبر موجات الراديو دون الحاجة إلى بنية تحتية ثابتة. تتطلب عملية التواصل في هذه الشبكات بروتوكولات توجيه فعالة بسبب الطوبولوجيا الديناميكية وغياب الإدارة المركزية.

في هذا البحث، قمنا بدراسة أداء ثلاثة بروتوكولات توجيه AODV و OLSR و DSR باستخدام محاكي الشبكات ns-3. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو مقارنة أداء هذه البروتوكولات بناءً على معايير تقييم مختلفة لتحديد الأنسب منها في السيناريوهات المختلفة. تم إجراء التقييم بناءً على عدة سيناريوهات حركة (منخفضة، متوسطة، وعالية) واستخدام مقاييس الأداء. **الكلمات المفتاحية:** شبكات MANET، بروتوكولات التوجيه، AODV، OLSR، DSR، ns-3، الحركة، الأداء.

Table des matières

Résumé

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale

I .Concept de base	3
Introduction.....	3
I .1.Definition des reseaux mobiles Ad-hoc.....	3
I .2. Caracteristiques des reseaux mobile Ad-hoc.....	4
I .3.Les Applications des reseaux Ad-hoc:.....	6
I .4. Importance du routage dans ces reseaux :.....	7
I .5. Presentation des protocoles etudies :.....	8
AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector).....	8
OLSR (Optimized Link State Routing).....	8
DSR (Dynamic Source Routing).....	8
Conclusion.....	8
II .Presentation des protocoles de routage :.....	9
Introduction.....	9
II .1. Classification des protocoles de routage	9
II .2. Les Protocoles Proactifs.....	10
Definition :.....	10
Mode de fonctionnement :.....	10
Avantage :.....	11
Inconvenients:.....	11
II .3 Les Protocoles Réactifs.....	11
Definition :.....	11
Mode de fonctionnement:.....	11
Avantages.....	12
Inconvenients:.....	46
II .4 Le protocole de routage AODV.....	13

Definition.....	13
Table de routage	13
Fonctionnement du protocole AODV.....	14
Analyse des Avantages et des limitations d'AODV.....	15
II .5 Le protocole de routage OLSR.....	16
Definition.....	16
Fonctionnement du protocole OLSR.....	16
Mécanisme des MPR.....	17
Analyse des Avantages et des limitations d'OLSR.....	18
II .6 Le protocole de routage DSR.....	19
Definition.....	19
Fonctionnement du protocole DSR.....	19
Analyse des Avantages et des limitations d'OLSR.....	21
II .7 Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs.....	21
II .8 Comparaison entre les protocoles de routage Adhoc.....	22
III. Méthodologie et Scenario de simulation	23
Introduction.....	23
III.1 Environnement de simulation.....	23
Le simulateur NS3.....	23
III.2 Paramètres de Simulation.....	26
III.3Expériences Réalisées	27
Scenario 1 :.....	27
Scenario 2 :.....	27
Scenario 3 :.....	28
III.4 Simulation des protocoles avec ns3.....	28
Conclusion.....	30
IV. Analyse et discussion du résultats.....	31
Introduction.....	60
IV.1 Méthodologie Expérimentale :.....	31
Simulation	31

Paramètres de Simulation :	32
IV.2 Scenario 1 :	32
Delai moyen :	33
Débit moyen :	34
Taux de perte :	35
Latence :	36
IV.3 Scenario 2 :	38
IV.4 Scenario 3 :	43
IV.5 Analyse comparative :	49
Comparaison du debit.....	49
Comparaison du délai :	49
Comparaison du latence	51
Comparaison du Taux de perte	51
Conclusion :	52
V. Conclusion et Perspectives :	53
V.1. Conclusion generale sur les performances des protocoles:	54
V.2. Perspectives et amélioration :	58
Conclusion :	60
Conclusion générale	
Bibliographie.....	61

Table des figures

Figure I.1 : Réseau mobile ad hoc, et graphe correspondant au réseau formé par ces terminaux mobiles	4
Figure I.2 : durée de vie de batterie des nœuds.....	5
Figure I.3 : Changement de la topologie d'un réseau Ad Hoc.....	5
Figure I.4 : Les nœuds cachés.....	6
Figure I.5 : Quelques domaines d'application pour les réseaux Ad hoc.....	7
Figure I.6 : Illustration du routage unicast, multicast et broadcast.	7
Figure II.1 : Classification des protocoles de routages.....	9
Figure II.2 : Principe de fonctionnement des protocoles proactif.....	10
Figure II.3 : Fonctionnement des protocoles réactifs	12
Figure. II.4 : Recherche de route dans AODV	14
Figure II.5 : Avantage d'utilisation MPR.....	17
Figure II.6 : La découverte de chemins dans le DSR.....	20
Figure II.7 : Construction de l'enregistrement des routes.....	20
Figure III.1 : Le Simulateur NS-3.....	23
Figure III.2 : Exemple de Visualisation avec netanim.....	25
Figure III.3 : les fichiers csv.....	29
Figure III.4 : Exemple de fichier csv	29
Figure III.5 : exemple de lancement de simulation.....	30

Figure IV.1 : Évolution du délai moyen dans mobilité statique.....	33
Figure IV.2 : Évolution du débit moyen dans mobilité statique.....	34
Figure IV.3 : Évolution de taux de perte dans mobilité statique.....	35
Figure IV.4 : Évolution de latence dans mobilité statique.....	36
Figure IV.5 : Évolution de délai dans mobilité moyenne.....	38
Figure IV.6 : Évolution de débit dans mobilité moyenne.....	39
Figure IV.7 : Évolution de Taux de perte dans mobilité moyenne.....	40
Figure IV.8 : Évolution de Latence dans mobilité moyenne.....	41
Figure IV.9 : Évolution de Délai dans mobilité élevée.....	43
Figure IV.10 : Évolution de Débit dans mobilité élevée.....	45
Figure IV.11 : Évolution de Taux de perte dans mobilité élevée.....	46
Figure IV.12 : Évolution de Latence dans mobilité élevée.....	47
Figure IV.13 : Comparaison de Débit des protocoles dans les différents cas de mobilité	49
Figure IV.14 : Comparaison de Délai des protocoles dans les différents cas de mobilité	50
Figure IV.15 : Comparaison de Latence des protocoles dans les différents cas de mobilité.....	51
Figure IV.16 : Comparaison de Taux de perte des protocoles dans les différents cas de mobilité.....	52
Figure V.1 : Comparaison du débit (kbps) pour les protocoles dans trois scénarios de mobilité.....	54
Figure V.2 : Évolution du délai moyen (s) pour AODV, DSR et OLSR selon le niveau de mobilité.....	55
Figure V.3 : Latence totale (s) pour les trois protocoles dans des conditions de mobilité.....	56
Figure V.4 : Taux de perte de paquets dans les trois contextes de mobilité.....	57

Liste des tableaux

Tableau II.1 Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs.....	23
Tableau II.2 : Comparaison entre les protocoles de routage ad-hoc [10]	24
Tableau III.1: Comparaison avec les autres simulateurs.....	27
Tableau IV.1 : Paramètres de simulation utilisés dans NS-3.....	31
Tableau IV.2 : Comparaison des protocoles dans le scénario de mobilité modérée.....	45

Liste des abréviations

AODV	Ad hoc on Demand Distance Vector Routing
MANET	Mobile Ad hoc Network
OLSR	Optimized Link State Routing
NS-3	Network Simulation version 3
RREQ	Route Request
RREP	Route Reply
RERR	Route Error
DSR	Dynamic Source Routing
CSV	Comma-Separated Values
PLR	Packet Loss Ratio

Introduction générale

Contexte de travail

Avec l'essor des technologies sans fil, les réseaux mobiles ad hoc (MANETs – Mobile Ad hoc Networks) se sont imposés comme une solution essentielle pour établir des communications sans infrastructure fixe. Ces réseaux sont auto-organisés, où chaque nœud mobile joue un rôle d'émetteur, de récepteur et de routeur, facilitant ainsi l'échange dynamique des données. Grâce à leur flexibilité et leur déploiement rapide, les MANETs sont utilisés dans divers domaines, notamment les interventions d'urgence (secours en cas de catastrophe), les opérations militaires, les communications en zones isolées et l'Internet des objets (IoT).

Cependant, la performance d'un réseau MANET repose largement sur le protocole de routage utilisé. En raison de la mobilité constante des nœuds, la topologie du réseau évolue continuellement, rendant la gestion des itinéraires particulièrement complexe. Ainsi, un protocole de routage efficace doit être capable d'optimiser la transmission des données, de minimiser la latence, de réduire la consommation énergétique et de s'adapter aux variations du réseau.

Cette étude vise à analyser et comparer différents protocoles de routage afin d'évaluer leurs avantages et limites dans divers scénarios. Trois grandes catégories de protocoles sont examinées :

Les protocoles proactifs (table-driven) : Ces protocoles maintiennent en permanence des tables de routage à jour, garantissant ainsi une faible latence, mais au prix d'une surcharge en mise à jour des routes (ex. OLSR, DSDV).

Les protocoles réactifs (on-demand) : Ils établissent les routes uniquement lorsqu'une communication est nécessaire, ce qui réduit la consommation de ressources, mais peut entraîner des délais supplémentaires lors de la découverte des chemins (ex. AODV, DSR).

Les protocoles hybrides : Ils combinent les approches proactive et réactive afin d'optimiser la gestion des routes et d'améliorer l'efficacité du réseau (ex. ZRP).

Problématique et Objectifs du Travail :

Dans le cadre des MANETs, il est crucial de déterminer quel protocole de routage existant s'adapte le mieux aux besoins spécifiques d'une situation donnée, compte tenu de la variété des protocoles disponibles. Par conséquent, la question que nous traitons est la suivante :

Quel protocole de routage présente les meilleures performances dans un contexte MANET selon différents critères ?

Les objectifs de cette étude sont :

1-Analyser les caractéristiques des protocoles AODV, DSR et OLSR :

Le temps de latence (délai moyen de transmission des paquets)

Le taux de livraison des paquets (Packet Delivery Ratio – PDR)

- La surcharge de contrôle (nombre de paquets de contrôle échangés)
- La consommation d'énergie (efficacité énergétique du protocole)
- La résilience aux pannes et à la mobilité des nœuds
- Throughput

2-Évaluer leurs performances via des simulations dans l'environnement ns-3.

3-Évaluez les résultats obtenus pour déterminer les points forts et les faiblesses de chaque protocole

Organisation du mémoire :

Pour répondre à cette problématique, nous adoptons une approche méthodologique basée sur :

1. Une revue de la littérature sur les MANETs et les protocoles de routage.
2. La mise en place de simulations sous l'outil ns-3.
3. L'analyse et la comparaison des résultats obtenus.

Ce document est structuré comme suit :

Chapitre 1 : Concepts de base

Chapitre 2 : Présentation détaillée des protocoles AODV, DSR et OLSR.

Chapitre 3 : Description de l'environnement de simulation et des paramètres utilisés.

Chapitre 4 : Analyse et discussion des résultats.

Chapitre 5 : Conclusion et perspectives de recherche.

Concepts De Base

Introduction

Un réseau sans fil Ad-Hoc est un réseau décentralisé et pair-à-pair où les nœuds communiquent directement sans infrastructure fixe (pas besoin de routeur ou de point d'accès). Cette famille de réseaux comprend plusieurs sous-catégories, dont les réseaux mobiles ad hoc (MANETs), les réseaux de capteurs (WSNs) et les réseaux maillés (WMNs).

Dans ce chapitre notre intérêt principal est mis sur les MANETs, du fait de leurs spécificités particulières et des enjeux qu'ils soulèvent dans le domaine de la communication mobile sans fil, Nous mettrons ensuite en lumière l'importance du routage dans ce type de réseau. Enfin, une présentation des protocoles de routage étudiés dans ce travail – à savoir AODV, DSR et OLSR – sera proposée, en vue de leur comparaison dans les chapitres suivants.

I.1. Définition des réseaux mobiles ad-hoc (MANETs) :

Un réseau mobile Ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc NETwork), peut être défini comme un ensemble d'entités mobiles interconnectées via une technologie sans fil, formant un réseau temporaire, sans nécessiter d'administration, que ce soit pour sa configuration ou sa gestion. La figure 1 illustre ce concept : à gauche, un MANET constitué d'ordinateurs portables et d'assistants numériques transportés par des individus nomades, et à droite, une représentation graphique de ce réseau. Dans cette modélisation, les nœuds correspondent aux terminaux mobiles, tandis que les arêtes symbolisent les connexions radio entre les dispositifs situés à portée l'un de l'autre.[3]

Les MANETs sont des réseaux capables de fonctionner immédiatement après leur initialisation, permettant ainsi aux nœuds de communiquer rapidement et indépendamment de leur emplacement. Dans un réseau Ad hoc, chaque nœud peut jouer différents rôles selon la situation :

Il peut être un nœud d'extrémité (émetteur et/ou récepteur) lorsqu'il initie ou reçoit une communication.

Il peut être un nœud de transfert (routeur) lorsqu'il participe à la découverte et à la maintenance des routes utilisées pour transmettre les paquets de données entre les nœuds d'extrémité.

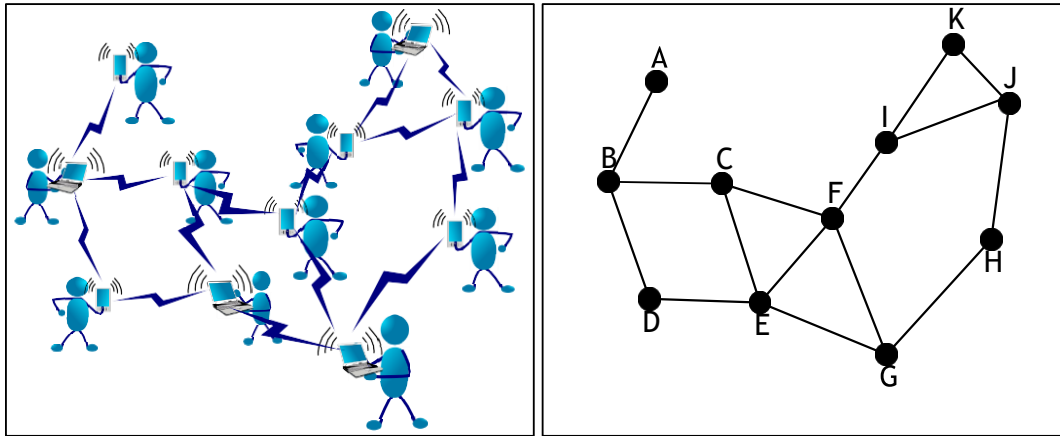


Figure I.1 : Réseau mobile ad hoc, et graphe correspondant au réseau formé par ces terminaux mobiles. [1]

Chaque nœud du graphe symbolise un terminal et la présence d'une arête entre deux nœuds symbolise le fait que deux terminaux mobiles sont à portée radio l'un de l'autre. [1]

I.2. Caractéristiques des réseaux mobiles ad-hoc (MANETs) :

Les réseaux mobiles Ad Hoc (MANETs) sont caractérisés par ce qui suit :

I.2.1. Absence d'infrastructure :

Les réseaux ad hoc se différencient des autres types de réseaux mobiles par l'absence d'infrastructures préexistantes et d'administration centralisée de toute sorte.

Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue [4].

I.2.2. Bande passante limitée :

L'un des aspects essentiels des réseaux qui reposent sur la communication sans fil est l'emploi d'un support de communication commun. Ce partage entraîne une bande passante allouée à un hôte plutôt modeste.

I.2.3. Contraintes de ressources :

Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.

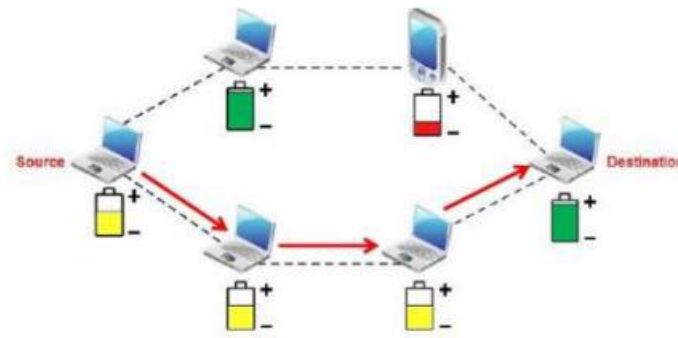


Figure I.2: durée de vie de batterie des nœuds.

I.2.4. Topologie dynamique :

Les unités mobiles dans le réseau se déplacent de manière totalement indépendante, ce qui rend la topologie du réseau susceptible de changer à tout moment de façon rapide et imprévisible.

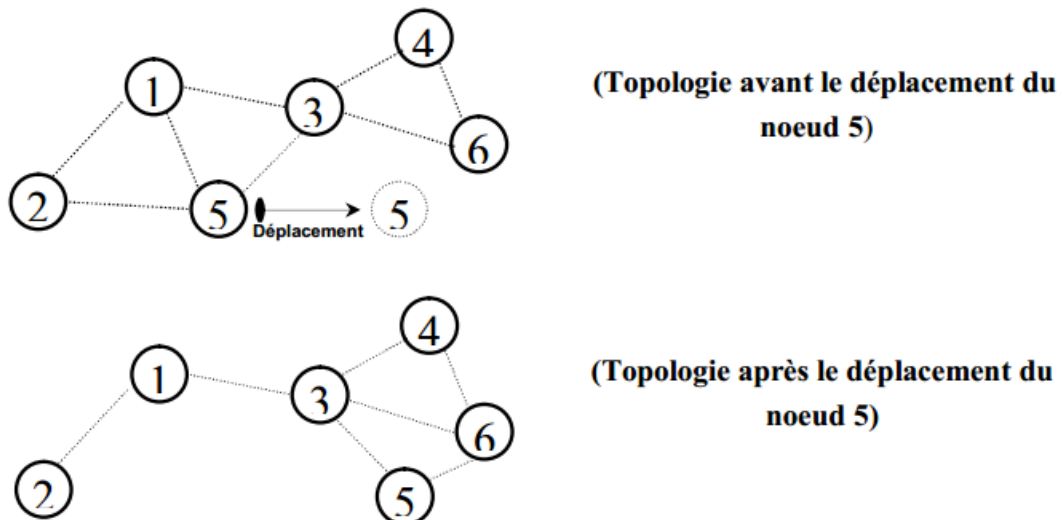


Figure I.3 : Changement de la topologie d'un réseau Ad Hoc.

I.2.5. Faible sécurité :

La communication sans fil entre les nœuds est assurée par l'échange d'ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'air. Ces ondes peuvent être facilement capturées, surveillées et modifiées ce qui compromet la sécurité dans les MANETs.

I.2.6. Nœuds cachés :

Ce phénomène est très particulier à l'environnement sans fil. Un exemple est illustré par la figure 4. Dans cet exemple, les nœuds B et C ne s'entendent pas, à cause d'un obstacle qui empêche la propagation des ondes. Les mécanismes d'accès au canal vont permettre alors à ces nœuds de commencer leurs émissions simultanément. Ce qui provoque des collisions au niveau du nœud A [5].

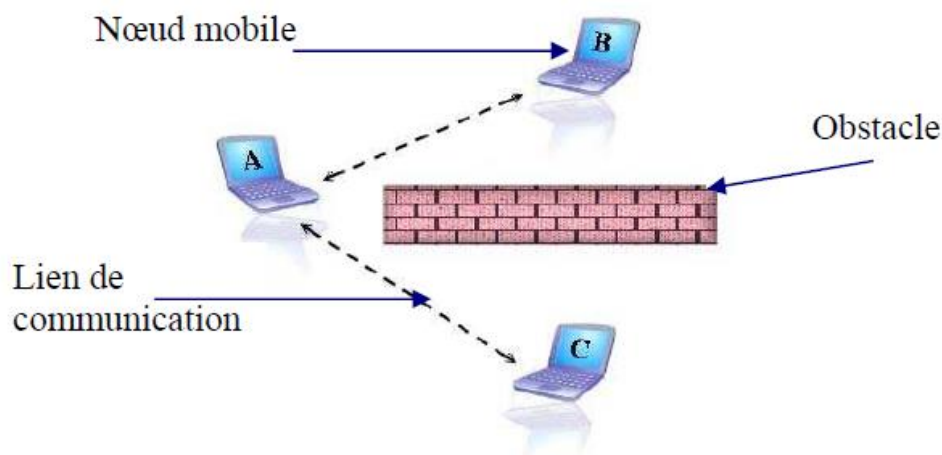


Figure I.4 : Les nœuds cachés

I.3. Les applications des réseaux mobiles ad hoc (MANETS) :

L'existence de multiples bénéfices des réseaux Ad hoc a débouché sur diverses applications dans différents secteurs (militaire, public, commercial, etc.). Parmi ces applications, on peut citer :

I.3.1. Applications militaires :

Les premiers travaux sur les réseaux Ad hoc ont été militaires. En effet, ce type de réseaux représente le moyen idéal pour leurs communications (le déploiement d'une infrastructure dans un territoire ennemi étant impossible), en plus, leurs capacités à se reconfigurer et à rester opérationnel malgré la perte de nœuds qui se révèle très intéressante. [27]

I.3.2. Opérations de sauvetage :

On utilise également les réseaux mobiles Ad hoc lors des opérations de secours, notamment pendant des catastrophes telles que les tremblements de terre. On peut déployer ces réseaux de manière rapide sur des zones sinistrées afin d'assurer la transmission et la connexion des communications entre les secouristes.

I.3.3. Domaine commercial :

Les réseaux mobiles ad hoc ont la capacité d'étendre un réseau basé sur l'infrastructure afin de proposer des services tels que l'accès à Internet à un coût réduit. En outre, ils facilitent la connexion de plusieurs ordinateurs pour le partage de fichiers, de jeux, la communication entre utilisateurs, etc. Les réseaux mobiles Ad hoc ont aussi d'autres applications, comme la communication entre véhicules. Cette application est prometteuse puisqu'elle contribue à minimiser le danger d'accidents sur les autoroutes, garantit la communication entre véhicules dans les tunnels, et ainsi de suite.

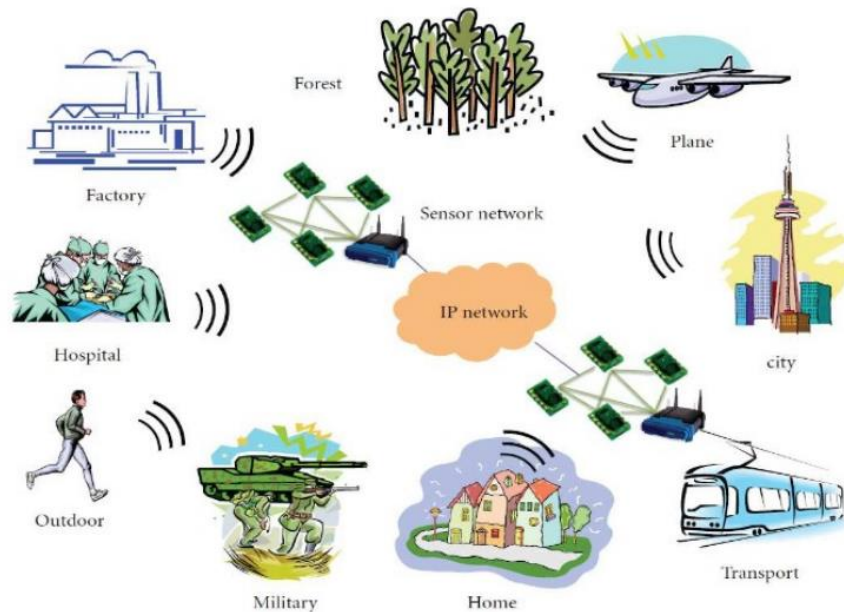


Figure I.5 : Quelques domaines d'application pour les réseaux Ad hoc.

I.4. Importance du routage dans ces réseaux :

Le routage joue un rôle très important dans les MANET car tous les services pris en charge, qu'ils soient unicast ou multicast, s'appuient sur des transmissions à travers plusieurs sauts pour la livraison des données. Les protocoles de routage, qui se servent d'informations locales ou globales pour établir les nœuds collaborant à l'acheminement des données de communication, peuvent être classés en Proactif, Réactif et Hybride [2]. Ces informations peuvent concerner le voisinage immédiat ou l'ensemble du réseau.

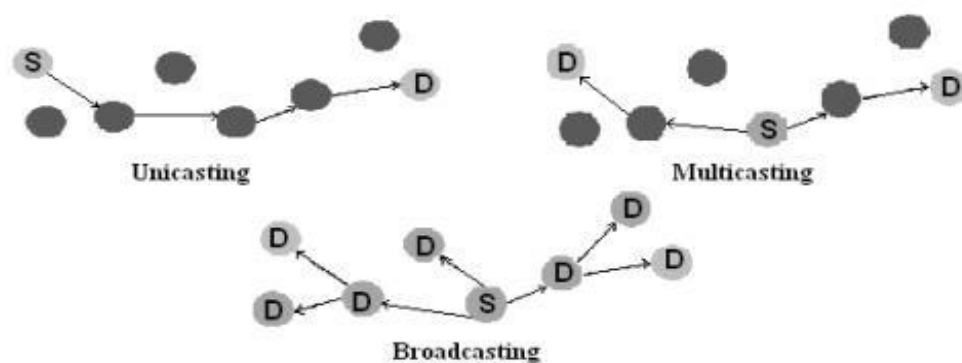


Figure I.6 : Illustration du routage unicast, multicast et broadcast.

Le but principal des protocoles de routage est de créer et d'entretenir des itinéraires afin d'assurer la bonne distribution des données au sein du réseau [3].

I.5. Présentation des Protocoles Étudiés :

Après avoir mis en évidence le rôle fondamental du routage dans les MANETs, il est essentiel de s'intéresser aux protocoles qui en assurent le bon fonctionnement.

Dans le cadre de ce travail, nous nous concentrons sur trois protocoles de routage représentatifs, chacun illustrant une approche différente du routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Il s'agit de :

I.5.1. AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector):

Le Protocole On-Demand Distance Vector (AODV) est un protocole de routage réactif conçu pour les réseaux mobiles ad hoc (MANETs). Ce protocole définit des chemins vers des destinations sur demande et gère le routage unicast et multicast. Il a été proposé en 1999 par Charles Perkins et Elizabeth Royer.[4]

I.5.2. OLSR (Optimized Link State Routing):

Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) est un protocole proactif standardisé par l'IETF dans la RFC 3626. [5]. Il s'agit d'un protocole de routage proactif optimisé basé sur l'état du lien. OLSR propose des itinéraires optimaux en fonction du nombre de sauts à travers le réseau. [5] Dans un protocole basé sur l'état du lien, chaque nœud informe l'ensemble du réseau de ses connexions directes avec ses voisins. Pour OLSR, les itinéraires sont élaborés en fonction des relais multipoints (MPR).

I.5.3.DSR (Dynamic Source Routing) :

Le protocole DSR « Routage à Source Dynamique » repose sur le routage source. Dans cette technique : la source des données détermine la séquence complétée des nœuds à travers lesquelles, les paquets de données seront envoyés [6]. Cette information est incluse dans l'en-tête des paquets, permettant ainsi aux nœuds intermédiaires de simplement lire et suivre cette séquence sans avoir besoin de calculer une route eux-mêmes. Pour cela, le nœud source doit connaître tous les nœuds intermédiaires du chemin vers la destination.[8]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux mobiles ad hoc (MANETs), leurs caractéristiques, leurs applications et les défis qu'ils posent, notamment en matière de routage. Le rôle essentiel des protocoles de routage a été souligné, car ils permettent la communication entre nœuds mobiles dans un environnement sans infrastructure. Enfin, trois protocoles représentatifs — AODV, DSR et OLSR — ont été introduits, et feront l'objet d'une analyse approfondie dans le chapitre suivant.

Présentation des Protocoles de Routage

Introduction

Ce que l'on appelle généralement MANET (Mobile Ad hoc NETwork) se réfère à un ensemble de nœuds mobiles reliés entre eux par une technologie sans fil. Ils constituent un réseau éphémère qui ne requiert ni structure permanente, ni gestion centralisée, que ce soit pour son installation ou son exploitation.

Les MANETs sont définis par leur aptitude à instaurer des communications rapidement, sans tenir compte de l'emplacement des entités. Cette adaptabilité les rend particulièrement appropriés pour des contextes dynamiques et restrictifs.

Dans ce chapitre, nous exposerons les protocoles de routage employés dans ce genre de réseau, en soulignant leur mécanisme, leurs atouts ainsi que leurs contraintes.

II.1. Classification des protocoles de routage :

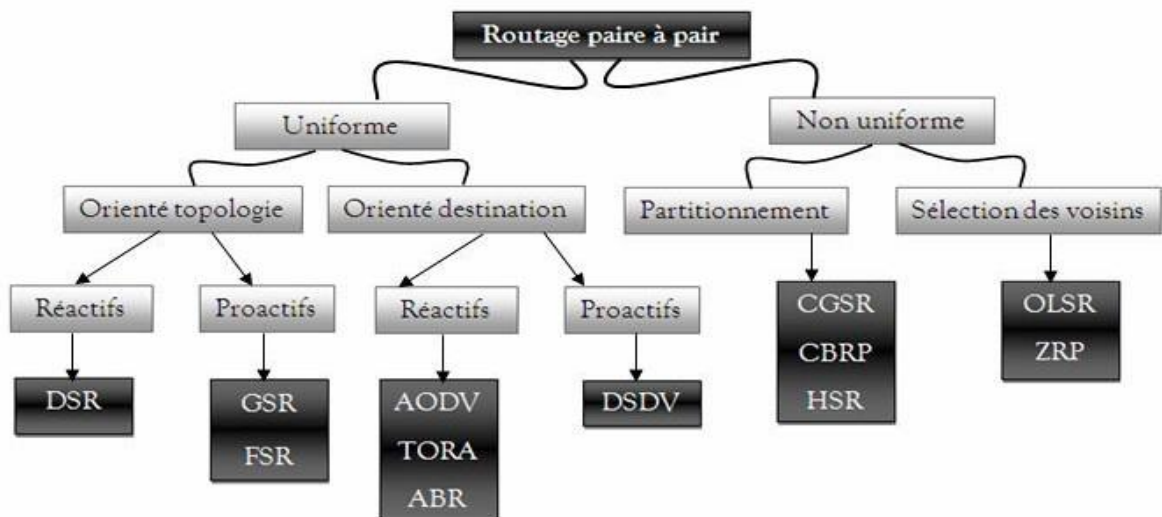


Figure II.1 : Classification des protocoles de routages

La figure ci-dessous présente une classification des protocoles de routage pour réseaux Adhoc qui peuvent être classés en deux grandes classes suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données.

II.2. Les Protocoles proactifs :

II.2.1 Définition

Les protocoles de routage proactifs dans les réseaux Adhoc visent à maintenir à jour, au sein de chaque nœud, les informations de routage relatives à l'ensemble des autres nœuds du réseau. Pour ce faire, chaque nœud conserve une ou plusieurs tables de routage dont la taille augmente avec l'expansion du réseau. Afin de s'adapter aux modifications de la topologie, ces protocoles propagent des mises à jour des routes à leurs voisins, permettant ainsi à chaque nœud de conserver une vision cohérente du réseau.

II.2.2. Mode de fonctionnement :

Les protocoles de routage proactifs fonctionnent comme ceux des réseaux filaires, en maintenant une vue globale de la topologie via des méthodes comme le vecteur de distance ou l'état de lien. Ils sont bien adaptés aux applications nécessitant des connexions continues. [25]

Toutefois, leur performance diminue avec l'augmentation du nombre de nœuds ou de la mobilité, en raison de la surcharge de mises à jour, des incohérences de routage et de la consommation excessive de bande passante.

Les protocoles basés sur ce principe sont entre autres : DSDV, OLSR, TBRPF.

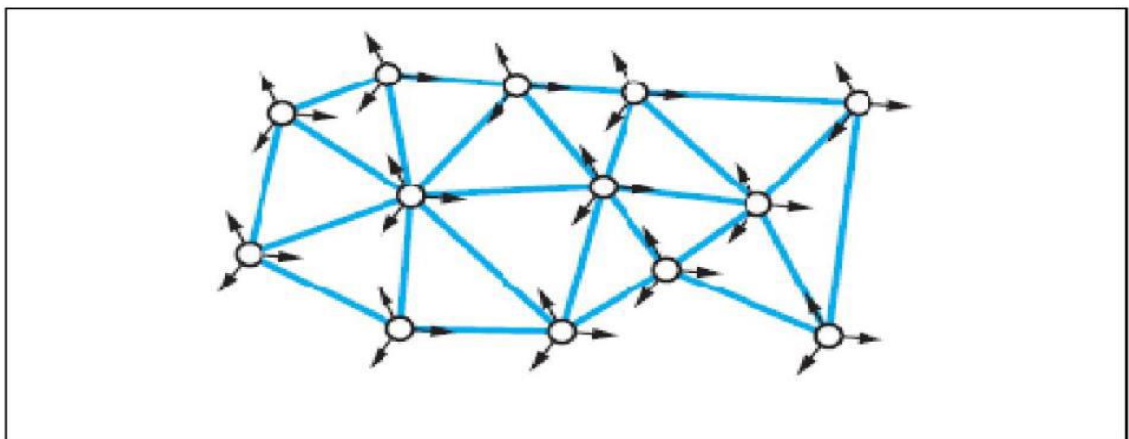


Figure II.2 : Principe de fonctionnement des protocoles proactif

II.2.3 Avantages :

- ✓ Pas de temps de réaction.
- ✓ Adaptés aux réseaux denses de taille moyenne.
- ✓ Adaptés aux réseaux à forte mobilité.

II.2.4 Inconvénients :

- ✓ Trafic de contrôle important.
- ✓ Capacité d'échange du réseau limitée.

II.3. Les Protocoles réactifs :

II.3.1. Définition :

Les protocoles réactifs utilisent des algorithmes traditionnels comme le routage par vecteur de distance. Les itinéraires sont définis uniquement sur sollicitation, et seul ceux actuellement en usage sont préservés.

Quand un nœud souhaite transmettre des paquets, une phase de découverte de route est lancée par la diffusion d'un message de recherche de chemin. Tout nœud qui reçoit ce message et qui ne détient pas d'informations sur la destination, il relaie le message. On désigne ce processus par le terme mécanisme d'inondation. [15]

II.3.2 Mode de Fonctionnement :

La plupart des techniques de découverte de parcours dans les réseaux MANET utilisent le processus d'apprentissage rétrograde (backward learning), où le nœud source diffuse une demande par inondation. Les nœuds intermédiaires consignent le trajet, et la destination renvoie une réponse par la même voie, créant ainsi une connexion full duplex. Si un nœud de transit est déjà au courant du chemin, le procédé est amélioré. Une fois tracé, le chemin doit être conservé et actualisé tant qu'il reste en usage.

Une autre approche consiste au routage basé sur la source, où chaque paquet inclut les détails complets de son parcours. Cela prévient les boucles, mais peut s'avérer inefficace en cas de mobilité intense, étant donné que les routes peuvent vite devenir dépassées.

Parmi les protocoles réactifs représentatifs figurent AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing) et DSR (Dynamic Source Routing). [20]

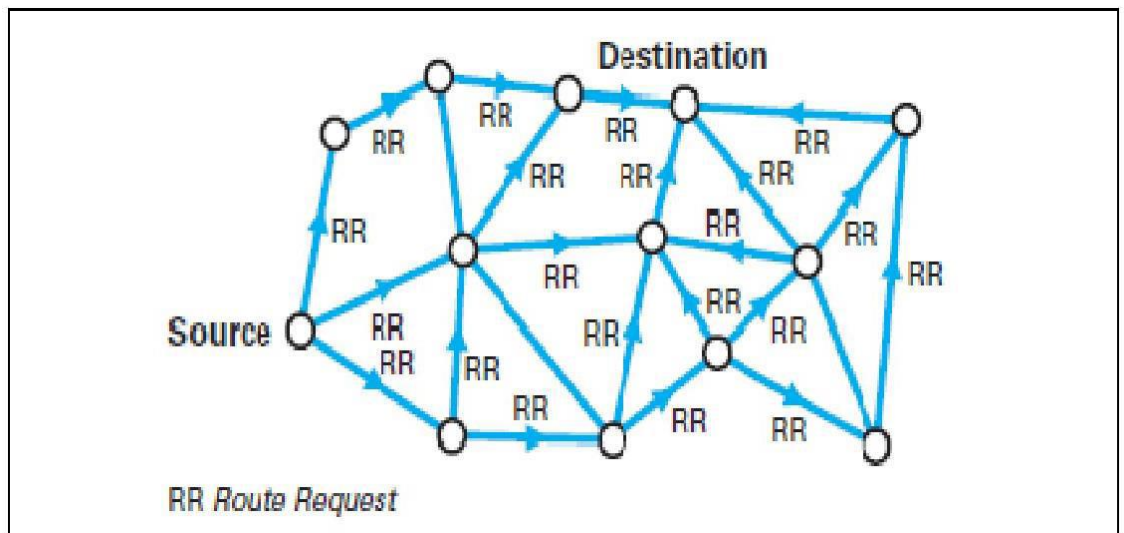


Figure II.3 : Fonctionnement des protocoles réactifs [20]

II.3.3. Avantages :

- ✓ Trafic de contrôle faible.
- ✓ Adaptés aux grands réseaux.
- ✓ Consommation énergétique réduite.

II.3.4. Inconvénients :

- ✓ Temps de réaction long.
- ✓ Problème en cas de forte mobilité des nœuds

II.4. Le protocole de routage AODV (Ad Hoc On demand Distance Vector) :

II.4.1. Définition

Le protocole AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), élaboré par Perkins et Royer, fusionne des aspects de DSDV (tels que le routage par sauts et les numéros de séquence) et de DSR (comme la découverte et l'entretien de routes). AODV, qui s'appuie sur le routage à vecteur de distance, crée des itinéraires uniquement à la demande. Cette caractéristique le rend idéal pour les réseaux mobiles, car il permet une adaptation rapide aux modifications de topologie sans conserver indûment des trajets inutilisés.

II.4.2. Table de routage

AODV gère les chemins de manière distribuée en maintenant une table de routage au niveau de chaque nœud de transit du chemin recherché. Chaque entrée de cette table contient des informations essentielles, telles que :

- L'adresse IP de la destination.
- Le nœud suivant à atteindre.
- La distance en nombre de nœuds, c'est-à-dire le nombre de nœuds nécessaires pour parvenir à la destination.
- Le numéro de séquence de la destination, qui assure qu'aucune boucle ne peut se former.
- Une liste des voisins actifs, c'est-à-dire ceux qui ont soit envoyé, soit relayé au moins un paquet vers la destination dans un intervalle de temps donné.
- Le temps d'expiration de l'entrée de la table.
- Un tampon de requête pour garantir qu'une seule réponse soit envoyée par requête. À chaque utilisation d'une entrée, son temps d'expiration est actualisé (temps actuel + durée de la route active). [2]

Si une nouvelle route est nécessaire, ou qu'une route disparaît, la mise à jour de ces tables s'effectue par l'échange de trois types de messages entre les nœuds :

- RREQ Route Request, un message de demande de route,
- RREP Route Reply, un message de réponse à un RREQ et
- RERR Route Error, un message qui signale la perte d'une route.

II.4.3 Fonctionnement du protocole AODV :

AODV [12] appartient à la catégorie des protocoles réactifs. Quand une application cherche un chemin vers un destinataire, AODV submerge le réseau de paquets Route Requeté (RREQ). Le nœud d'origine propage une demande de routage de retour sur tous les canaux accessibles, tandis que les nœuds qui reçoivent cette requête mettent à jour la voie menant vers le point d'origine. Ces voisins, à leur tour, propagent cette requête RREQ vers les autres nœuds. Chaque nœud qui reçoit un paquet RREQ conserve des données concernant le numéro de séquence du paquet, l'adresse des nœuds source et de destination, ainsi que l'adresse du nœud précédent. Quand ces paquets RREQ arrivent à leur destination, un paquet de réponse Route Replay (RREP) est renvoyé sur le chemin inverse vers le nœud expéditeur. (Voir Figure II.4).

L'exemple de recherche de chemin dans un réseau à l'aide d'AODV est illustré à la Figure II.4. Le nœud Source souhaite transmettre du trafic vers le nœud Dest. Il produit un paquet RREQ qu'il répand à ses voisins A et B. Ces deux nœuds, à leur tour, propagent le RREQ vers leurs voisins. Ce paquet permet, à chaque nœud, d'actualiser le saut suivant pour le chemin établi vers la Source. À chaque bond, le nœud détermine le nombre de bonds effectués depuis la Source. Le RREQ parvient au niveau du nœud Dest qui, réalisant qu'il est le nœud de destination, crée un paquet RREP empruntant la voie inverse afin d'informer le nœud source du trajet à suivre.

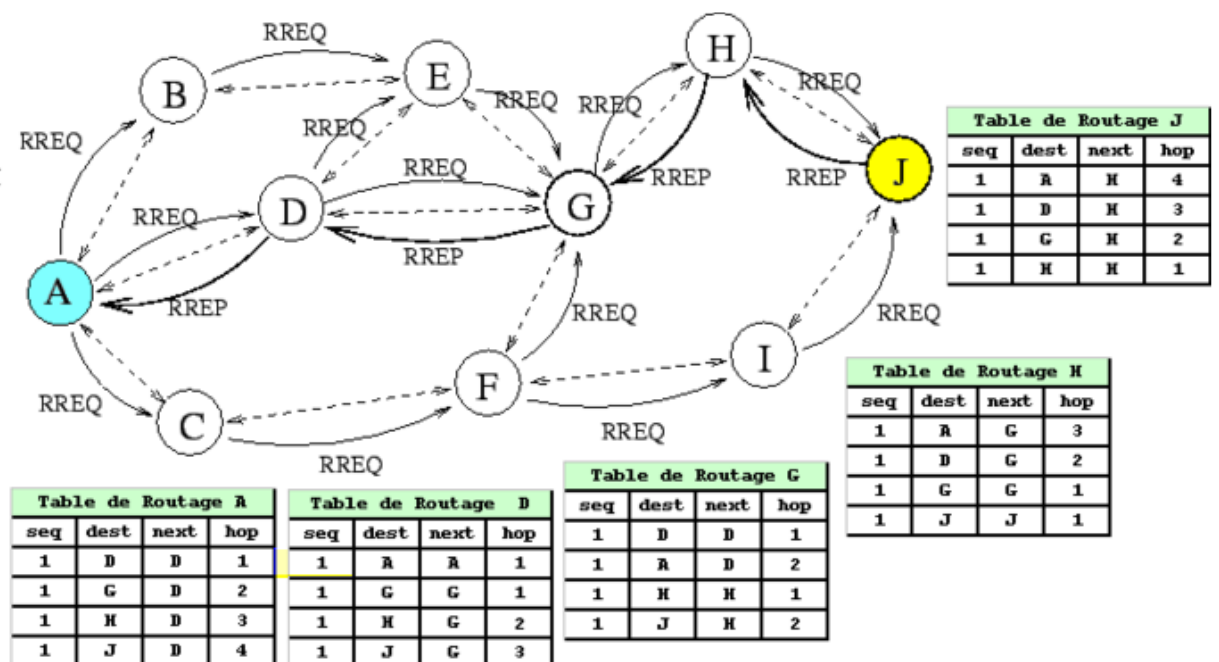


Figure. II.4 : Recherche de route dans AODV [13]

AODV envoie régulièrement des messages Hello à ses voisins pour contrôler l'état des connexions. Si un nœud ne reçoit pas de paquets Hello de la part d'un de ses voisins pendant une durée déterminée, et que les paquets Hello qu'il transmet à cette destination sont perdus, il conclut que le lien est défectueux et initie une nouvelle procédure de recherche d'itinéraire pour toutes les routes reliant ce lien.

II.4.4. Analyse des avantages et des limitations d'AODV :

Comme tout protocole réactif, AODV rencontre un délai lors de l'expédition des premiers paquets vers une destination inconnue. Le recours aux numéros de séquence engendre une complexité certaine, mais offre l'avantage de réduire considérablement les retransmissions superflues. En plus de l'aspect réactif du protocole qui n'affecte que légèrement la charge du réseau, on peut conclure qu'AODV a un impact minimal sur ce dernier. Toutefois, l'envoi régulier de messages HELLO demeure indispensable.

II.5. Le protocole de routage OLSR (Optimized Link State Routing) :

II.5.1. Définition :

OLSR est un protocole de routage proactif, conçu pour fonctionner dans un environnement mobile distribué sans aucune entité centrale le contrôlant et réagissant à la mobilité (réseaux Ad hoc). Il est utilisé dans les réseaux denses et peu mobiles.

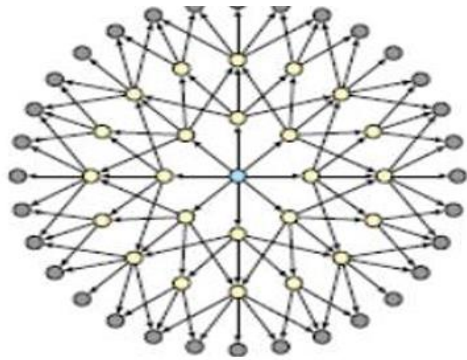
Il représente une adaptation et une optimisation du principe de routage à état de lien pour les réseaux ad hoc. Il permet d'obtenir les routes de plus court chemin. L'optimisation tient au fait que dans un protocole à état de lien, chaque nœud déclare ses liens directs avec tous ses voisins à tout le réseau [7]. Dans le cas d'OLSR, les nœuds ne vont déclarer qu'une sous partie de leur voisinage par l'utilisation de relais multipoints MPR (Multipoint Relay).

II.5.2. Fonctionnement du protocole OLSR :

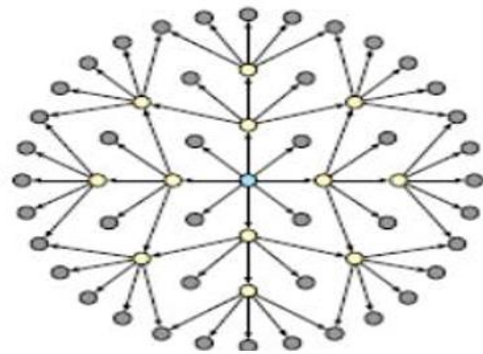
OLSR propose des chemins optimaux en minimisant le nombre de sauts à travers le réseau. Ce protocole fait appel à une méthode de diffusion optimisée en recourant à des relais multipoints (MPRs). Il perfectionne l'algorithme basé sur l'« état des liens » (un nœud détecte ses voisins et communique son environnement à tout le réseau par diffusion) pour les réseaux ad-hoc mobiles, en diminuant la taille des paquets de contrôle et en limitant la saturation du trafic des paquets de contrôle. Comme illustré à la figure II.5, l'utilisation des relais multipoints permet de réduire le nombre de transmissions.

En effet, alors que dans un protocole de type état de lien, chaque nœud établit des connexions directes avec ses voisins à travers l'ensemble du réseau, OLSR, quant à lui, ne permet aux nœuds de communiquer qu'une partie de leur voisinage grâce à la méthode des relais multipoints. OLSR emploie quatre catégories de messages.

- **MID** : facilitent la publication de l'inventaire des interfaces pour chaque nœud.
- **HELLO** employé pour la reconnaissance de voisinage.
- **TC** : véhiculent les renseignements de topologie
- **HNA** : utilisés pour l'énoncé des sous-réseaux et des hôtes (à l'exception du MANET) accessibles par un nœud qui remplit la fonction de passerelle [15].



a. Routage par inondation (24 transmissions pour atteindre tous les nœuds à 3 sauts).



b. Routage avec les nœuds MPR (12 transmissions pour atteindre tous les nœuds à 3 sauts).

Figure II.5 : Avantage d'utilisation MPR

II.5.3. Mécanisme des MPR (Multipoint Relays) :

Le concept des relais multipoints vise à diminuer le surplus causé par une saturation de messages sur le réseau en minimisant les réexpéditions superflues dans la même zone. Chaque nœud du réseau choisit un groupe de nœuds dans son voisinage à un saut, capables de transmettre ses messages. On nomme cet ensemble de nœuds voisins choisis « ensemble relais multipoint » (MPR) pour ce nœud. Les nœuds voisins du nœud N qui ne sont pas inclus dans son ensemble MPR reçoivent et gèrent les messages de diffusion, cependant ils ne repartagent pas les messages de diffusion qu'ils ont reçus du nœud N. [18]

Chaque nœud sélectionne son ensemble MPR parmi ses voisins symétriques à 1 saut. Cet ensemble est sélectionné de manière à couvrir (en termes de portée radio) tous les nœuds symétriques stricts à 2 sauts. L'ensemble MPR de N, noté $MPR(N)$, est alors un sous-ensemble arbitraire du voisinage symétrique à 1 saut de N qui satisfait la condition suivante : chaque nœud du voisinage symétrique strict à 2 sauts de N doit disposer d'une liaison symétrique vers $MPR(N)$. Plus l'ensemble MPR est petit, moins le trafic de contrôle généré par le protocole de routage est surchargé, [8] présente une analyse et un exemple d'algorithmes de sélection MPR.

Chaque nœud dispose d'informations concernant les voisins qui l'ont sélectionné comme relais multipoint (MPR). On désigne cet ensemble par le nom de MPR Selector Set.

Le nœud assimile ces données via les messages HELLO qu'il reçoit régulièrement de ses voisins.

Quand un message de diffusion est reçu d'un nœud inclu dans son ensemble MPR Selector Set, le nœud le réémet, à condition de ne pas déjà l'avoir reçu.[29]

Ce jeu de sélection MPR peut être sujet à des modifications au fil du temps, en raison des variations dans la sélection des MPRs. Ces modifications sont également indiquées par les messages HELLO.

II.5.4. Analyse des avantages et des limitations d'OLSR :

OLSR est un protocole de routage performant puisqu'il assure des chemins optimaux en termes de nombre de sauts, et n'est pas sujet à des problèmes de latence lors de l'envoi des premiers paquets, contrairement aux protocoles réactifs. Peu importe le protocole concerné, l'idée de relais multipoint est particulièrement attrayante car elle offre la possibilité d'améliorer le processus de diffusion en réalisant une inondation au sein du réseau avec un impact réduit comparé à une inondation standard.[14] Cependant, OLSR génère une surcharge de contrôle importante, surtout en cas de forte mobilité ou de réseau dense, ce qui peut affecter la fiabilité des routes et compliquer la gestion des relais multipoints.

II.6. Le Protocole de routage DSR (Dynamic Source Routing) :

I.6.1. Définition :

Le protocole « Dynamic Source Routing » [9] est un protocole réactif qui repose sur le concept de routage basé sur la source. Cela signifie que l'émetteur des données détermine l'itinéraire complet que suivront les informations et communique ce trajet avec les données elles-mêmes. Chaque paquet envoyé comporte un champ qui indique la série de nœuds à parcourir pour arriver à la destination.

II.6.2. Fonctionnement du protocole DSR :

Ce protocole consiste en deux procédures, une procédure de découverte de route et une procédure de maintenance de route [11].

Procédure de découverte de route :

Le processus de découverte de routes dans DSR se fait comme suit :

-Lorsqu'un nœud veut envoyer un paquet, il commence par vérifier son cache :

- Si une route existe, il envoie directement le paquet en utilisant le routage à la source.
- Sinon, il émet une requête RREQ contenant :
 1. L'adresse source et destination,
 2. Une liste vide des nœuds traversés,
 3. Un identifiant unique pour éviter les doublons.

-Chaque nœud recevant un RREQ (Src, Dest, List) :

- Vérifie s'il est la destination.
- Sinon, il consulte son cache :
 - S'il connaît une route vers la destination, il renvoie un RREP (Route Reply).
 - Sinon, il retransmet la requête à ses voisins, en ajoutant sa propre adresse à la liste.

-Lorsque la destination reçoit le RREQ :

- Elle envoie un RREP vers la source :
 - Si elle a déjà une route, elle l'utilise (routage à la source).
 - Sinon:
 - Si les liens sont bidirectionnels, elle inverse la liste et renvoie le RREP.
 - Si les liens sont asymétriques, elle lance une nouvelle découverte vers la source.

Procédure de maintenance de route

La maintenance de route est réalisée en utilisant des paquets d'erreur et des acquittements. Quand un nœud sur le chemin des données ne répond pas après plusieurs essais d'envoi, un paquet d'erreur RERR est produit pour signaler à la source les adresses aux extrémités du lien défectueux. Les nœuds en amont qui obtiennent le RERR éliminent le nœud défectueux de leur mémoire cache et toutes les routes intégrant le lien défaillant sont mises à jour en conséquence.

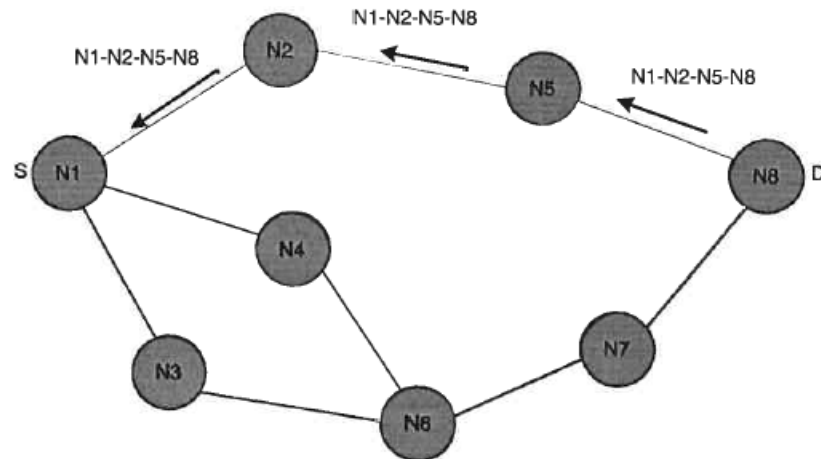


Figure II.6 : La découverte de chemins dans le DSR.[31]

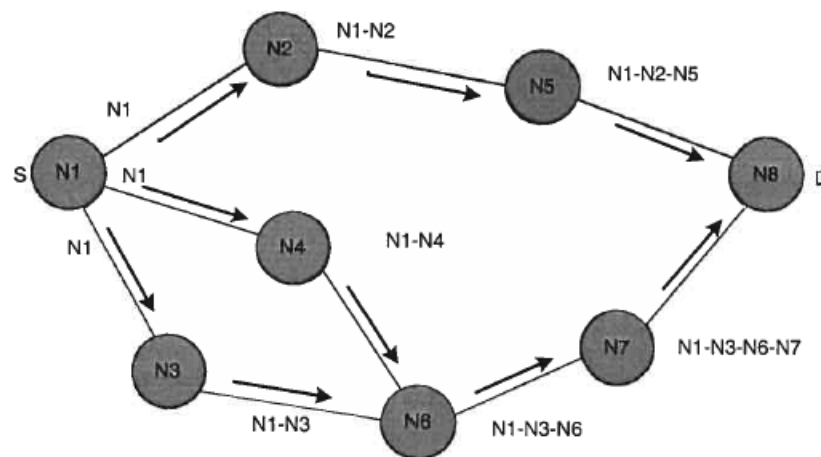


Figure II.7: Construction de l'enregistrement des routes [31]

II.6.3. Avantages et Limites du Protocole DSR dans les Réseaux Ad Hoc Mobiles :

DSR est un protocole qui a l'avantage d'être relativement simple, et qui offre de bons résultats. La stratégie réactive et l'absence de notifications périodiques associées au routage contribuent à éviter toute surcharge significative sur le réseau ainsi qu'à réduire la consommation d'énergie. Les nœuds qui ne sont pas traversés par des routes ne dépensent pas non plus d'énergie pour le bon fonctionnement du réseau, excepté pendant les phases de découverte de route.

II.7. 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. Par contre, l'établissement d'un itinéraire est beaucoup plus rapide en utilisant les protocoles proactifs, car les appareils mobiles disposent d'informations de routage actualisées. Les études de performance réalisées sur ces divers protocoles indiquent en particulier que les protocoles proactifs tels que OLSR sont performants dans des environnements denses avec une mobilité assez élevée, alors que les protocoles réactifs comme DSR sont plus performants dans des réseaux clairsemés dotés d'une mobilité restreinte. Le tableau ci-dessous offre une vue d'ensemble des compromis à considérer entre les deux familles de protocoles :

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	emploie 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.

II.8. Comparaison entre les protocoles de routage ad-hoc :

Nous représentons dans ce tableau suivant les différents protocoles étudiés dans ce chapitre ainsi les classes à qui ils appartiennent, leurs avantages et leurs inconvénients :

Protocoles	Classe	Avantages	Inconvénients
OLSR	Table-Driven	-Garantit l'optimalité des routes en termes de sauts, - ne souffre pas de problème de délai pour l'émission des premiers paquets	- Souffre d'une surcharge sur le réseau cela est du a la maintenance régulière des tables de routage (échange périodique des messages de contrôle).
AODV	On-Demand	- Découvre les routes à la demande en inondant le réseau avec un paquet de requête.	- Délai initial avant de commencer la transmission des données.
DSR	On-Demand	- Découvre les routes à la demande en inondant le réseau avec un paquets de requête. - Les paquets de données peuvent être redirigé pendant leurs transmission.	- Délai initial avant de commencer la transmission des données. - La taille des paquets de données très grande quand le nombre de nœud dans réseau est grand.

Table II.2 : Comparaison entre les protocoles de routage ad-hoc [10]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents protocoles de routage MANET, en mettant en parallèle leurs approches proactives et réactives, ainsi que leurs points forts et faibles.

Dans les prochains chapitres, nous procéderons à l'analyse et à la comparaison de ces protocoles en fonction de critères spécifiques via des simulations.

Méthodologie et Scénarios de Simulation

Introduction :

Dans ce chapitre, nous exposons la méthode utilisée pour juger les rendements des protocoles de routage introduits dans le chapitre précédent. Nous avons donc recouru au simulateur NS-3, un outil performant et couramment employé pour la simulation des réseaux.

Nous commençons par décrire l'environnement de simulation, en expliquant brièvement les fonctionnalités de NS-3. Par la suite, nous présentons les paramètres de simulation employés, comme le nombre de nœuds, le modèle de mobilité (Random Waypoint) et le type de trafic (UDP/TCP). Pour conclure, nous exposons les divers scénarios d'expérimentation déployés pour évaluer les performances des protocoles : variation du nombre de nœuds et impact de la mobilité.

III.1 Environnement de simulation :

III.1.1. Le Simulateur NS3 :

Le NS-3 (Network Simulator 3) est un simulateur open source axé sur la recherche, surtout utilisé pour la modélisation de réseaux IP. Il offre la possibilité de simuler une variété de scénarios de communication, à la fois filaire et sans fil, y compris les réseaux MANET. Il est développé en C++ avec des liaisons Python, offrant une souplesse considérable pour la configuration des protocoles, de la mobilité et des applications réseau. [26]



Figure III.1: Le Simulateur NS-3 [26]

III.1.2. Justification du choix de NS-3 :

Les réseaux MANET (Mobile Ad hoc Networks) se caractérisent par leur topologie changeante, leur grande mobilité et l'absence d'une infrastructure stable. Pour simuler leurs caractéristiques, un outil capable de les reproduire fidèlement est nécessaire. NS-3 (Network Simulator 3) se présente comme une option appropriée pour diverses raisons :

1. Support natif et complet des protocoles MANET :

NS-3 intègre directement des protocoles comme **AODV**, **OLSR** et **DSR**, évitant ainsi leur implémentation manuelle. Ces protocoles sont bien documentés et adaptés à divers scénarios de mobilité et de densité.

2. Modélisation avancée de la mobilité :

NS-3 offre divers modèles réalistes tels que RandomWaypoint, Gauss-Markov, etc., avec des paramètres de configuration détaillés (zones, vitesses, pauses). Ceci autorise une simulation précise d'environnements urbains, militaires ou d'urgence.

3. Simulation complète, réaliste et modulaire :

Le simulateur gère toute la pile de protocoles, les canaux sans fil réalistes (pertes, interférences), ainsi que les interfaces multiples. Cela autorise une représentation précise du comportement réel du réseau.

4. Analyse détaillée des performances :

NS-3 propose des indicateurs clés : latence moyenne, surcharge, taux de perte de paquets, et ainsi de suite. On peut extraire les résultats (.tr, .pcap, .txt) et les analyser à l'aide d'outils sur mesure ou de NetAnim.

5. Visualisation avec NetAnim :

NetAnim permet d'animer les scénarios, de visualiser les mouvements des nœuds, le transfert de paquets et de détecter les erreurs en utilisant une représentation graphique. C'est un avantage éducatif significatif pour l'affichage des résultats.



Figure III.2 : Exemple de Visualisation avec netanim.

6. Communauté active, support riche :

NS-3 reçoit un fort appui académique, dispose d'une documentation exhaustive, de nombreux exemples détaillés et d'un forum dynamique. Cela rend son apprentissage et l'ajout de nouvelles fonctionnalités plus aisé.

7. Comparaison avec d'autres simulateurs :

Simulateur	Avantages	Inconvénients
NS-3	Réaliste, flexible, open-source, protocoles MANET intégrés, visualisation avec NetAnim	Courbe d'apprentissage plus longue
OMNeT++	Interface graphique avancée, modulaire	Moins d'exemples spécifiques aux MANET, protocole souvent à implémenter
GNS3	Bon pour l'émulation de réseaux fixes	Peu adapté à la simulation de mobilité ou des couches basses
NS-2	Ancien, protocole MANET supporté	Moins performant, architecture obsolète

Tableau III.1: comparasion avec les autres simulateurs

III.2. Paramètres de Simulation :

III.2.1. Métriques à évaluer :

Pour juger avec rigueur l'efficacité des protocoles de routage examinés (AODV, DSR, OLSR), différentes métriques essentielles ont été mises en œuvre.

Ces indicateurs servent à évaluer l'efficacité, la fiabilité et la rapidité de chaque protocole dans divers contextes de mobilité. Voici un aperçu succinct des principales mesures sélectionnées dans le cadre de cette recherche : [32]

- **Délai moyen (AvgDelay) :**

C'est le délai moyen pris par un paquet de données pour transiter d'une application à une autre.

- **Débit (Throughput) :**

Quantité de données correctement réceptionnées par seconde (indiquée en kbps). Renvoie l'efficacité générale de la transmission.

- **Taux de perte (LossRate) :**

Elle correspond à la non délivrance d'un paquet de données par rapport à ceux envoyés. Un protocole est d'autant plus fiable que ce taux est faible.

- **Latence (Latency) :**

Délai ou temps de réponse, elle caractérise le retard entre l'émission et la réception d'un paquet.

III.3. Expériences Réalisées

Trois scénarios de simulation ont été créés pour déterminer la fiabilité des protocoles de routage AODV, DSR et OLSR dans diverses situations de mobilités. Chaque scénario est basé sur un modèle particulier et une vitesse traduite des situations réelles. Cette méthode aide à l'analyse de chaque protocole d'adaptabilité face aux changements de topologie.

III.3.1. Scénario 1 : Mobilité constante (0 m/s) :

Dans ce scénario, les nœuds sont configurés avec le modèle `ConstantPositionMobilityModel`, ce qui signifie qu'ils restent fixes pendant toute la durée de la simulation (vitesse = 0 m/s). Il s'agit d'une étude de cas, ce qui permet de suivre les protocoles dans un environnement complètement stable. Toute perturbation relative au changement de topologie est éliminée par l'absence de mobilité.

```
// Mobilité constante (statique)
mobilityAdhoc.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
```

III.3.2. Scénario 2 : Mobilité Moyenne (1–5 m/s) :

Ce scénario met en œuvre le modèle de mobilité `RandomWaypointMobilityModel`, avec une vitesse aléatoire uniforme variant entre 1 m/s et 5 m/s. C'est le reflet de situations réalistes comme le mouvement des piétons. L'objectif consiste à examiner la compétence des protocoles pour gérer les modifications modérées de topologie résultant du déplacement des nœuds.

```
// Mobilité modérée
mobilityAdhoc.SetMobilityModel("ns3::RandomWaypointMobilityModel",
    "Speed", StringValue("ns3::UniformRandomVariable[Min=1.0|Max=5.0]"),
    "Pause", StringValue("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0.0]"),
    "PositionAllocator", PointerValue(positionAlloc));
```

III.3.3. Scénario 3 : Mobilité Élevée (10–20 m/s) :

Dans cette situation, le modèle `RandomWaypointMobilityModel` est aussi mis en œuvre, toutefois avec des vitesses aléatoires variant entre 10 m/s et 20 m/s. Cela recrée un cadre hautement dynamique, semblable à un réseau de véhicules en déplacement rapide. Ce scénario évalue la résilience des protocoles face à des modifications rapides de topologie et à une connectivité fluctuante.

```
// Mobilité élevée
mobilityAdhoc.SetMobilityModel("ns3::RandomWaypointMobilityModel",
    "Speed", StringValue("ns3::UniformRandomVariable[Min=10.0|Max=20.0]"),
    "Pause", StringValue("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0.0]"),
    "PositionAllocator", PointerValue(positionAlloc));
```

III.4. Simulation des protocoles AODV, DSR et OLSR avec ns-3 :

Un exemple pour le cas de mobilité statique :

III.4.1. Étapes de simulation :

Un exemple pour le protocole OLSR :

```
sarah@sarah-VirtualBox:~/ns-allinone-3.43$ cd ns-3.43
sarah@sarah-VirtualBox:~/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run "scratch/manet-routing-compare --protocol=olsr"

sarah@sarah-VirtualBox:~/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run "scratch/manet-routing-compare --protocol=aodv"

sarah@sarah-VirtualBox:~/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run "scratch/manet-routing-compare --protocol=dsr"
```

On obtiendra pour chaque protocole :

- Un fichier **aodv.csv**, **dsr.csv**, **olsr.csv** pour les métriques finales.
- Un fichier **aodv_time_series.csv**, **olsr_time_series.csv** et **dsr_time_series.csv** pour l'évolution par seconde.

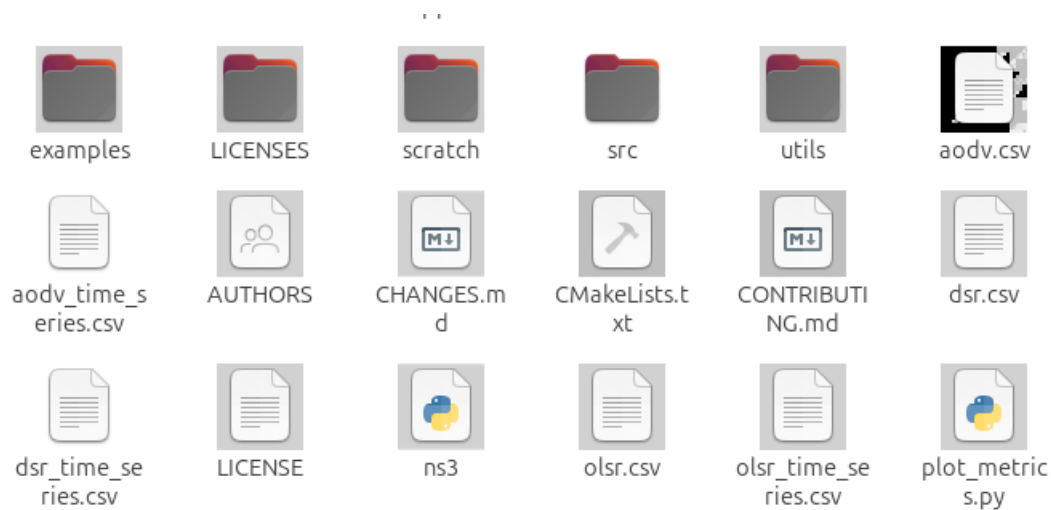


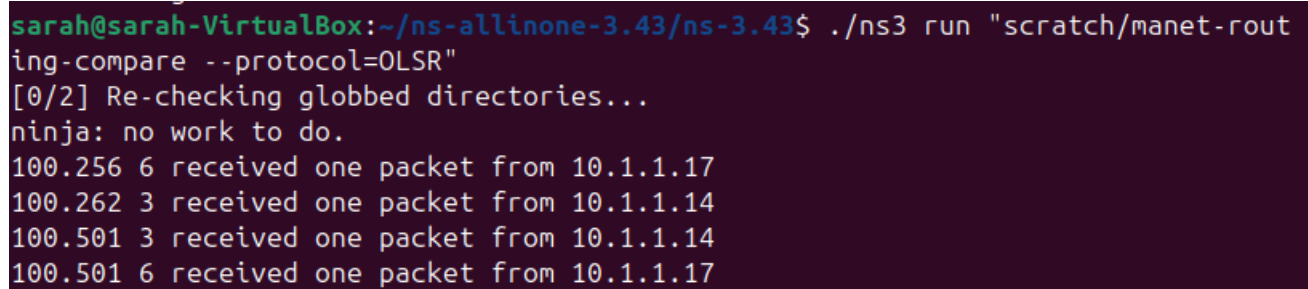
Figure III.3 : les fichiers csv

Un exemple de fichier csv :

	A	B	C	D	E
1	Time	Throughput	Delay(s)	Latency(s)	PacketLoss
2	1	127.78	0.047	0.0589	0.008
3	2	123.78	0.0479	0.0543	0.0122
4	3	123.32	0.0462	0.0592	0.0121
5	4	125.18	0.0509	0.0517	0.0052
6	5	128.07	0.047	0.0514	0.0136
7	6	129.1	0.0502	0.0536	0.0075
8	7	129.3	0.0495	0.0554	0.0099
9	8	125.12	0.0471	0.0587	0.0121
10	9	125.08	0.0505	0.0513	0.0149
11	10	126.5	0.0522	0.0544	0.0122
12	11	125.35	0.0506	0.0528	0.0081
13	12	125.56	0.0542	0.0577	0.0052
14	13	126.76	0.0513	0.0569	0.0089
15	14	129.16	0.049	0.0557	0.0127
16	15	126.15	0.0539	0.0526	0.0105
17	16	120.08	0.0533	0.0534	0.0091
18	17	122	0.0529	0.0549	0.0116
19	18	127.04	0.0474	0.0547	0.0119
20	19	122.93	0.0532	0.0573	0.0114
21	20	128.24	0.0549	0.0551	0.0123
22	21	121.2	0.0479	0.0523	0.0068
23	22	128.63	0.0545	0.0575	0.0102
24	23	126.48	0.048	0.0584	0.0143
25	24	123.06	0.0502	0.0521	0.0087
26	25	127.98	0.0494	0.0568	0.0143
27	26	122.41	0.051	0.0501	0.0054
28	27	121.23	0.0488	0.0579	0.0053
29	28	129.09	0.0461	0.0597	0.0095
30	29	120.62	0.0486	0.0529	0.0087
31	30	124.96	0.0515	0.055	0.0094
32	31	120.95	0.0539	0.0538	0.0071
33	32	125.07	0.0498	0.0514	0.0109
34	33	123.45	0.0512	0.0535	0.0131
35	34	124.2	0.0468	0.0587	0.0079
36	35	127.73	0.0465	0.0505	0.0076
37	36	129.84	0.0456	0.0509	0.0122
38	37	123.93	0.045	0.0593	0.012
39	38	122.36	0.0543	0.0599	0.0084
40	39	129.76	0.0473	0.0514	0.006
41	40	125.44	0.0515	0.0567	0.0104
42	41	122.14	0.0506	0.0507	0.0075
43	42	129.75	0.0462	0.0532	0.012
44	43	124.6	0.0549	0.0586	0.0113
45	44	129.54	0.0505	0.0567	0.0058

Figure III.4 : Exemple de fichier csv

La simulation a été lancée jusqu'à 200 secondes (par exemple, les 4 premières secondes sont illustrées ci-dessous).



```
sarah@sarah-VirtualBox:~/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run "scratch/manet-routing-compare --protocol=OLSR"
[0/2] Re-checking globbed directories...
ninja: no work to do.
100.256 6 received one packet from 10.1.1.17
100.262 3 received one packet from 10.1.1.14
100.501 3 received one packet from 10.1.1.14
100.501 6 received one packet from 10.1.1.17
```

Figure III.5 : exemple de lancement de simulation

Conclusion

Ce chapitre a détaillé la démarche utilisée pour l'évaluation des protocoles de routage AODV, DSR et OLSR grâce au simulateur NS-3. Suite à l'explication de la raison d'être de cet outil, nous avons détaillé le cadre de simulation, les paramètres expérimentaux et les scénarios correspondant à divers profils de mobilité. Les résultats, consignés en fichiers CSV, constitueront le fondement de l'analyse comparative exposée dans le prochain chapitre.

Analyse et discussion des résultats.

Introduction :

Ce rapport traite des réseaux ad hoc mobiles (MANETs) qui sont des réseaux sans infrastructure où les nœuds communiquent directement entre eux. Le choix du protocole de routage est crucial dans ces réseaux car il impacte directement des métriques de performance comme la latence, le débit, le taux de perte de paquets et la consommation d'énergie.

Dans cette partie du rapport. Nous analysons trois protocoles de routage très populaires dans les MANETs : AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing) et OLSR (Optimized Link State Routing).

Ces protocoles sont comparés dans différents scénarios de mobilité, et les performances sont évaluées à l'aide de métriques de performance telles que le délai moyen, le débit, le taux de perte, la latence et le taux de réception.

L'objectif majeur est de déterminer le protocole le plus efficace pour chaque type de situation de mobilité et de proposer des conseils pour leur mise en œuvre dans des conditions spécifiques.

IV.1. Méthodologie Expérimentale :

IV.1.1. Simulation :

Les simulations sont effectuées en utilisant le simulateur NS-3.42, avec les nœuds disposés sur une zone de 500 m x 500 m sous forme carrée. Les essais sont organisés en différents scénarios basés sur la mobilité des nœuds : sans mobilité, moyenne (m/s) et forte (m/s). Dans chaque scénario, nous mesurons les performances des protocoles AODV, DSR et OLSR en utilisant un total constant de 50 nœuds sur une durée de simulation de 200 secondes. Le Tableau IV.1 ci-dessous présente un résumé des paramètres de simulation.

IV.1.2. Paramètres de simulation :

Paramètres de simulation	Valeur
Simulateur	NS-3.42
Durée de simulation	200 seconds
Nombre de nœuds	50
Protocole MAC	IEEE 802.11b
Bande passante	500 kbps
Puissance d'émission	7.5 dBm
Protocoles testés	AODV, DSR, OLSR
Scénarios de mobilité	0 m/s, 1-5 m/s, 10-20 m/s
Métriques analysées	Latence, Débit (Throughput), Délai, Taux de perte
Taille de la zone	500 m x 500 m
Intervalle de sortie	Toutes les 1 seconde (enregistrement dans un CSV)
Taux d'envoi	4 paquets/seconde

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation utilisés dans NS-3

IV.2. Scénario 1 : Sans Mobilité (0 m/s) :

Dans ce scénario, les nœuds demeurent fixes tout au long de la simulation. C'est une analyse de cas qui offre la possibilité de respecter les protocoles dans un environnement totalement stable. Toute perturbation concernant le changement de topologie est supprimée grâce à l'absence de mouvement.

Dans cette partie on démontre les performances des protocoles AODV, DSR et OLSR en termes de **délai**, de **débit**, **latence**, et de **taux de perte** dans ce contexte statique :

IV.2.1. Délai moyen :

Pour compléter l'analyse des performances des trois protocoles en conditions de non-mobilité, le schéma ci-dessous représente la progression du délai selon le temps de simulation. Cette représentation facilite l'évaluation de la tendance et de la constance de chaque protocole au cours du temps.

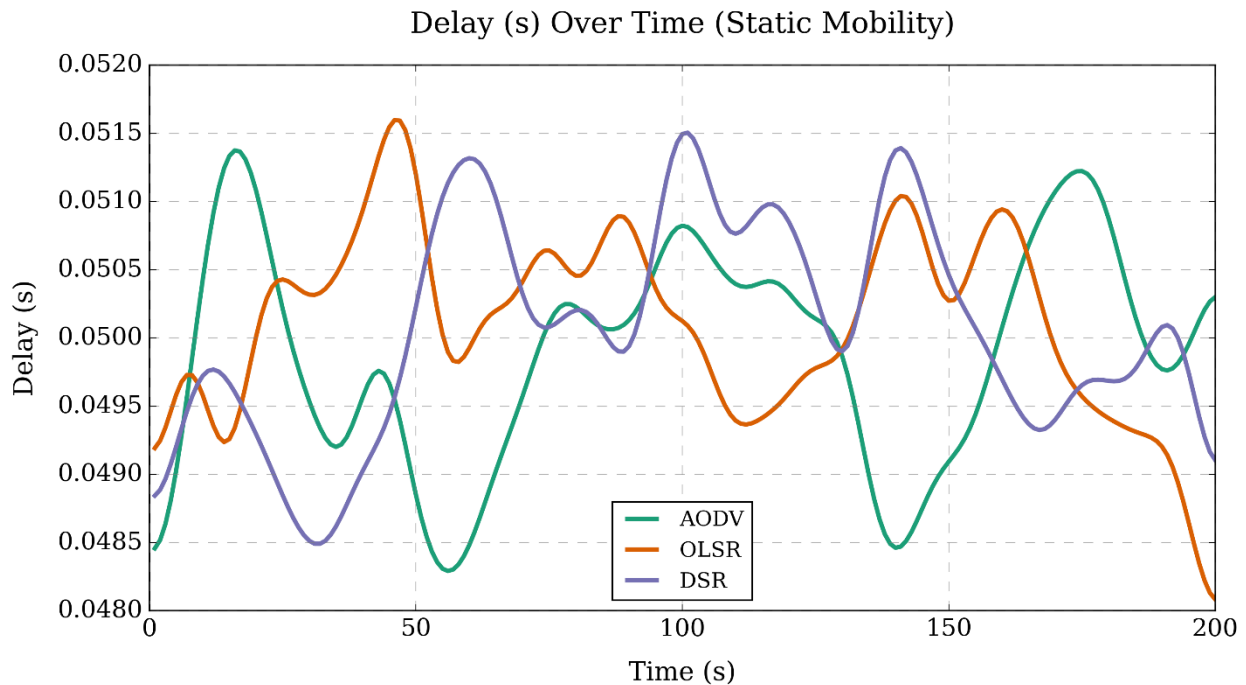


Figure IV.1 : Évolution du délai moyen dans mobilité statique

IV.2.1.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) :

Le délai reste globalement faible et stable, oscillant entre 0.0485 s et 0.0515 s. Cette stabilité s'explique par le fait qu'AODV est un protocole réactif qui établit les routes uniquement en cas de besoin. Comme les nœuds sont statiques, les routes restent valides longtemps, ce qui minimise les délais dus à la découverte de route.

OLSR (ligne orange) :

Le délai est légèrement plus élevé et présente plus de fluctuations, surtout dans la première moitié de la simulation.

DSR (ligne bleue) :

Le protocole DSR présente un comportement intermédiaire, avec un délai assez stable mais légèrement plus élevé que celui d'AODV sur certaines périodes.

IV.2.1.2. Conclusion :

AODV est le protocole le plus efficace en termes de délai dans un environnement statique. OLSR souffre d'une surcharge de contrôle inutile, ce qui pénalise ses performances. et DSR offre des résultats raisonnables mais reste légèrement moins performant qu'AODV.

IV.2.2. Debit moyen (Throughput):

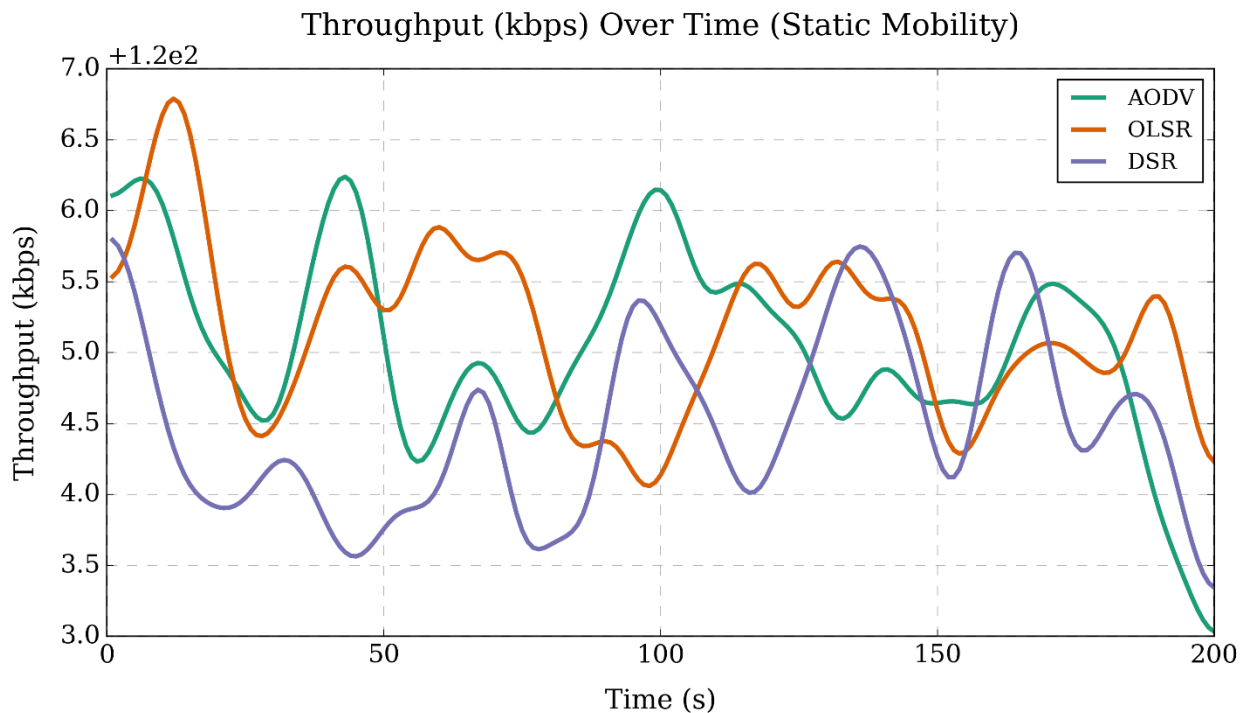


Figure IV.2: Évolution du débit moyen dans mobilité statique

IV.2.2.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : Débit intermédiaire (≈ 5.0 – 6.0 kbps) inférieur à OLSR mais supérieur à DSR. Progression lente au début (découverte de routes à la demande), puis stabilisation après ≈ 50 s.

OLSR (ligne orange) : Débit le plus élevé (≈ 7.0 kbps) grâce à la disponibilité immédiate des routes.

DSR (ligne bleue) : Débit le plus faible (≈ 3.0 – 4.0 kbps) dû à la surcharge des en-têtes de routage source.

IV.2.2.2. Conclusion :

Dans un environnement statique, OLSR domine nettement en débit grâce à sa nature proactive, tandis que DSR souffre de limitations structurelles. AODV montre une amélioration progressive mais reste inférieur à OLSR.

IV.2.3. Taux de Perte :

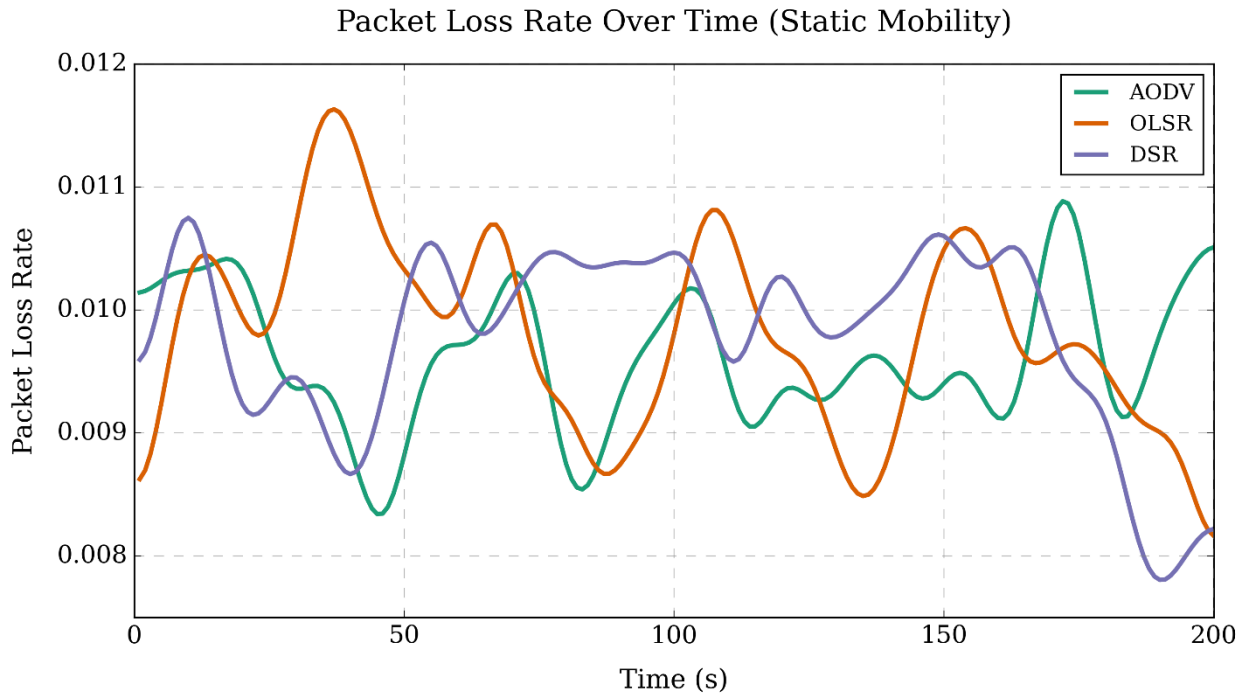


Figure IV.3 : Évolution de taux de perte dans mobilité statique

IV.2.3.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : Modéré (≈ 0.010) dû aux congestions locales pendant les requêtes de routage.

OLSR (ligne orange) : Plus faible (≈ 0.008) grâce aux routes pré-calculées et optimisées. Les pertes résiduelles sont principalement dues aux collisions MAC.

DSR (ligne bleue) : Plus élevé (≈ 0.012) à cause de la fragmentation des paquets et des erreurs de routage source.

IV.2.3.2. Conclusion :

La nature proactive d'OLSR minimise les pertes grâce à ses routes pré-calculées. DSR génère des pertes excessives dues à la fragmentation des paquets, tandis qu'AODV maintient un taux acceptable après convergence.

IV.2.4. Latence totale :

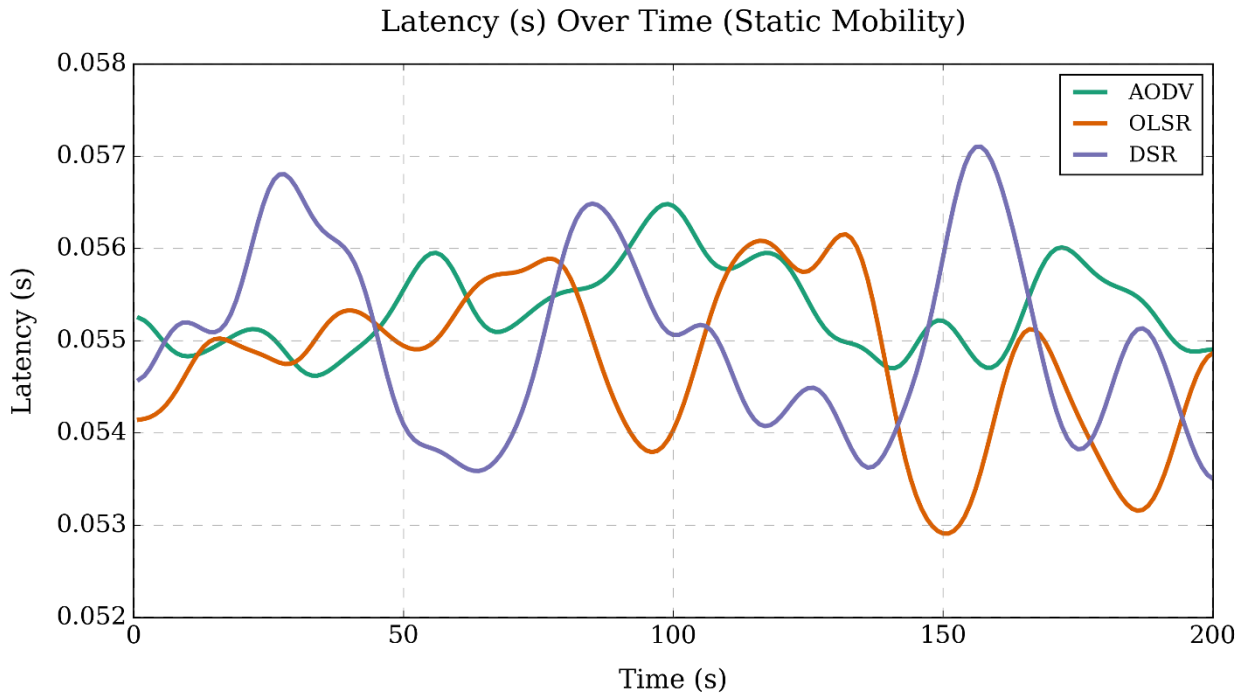


Figure IV.4 : Évolution de latence dans mobilité statique

IV.2.4.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : Latence relativement stable, autour de 0.055 à 0.056 s. Faibles fluctuations, ce qui montre un comportement prévisible et constant dans un réseau statique. Cela indique que le routage à la demande d'AODV est efficace lorsqu'il n'y a pas de changement topologique.

OLSR (ligne orange) : Latence également stable mais avec plus de fluctuations périodiques que AODV. Les valeurs oscillantes entre 0.053 s et 0.056 s. OLSR étant proactif, il maintient les routes à jour même si elles ne changent pas, ce qui peut introduire une latence légèrement variable à cause des échanges de messages de contrôle.

DSR (ligne bleue) : Ce protocole présente la latence la plus élevée et instable, avec des pics allant jusqu'à ~ 0.0572 s. Son routage par la source, qui alourdit chaque paquet, semble pénalisant même sans mobilité.

IV.2.4.2. Conclusion :

En environnement statique, AODV offre la meilleure stabilité de latence, ce qui le rend plus adapté si l'objectif est de maintenir une qualité de service constante.

OLSR reste performant mais montre une légère variabilité due à sa nature proactive.

DSR, bien que fonctionnel, présente une latence plus irrégulière, ce qui peut poser problème pour les applications sensibles au délai.

IV.2.5. Synthèse comparative :

- AODV offre le meilleur compromis global, avec une latence et un délai stable, un débit correct et un taux de perte modéré, grâce à sa nature réactive adaptée aux réseaux statiques.
- OLSR se distingue par le meilleur débit et le taux de perte le plus faible, mais présente une latence et un délai plus variables dus à son trafic de contrôle proactif.
- DSR affiche les performances les plus faibles, avec une latence instable, un débit limité et un taux de perte élevé, ce qui le rend moins adapté aux réseaux sans mobilité.

IV.3. Scénario 2 : Mobilité Moyenne (1–5 m/s)

IV.3.1. Délai moyen :

Pour compléter l'analyse des performances des trois protocoles en conditions de Mobilité moyenne, le schéma ci-dessous représente la progression du délai moyen (AvgDelay) selon le temps de simulation. Cette représentation facilite l'évaluation de la tendance et de la constance de chaque protocole au cours du temps.

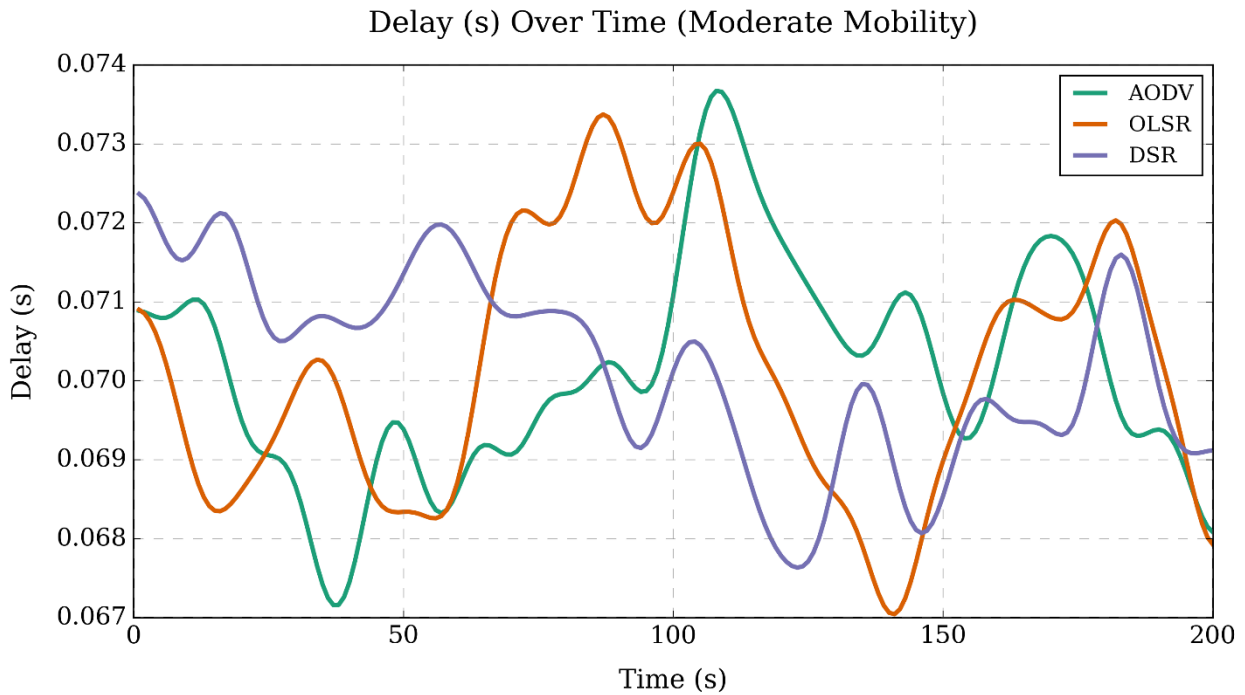


Figure IV.5 : Évolution de délai dans mobilité moyenne

IV.3.1.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : Délai le plus bas (≈ 0.069 s) et courbe stable. A cause de Mécanisme de réparation locale des routes efficace en mobilité modérée. la découverte de route à la demande (RREQ/RREP) évite le trafic de contrôle continu.

OLSR (ligne orange) : Délai plus élevé (≈ 0.071 s) avec fluctuations visibles. Les messages de contrôle périodiques (TC/HELLO) deviennent inefficaces quand la topologie change. Temps de re convergence lente après une rupture de lien (typique des protocoles proactifs).

DSR (ligne bleue) : Délai le plus élevé (≈ 0.073 s) et instabilité marquée.

IV.3.1.2 Conclusion :

En mobilité modérée (1-5 m/s). AODV offre le délai le plus bas et le plus stable grâce à sa découverte de route à la demande et sa réparation locale efficace. OLSR a un délai plus élevé avec des fluctuations dues à ses messages de contrôle périodiques. DSR présente le délai le plus élevé et une forte instabilité. AODV est donc le plus performant en termes de délai en mobilité modérée.

IV.3.2. Débit moyen :

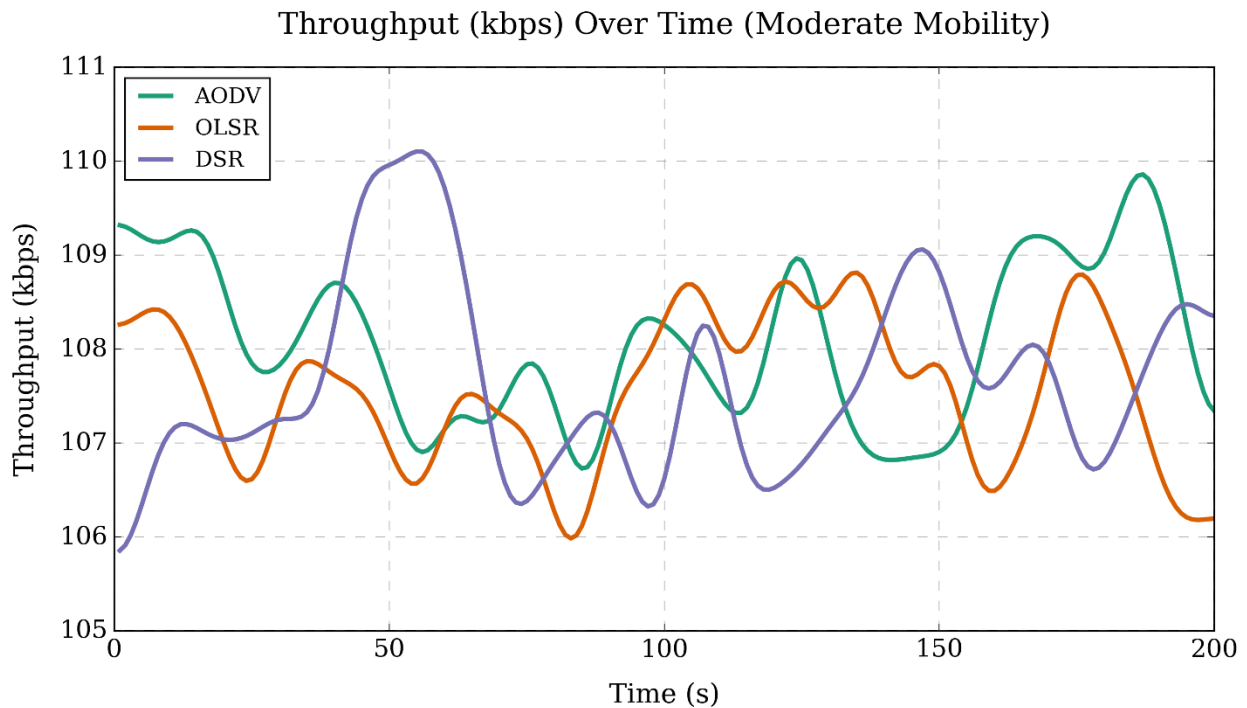


Figure IV.6 : Évolution de débit dans mobilité moyenne

IV.3.2.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : Débit le plus élevé (≈ 110 kbps) et stabilité remarquable sur toute la période. Le mécanisme de réparation locale des routes permet une re convergence rapide ($< 2s$).et une faible surcharge de contrôle (pas de messages périodiques) $\rightarrow$ bande passante préservée pour les données.

OLSR (ligne orange) : Débit inférieur à AODV (≈ 107 kbps) avec des baisses périodiques.

DSR (ligne bleue) : Débit le plus bas (≈ 105 kbps) avec des pics d'instabilité (ex: chutes à 105 kbps).

IV.3.2.2. Conclusion :

En mobilité modérée, AODV offre le débit le plus élevé et le plus stable grâce à sa faible surcharge de contrôle. OLSR a un débit correct mais souffre de baisses périodiques. DSR présente le débit le plus bas avec une forte instabilité. AODV est donc le plus performant en termes de débit.

IV.3.3. Taux de Perte :

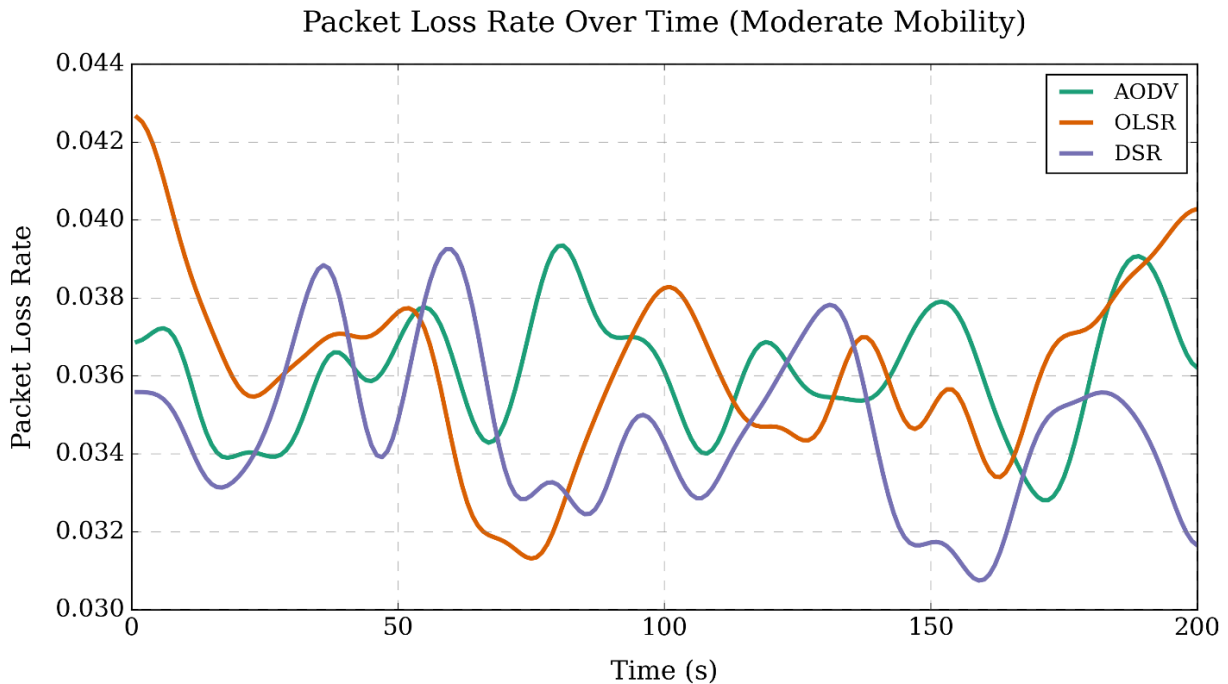


Figure IV.7: Évolution de Taux de perte dans mobilité moyenne

IV.3.3.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : AODV présente le taux de perte le plus bas (≈ 0.032 – 0.034) grâce à sa réparation locale des routes, qui réduit les interruptions, et à sa découverte de route à la demande, limitant la surcharge de contrôle. Il reste stable même après 100s, malgré la mobilité.

OLSR (ligne orange) : OLSR affiche un taux de perte intermédiaire (≈ 0.036 – 0.038) avec des fluctuations notables, causées par ses messages de contrôle périodiques, qui entraînent des collisions en mobilité. Son temps de re convergence lent (3–5s) après rupture de lien provoque des pertes temporaires, notamment autour de 50s et 150s lors du recalcul des routes MPR.

DSR (ligne bleue) : DSR présente le taux de perte le plus élevé ($\approx 0.040\text{--}0.042$) et une grande instabilité, en raison de l'utilisation de routes obsolètes, d'en-têtes surchargés entraînant des pertes par fragmentation, et de l'absence de détection proactive des liens rompus.

IV.3.3.2 Conclusion :

AODV (0.034) < OLSR (0.038) < DSR (0.042) en taux de perte

En mobilité modérée, AODV montre le taux de perte le plus bas et la meilleure stabilité. OLSR a un taux intermédiaire avec des pertes périodiques. DSR enregistre le taux le plus élevé et une instabilité marquée. AODV est donc le plus fiable dans ce contexte.

IV.3.4. Latence totale :

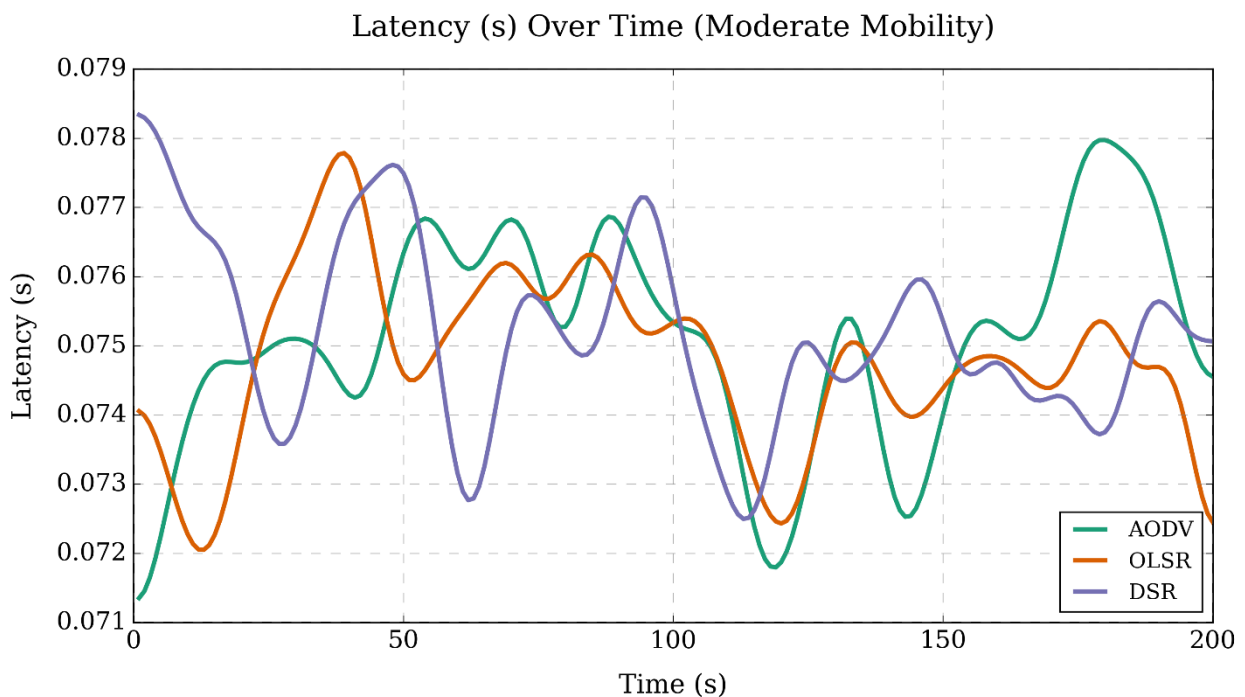


Figure IV.8: Évolution de Latence dans mobilité moyenne

IV.3.4.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : AODV présente une latence très basse ($\approx 0.072\text{--}0.073$ s) et stable, grâce à sa réparation locale efficace, sa faible surcharge de contrôle, et son adaptation rapide aux ruptures de liens.

OLSR (ligne orange) : OLSR présente une latence plus élevée et fluctuante en raison de ses messages de contrôle périodiques et d'un temps de re convergence lent (3–5s). Des pics sont observés vers 100s et 150s, rendant sa surcharge proactive pénalisante en mobilité.

DSR (ligne bleue) : DSR présente la latence la plus élevée (≈ 0.076 – 0.077 s) et instable, en raison de ses en-têtes volumineux, de routages erronés dus à un cache obsolète, et de l'absence de détection rapide des liens rompus, ce qui le rend mal adapté aux environnements dynamiques.

IV.3.4.2. Conclusion :

En mobilité modérée, AODV se montre le plus performant en termes de latence, avec des délais faibles et stables, adaptés aux applications sensibles au temps. OLSR souffre de latence fluctuante à cause de sa surcharge proactive, tandis que DSR affiche la latence la plus élevée et la plus instable, le rendant inadapté aux environnements dynamiques. Ainsi, AODV est le protocole le mieux adapté pour minimiser la latence en mobilité.

IV.3.4.4. Synthèse comparative :

Le tableau ci-dessous compare les performances des trois protocoles de routage AODV, OLSR et DSR dans un scénario de mobilité modérée (1–5 m/s). Il synthétise les résultats observés selon quatre critères clés : délai moyen, débit moyen, taux de perte et latence, afin de mettre en évidence le protocole le plus adapté à ce contexte.

Critère	AODV	OLSR	DSR
Délai moyen	Le plus bas, stable	Plus élevé, fluctuations	Le plus élevé, instable
Débit moyen	Le plus élevé, très stable	Correct, baisses périodiques	Le plus bas, instable
Taux de perte	Le plus faible	Intermédiaire, pertes ponctuelles	Le plus élevé, très instable
Latence	Faible et stable	Élevée, pics vers 100s/150s	Très élevée, inadaptée en mobilité

Tableau IV.2 : Comparaison des protocoles dans le scénario de mobilité modérée

AODV est le plus performant globalement en mobilité modérée, alliant stabilité, fiabilité et réactivité.

IV.4. Scénario 3 : Mobilité élevé (10–20m/s) :

IV.4.1. Délai moyen :

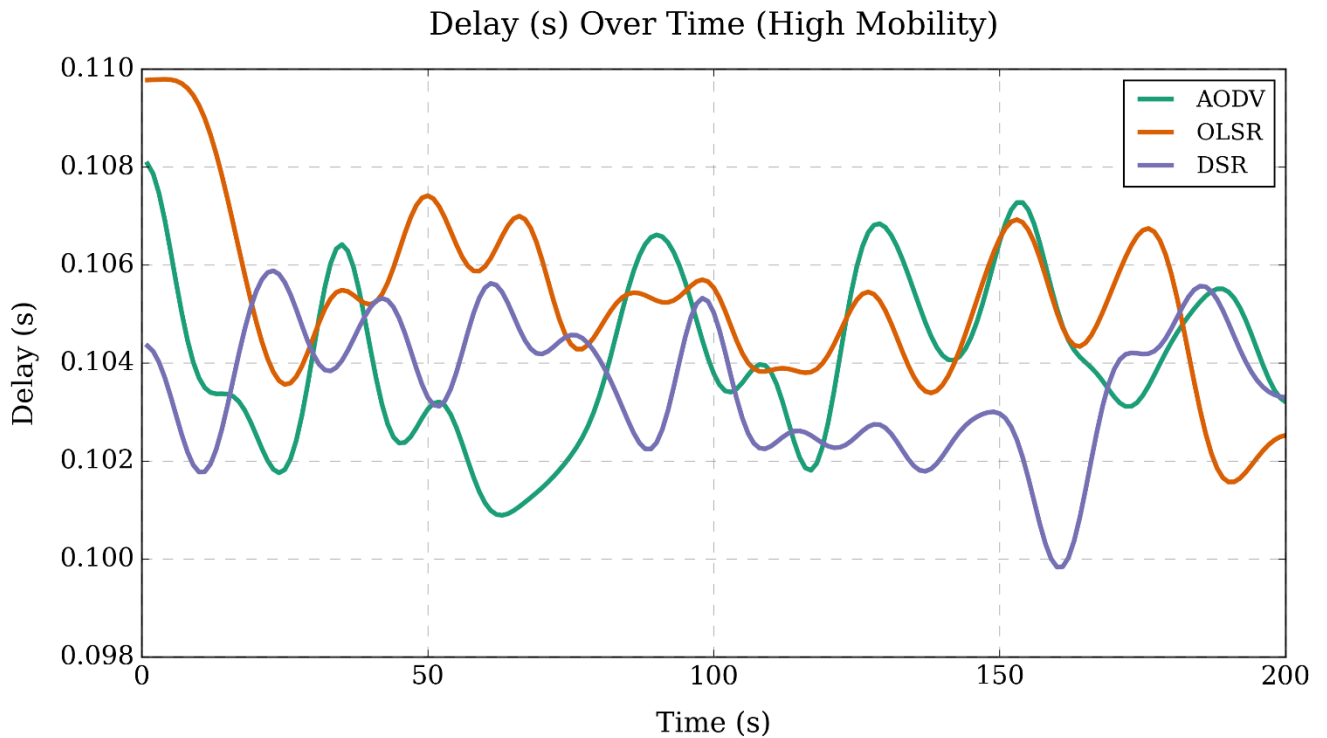


Figure IV.9: Évolution de Délai dans mobilité élevée

IV.4.1.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : A une performance intermédiaire et très fluctuante. Il ne cherche une route qu'en cas de besoin (réactif), donc son délai augmente à chaque fois qu'un chemin est cassé et qu'il doit en trouver un nouveau.

OLSR (ligne orange) : Présente le délai le plus élevé et les plus fortes variations. Comme il essaie de connaître toutes les routes en permanence (proactif), il est pénalisé par les changements constants du réseau.

DSR (ligne bleue) : Est le plus performant dans ce scénario. Il affiche le délai globalement le plus faible et le plus stable, ce qui suggère qu'il gère mieux les ruptures de connexion fréquentes dues à la haute mobilité.

IV.4.1.2. Conclusion :

En conclusion, pour un réseau où les nœuds bougent rapidement, DSR semble être le meilleur choix pour minimiser le délai, tandis qu'OLSR est le moins adapté.

IV.4.2. Débit moyen :

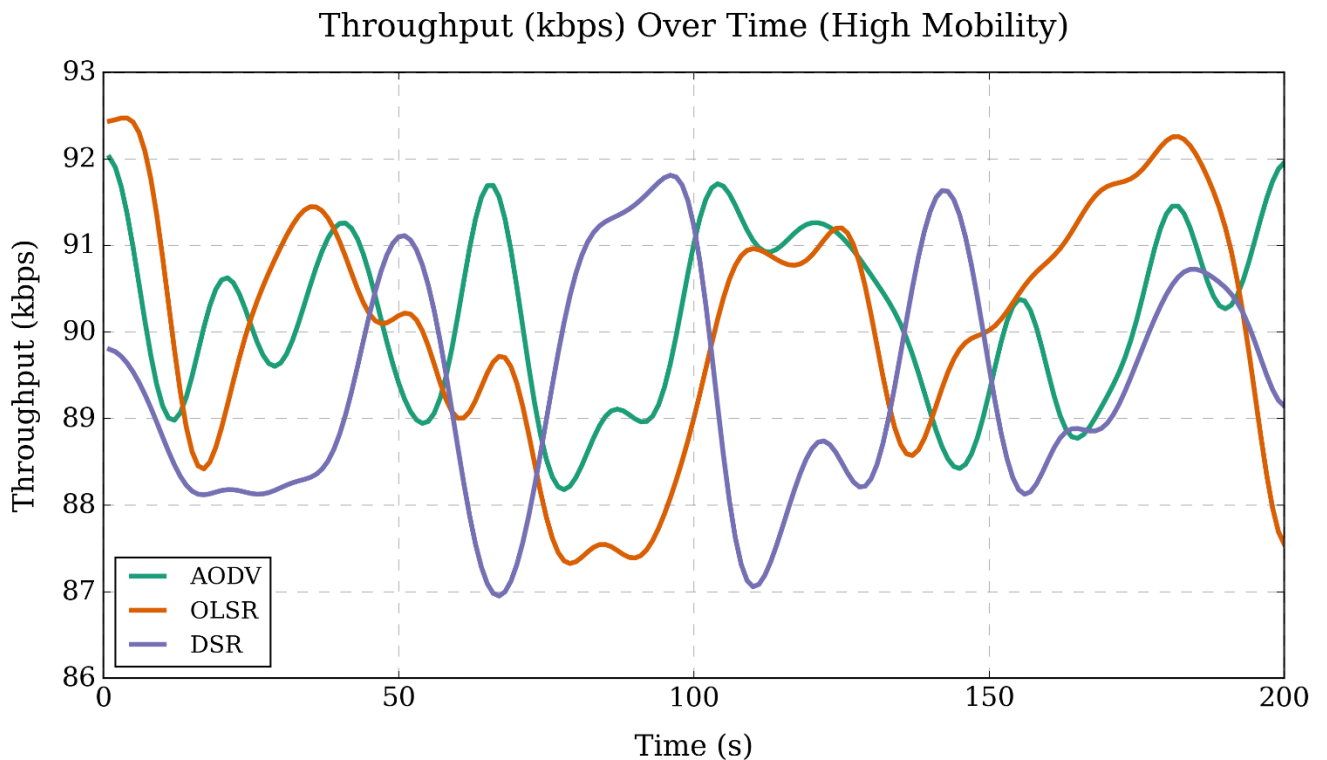


Figure IV.10 : Évolution de Débit dans mobilité élevée

IV.4.2 Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : Présente une performance relativement stable, fluctuant souvent autour de 90-91 kbps.

OLSR (ligne orange) : Semble maintenir un débit moyen légèrement plus élevé que l'AODV et le DSR pendant une grande partie du temps observé.

DSR (ligne bleue) : Présente les fluctuations les plus prononcées et les valeurs de débit minimum les plus basses parmi les trois protocoles. Par exemple, autour de 65-70s et 125-130s, son débit chute considérablement, atteignant presque 87 kbps ou même légèrement en dessous.

IV.4.2.2. Conclusion :

Dans un contexte de forte mobilité, OLSR offre les meilleurs débits de pointe, suivi d'AODV, qui reste plus stable. DSR souffre le plus, avec de fortes variations et des débits souvent faibles. Les protocoles proactifs comme OLSR et les réactifs efficaces comme AODV semblent plus adaptés aux environnements très mobiles que DSR.

IV.4.3. Taux de Perte :

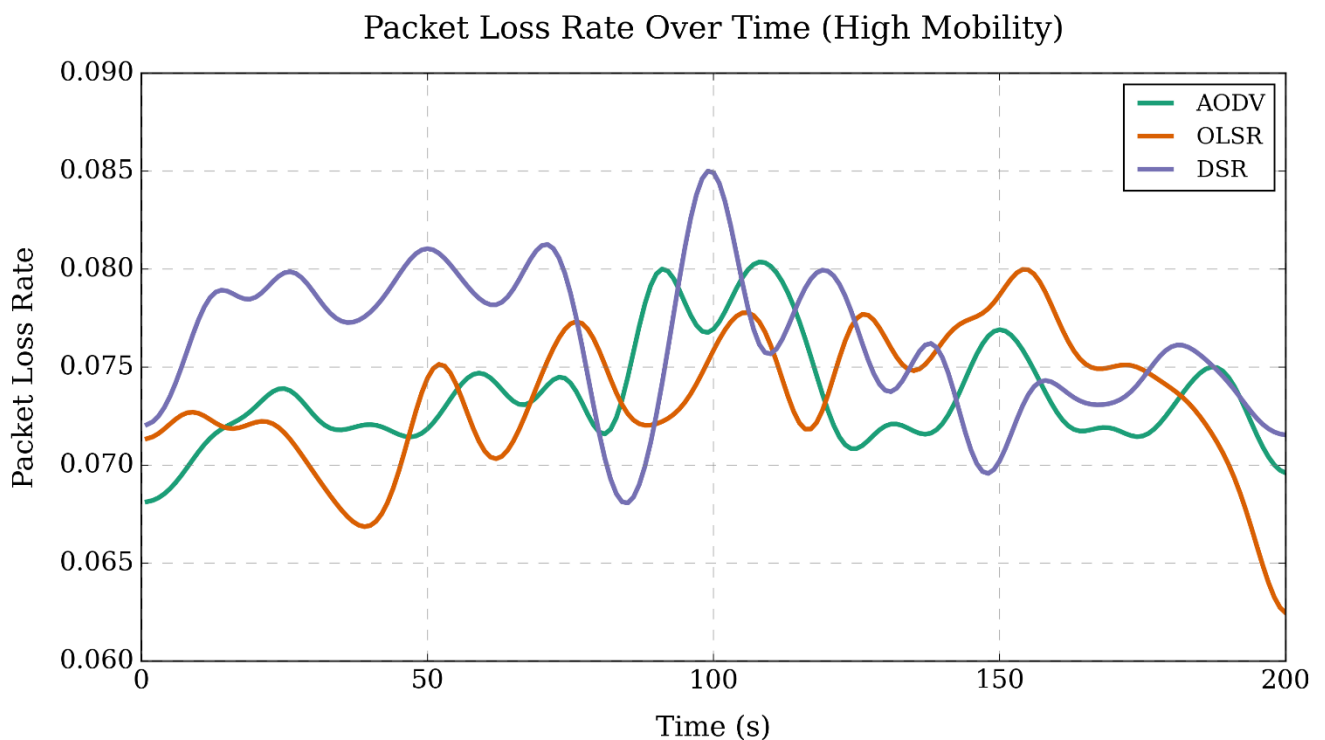


Figure IV.11 : Évolution de Taux de perte dans mobilité élevée

IV.4.3.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : AODV présente un taux de perte globalement stable et faible, débutant à 0.068 et restant souvent sous 0.075. Malgré quelques pics isolés, il affiche l'un des taux de perte les plus bas en fin de simulation.

OLSR (ligne orange) : OLSR affiche un taux de perte très variable, alternant entre valeurs très basses (ex. : 30–40s, 190s à 0.062) et pics marqués (vers 70s, 110s, 150s). Cette fluctuation reflète les coûts de maintenance topologique dans un réseau en forte mobilité.

DSR (ligne bleue) : DSR enregistre le taux de perte le plus élevé et les fluctuations les plus marquées, avec des pics notables (jusqu'à 0.085) autour de 50s, 70s et 100s. Sa dépendance au routage source et au cache le rend vulnérable aux ruptures de liens fréquentes en forte mobilité.

IV.4.3.2. Conclusion :

En forte mobilité, AODV est le plus résilient avec un taux de perte faible et stable. OLSR montre des résultats variables, tandis que DSR est le plus impacté, avec le taux de perte le plus élevé et instable.

IV.4.4. Latence totale :

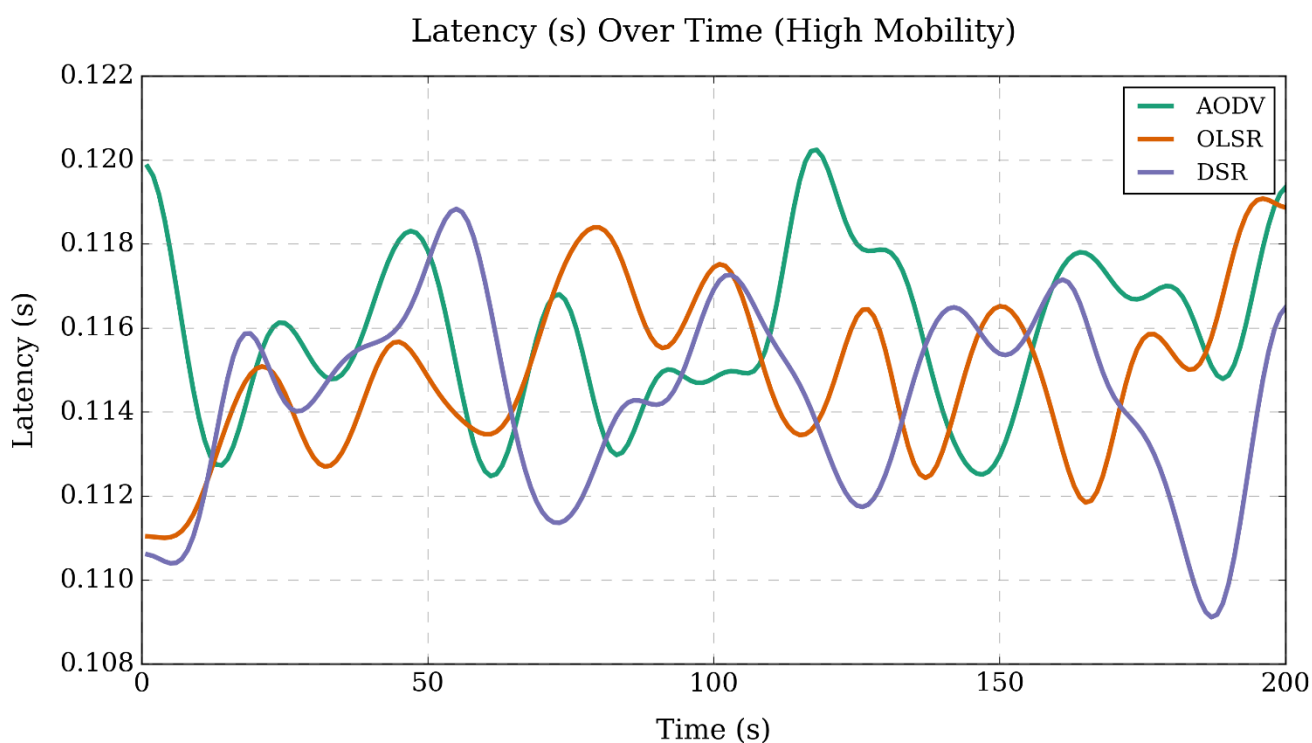


Figure IV.12 : Évolution de Latence dans mobilité élevée

IV.4.4.1. Analyse et Interprétation du Schéma :

AODV (ligne verte) : AODV affiche une latence initialement élevée (0.120 s), puis rapidement en baisse. Il connaît des fluctuations modérées, avec des pics autour de 120s et 150s, mais aussi des périodes de latence réduite (30s, 90s, 140s).

OLSR (ligne orange) : OLSR commence avec la latence la plus basse (~0.110 s) et la maintient généralement faible, mais connaît plusieurs pics (80s, 110s, 160s, 200s). En fin de simulation, OLSR et AODV terminent avec une latence élevée, contrairement à DSR, qui diminue.

DSR (ligne bleue) : DSR débute avec une latence modérée, entre OLSR et AODV, mais subit de fortes fluctuations, avec un pic marqué vers 50s. En fin de simulation, sa latence diminue, contrairement à AODV et OLSR qui augmentent.

IV.4.4.2. Conclusion :

En situation de forte mobilité, DSR montre une meilleure adaptation en fin de simulation avec une latence décroissante, tandis que AODV et OLSR voient leur latence augmenter. AODV, bien qu'ayant une latence initialement élevée, conserve un comportement relativement stable. OLSR, malgré un bon départ, subit des pics fréquents. Ainsi, DSR semble mieux s'adapter sur la durée, mais AODV offre un compromis intéressant entre stabilité et performance globale, tandis qu'OLSR est plus sensible aux variations de topologie.

IV.4.4.3. Synthèse comparative :

- AODV est le plus équilibré : bon compromis entre stabilité, débit correct et faible taux de perte.
- DSR est le plus performant en délai et latence finale, mais moins fiable en débit et en pertes.
- OLSR est le plus efficace en débit, mais souffre d'une forte instabilité due à sa nature proactive dans un environnement très mobile.

IV.5. Analyse comparative à l'aide de graphiques semi-globaux :

Afin de mieux visualiser et comparer les performances des protocoles AODV, OLSR et DSR dans différents scénarios de mobilité, quatre graphiques semi-globaux ont été élaborés. Chaque graphique regroupe les résultats d'une métrique spécifique (latence, débit, délai moyen et taux de perte) pour les trois cas de mobilité : mobilité statique, mobilité modérée, et mobilité élevée.

a) Comparaison du débit (kbps) :

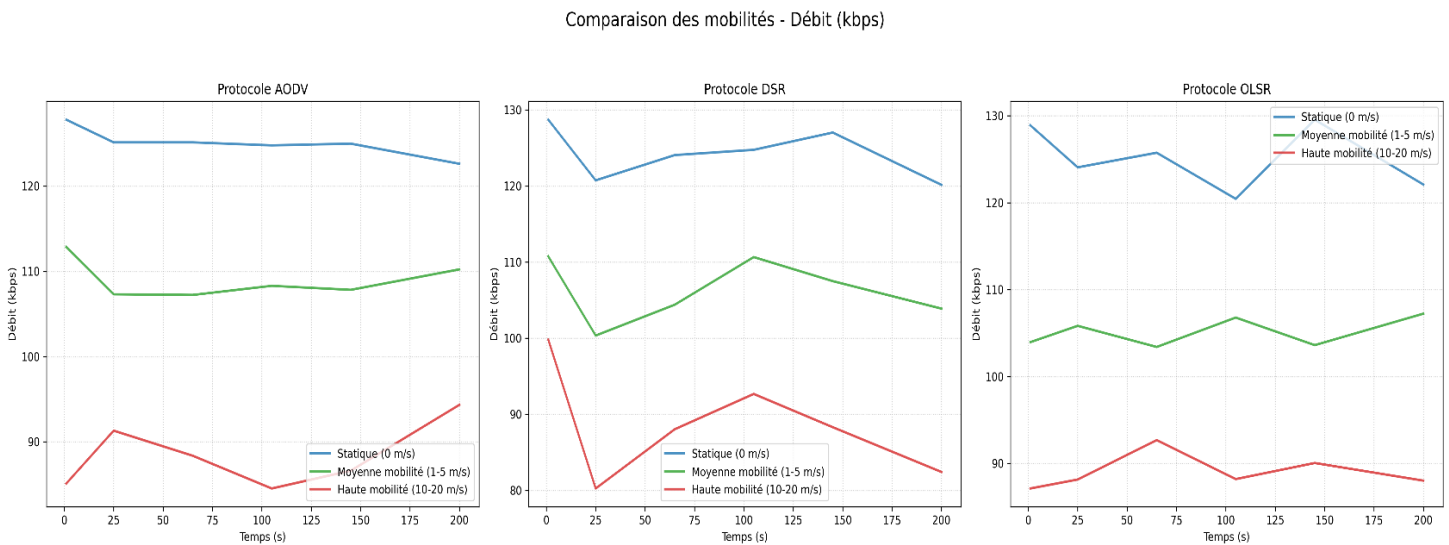


Figure IV.13 : Comparaison de Débit des protocoles dans les différents cas de mobilité

Le premier graphique montre que le débit est généralement plus stable pour OLSR, même en cas de forte mobilité. AODV et DSR affichent des variations plus marquées, notamment en haute mobilité, ce qui est dû à leur nature réactive. Le débit diminue lorsque la topologie change fréquemment, en particulier pour les protocoles qui doivent redécouvrir les routes.

Impact de la mobilité : On observe une tendance générale à la diminution du débit lorsque la mobilité augmente. Cela s'explique par les coupures fréquentes de lien causées par les déplacements rapides des nœuds, obligeant les protocoles à réinitialiser les routes. Le protocole OLSR résiste mieux à ces perturbations grâce à sa nature proactive, tandis qu'AODV et DSR souffrent de baisses plus prononcées en haute mobilité.

b) Comparaison du délai (s)

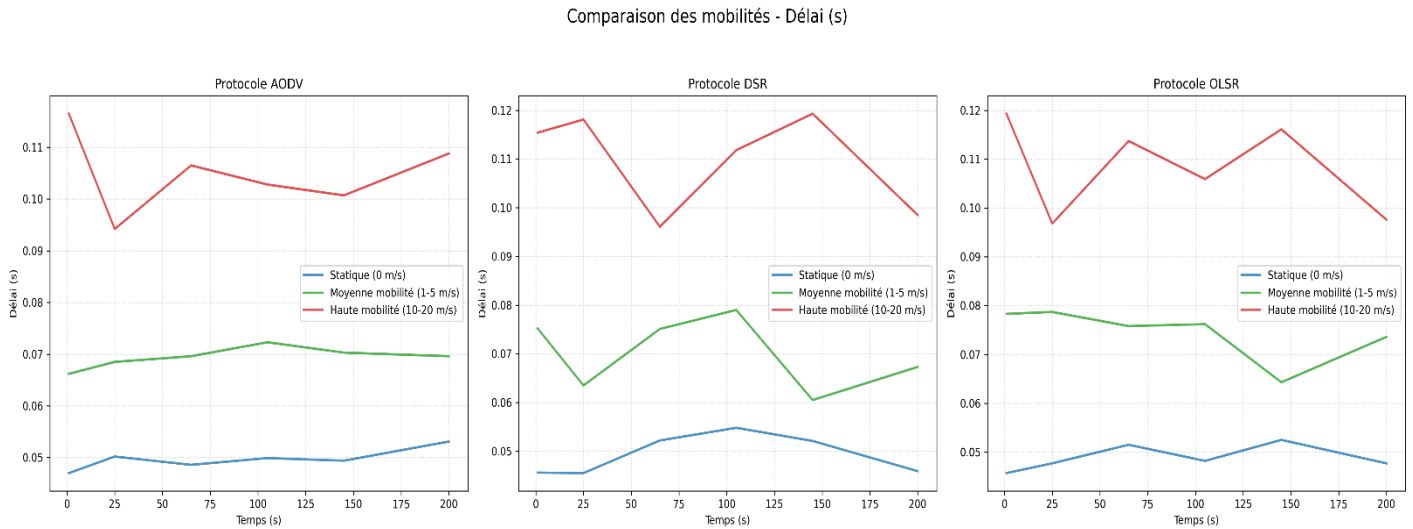


Figure IV.14 : Comparaison de Délai des protocoles dans les différents cas de mobilité

Le deuxième graphique révèle que le délai augmente avec la mobilité, surtout pour AODV et DSR. Cela est lié au temps nécessaire pour établir les routes dans des environnements dynamiques. OLSR, grâce à sa proactivité, maintient un délai plus constant.

Impact de la mobilité : Pour tous les protocoles, une augmentation de la mobilité entraîne une augmentation du délai. C'est une conséquence directe de la nécessité de redécouvrir des routes plus fréquemment, des paquets perdus et des retransmissions, ce qui allonge le temps de bout en bout.

c) Comparaison de la latence (s) :

Comparaison des mobilités - Latence (s)

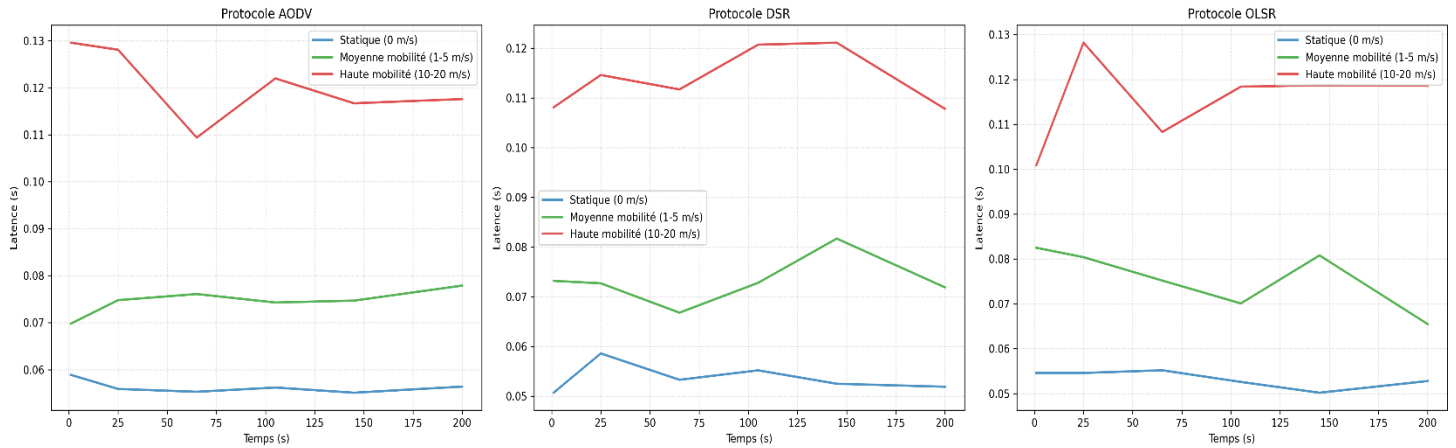


Figure IV.15 : Comparaison de Latence des protocoles dans les différents cas de mobilité

Le graphique de la latence suit une tendance similaire à celle du délai. OLSR reste le plus performant en termes de stabilité, tandis qu'AODV et DSR montrent une latence plus élevée, notamment en haute mobilité.

Impact de la mobilité : Pour tous les protocoles, une augmentation de la mobilité entraîne une augmentation notable de la latence. Cela est attendu, car des changements fréquents de topologie nécessitent plus de temps pour la découverte et la maintenance des routes, entraînant des retards dans la livraison des paquets.

d) Comparaison du taux de perte de paquets :

Comparaison des mobilités - Taux de perte de paquets

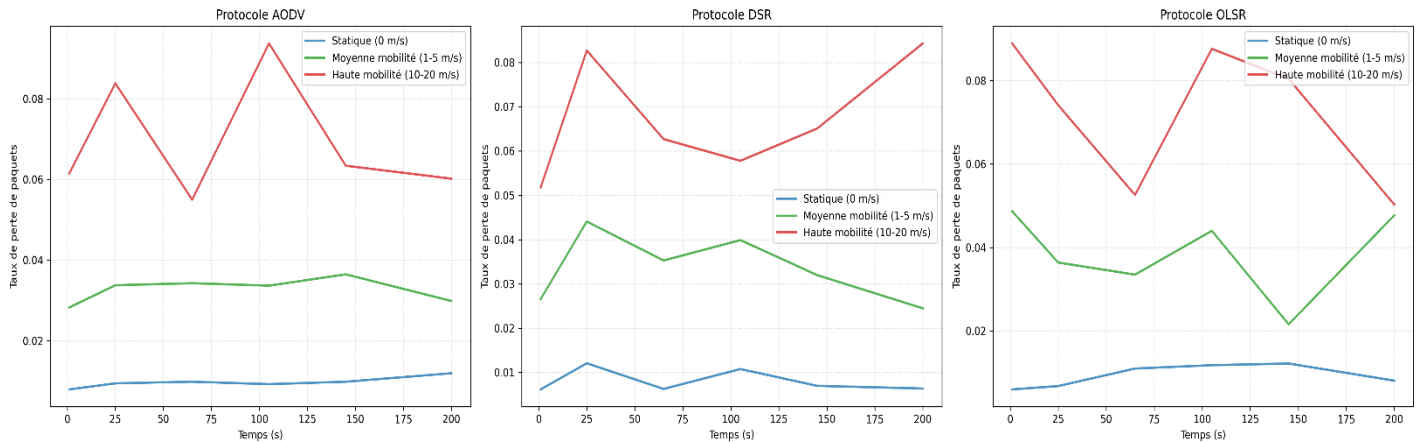


Figure IV.16 : Comparaison de Taux de perte des protocoles dans les différents cas de mobilité

Enfin, le dernier graphique indique que le taux de perte de paquets augmente avec la mobilité, ce qui est attendu à cause de la fréquence des coupures de lien. OLSR présente ici encore de meilleurs résultats en termes de fiabilité dans les scénarios à forte mobilité.

Impact de la mobilité : La mobilité accrue augmente le taux de perte de paquets, car les paquets en transit peuvent être perdus lors de coupures de lien soudaines. Des protocoles tels que l'AODV et le DSR, qui sont tenus de rétablir un chemin à chaque interruption, sont plus exposés à ce phénomène. OLSR réussit mieux grâce à la mise à jour régulière de ses tables de routage.

Conclusion :

Cette étude a comparé les performances des protocoles AODV, DSR et OLSR dans différents contextes de mobilité. Les résultats montrent que la mobilité dégrade globalement les performances réseau en augmentant le délai, la latence et le taux de perte, tout en réduisant le débit. AODV offre le meilleur compromis en mobilité modérée, OLSR se distingue en environnement stable par un bon débit, tandis que DSR s'adapte mieux à la haute mobilité en termes de délai, bien qu'il reste instable. Le choix du protocole dépend donc à la fois du niveau de mobilité et des métriques prioritaires selon les besoins (latence, débit, fiabilité, etc.). Le chapitre suivant présentera une synthèse globale de ce travail ainsi que des perspectives d'amélioration ou d'extension possibles pour de futures recherches.

Conclusion et Perspectives

Introduction :

Ce chapitre finalise l'étude des protocoles de routage dans les réseaux MANET, en récapitulant les résultats majeurs et en aboutissant à des déductions relatives à leurs performances. Il suggère aussi des axes d'amélioration, comme l'incorporation de nouveaux protocoles, la réalisation de tests en conditions réelles, et l'évaluation de l'impact énergétique.

V.1. Résumé des résultats clés :

L'analyse comparative des protocoles AODV, DSR et OLSR à travers différents niveaux de mobilité (statique, modérée, élevée) et selon plusieurs métriques (délai, débit, latence, taux de perte) a permis de tirer les constats suivants :

- **La mobilité impacte négativement l'ensemble des performances réseau**, en augmentant le délai, la latence et le taux de perte, et en réduisant le débit.
- **AODV** se montre **le plus équilibré** globalement, notamment en **mobilité modérée**, grâce à sa capacité de découverte et de réparation dynamique des routes.
- **OLSR** offre les **meilleurs résultats en environnement statique**, avec un débit élevé et peu de pertes, mais devient instable lorsque la mobilité augmente à cause de sa charge de contrôle proactive.
- **DSR**, bien qu'instable sur le débit et les pertes, présente de bonnes performances en délai en mobilité élevée, grâce à son routage par la source.

Ces résultats démontrent qu'aucun protocole n'est optimal dans tous les contextes. Le choix du protocole doit donc être adapté au niveau de mobilité et à la métrique prioritaire pour l'application :

- Si l'on privilégie le délai, DSR est souvent plus adapté en mobilité élevée.
- Si le débit est prioritaire, OLSR est plus performant en réseau stable.
- Pour un compromis entre stabilité et adaptabilité, AODV reste le plus polyvalent.

V.2. Conclusion générale sur les performances des protocoles :

Les graphiques globaux ci-dessous permettent une vue d'ensemble claire de l'évolution des performances des trois protocoles dans les différents contextes de mobilité (statique, moyenne, élevée)

a) Comparaison globale du débit :

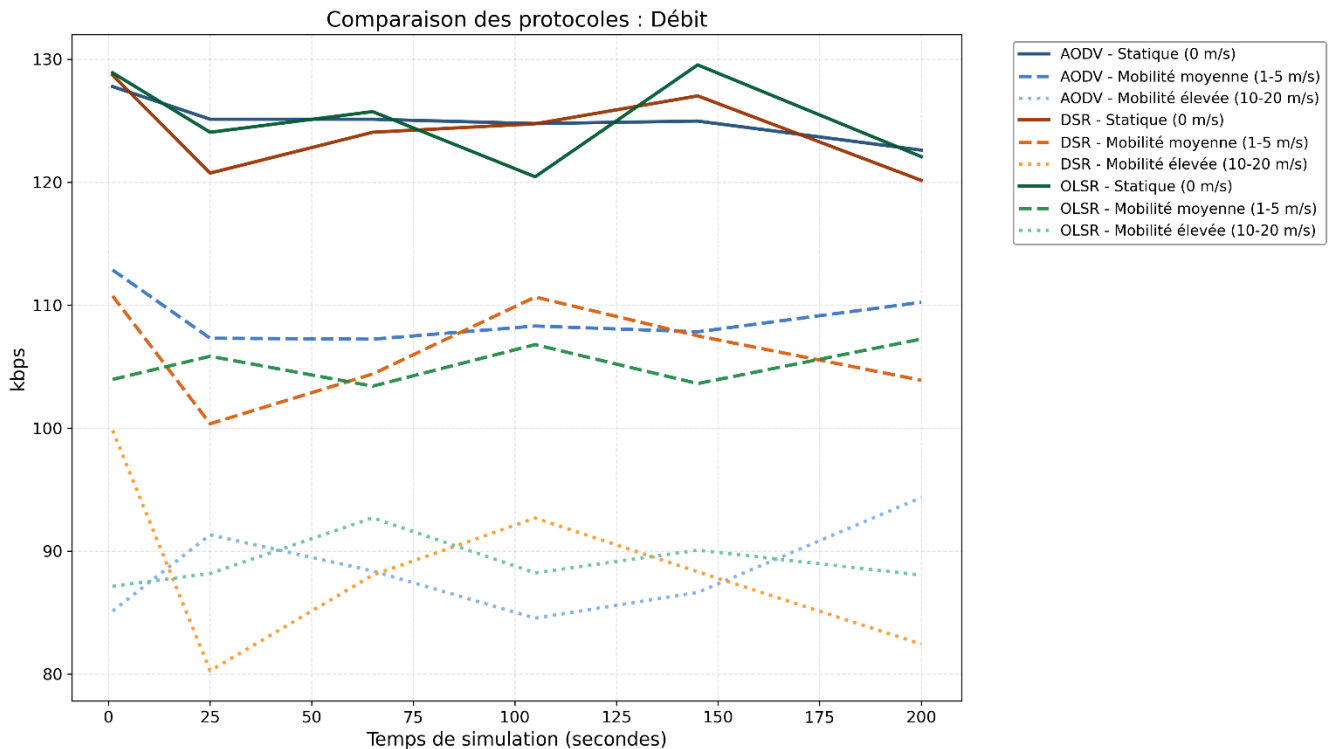


Figure V.1 : Comparaison du débit (kbps) pour les protocoles dans trois scénarios de mobilité

Le graphe montre que OLSR atteint les meilleurs débits en environnement **statique**, grâce à sa nature proactive, mais perd en efficacité en **mobilité élevée** à cause de sa surcharge de contrôle. AODV maintient un débit **stable** en **mobilité modérée**, tandis que DSR reste en retrait, avec un débit globalement **plus faible** et plus instable à mesure que la mobilité augmente.

b) Comparaison globale du délai :

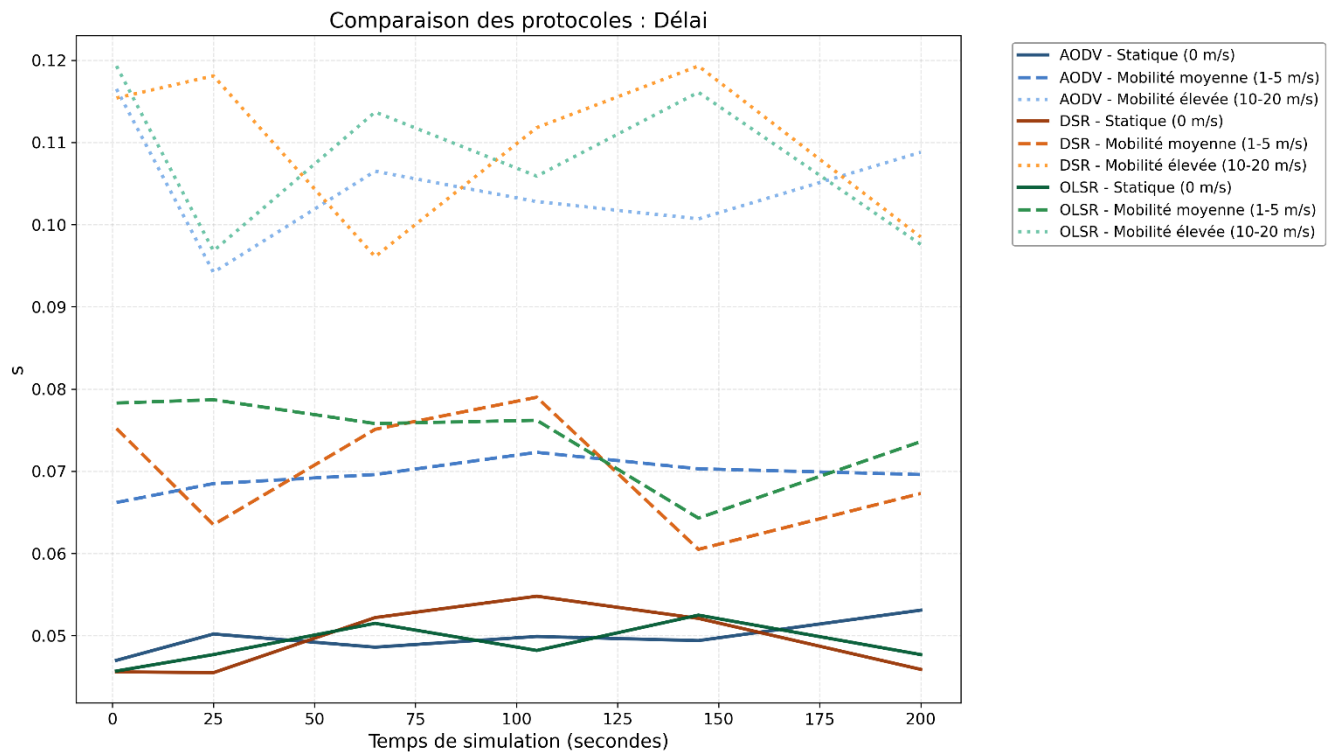


Figure V.2 : Évolution du délai moyen (s) pour AODV, DSR et OLSR selon le niveau de mobilité.

Le diagramme comparatif du délai moyen indique que la mobilité a un impact considérable sur le temps requis pour transmettre les paquets. Dans des conditions statiques, les trois protocoles – DSR, OLSR et AODV – présentent des latences assez faibles et constantes, avec une légère préférence pour DSR. En termes de mobilité moyenne, AODV maintient un retard modeste, alors que OLSR et DSR montrent une petite augmentation.

Dans un contexte de mobilité élevée, le temps de latence s'accroît considérablement pour tous les protocoles, en particulier pour OLSR et DSR, atteignant des niveaux avoisinant les 0.12 secondes. Ceci est dû à l'augmentation de la fréquence des déconnexions, entraînant des rétablissements de liaisons plus fréquents et par conséquent des retards additionnels dans la transmission des paquets. Malgré un temps de réponse globalement plus stable, AODV, grâce à son procédé réactif de recherche de chemin, réussit à mieux gérer ces interruptions. Par conséquent, on remarque que l'augmentation de la mobilité entraîne une prolongation du délai, à cause de l'instabilité topologique et du temps requis pour la re-configuration du réseau. Ce comportement met en évidence la nécessité d'un protocole capable de répondre avec efficacité aux modifications rapides de la topologie dans des contextes mobiles.

c) Comparaison globale de la latence :

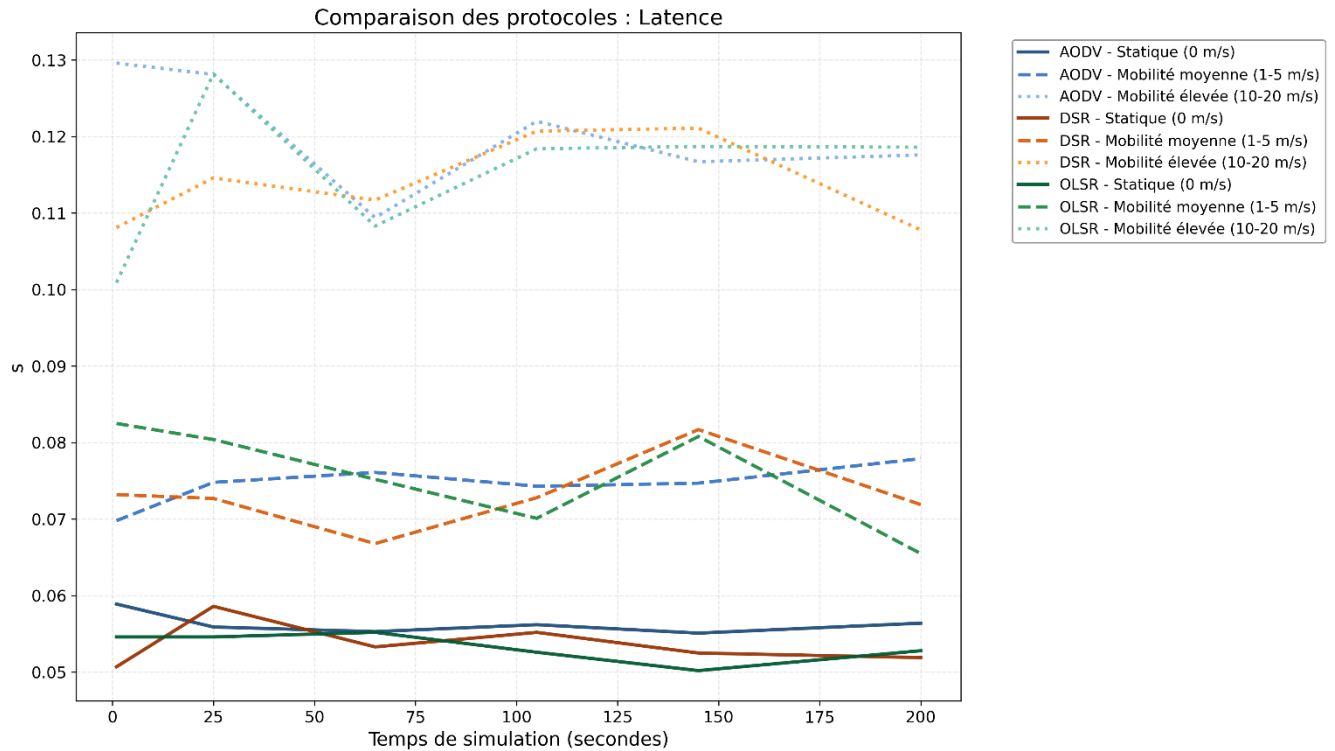


Figure V.3 : Latence totale (s) pour les trois protocoles dans des conditions de mobilité

La latence suit la même logique que le délai. **AODV conserve une latence stable en mobilité modérée, DSR subit des pics importants en forte mobilité, et OLSR montre des fluctuations fréquentes** liées à son fonctionnement proactif.

Plus la mobilité augmente, plus la latence semble se détériorer pour l'ensemble des protocoles. Ceci est attribué à l'augmentation fréquente des modifications de topologie, qui entrave les itinéraires de routage et provoque des retards supplémentaires pour établir des parcours stables.

d) Comparaison globale du taux de perte de paquets :

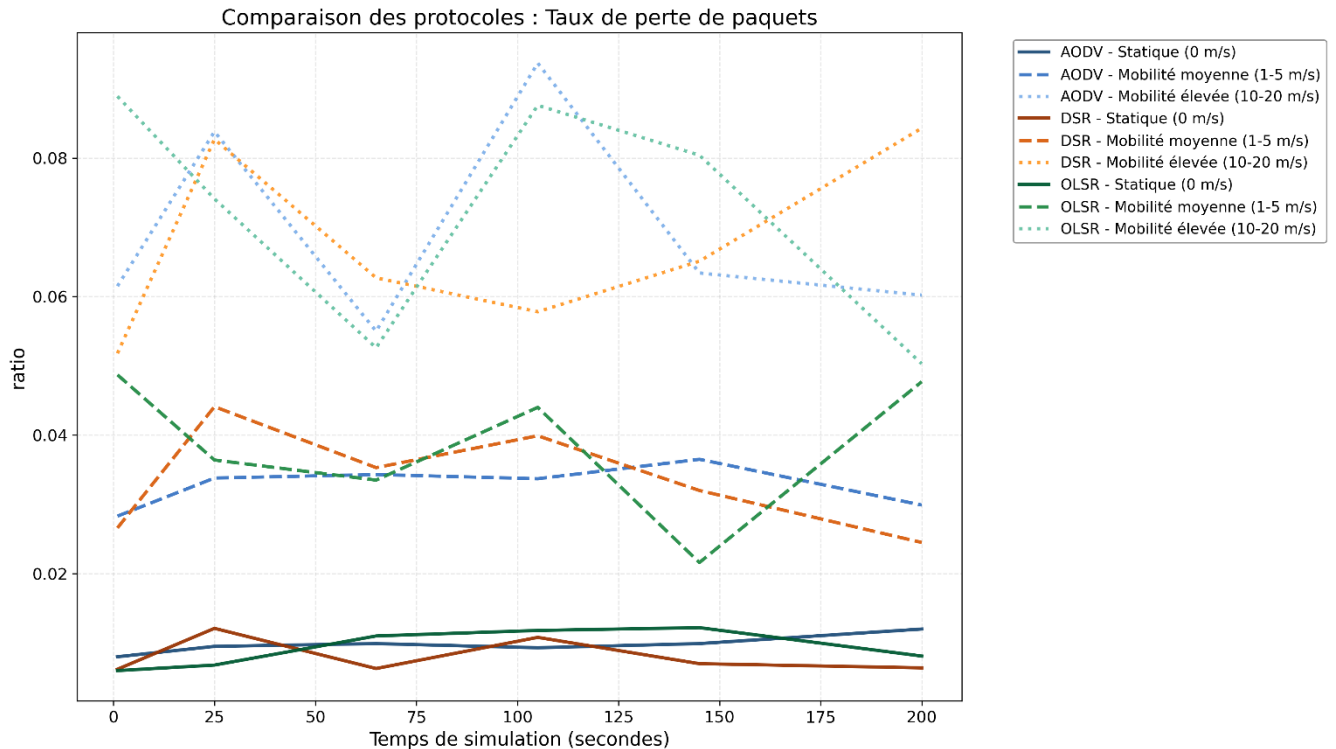


Figure V.4 : Taux de perte de paquets dans les trois contextes de mobilité.

Le graphe du taux de perte de paquets montre que la mobilité a un impact direct sur l'efficacité des protocoles de routage. Dans des conditions statiques, DSR, OLSR et AODV présentent une faible perte en raison de la constance des liaisons. En termes de performance en mobilité, DSR continue d'être efficace, AODV demeure stable, alors qu'OLSR commence à montrer des signes de dégradation. En situation de mobilité élevée, tous les protocoles voient une augmentation significative du taux de perte, particulièrement OLSR et DSR. Cette détérioration est causée par les interruptions fréquentes de connexions, qui rendent les routes obsolètes et entraînent la perte de paquets avant leur réacheminement. AODV, grâce à sa capacité de recherche de routes à la demande, est plus apte à s'ajuster aux changements rapides. En résumé, plus la mobilité augmente, plus le taux de perte s'élève, soulignant l'importance de choisir un protocole adapté à la dynamique du réseau.

Conclusion générale :

L'étude a montré que le choix du protocole de routage dépend fortement à la fois de la mobilité du réseau et des métriques de performance prioritaires pour l'application. AODV apparaît comme le plus équilibré, notamment en mobilité modérée, en offrant de bonnes performances globales. OLSR, protocole proactif, est particulièrement efficace en environnement statique grâce à son débit élevé, mais il devient moins stable lorsque la topologie change fréquemment. DSR, bien que souvent instable, peut offrir un délai réduit en haute mobilité grâce à son routage par la source. Ainsi, si l'objectif est de minimiser le délai, DSR peut être plus adapté ; si le débit est prioritaire, OLSR constitue un meilleur choix ; et si l'on cherche un compromis global, notamment en mobilité moyenne, AODV s'impose comme le plus robuste. Aucun protocole n'est universellement optimal : le choix doit donc être fait en fonction des contraintes de mobilité et des exigences spécifiques (latence, fiabilité, débit, ou consommation énergétique) du réseau ciblé.

V.3. Perspectives et améliorations :

Pour aller au-delà des résultats actuels, plusieurs axes d'amélioration sont envisagés :

V.3.1. Intégration d'autres protocoles de routage (ZRP) :

En plus des protocoles de routage proactifs et réactifs, il existe une famille de protocole de routage qui est une combinaison des deux précédents et est dite 'hybrides' par exemple ZRP (the Zone Routing Protocol).

Le ZRP fait appel à deux protocoles distincts : un protocole proactif (IARP) (IntrAzone Routing Protocol). Destiné à gérer les nœuds dans une zone déterminée par un nombre de sauts, et un protocole réactif (IERP) (IntErzone Routing Protocol) conçu pour la connexion aux nœuds en dehors de cette zone. Les paquets de contrôle proactifs ont une longévité exprimée en nombre de sauts, restreignant ainsi leur propagation au sein de la zone. Un troisième protocole gère les transitions entre les deux précédents : le protocole BRP (Border Resolution Protocol). [15]

V.3.2. Intégration d'autres protocoles de routage (DYMO) :

DYMO (Dynamic MANET On-demand) représente une version améliorée du protocole AODV, plus facile à mettre en œuvre et conçue pour les réseaux mobiles à multi-sauts. Il s'occupe de la découverte et de l'entretien des routes à la demande, avec une gestion du routage simpliste, parfaitement adapté aux appareils disposant d'une mémoire restreinte. DYMO est adapté aux réseaux à faible densité de trafic et peut opérer à divers niveaux du réseau avec une surcharge de contrôle sous contrôle. Elle offre une bonne capacité d'évolution, cependant certaines fonctionnalités méritent d'être perfectionnées.[16]

V.3.3. Prise en compte de l'impact énergétique :

Dans les réseaux ad hoc mobiles (MANETs), la consommation d'énergie est un facteur crucial du fait de la contrainte des ressources des nœuds, notamment en termes d'autonomie. Cette consommation est influencée par trois facteurs clés : la puissance de transmission, l'acheminement des données et la gestion énergétique.

- Puissance de transmission : Un niveau de puissance trop élevé entraîne une hausse des interférences et de la consommation d'énergie [17], alors qu'un niveau trop bas risque d'interrompre la connectivité [18]. L'objectif du contrôle de puissance est donc de trouver un équilibre pour préserver les connexions tout en réduisant au minimum l'énergie consommée. [19]
- Routage : Les protocoles de routage traditionnels utilisent généralement les algorithmes du chemin le plus court (en termes de nombre de sauts) sans tenir compte le problème d'énergie. Cela entraîne souvent un épuisement rapide de l'énergie. Plusieurs solutions ont été proposées pour utiliser l'énergie des nœuds d'une manière plus équilibrée : MPTR parmi les protocoles suggérés, réduit la puissance de transmission totale, MBCR et CMMBCR opèrent en fonction de l'énergie résiduelle des nœuds pour sélectionner les voies, alors que CBRP et LEACH font appel à une organisation en clusters hiérarchique pour diminuer les transmissions et économiser de l'énergie. Ces procédures cherchent à optimiser l'efficacité énergétique tout en préservant la connectivité du réseau.[20].

-
- Gestion d'énergie : Pendant les phases de non-utilisation, les interfaces radio gaspillent de l'énergie. Des dispositifs tels que le mode sommeil (PSM) ou les protocoles adaptatifs (GAF, EASRP) offrent la possibilité de désactiver les nœuds inutilisés tout en préservant la couverture du réseau [21].

En conclure qu'une gestion inefficace de l'énergie dans les MANETs peut provoquer une interruption de la connectivité, une réduction de la longévité du réseau et un affaiblissement général des performances. C'est pour cette raison que les protocoles contemporains prennent de plus en plus en compte l'aspect énergétique comme critère de prise de décision.

Conclusion :

Ce chapitre a récapitulé les performances des protocoles AODV, DSR et OLSR selon différents niveaux de mobilité dans les MANETs, en montrant que la mobilité dégrade globalement la qualité du routage. On a aussi proposé plusieurs pistes d'amélioration, notamment l'étude de nouveaux protocoles, et l'intégration de la consommation énergétique. Ces perspectives visent à adapter les MANETs aux besoins des applications modernes et critiques.

Conclusion générale

Dans notre travail on a examiné les protocoles de routage AODV, OLSR et DSR dans le cadre des réseaux mobiles ad hoc (MANETs), en se concentrant spécifiquement sur l'effet de la mobilité des nœuds. En utilisant le simulateur NS-3 pour des simulations, nous avons jugé l'efficacité de ces protocoles en nous basant sur trois situations de mobilité : statique (sans mobilité), mobilité modérée et mobilité élevée. Les métriques choisis sont latence, débit, délai global et taux de pertes de paquets ont fourni une image précise des comportements des protocoles en question.

Les conclusions indiquent qu'OLSR, en tant que protocole proactif, donne de bons résultats dans un environnement stable, avec une faible latence et un bon taux de transfert de données. Cependant, son efficacité diminue lorsque la mobilité augmente à cause du surcroît de travail lié aux mises à jour fréquentes. Le protocole AODV, qui est réactif par nature, s'ajuste de manière optimale aux environnements dynamiques tout en préservant une balance satisfaisante entre latence et niveau de perte. Quant au DSR, il montre des performances inégales, ayant une latence accrue en situation de mobilité élevée, à cause du surcoût lié à l'en-tête des paquets.

Pour résumer, la sélection du protocole de routage dans un MANET repose largement sur le contexte mobile et les priorités du réseau. Cette recherche met en évidence la nécessité d'ajuster le protocole en fonction des conditions du réseau afin d'assurer une communication efficace. Les projections futures envisagent l'incorporation de l'impact énergétiques et la modélisation de scénarios plus sophistiqués afin de fournir une analyse encore plus détaillée.

Bibliographie

- [1] Julien Haillot. Définition et validation d'un modèle de communication supportant la communication basée contenus dans les réseaux mobiles ad hoc discontinus. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Bretagne Sud, 2010. Français.
- [2] Ait Ali Kahina, Modélisation Et Etude De Performances Dans Les Réseaux VANET. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 16 /10/ 2012.
- [3] R. Meraihi ; "Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux ad hoc" ; Thèse de doctorat, École nationale supérieure des télécommunications, Paris, 2004.
- [4] <https://definir-tech.com/vecteur-de-distance-a-la-demande-ad-hoc-aodv/>
- [5] IEEE 802.11 WG: IEEE Std 802.11-1999, Part 11, Wireless LAN MAC and physical layer specifications. Reference number ISO/IEC 8802-11:1999 (E), (1999).
- [6] Pravin Bhagwat Charles E.Perkins.Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing(dsdv) for mobile computers.ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 24, 1999.
- [7] M. Dawoud. *Analyse du protocole AODV*. Université Paul sabatier, 2006.
- [8] A. Qayyum, L. Viennot, A. Laouiti. Multipoint relaying: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks. 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'2001).
- [9] P. S. Padmalaya Nayak, «Analysis of Random Way Point and Random Walk Mobility Model for Reactive,» December 2015. [En ligne]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309438065>.
- [10] BOUKHECHEM Nadhir , thèse magister , « Routage Dans Les Reseauxmobiles Ad Hoc Par Une Approche A Base D'agents »,2008.

- [11] Sedrati Maamar, Aouragh Lamia, Guettala Leila, Bilami Azeddine , « Etude des Performances des Protocoles de Routage dans les Réseaux Mobiles Ad-Hoc », 2007.
- [12] A. ABDULALLI, Réseaux ad-hoc : Etude des modèles de mobilité et de protocoles de routage, UVHC, 12/12/2008, p. 38.
- [13] Charles E. Perkins. *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley, 2001. ISBN :0201309769.
- [14] Abdelmajid Hajami ,thèse doctorat, « sécurité de routage dans les réseaux sans fil spontanées : cas du protocole OLSR »,2011
- [15] Jean-Pierre CHANET, « Algorithme de routage coopératif à qualité de service pour des réseaux ad hoc agri- environnementaux », Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR D'université Blaise Pascal - Clermont II, 20 avril 2007.
- [16] I. Chakeres and C. Perkins, "Dynamic MANET On-demand (DYMO) Routing draft-ietfmanetdymo-17" Internet Engineering Task Force, Mar. 2009. [Online]. Available:
- [17] Piyush Gupta et Panganmala R Kumar. « The capacity of wireless networks ». In : IEEE Transactions on information theory 46.2 (2000), p. 388-404.
- [18] Yurong Chen, Emin Gün Sirer et Stephen B Wicker. « On selection of optimal transmission power for ad hoc networks ». In : 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. Proceedings of the. IEEE. 2003, 10-pp.
- [19] Wing Ho Yuen et Chi Wan Sung. «On energy efficiency and network connectivity of mobile ad hoc networks ». In : 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. IEEE. 2003, p. 38-45.
- [20] Mingliang Jiang. « Cluster Based Routing Protocol (CBRP)(INTERNET-DRAFT draft-ietf-manet-cbrp-spec-01. txt) ». In : National University of Singapore (1999), p. 1-27.
- [21] Daji Qiao et Kang G Shin. « Smart power-saving mode for IEEE 802.11 wireless LANs».In: Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. T. 3. IEEE. 2005, p. 1573-1583.

- [22] Khadidja AYAD, Sécurité du routage dans les réseaux Ad Hoc mobile, Thème de MAGISTER Option : Informatique Répartie et Mobile, 14 /11/ 2012.
- [23] M elle BESSAIH Aldja M me BOUCHAKEL Siham."Routage et simulation dans les réseaux mobiles ad hoc", 2017, Université A/Mira de Béjaia.
- [24] Melle. Saloua CHETTIBI ; "Protocole de routage avec prise en compte de la consommation d'énergie pour les réseaux mobile Ad Hoc". Université Mentouri Constantine, 2008.
- [25] Fatima AMEZA."Les technologies sans fil: Le routage dans les réseaux ad hoc (OLSR et AODV)", Licence 2007.
- [26] What is ns-3, « <https://www.nsnam.org/about/what-is-ns-3/>»
- [27] BACCOUR SELLAMI Nouha « Conception d'une nouvelle staratigie de routage dynamique pour les réseaux mobile Ad Hoc», Université de Sfax juin 2006 - I 'École Nationale d'Ingé-
nieurs de Sfax-
- [28] M. Ilyas, The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks", USA, CRC Press, 2003.
- [29] M. B. K. Y. Lisa., Evaluation des protocoles de routage, TIZI-OUZOU, FACULTE DE GENIE
ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE, 2012/2013.
- [30] P. M. UHLETHALER, Routage dans les Réseaux Ad hoc, 2008.
- [31] A. N. Thakare et M. M. Y. Joshi, Performance Analysis of AODV & DSR Routing Protocol in,
Nagpur, Department of Computer Science & Engineering,, 2010.
- [32] B. Nadhir, ROUTAGE DANS LES RESEauxMOBILES AD HOC, constantine, Faculté des
sciences et science de l'ingénieur, 25 / 06 / 2008.