



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique.

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Télécommunications.

Spécialité : Systèmes des Télécommunications.

Réalisé par :

ZIREG Tahar

Et

BOUAOUD Idir

Thème

Routage d'information dans les réseaux Véhiculaires (VANET)

Soutenu le : 02/07/2023

Devant la commission composée de :

Mr: SAIDI Mohammed.	M.A.A	Univ. Bouira	Président
Mr: SAOUD Bilal.	M.C.A	Univ. Bouira	Rapporteur
Mr: MEDJEDOUB Smail.	M.A.A	Univ. Bouira	Examineur



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... تيسير طاهر.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 400 776 673.....والصادرة بتاريخ 2022/02/28

المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم: الهندسة
الكهربائية.....

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Régulation d'information dans
les réseaux Véhiculaires (VANETS)

تحت إشراف الأستاذ(ة): مسعود بلال

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/07/04

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



% 08

النسبة: itin

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) موسى عيسى الصفة: طالب، استاذ، باحث
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 117885000 والصادرة بتاريخ 2020/01/25
المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية قسم: الهندسة
الكهربائية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Recherche en information dans
les réseaux véhiculaires (VANET)

تحت إشراف الأستاذ(ة): موسى عيسى
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/07/04

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:



% 08

النسبة: itin

الامضاء:

Résumé :

Parmi les applications du réseau ad hoc, nous avons le réseau ad hoc véhiculaire (VANET), qui est un domaine de recherche important aujourd'hui. VANET peut améliorer l'efficacité routière afin de surmonter de nombreux problèmes et d'offrir plus de services au client. Par exemple, VANET peut réduire les embouteillages ou améliorer la sécurité routière en minimisant les accidents de véhicules. Comme tout réseau sans fil sans infrastructure, la tâche de routage est la plus difficile, surtout lorsque les nœuds sont mobiles. La mobilité des nœuds, qui sont des véhicules dans VANET, provoque un changement rapide de la topologie du réseau mener à la déconnexion entre les nœuds source et destination. Dans ce travail, nous analyserons certains protocoles de routage afin d'évaluer leurs performances. Dans cette étude, nous avons proposé quelques scénarios de protocoles de routage VANET. La simulation a été faite sur le simulateur NS3 et SUMO. La simulation prouve que le protocole de routage a un impact énorme sur les performances du réseau VANET.

Mots clé : VANET, Simulation, NS3, SUMO, Routage, AODV, DSDV, GPSR, OLSR

Remerciements

Nous adressons en premier lieu notre reconnaissance à notre DIEU (Allah) tout puissant, car sans lui rien n'est possible.

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadrant de mémoire Dr. ING. SAOUD Bilal, maitre de conférences à l'université de Bouira pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, la guidance qu'il nous a apporté pendant la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Nous tenons ensuite à remercier MR. BALOUL Fahim ingénieur à Algérie Télécom et toute l'équipe de CMRA BOUIRA, ainsi que MR. YAKOUBI et Mme MERZOUK des techniciens supérieurs à SONELGAZ pour leur aide et leur accueil et générosité durant la durée nos stages pratique.

Nos remerciements sont destinés aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous nos enseignants et les membres du département de génie électrique d'université AKLI MOHAND OULHADJE BOUIRA.

Dédicace 1

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire

" Alhamdulillah "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère.

À mon père, l'école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les garde et les protège.

À mes deux frères et ma sœur.

À mes amies : Idir, Khalil (weld khaliuuuu), El Bouth, EL Belda, Soulef et Youssra.

À tous ceux et celle qui m'ont aidé de près ou de loin.

TAAAR

Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère et mon cher père, pour leur soutien et tous les efforts qu'on m'a donnés le long de mon parcours.

Que dieu me les Garde.

Je dédie ce travail aussi

À mes très chers frères.

À tous les membres de ma famille.

À tous mes amis.

À mon cher ami TAHAR.

Je leurs souhaite de succès dans leurs vies. À tous Les amis de ma promotion Télécom.

À tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin.

TD9R

Table des matières

Liste des Figures	VII
Liste des Tableaux	VIII
Liste des abréviations.....	IX
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les réseaux VANETs, caractéristiques et architecture	
1.1. Introduction	3
1.2. Généralités sur les réseaux sans-fil	3
1.3. Classification des réseaux sans fils	3
1.3.1. Zone de couverture.....	3
1.3.2. Infrastructure.....	4
1.4. Réseaux Ad Hoc.....	5
1.4.1. Les réseaux de capteurs sans fils RCSF.....	5
1.4.2. Les caractéristiques des réseaux Ad Hoc	5
1.5. Les réseaux Véhiculaires Ad hoc (VANETs)	7
1.5.1. Historique.....	7
1.5.2. Nœud du réseau VANET	8
1.5.3. Systèmes de transport intelligents.....	8
1.5.4. Principaux composants	9
1.6. Les différentes modes de communication utilisée dans les réseaux VANETs	10
1.6.1. Communication directe entre véhicules V2V (Vehicle-to-Vehicle).....	10
1.6.2. Communication indirecte via des points d'accès fixes V2I (Vehicle-to-Infrastructure)	10
1.6.3. Le mode de communication I2I (inter-infrastructure)	10
1.6.4. La communication hybride, impliquant les deux V2V et V2I.....	11
1.6.5. La communication V2P	11
1.7. Caractéristiques des réseaux sans fil véhiculaires.....	12
1.8. Environnement de déploiement des véhicules	13
1.8.1. L'environnement urbain.....	14
1.8.2. L'environnement autoroutier	14
1.9. Applications des VANETs	14
1.9.1. Sécurité routière	14
1.9.2. Navigation et confort	15
1.10. Les différentes technologies de communication et de diffusion utilisé dans les VANETs.....	16

1.10.1.	Wi-Fi	17
1.10.2.	Bluetooth.....	17
1.10.3.	3G ET 4G LTE.....	18
1.10.4.	WiMAX	18
1.10.5.	Satellite.....	18
1.11.	Standardisation et normalisation dans un VANET	18
1.11.1.	DSRC (Dedicated Short-Range Communications).....	18
1.11.2.	WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) et IEEE 802.11p.....	19
1.11.3.	C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything)	19
1.12.	Les principaux problèmes des Réseaux VANET	19
1.12.1.	Routage	19
1.12.2.	La sécurité des données.....	20
1.12.3.	La fiabilité de la communication	20
1.12.4.	La gestion de la bande passante	20
1.12.5.	L'intégration avec d'autres technologies	20
1.13.	Projets de recherche dans le cadre des réseaux véhiculaires.....	20
1.14.	Conclusion.....	21

Chapitre 2 : Le routage dans les réseaux VANETs

2.1.	Introduction	22
2.2.	Routage.....	22
2.3.	Protocoles de routage dans les réseaux VANETs	22
2.3.1.	Protocoles basés sur la topologie	23
2.3.2.	Protocoles de routage à base la localisation géographique	31
2.3.3.	Protocoles de routage basés sur les clusters (groupes)	35
2.3.4.	Protocoles Géo-caste.....	37
2.3.5.	Protocoles Broad-caste.....	38
2.4.	Conclusion.....	39

Chapitre 3 : Simulations et Résultats

3.1.	Introduction	40
3.2.	Outils de simulation.....	40
3.2.1.	Sumo	40
3.2.2.	Simulateur réseaux Ns-2	41
3.2.3.	Opnet.....	41
3.2.4.	Omnet++	41
3.2.5.	J-sim	41
3.2.6.	Veins	42

3.2.7.	NCTUns	42
3.3.	Choix de simulateur.....	42
3.3.1.	Simulateur réseaux Ns3	42
3.4.	Modèles de propagation dans ns3	46
3.4.1.	Model de Friis	46
3.4.2.	Modèle Two Ray Ground	46
3.4.3.	Modèle Nakagami-m Fast Fading.....	47
3.5.	Métriques d'évaluation.....	47
3.5.1.	BSM_PDR	47
3.5.2.	MAC/PHY Overhead.....	47
3.5.3.	La moyenne de Débit utile (Average Goodput).....	48
3.6.	Simulations.....	48
3.6.1.	Simulation 1	49
3.6.2.	Simulation 2	52
3.6.3.	Simulation 3	54
3.7.	Conclusion.....	58
	Conclusion générale.....	59
	Bibliographie.....	60
	Annexe	64

Liste des Figures

Figure 1.1: Classification des réseaux sans-fils.	3
Figure 1.2: Exemple d'un réseau VANET.	7
Figure 1.3: Exemple de véhicule intelligente.	8
Figure 1.4: Les éléments de base d'un VANET.	10
Figure 1.5: Les modes de communication dans les VANETs.	12
Figure 1.6: Classification des Technologies de communication.	17
Figure 2.1: Propagation du paquet RREQ.	25
Figure 2.2: Chemin pris par RREP.	25
Figure 2.3: Format de paquet RREQ.	25
Figure 2.4: Format de paquet RREP.	26
Figure 2.5: Format de paquet RRER.	26
Figure 2.6: Découverte & maintenance de route.	27
Figure 2.7: RREP dans le protocole DSR.	27
Figure 2.8: Greedy Forwarding.	33
Figure 2.9: Périmètre Forwarding ou règle de la main droite.	34
Figure 2.10: Cluster-based routing protocol.	36
Figure 3.1: Les modules de NS3.	44
Figure 3.2: Le modèle Two-ray ground.	47
Figure 3.3: Analyse de débit pour une vitesse de 10m/s.	49
Figure 3.4: Analyse de MAC/PHY Overhead pour une vitesse de 10m/s.	50
Figure 3.5: L'analyse de BSM-PDR pour 30 véhicules.	50
Figure 3.6: L'analyse de BSM-PDR pour 50 véhicules.	51
Figure 3.7: L'analyse de BSM-PDR pour 70 véhicules.	51
Figure 3.8: Analyse de débit pour une vitesse de 15m/s.	52
Figure 3.9: Analyse de MAC/PHY Overhead pour une vitesse de 15m/s.	53
Figure 3.10: L'analyse de BSM_PDR pour 30 véhicules.	53
Figure 3.11: L'analyse de BSM_PDR pour 50 véhicules.	54
Figure 3.12: L'analyse de BSM_PDR pour 70 véhicules.	54
Figure 3.13: Analyse de débit pour une vitesse de 20m/s.	55
Figure 3.14: Analyse de MAC/PHY Overhead pour une vitesse de 20m/s.	55
Figure 3.15: L'analyse de BSM-PDR pour 30 véhicules.	56

Figure 3.16: L'analyse de BSM-PDR pour 50 véhicules.....	56
Figure 3.17: L'analyse de BSM-PDR pour 70 véhicules.....	57

Liste des Tableaux

Tableau 1.1: les applications du réseau VANET.	15
Tableau 1.2: Comparaison des technologies de communication.	17
Tableau 3.1: Les paramètres de simulation.	48
Tableau 3.2: Les résultats de toutes les simulations.....	57

Liste des abréviations

AODV : Ad-Hoc On- demand Distance Vector.

CBDRP : Cluster-Based Directional Routing Protocol.

CBLR : Cluster Based Location Routing.

DRG : Distributed Robust Geocast.

DSDV : Destination-Sequenced Distance-Vector.

DSR : Dynamic Source Routing.

DSRC : Dedicated Short Range Communications.

DTN : Delay Tolerant Network.

DVCAST : Distributed vehicular broadcast protocol.

EDGE : Enhanced Data for GSM Evolution.

GPS : Global Positioning System.

GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing.

GSR : Global State Routing.

GyTAR : Greedy Traffic Aware Routing protocol.

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IVG : Inter-Vehicle Geocast.

LTE : Long Term Evolution.

MANET : Mobile Ad hoc Net Work

MPR : Multi-Point Relaying.

NCTUns : National Chiao Tung University Network Simulator.

NS2 : Network Simulator 2.

NS3 : Network Simulator 3.

OBU : On-Board Unit.

OLSR : Optimized Link State ProtocolListe des abréviations.

OMNET++ : Objectif Modular Network Test-Bed.

OTCL : Object Tools Command Language.

RCSF : réseau de capteurs sans fil.

RERR : Route Error message.

RREP : Route Reply message.

RREQ : Route Request message.

RSU : Road Side Units.

ITS : Système de transport intelligent.

SUMO : Simulator of Urban Mobility.

TCP : Transmission Control Protocol

UDP : User Datagram Protocol.

UMB : Urban Multihop Broadcast Protocol.

V2I : vihecule to Infrastructure.

V2V : Vehicle to Vehicle.

VADD : Vehicle-Assisted Data Delivery.

VANET : Vehicular Ad-Hoc Network.

Veine : Vehicles in Network Simulator.

WAVE : Wireless Access in Vehicular Environment.

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

WiMax : World wide Interoperability for Microwave Access.

WSN : Wireless Sensor Network.

ZRP : Zone Routing Protocol.

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, la communication sans fil est très importante et peut être utilisée dans différents domaines. La communication sans fil a la capacité de résoudre de nombreux problèmes et de surmonter différents problèmes en raison de sa flexibilité et de sa mobilité [1] [2]. MANet (Mobile Ad Hoc Network) est un exemple de communication sans infrastructure. De nombreuses études ont été réalisées autour des réseaux Ad Hoc. Parmi les applications des réseaux Ad Hoc, on trouve le réseau Véhiculaire Ad Hoc (VANET). VANET a attiré beaucoup d'attention de la part des scientifiques au cours des dernières décennies. VANET peut permettre la communication et la transmission de données entre les véhicules, ce qui permet de partager différents types d'informations sur l'état des véhicules, des routes, du trafic, etc.

VANET peut être considéré comme un ensemble de nœuds mobiles, qui sont des véhicules, et certaines unités fixes (comme le bord de la route). Ces nœuds mobiles coopèrent pour assurer la communication et la transmission de données entre nœud source et nœud destination. Parmi les domaines de communication VANET, nous avons la communication véhicule à véhicule (V2V), la communication véhicule à infrastructure (V2I), la communication intra-infrastructure (I2I), la communication véhicule à capteur (V2S), le véhicule à appareil personnel communication (V2PD), communication d'infrastructure de réseau véhicule à réseau cellulaire (V2CN) [3]. De plus, on trouve également les communications Vehicle to Everything (V2X) basées sur l'émergence des réseaux cellulaires. VANET a été utilisé pour assurer différents services tels que les applications d'assistance à la conduite, la vidéo à la demande, etc. De plus, VANET améliore considérablement la sécurité par des messages d'avertissement afin d'éviter les accidents [3].

Le routage est une tâche difficile et est très important pour assurer la transmission des données. Les données peuvent être envoyées du nœud source aux nœuds de destination via de nombreux nœuds intermédiaires. L'établissement de routes entre le nœud source et les nœuds de destination a un impact énorme sur les performances de VANET telles que les paquets reçus, les erreurs, les ruptures de liaison, etc. Dans cette étude, certains protocoles de routage pour VANET ont été étudiés, analysés et évalués dans différents scénarios VANET. Nous avons proposé des scénarios de simulation afin d'étudier le comportement de ces protocoles de routage. Notre étude a été effectuée à l'aide le simulateur NS-3 et SUMO.

Ce mémoire se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des réseaux véhiculaires Ad Hoc VANETs, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs applications.

Le deuxième chapitre propose une présentation générale des protocoles de routage utilisés dans les réseaux VANETs. Nous détaillons leur fonctionnement ainsi que les stratégies utilisées pour acheminer les données entre les différents nœuds mobiles.

Enfin, dans le troisième chapitre, dans sa première partie nous présentons quelques simulateurs utilisés pour simuler les VANETs. La deuxième partie est consacrée pour l'interprétation et l'analyse des résultats de simulation.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale résumant les apports essentiels de ce mémoire.

Chapitre 1 :

*Les réseaux VANETs, caractéristiques et
architecture*

1.1. Introduction

VANET est un cas particulier de réseau sans fil multi-sauts, qui a la contrainte de changements rapides de topologie en raison de la forte mobilité des nœuds. Avec le nombre croissant des véhicules équipés de technologies informatiques et de dispositifs de communication sans fil. La communication inter véhicule devient un domaine prometteur de recherche, de normalisation et de développement. Les VANETs permettent un large éventail d'applications, telles que la prévention des collisions, la sécurité, le franchissement à l'aveugle, la planification dynamique des itinéraires, la surveillance en temps réel de l'état du trafic, etc. Une autre application importante des VANET est la fourniture de la connectivité Internet aux nœuds véhiculaires.

Dans ce chapitre nous allons introduire le domaine des VANETs. Nous allons commencer par quelles généralités et définitions. Ensuite, les caractéristiques des VANETs seront présentées. Le chapitre sera terminé avec quelques application du VANET.

1.2. Généralités sur les réseaux sans-fil

Un réseau sans fil est un réseau informatique qui relie différents machines ou systèmes en utilisant des ondes radio. Les réseaux sans fil peuvent être connectés à des réseaux de télécommunication pour permettre l'interconnexion des nœuds. Actuellement, la norme la plus couramment utilisée pour les réseaux sans fil est la norme IEEE802.11 (WI-FI) [1].

Les réseaux sans fil permettent aux utilisateurs de rester connectés tout en se déplaçant dans une zone géographique plus ou moins étendue.

1.3. Classification des réseaux sans fils

Les réseaux sans fil peuvent être classés selon deux critères : la zone de couverture du réseau (qui peut être personnel, local, métropolitain ou étendu) et l'infrastructure et le modèle adopté (qui peuvent être avec ou sans infrastructure).

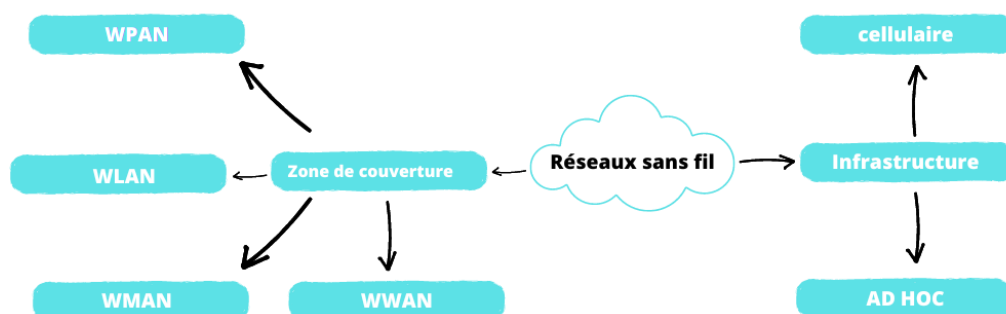


Figure 1.1: Classification des réseaux sans-fils.

1.3.1. Zone de couverture

On peut classer les réseaux sans fils en quatre types par la zone de couverture [2].

➤ **Réseaux personnels sans fil (WPAN) :** Wireless Personal Area Network (WPAN) ou

Les réseaux personnels sans fil ou sont des réseaux à courte portée, généralement limités à environ 10 mètres. Ils sont souvent utilisés pour connecter des équipements personnels tels que les écouteurs et un téléphone portable, ainsi que pour relier des appareils informatiques tels qu'une imprimante, un clavier ou une souris à un ordinateur, ou pour permettre la communication entre deux machines très proches.

➤ **Réseaux locaux sans fil (WLAN) :** ont une portée plus grande que les réseaux

personnels et sont utilisés principalement à l'intérieur d'une entreprise, d'une université ou chez les particuliers. Ils offrent une plus grande flexibilité et une meilleure mobilité que les réseaux filaires traditionnels, car les utilisateurs peuvent se déplacer librement tout en restant connectés au réseau.

➤ **Réseaux métropolitains sans fil (WMAN) :** couvrent une zone géographique plus

large, telle qu'une ville entière (environs 50 km). Ces réseaux sont souvent utilisés pour fournir un accès à Internet dans les zones urbaines. Les réseaux WMAN généralement utilisent la norme IEEE 802.16 avec un débit peut atteindre 74 Mbit/s pour la norme IEEE 802.16-2004, également connue sous le nom commercial de WiMax.

➤ **Réseaux sans fil étendus (WWAN) :** ont une portée encore plus grande que les

réseaux métropolitains et couvrent souvent des zones géographiques étendues, telles que des pays entiers. Les réseaux cellulaires tels que 3G, 4G et 5G sont des exemples de réseaux WWAN.

1.3.2. Infrastructure

Le critère de la zone de couverture peut également être utilisé pour distinguer les différents types de réseaux sans fil en fonction de leur infrastructure. On peut classifier les réseaux sans fil en deux catégories principales : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure [2].

1.3.2.1. Les réseaux avec infrastructure

Les opérateurs de télécommunications fournissent des services de communication vocale et de données via des réseaux cellulaires, qui sont des réseaux sans fil basés sur une infrastructure qui reposent sur des stations de base fixes, communément appelées tours cellulaires. Des réseaux de liaison câblés relient ces tours, facilitant le transport du trafic des utilisateurs vers Internet ou d'autres réseaux. Les réseaux cellulaires utilisent des normes de communication normalisées pour assurer la compatibilité entre les différents fabricants d'appareils et les opérateurs de réseau. Offrant une couverture stable avec une qualité de service garantie, ces réseaux restent coûteux en raison du coût d'installation et de maintenance des tours cellulaires. Et les coûts de l'utilisation du réseau peuvent être élevés pour les utilisateurs finaux [2][3].

1.3.2.2. Les réseaux sans infrastructure

Les réseaux sans infrastructure sont également connus sous le nom de réseaux ad hoc ou « Peer-to-Peer » [3]. Dans ce type de réseau, chaque nœud dans le réseau peut communiquer directement avec tous les autres nœuds. Les réseaux ad hoc ne nécessitent pas de point d'accès centralisé, ce qui signifie qu'ils peuvent être utilisés dans des situations où une infrastructure de réseau n'est pas disponible ou n'est pas pratique, comme dans les environnements militaires, les zones rurales ou les événements en plein air.

1.4. Réseaux Ad Hoc

Les appareils d'un réseau ad hoc sont reliés entre eux directement, au lieu de passer par un point d'accès centralisé tel qu'un commutateur ou un routeur. Ce type de réseau informatique sans fil a un caractère décentralisé [1]. Dans ce genre des réseaux, la communication est directe entre tous les nœuds qui se trouvent dans la portée du réseau, ce qui permet de communiquer sans aucune infrastructure présente. Lorsque les réseaux d'infrastructure sont inexistantes, comme dans les interventions d'urgence, dans les régions militaires ou éloignées, des réseaux ad hoc entrent en jeu. Ces réseaux provisoires ou permanents permettent des applications, des services, des données et des fichiers partagés dans le réseau. Toutefois, ces réseaux peuvent imposer des risques de gestion et de sécurité en raison de l'absence d'un point d'accès central pour la gestion du réseau.

1.4.1. Les réseaux de capteurs sans fils RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN : Wireless Sensor Network) sont constitués de nœuds de capteurs, qui sont de petits appareils électroniques. Équipés de modules de communication, de processeurs et de capteurs, ces nœuds peuvent collecter une pléthore de données environnementales, notamment la lumière, la pression, la température et l'humidité [4]. Une fois collectées, les données peuvent être envoyées à un système de gestion ou à une station de base [1].

1.4.2. Les caractéristiques des réseaux Ad Hoc

Les VANETs ont été développés à base des réseaux Ad Hoc. Dans cette section nous allons illustrés quelques caractéristiques des réseaux Ad Hoc [5] :

Topologie dynamique (Mobilité)

Des modifications en temps réel de la structure de communication d'un réseau Ad Hoc, connues sous le nom de topologie dynamique, peuvent être apportées en réponse à divers facteurs d'environnement réseau tels que les arrivées ou les départs de nœuds, les obstacles physiques ou les différences de puissance de transmission. Cette fonctionnalité adaptative est facilitée par la nature distribuée des réseaux Ad Hoc qui permet à chaque nœud de fonctionner comme un canal de communication direct avec les autres dans le réseau [6].

Absence d'infrastructure

Dans les réseaux ad hoc, l'absence d'infrastructure se réfère au fait qu'il n'y a pas de point d'accès centralisé ou de serveur dédié pour gérer les communications entre les nœuds. Au lieu de cela, chaque nœud est capable d'agir comme un routeur, en relaient les messages et en participant à la transmission de données dans le réseau. Cette absence d'infrastructure permet une grande flexibilité et une grande résilience dans les réseaux Ad Hoc.

Vulnérabilité (Une sécurité physique limitée)

La vulnérabilité dans les réseaux Ad Hoc fait référence à la capacité des nœuds à être exploités par des attaquants malveillants pour perturber le fonctionnement du réseau. Cette vulnérabilité est due à la nature ouverte et non sécurisée des réseaux Ad Hoc, qui permettent à tout nœud de rejoindre le réseau sans authentification préalable et de communiquer avec d'autres nœuds [3].

Liaisons sans fil (Une bande passante limitée)

Les réseaux Ad Hoc sont des réseaux sans fil où les nœuds communiquent directement entre eux sans l'aide d'une infrastructure centrale. Les liaisons sans fil dans ces réseaux sont généralement basées sur une bande passante limitée et peuvent être sujettes à des interférences et des perturbations, entraînant une diminution de la qualité de service et de la fiabilité de la communication. En outre, les liens sans fil peuvent être instables en raison des mouvements des nœuds, des obstacles physiques ou des interférences électromagnétiques, ce qui peut entraîner des coupures de communication temporaires ou permanentes. Pour faire face à ces limitations, des techniques de gestion de bande passante, de routage et de contrôle de congestion doivent être mises en œuvre pour assurer une communication efficace et fiable dans les réseaux Ad Hoc.

Autonomie des nœuds

L'autonomie des nœuds dans les réseaux Ad Hoc fait référence à leur capacité à fonctionner indépendamment les uns des autres, sans aucune structure de contrôle centrale ou infrastructure de réseau prédéfinie. Les nœuds dans un réseau Ad Hoc doivent être autonomes pour pouvoir prendre des décisions en temps réel en fonction de l'environnement changeant du réseau et des conditions de communication. Cette autonomie est rendue possible par la capacité des nœuds à configurer dynamiquement les paramètres de réseau, à maintenir des connexions avec d'autres nœuds, à router les données vers leur destination et à ajuster leurs transmissions de données en fonction des conditions de réseau.

Les contraintes énergétiques

Dans les réseaux ad hoc, les contraintes énergétiques font référence aux limitations de l'énergie des nœuds du réseau. Étant donné que les nœuds sont généralement alimentés par batterie et que le

remplacement de la batterie peut être difficile, voire impossible. Il est crucial de gérer efficacement l'utilisation de l'énergie pour prolonger la durée de vie du réseau. Les contraintes énergétiques peuvent avoir un impact sur la capacité de transmission des nœuds, la qualité de service du réseau, la couverture du réseau, la sécurité du réseau et la tolérance aux pannes.

1.5. Les réseaux Véhiculaires Ad hoc (VANETs)

Un réseau véhiculaire Ad Hoc est un réseau de communication entre véhicules intelligents (VANET) comprend un groupe de véhicules mobiles ou stationnaires connectés par un réseau sans fil. Ces véhicules sont équipés par des calculateurs, périphériques réseau et de différents types de capteurs. VANET est une partie de la famille des réseaux mobiles MANET. Les VANET jouent un rôle essentiel dans la sécurité et le confort des conducteurs dans les environnements de véhicules. Ils fournissent un contrôle intelligent du trafic et des informations en temps réel, l'attribution d'événements [7]. La figure suivante montre un exemple du VANET.

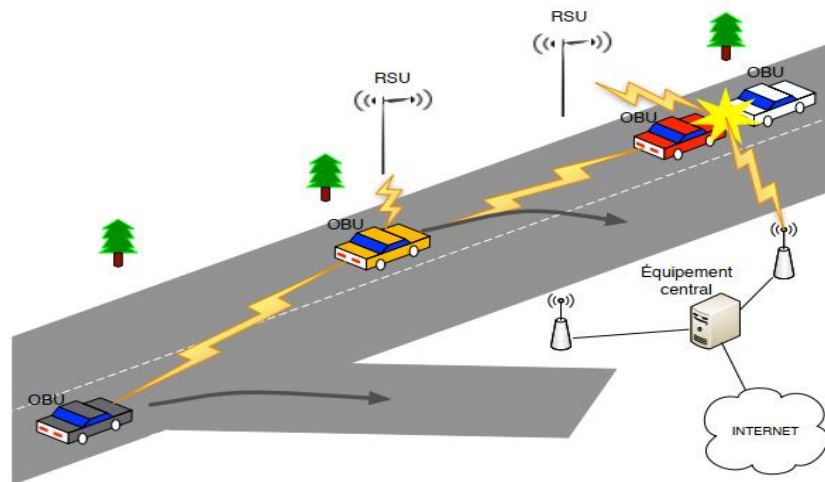


Figure 1.2: Exemple d'un réseau VANET.

1.5.1. Historique

Au début des années 1980, les premières études avec la communication entre les véhicules et l'infrastructure ont été réalisées au Japon à travers le projet JSK (Abbréviation japonaise pour "Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving") [3]. Les recherches sur ces réseaux ont véritablement pris leur essor au début des années 2000 avec la création de projets comme le projet européen « CarTalk 2000 » qui tentait d'aborder les problématiques liées à la sécurité ou au confort des passagers par des véhicules communicants, « Advance Safety Vehicle 3 » en Japon, "Communication sur la sécurité des véhicules" Aux Etats-Unis [8].

Des conférences internationales ont ensuite été créées, rassemblant industriels et universitaires pour discuter de leurs projets. En Europe, plusieurs constructeurs automobiles se sont associés pour créer une association à but non lucratif dont l'objectif principal est d'améliorer la sécurité routière : « Car 2

Car Communication Consortium » (C2C-CC) [9]. L'organisation regroupe désormais un grand nombre de membres et coopère avec des organismes européens de certification et de normalisation pour développer le déploiement de réseaux de véhicules mobiles [8] [9].

L'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a publié la norme 802.11p, qui définit l'accès sans fil dans un environnement des réseaux VANET (WAVE) en 2009 [3][8]. Bientôt, les chercheurs se sont intéressés à un nouveau type d'adressage et de routage des paquets. Une méthode géographique appelée GeoCast basée sur les normes DSRC et IEEE 802.11 a été mise en œuvre au lieu d'utiliser la méthode IP pour fournir une communication sans fil multi-sauts sans l'aide d'une infrastructure. (Par rapport au système de positionnement global (GPS), qui nécessite un réseau de satellites [8].

1.5.2. Nœud du réseau VANET

Dans un réseau VANET (Vehicular Ad Hoc Network), un nœud est un dispositif de communication mobile qui peut être un véhicule, un piéton, un cycliste ou une infrastructure de réseau routier. Les nœuds émettent et reçoivent des messages à l'aide de la technologie sans fil pour communiquer entre eux. Chaque nœud peut également avoir des capacités de traitement et de stockage pour effectuer des tâches de routage et de traitement des données. Les nœuds du réseau VANET peuvent être équipés de capteurs pour collecter des données environnementales telles que la température, la pression atmosphérique, l'humidité, la qualité de l'air et d'autres informations. Les nœuds du réseau VANET peuvent coopérer pour améliorer l'efficacité et la sécurité du trafic routier en échangeant des informations en temps réel telles que la vitesse, la position, la direction et les événements de la route.

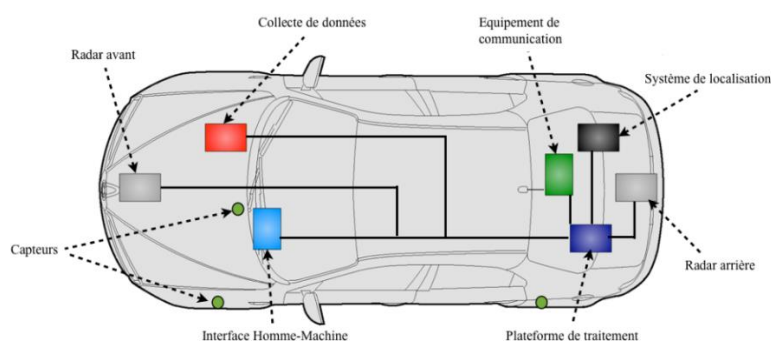


Figure 1.3: Exemple de véhicule intelligent.

1.5.3. Systèmes de transport intelligents

Le système de transport intelligent (ITS) est une application importante du réseau de véhicules intelligents (VANET) [10]. Le STI est un système qui utilise les technologies de l'information et de la communication pour améliorer la sécurité, l'efficacité et la qualité des transports. Les réseaux

VANET sont un élément clé des STI car ils permettent une communication en temps réel entre les véhicules et l'infrastructure routière, ainsi qu'entre les véhicules eux-mêmes.

Les ITS's dans les réseaux VANET offrent une gamme d'applications pour améliorer la sécurité [10], l'efficacité et la qualité du trafic. Ces systèmes permettent une communication en temps réel entre les véhicules et l'infrastructure routière, ainsi qu'entre les véhicules eux-mêmes, pour fournir des informations précises sur l'état des routes, les temps de trajet et les services de divertissement.

1.5.4. Principaux composants

➤ **Autorité Centrale (CA) :** Le CA joue le rôle d'un serveur qui assure la sécurité des différents services. C'est une source d'authenticité de l'information. Il assure la gestion et l'enregistrement de toutes les entités sur le réseau (RSU et OBU) [11] [12]. Il gère la délivrance des certificats, des clés de communication et le stockage de certaines données, et il connaît toutes les vraies identités des véhicules et au besoin les divulgue pour les forces de l'ordre [13].

➤ **Road Side Unit (RSUs) :** Dans VANET, Les RSU sont des entités situées et installées au bord de la route. Peuvent recueillir des données en temps réel auprès des véhicules, puis les transmettre aux centres d'information sur la circulation pour une analyse plus approfondie. De plus, les RSUs diffusent aux véhicules les renseignements importants qu'ils reçoivent des centres de gestion de la circulation. Ces messages contiennent des informations sur les conditions météorologiques, ainsi que sur l'état de la route (vitesse maximale, autorisation de dépassement, Feux de circulation et intersections etc.) [14]. Cependant, la communication avec un nombre énorme de véhicules circulant dans une grande ville exige le déploiement d'un grand nombre d'RSUs à différents endroits [15]. À cet égard, il faut adopter une stratégie de déploiement efficace des RSUs. Le défi consiste à [16] :

- ✓ Minimiser le nombre d'RSU autant que possible afin de réduire les coûts de déploiement.
- ✓ Maximiser le ratio de couverture.

➤ **On Board Unit (OBUs) :** L'OBU est une unité de communication sans fil installée dans un véhicule et est responsable du stockage des clés, du chiffrement et du déchiffrement de l'information, ainsi que de la communication avec l'RSU au moyen du protocole DSRC [15]. Les dispositifs de communication de portée permettant des communications ponctuelles entre les véhicules [17].

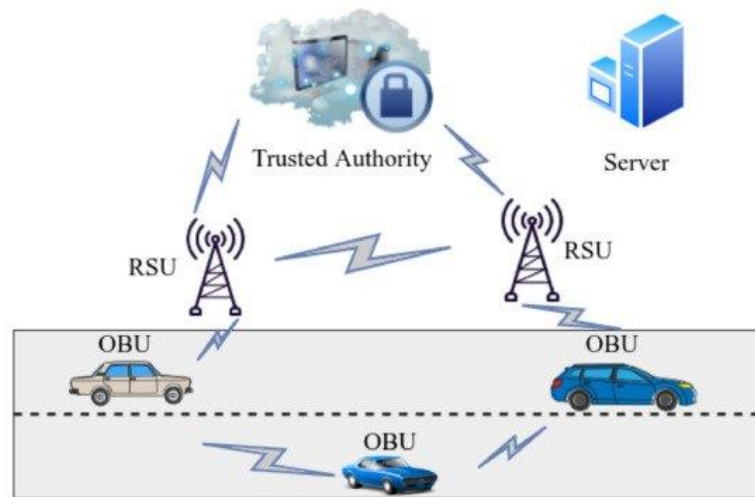


Figure 1.4: Les éléments de base d'un VANET.

1.6. Les différents modes de communication utilisés dans les réseaux VANETs

Les réseaux VANET sont des réseaux sans fil qui permettent à des véhicules de communiquer les uns avec les autres pour améliorer la sécurité, la performance du trafic, la qualité de service, etc. Il existe plusieurs modes de communication dans les réseaux VANET, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients. Les quatre principaux modes de communication pour les réseaux VANET sont [18] [19] :

1.6.1. Communication directe entre véhicules V2V (Vehicle-to-Vehicle)

Cette forme de communication permet à deux véhicules de communiquer entre eux directement sans l'aide d'une infrastructure tierce. Elle est utile pour transmettre des informations en temps réel telles que la vitesse, la direction et les conditions de conduite pour assurer la sécurité routière et permettre une prise de décision plus efficace.

1.6.2. Communication indirecte via des points d'accès fixes V2I (Vehicle-to-Infrastructure)

Ce mode de communication implique la transmission indirecte de données via des points d'accès fixes tels que les poteaux de signalisation, les caméras de surveillance, etc. Les données peuvent être transmises aux véhicules en temps réel pour des informations telles que les conditions de la route, les accidents, les travaux de construction, les conditions de circulation, les itinéraires, les stations de services et bien plus encore.

1.6.3. Le mode de communication I2I (inter-infrastructure)

Implique la communication entre infrastructures, telles que les routes, les feux de signalisation et les panneaux de signalisation. Cela permet aux informations provenant des capteurs en place sur ces infrastructures d'être partagées avec les véhicules environnants, offrant ainsi une meilleure visibilité sur les conditions de conduite. La communication I2I peut également être utilisée pour transmettre

des informations de navigation, telles que les itinéraires optimaux, les alertes de circulation et les informations de circulation en temps réel.

1.6.4. La communication hybride, impliquant les deux V2V et V2I

Ce mode de communication combine les avantages des modes V2V et V2I pour offrir une couverture plus étendue et une meilleure fiabilité. Les véhicules peuvent communiquer directement avec d'autres véhicules dans leur proche voisinage tout en transmettant des données à des points d'accès fixes pour une couverture plus étendue.

1.6.5. La communication V2P

La communication véhicule-piéton (V2P) est une forme de communication sans fil qui permet aux véhicules de communiquer avec les piétons ou les cyclistes dans leur environnement. Dans les réseaux VANET, la communication V2P est cruciale pour assurer la sécurité des piétons et des cyclistes dans les zones urbaines. Les véhicules équipés de dispositifs de communication sans fil peuvent utiliser des fréquences radio dédiées pour envoyer des messages de sécurité aux piétons et aux cyclistes, leur fournissant des informations sur la distance et la vitesse. Les piétons et les cyclistes peuvent également communiquer avec les véhicules pour signaler leur présence et leur intention de traverser la route. La communication V2P utilise des technologies de communication sans fil telles que le Wi-Fi, le Bluetooth et même les réseaux cellulaires pour transférer des informations sécurisées entre les différents participants sur la route. La communication V2P peut aider à prévenir les accidents entre les piétons, les cyclistes et les véhicules, en augmentant la conscience situationnelle des conducteurs et en fournissant une alerte précoce pour les situations dangereuses [10].

La figure suivante présente les différentes modes de communication dans les réseaux VANETs.

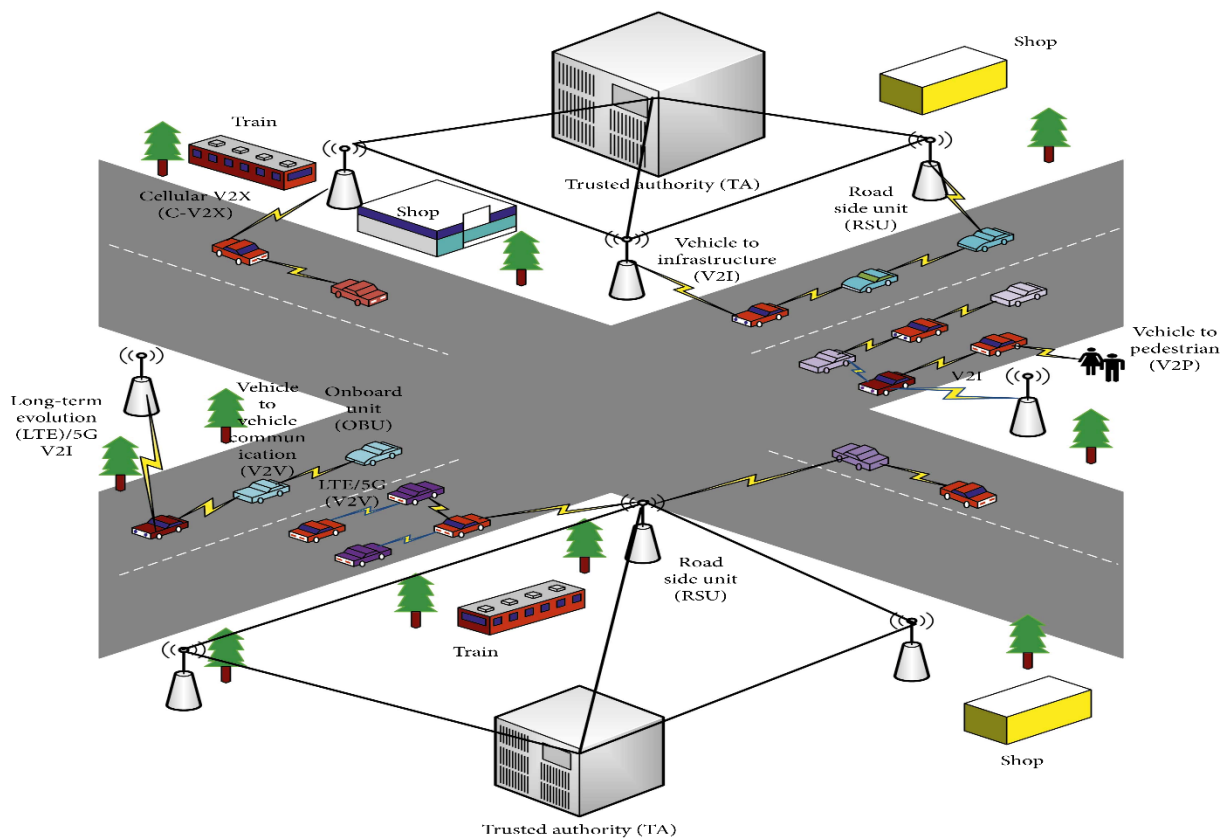


Figure 1.5: Les modes de communication dans les VANETs.

Les modes de communication dans les réseaux VANET sont sélectionnés en fonction des besoins et des caractéristiques de chaque application spécifique. Il est important de sélectionner le mode de communication approprié pour assurer une qualité de communication optimale et une sécurité maximale pour les usagers de la route.

1.7. Caractéristiques des réseaux sans fil véhiculaires

Les caractéristiques clés des VANETs incluent une infrastructure dynamique, une large couverture, une mobilité élevée et des temps de latence réduits. Les VANETs sont également conçus pour garantir la fiabilité, la sécurité et la confidentialité des communications entre les véhicules. Les réseaux VANETs sans fil peuvent être déployés sur différentes bandes de fréquences, notamment les bandes de fréquences dédiées aux applications de véhicules à grande vitesse et les bandes de fréquences dédiées aux communications à courtes distances [19] [20].

Les caractéristiques clés des réseaux sans fil véhiculaires sont les suivantes [19] [20] :

- **Mobilité élevée :** Les réseaux sans fil véhiculaires sont conçus pour gérer la mobilité élevée des véhicules sur les routes. Cela signifie que les nœuds de réseau sont en constante mouvement et doivent être capables de gérer des communications rapides et fiables.
- **Infrastructure dynamique :** Les VANETs sont considérés comme des réseaux sans fil dynamiques, car les nœuds sont en constante mouvement et les routes peuvent être fermées ou

bloquées à tout moment. Cela nécessite une adaptation en temps réel de la topologie du réseau pour maintenir la connectivité.

- **Large couverture :** Les réseaux sans fil véhiculaires doivent couvrir une large zone pour atteindre un grand nombre de véhicules. Cela peut impliquer l'utilisation de relais de communication pour étendre la portée du réseau.
- **Faible latence :** Les réseaux sans fil véhiculaires doivent fournir des informations en temps réel pour garantir la sécurité sur les routes. Pour cette raison, ils doivent avoir une latence très faible pour transmettre rapidement les informations critiques.
- **Fiabilité :** Les réseaux sans fil véhiculaires doivent être fiables pour garantir la sécurité des passagers et des autres usagers de la route. Les données transmises doivent être exactes et fiables pour permettre aux systèmes de prendre des décisions en temps réel.
- **Sécurité :** Les réseaux sans fil véhiculaires doivent être sécurisés pour empêcher les intrusions et garantir la confidentialité des données transmises. Cela peut inclure des mécanismes de cryptage pour protéger les données sensibles.
- **Scalabilité :** Les réseaux sans fil véhiculaires doivent être scalables pour s'adapter à l'augmentation du nombre de véhicules connectés. Cela peut impliquer l'ajout de nouveaux nœuds de réseau pour étendre la couverture du réseau.
- **Interopérabilité :** Les réseaux sans fil véhiculaires doivent être interopérables pour permettre la communication entre différents types de véhicules et d'infrastructures routières. Cela peut inclure des normes de communication pour garantir la compatibilité entre les différents systèmes.

1.8. Environnement de déploiement des véhicules

L'environnement de déploiement des véhicules dans les réseaux VANETs est un domaine en constante évolution. Les VANETs permettent la communication directe entre les véhicules et les infrastructures routières, ce qui permet une meilleure gestion du trafic, une amélioration de la sécurité routière et une augmentation du confort pour les conducteurs. Les VANETs peuvent être déployés dans des zones urbaines et rurales et sont considérés comme un moyen de développer l'Internet des Objets (IoT) pour les applications de la route. Selon les statistiques, le nombre de véhicules connectés est en constante augmentation. Les déploiements de VANETs sont en croissance dans de nombreux pays, notamment aux États-Unis, en Europe et en Asie. Les gouvernements et les industriels investissent dans les infrastructures de communication pour permettre une communication efficace entre les véhicules et les infrastructures routières, ce qui est considéré comme un pas important vers la réalisation d'un système de transport intelligent. De plus, les entreprises de technologie de l'information et de la communication (TIC) développent des technologies innovantes pour les VANETs, telles que la communication sans fil décentralisée, la communication par satellite, les

algorithmes de routage et les systèmes de positionnement. Les développements technologiques en matière de VANETs sont de plus en plus axés sur la sécurité, la fiabilité et la performance.

L'environnement de déploiement des véhicules dans les VANETs (Vehicular Ad-hoc Networks) peut être divisé en deux catégories principales [21] :

1.8.1. L'environnement urbain

Dans l'environnement urbain, les véhicules sont soumis à des conditions de circulation complexes, telles que des intersections, des changements de voie fréquents, des feux de signalisation et une circulation dense il exige une vitesse réduite jusqu'à un maximum de 50 km/h en ville. De plus, les immeubles et les obstacles peuvent interférer avec les signaux radios entre les véhicules, ce qui peut rendre difficile l'établissement de communications fiables.

1.8.2. L'environnement autoroutier

D'un autre côté, dans l'environnement autoroutier, les véhicules se déplacent à des vitesses plus élevées et sont soumis à des conditions de circulation plus simples, telles que des voies de circulation séparées, des distances de sécurité plus longues et des obstacles moins nombreux. Cependant, la couverture radio peut être interrompue en raison de l'existence d'obstacles tels que des collines et des tunnels.

Dans les deux environnements, les défis liés à la mise en œuvre des VANETs varient, ce qui peut influencer la qualité de l'expérience de communication pour les utilisateurs. Il est donc important de tenir compte de l'environnement de déploiement lors de la conception et de la mise en œuvre de VANETs pour assurer un fonctionnement optimal et une expérience utilisateur satisfaisante.

1.9. Applications des VANETs

Voici les applications courantes des réseaux de capteurs véhiculaires (VANETs) [10] [22] :

1.9.1. Sécurité routière

Les applications de sécurité routière incluent toutes les informations nécessaires relatives à la route. Les VANETs peuvent être utilisés pour renforcer la sécurité routière en transmettant des informations en temps réel sur les conditions de la route, les obstacles et les accidents [10] [19]. Les études ont montré que les technologies VANET telles que les avertissements de collision et les systèmes de navigation par véhicule peuvent réduire les accidents de la route jusqu'à 80% [23].

Les applications de sécurité routière dans les VANETs peuvent être regroupées en plusieurs catégories telles que :

- La détection et la notification d'accidents
- La gestion de la circulation

- La prévention des collisions
- La surveillance des véhicules La sécurité des passagers

1.9.2. Navigation et confort

Les VANETs peuvent fournir des informations en temps réel sur la circulation et les itinéraires, permettant ainsi aux conducteurs de trouver des itinéraires plus rapides et plus efficaces. Les applications de confort font partie de ces types d'applications qui ont pour objectif de fournir une expérience de conduite plus confortable et une meilleure qualité de voyage en offrant des services et des informations nécessaires. Certaines de ces applications incluent, par exemple, la localisation des stations de services telles que les restaurants, les hôtels et les stations d'essence, ainsi que les applications pour l'accès à Internet, le partage de fichiers et de données, le streaming multimédia et les échanges d'informations avec d'autres conducteurs. Parmi ces applications, on trouve :

- Intelligent Transport System
- Maintenance prédictive
- Économie d'énergie

Le tableau suivant résume quelques applications des VANETs [23] :

Tableau 1.1: les applications du réseau VANET.

	Nom d'application	Information Sur L'application				
		Communication	Type de message	Fréquence d'émission (ms)	Latence (ms)	Autres Prérequis
1	Feux de freinage d'urgence électronique	Ad hoc V2V	Événementiel, diffusion limitée dans le temps	100	100	Portée : 300 m Priorité haute
2	Alerte de véhicule lent	Ad hoc V2V	Diffusion périodique permanente	500	100	Priorité haute
3	Alerte de collision (intersection)	Ad hoc, infrastructure V2I, V2V	Diffusion périodique permanente	100	100	Positionnement précis Priorité haute
4	Alerte de zone dangereuse	Ad hoc, infrastructure V2I, V2V	Événementiel, diffusion localisée limitée dans le temps	100	100	Priorité haute
5	Alerte de violation de feux tricolores	Ad hoc, infrastructure V2I	Événementiel, diffusion limitée dans le temps	100	100	Portée : 250 m Priorité haute

6	Détection pré-accident	Ad hoc V2V	Diffusion périodique, unicast	100	50	Portée : 50 m Priorité haute/moyenne
7	Alerte de changement de voie	Ad hoc V2V	Diffusion périodique	100	100	Précision de positionnement < 2m Portée : 150 m
8	Alerte coopérative de collision	Ad hoc V2V	Périodique, diffusion événementielle, unicast	100	100	Précision de positionnement < 1m Portée : 150 m
9	Gestion d'intersection	Ad hoc, infrastructure V2I, V2V	Diffusion périodique, unicast	1000	500	Précision de positionnement < 5 m
10	Alerte d'accès limite et de déviation	Infrastructure I2V, autres réseaux de diffusion	Diffusion périodique	100	500	Priorité moyenne/basse
11	Contrôle de la vitesse de croisière	Ad hoc V2V	Diffusion unicast	500	100	Priorité moyenne
12	Télépéage	Ad hoc, infrastructure V2I, cellulaire	Diffusion périodique, unicast	1000	200	DSRC
13	Diagnostic distant	Ad hoc, infrastructure V2I, V2V, cellulaire	Unicast, diffusion, événementiel	N/A	500	Accès Internet Service disponible
14	Téléchargement de média	Infrastructure cellulaire, autres réseaux de diffusion	Unicast, diffusion, à la demande	N/A	500	Accès Internet Gestion des droits numériques
15	Téléchargement de cartes routières	Ad hoc, infrastructure cellulaire, autres réseaux de diffusion, V2I, V2V	Unicast, diffusion, à la demande	1000	500	Accès Internet Gestion des droits numériques Service disponible
16	Assistance de conduite économique	Ad hoc, infrastructure V2I, V2V, cellulaire	Unicast, diffusion, à la demande	1000	500	Accès Internet Service disponible

1.10. Les différentes technologies de communication et de diffusion utilisé dans les VANETs

Les technologies de communication véhiculaire pour les VANETs sont des systèmes de communication sans fil utilisés pour échanger des informations entre les véhicules et les infrastructures routières. Ces technologies comprennent les réseaux ad hoc mobiles, les réseaux cellulaires et les systèmes de communication à courte portée, tels que le WiFi, le Bluetooth et le Zigbee. Les communications véhiculaires permettent aux véhicules de communiquer en temps réel pour améliorer la sécurité, la gestion du trafic, la navigation et les services d'information pour les conducteurs et les passagers. Les technologies de communication véhiculaire sont également utilisées pour fournir des services de divertissement et de confort à bord, tels que les systèmes de divertissement à bord, la navigation assistée, la reconnaissance vocale et la gestion de la consommation d'énergie. Les technologies de communication véhiculaire sont essentielles pour

l'avenir de la mobilité, car elles permettent aux véhicules de devenir de plus en plus autonomes et connectés.

On peut les regrouper en trois catégories selon leur portée, comme illustré dans la figure :

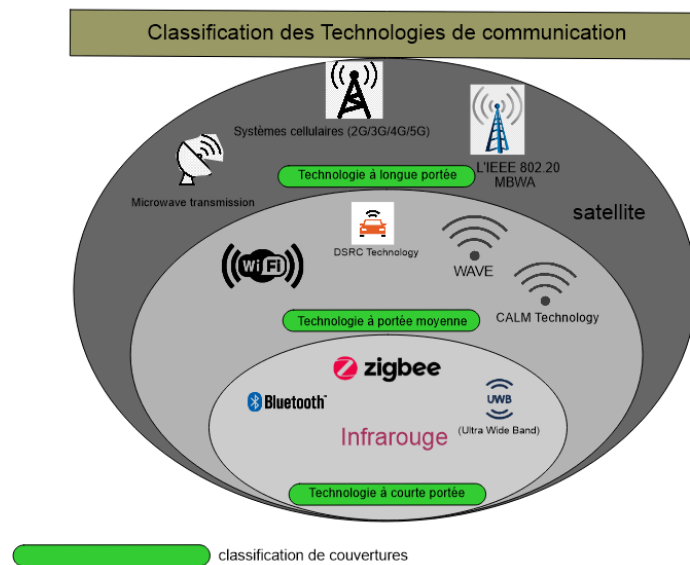


Figure 1.6: Classification des Technologies de communication.

1.10.1. Wi-Fi

La norme WLAN/Wi-Fi (Wireless Local Area Network) est un ensemble de spécifications techniques pour les réseaux locaux sans fil. Ces normes sont définies par la série de normes 802.11 de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), qui comprend 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac et 802.11ax. En raison de leur coût relativement faible, de leurs taux de transfert de données élevés et de leur grande flexibilité, ces normes peuvent être utilisées pour créer des réseaux ad hoc. Le Tableau suivant donne la fréquence et le débit de quelques normes IEEE 802.3.

Tableau 1.2: Comparaison des technologies de communication.

Technologie	Fréquence	Débit théorique maximal
802.11ac wave2	5 GHz	1.73 Gbps
802.11ac wave1	5 GHz	866.7 Mbps
802.11n	2.4 or 5 GHz	450 Mbps
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps
802.11a	5 GHz	54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps
802.11	2.4 GHz	2 Mbps

1.10.2. Bluetooth

Bluetooth (IEEE 802.15.1) est une technologie de communication sans fil à courte portée qui permet l'échange de données entre différents appareils électroniques. Elle utilise la bande de fréquence de 2,4 GHz pour transmettre des données numériques à des vitesses allant jusqu'à 1 Mbps.

Les dispositifs Bluetooth sont largement utilisés dans les réseaux VANET pour améliorer la sécurité et l'efficacité du transport en fournissant une connectivité sans fil fiable et sécurisée [24].

1.10.3. 3G ET 4G LTE

Dans les réseaux de véhicules autonomes (VANETs), les technologies de communication cellulaire peuvent être utilisées pour fournir une connectivité à large bande passante entre les véhicules et les infrastructures de réseau. Les réseaux 4G LTE peuvent être utilisés pour fournir des services tels que la navigation en temps réel, la communication inter-véhiculaire et l'accès à des services basés sur la localisation. Cependant, la couverture cellulaire est souvent limitée dans les zones rurales ou éloignées, ce qui peut limiter la portée des réseaux de communication cellulaire pour les VANETs. De plus, les coûts de déploiement et d'exploitation de ces réseaux peuvent être élevés. Par conséquent, des technologies de communication alternatives telles que le Wi-Fi et Bluetooth peuvent être utilisées pour fournir une connectivité à moindre coût et à plus courte portée dans les VANETs.

1.10.4. WiMAX

WiMAX est l'acronyme de (Worldwide Interoperability for Microwave Access), qui est une technologie de communication sans fil à haut débit qui utilise des fréquences micro-ondes pour transmettre des données. Contrairement au Wi-Fi, qui est limité à une portée de quelques centaines de mètres, le WiMAX peut couvrir de plus longues distances, jusqu'à plusieurs kilomètres.

1.10.5. Satellite

Les satellites sont des équipements de télécommunications essentiels dans les technologies de communication véhiculaire. Ils sont des émetteurs et des récepteurs de signaux radio qui fournissent une couverture globale pour la communication et la navigation. Les satellites sont placés en orbite autour de la Terre, ce qui leur permet de communiquer avec des dispositifs sur le sol, dans les airs et sur les mers. Les bandes de fréquences utilisées pour les communications satellites sont généralement de 1 à 20 GHz, et peuvent être affectées pour une utilisation spécifique telle que la télédiffusion, les communications mobiles, la télémétrie, la télémétrie et la navigation.

1.11. Standardisation et normalisation dans un VANET

Les normes et standards jouent un rôle crucial dans les réseaux VANET pour garantir une interopérabilité et une compatibilité entre les différents équipements et systèmes. Certaines des normes et standards les plus couramment utilisés dans les réseaux VANET incluent [19] [20].

1.11.1. DSRC (Dedicated Short-Range Communications)

La norme DSRC (Dedicated Short Range Communications) est considérée comme le moyen de communication sans fil le plus approprié pour les réseaux VANETs. La technologie a évolué de la

norme IEEE 802.11a à la norme IEEE 802.11p pour répondre aux besoins des réseaux VANET. Grâce à la norme DSRC, la communication peut être établie entre véhicules (V2V) et entre véhicules et infrastructure (V2I). Il est compatible avec les exigences changeantes des réseaux VANET et garantit la fiabilité des communications et une faible latence. Les caractéristiques du DSRC incluent [20] :

- La capacité de supporter des vitesses de véhicules dépassant les 200 km/h.
- Une portée radio allant de jusqu'aux 1000 mètres.
- Un temps de latence pour l'établissement de la communication inférieur à 50 ms.
- Un débit théorique (bande passante) atteignant 6 Mbps.

1.11.2. WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) et IEEE 802.11p

Le groupe de travail IEEE a défini une norme pour la communication entre véhicules, appelée WAVE (Wireless Ability in Vehicular Environment), également connue sous le nom d'IEEE 802.11p ; plus tard, l'IEEE a commencé des travaux pour un nouveau standard connu sous le nom IEEE 802.11p/WAVE (Wireless Ability in Vehicular Environment) qui utilise le concept de multicanaux pour fournir des services de système de transport intelligent (ITS) [3]. IEEE 802.11p est généralement une variante personnalisée de IEEE 802.11a avec une couche physique adaptée pour permettre un fonctionnement à faible charge dans la norme DSRC [19]. La norme IEEE 802.11p est capable de fournir un débit de 6 à 27 Mbps (jusqu'à une distance de 1000 mètres). De plus, la couche MAC du 802.11p utilise le principe CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) développé dans le protocole MAC de l'IEEE 802.11 pour gérer la qualité de service et supporter le protocole de marquage de priorité [20].

1.11.3. C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything)

Une norme pour les communications directes et indirectes sans fil pour les réseaux VANET, développée par l'industrie mobile.

Généralement, ces normes et standards sont conçus pour garantir une communication efficace, fiable et sécurisée entre les véhicules et les infrastructures pour les applications critiques de la sécurité routière, telles que les avertissements de collision, les alertes d'embouteillage et la navigation assistée.

1.12. Les principaux problèmes des Réseaux VANET

Les principaux problèmes des réseaux de capteurs véhiculaires (VANETs) comprennent [3] :

1.12.1. Routage

Les Réseaux Véhiculaires (VANET) sont confrontés à plusieurs défis en matière de routage en raison de leur nature dynamique et de leurs caractéristiques spécifiques. Les principaux problèmes de routage dans les VSNs sont les suivants :

- **Mobilité** : Les véhicules dans les VANET sont en mouvement constant, ce qui rend difficile la découverte et la maintenance des routes de manière fiable.
- **Hétérogénéité** : Les différents types de véhicules dans les VANET ont des capacités de communication et de traitement différentes, ce qui peut entraîner des déséquilibres dans le trafic de données.
- **Densité** : La densité de véhicules dans les VANET peut varier considérablement selon les zones géographiques et les moments de la journée, ce qui peut affecter la qualité de service (QoS).

La résolution de ces problèmes de routage dans les VANET est un défi de recherche important qui nécessite des techniques innovantes de conception et de mise en œuvre de protocoles de routage adaptés aux caractéristiques spécifiques des VANET.

1.12.2. La sécurité des données

Les VANETs doivent garantir la sécurité des données sensibles transmises, telles que les informations de position et les informations de conduite. Les attaques telles que les falsifications de messages peuvent compromettre la sécurité des réseaux.

1.12.3. La fiabilité de la communication

Les réseaux sans fil peuvent être soumis à des interférences telles que le bruit et les collisions de paquets. Les VANETs doivent garantir une communication fiable pour transmettre des informations critiques en temps réel.

1.12.4. La gestion de la bande passante

Les VANETs génèrent de grandes quantités de données en temps réel, ce qui peut entraîner une utilisation excessive de la bande passante. Il est donc important de gérer efficacement la bande passante pour garantir une communication efficace.

1.12.5. L'intégration avec d'autres technologies

Les VANETs doivent être intégrés avec d'autres technologies telles que les réseaux cellulaires et les systèmes de navigation GPS pour offrir une couverture complète et une fonctionnalité améliorée.

1.13. Projets de recherche dans le cadre des réseaux véhiculaires

Les projets menés dans le cadre des réseaux véhiculaires ont des objectifs variés tels que la création et la vérification de nouveaux protocoles de communication et/ou d'applications, le développement d'architectures de communication basées sur différentes technologies, la sécurité des données et la standardisation. Certains exemples de projets incluent VII, CarTalk, FleetNet, CVIS, GeoNet, NoW, SeVeCom, C2C-CC et COMeSafety [25].

1.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques et les applications des réseaux sans fil, les réseaux Ad Hoc et les VANETs. Les réseaux VANETs peuvent être considérés comme une application des réseaux Ad Hoc. Afin que les véhicules puissent communiquer entre eux, des protocoles de routage doivent être définis. En effet, le routage est nécessaire pour établir la communication entre les véhicules lorsque les terminaux ne sont pas à portée de transmission radio directe ; concevoir des protocoles de routage efficaces pour les VANETs est un défi majeur. Tous les protocoles qui existent déjà dans les réseaux mobiles Ad Hoc ne conviennent pas aux VANET car ils ont des propriétés très spécifiques telles qu'une mobilité élevée entraînant des topologies très dynamiques et la propagation des signaux radio.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter les différents types des protocoles de routage dans les réseaux de véhicules (VANET).

Chapitre 2 :

Le routage dans les réseaux VANETs

2.1. Introduction

Le routage des données permet de garantir que les paquets de données sont efficacement relayés vers leur destination [26]. Par conséquent, déterminer le chemin optimal et le maintenir est un processus assez complexe dans les VANETs. Cela est dû à la grande maniabilité du véhicule et au changement rapide de topologie. Par conséquent, la sélection du chemin est cruciale pour concevoir des protocoles de routage pour ces réseaux hautement dynamiques. Cependant, le routage reste l'un des principaux défis.

Dans ce chapitre, nous allons introduire les concepts de base du routage dans les VANETs. Par la suite, nous introduisons la classification des protocoles de routage. Il existe plusieurs protocoles de routage pour les VANETs. Nous allons présenter dans ce chapitre quelques protocoles de chaque catégorie.

2.2. Routage

Le routage dans les réseaux VANETs est un domaine de recherche important car il est essentiel que les véhicules puissent communiquer entre eux de manière efficace et fiable. Le routage est un défi en raison de la nature dynamique de ces réseaux, où les nœuds se déplacent rapidement et les liens peuvent être de courte durée [27].

Le routage dans les réseaux VANET peut être divisé en deux catégories : le routage basé sur l'emplacement géographique et le routage basé sur l'infrastructure [6].

Le routage basé sur la localisation utilise les informations de localisation du véhicule pour déterminer l'itinéraire le plus approprié à partir des données de routage. Les protocoles de routage basés sur la localisation utilisent des algorithmes de routage qui tiennent compte de l'emplacement et de l'orientation du véhicule pour choisir le meilleur chemin pour acheminer les données.

Le routage basé sur l'infrastructure utilise une infrastructure de communication fixe pour acheminer les données entre les véhicules. Dans ce type de routage, le véhicule communique avec un point d'accès (PA) connecté à une infrastructure de communication fixe. PA peut ensuite acheminer les données vers d'autres véhicules ou vers Internet.

2.3. Protocoles de routage dans les réseaux VANETs

Les protocoles de routage peuvent être classifiés suivant plusieurs critères. Dans cette section nous allons présenter les classifications les plus connus. La classification à base la topologie, la localisation géographique, des clusters, géo-caste et Borad-caste seront présentées. Pour chques classification quelques exemples de protocoles seront donnés.

2.3.1. Protocoles basés sur la topologie

Les protocoles de routage basés sur la topologie sont des protocoles de routage qui utilisent des informations sur la topologie du réseau afin d'installer des routes. Ces protocoles maintiennent une vue d'ensemble de la topologie du réseau en échangeant périodiquement des messages de contrôle entre les nœuds du réseau. Les informations de topologie peuvent inclure des informations sur les voisins, les liens entre les nœuds et les chemins vers les destinations, etc. Les protocoles de routage basés sur la topologie sont souvent utilisés dans les réseaux VANETs en raison de leur capacité à s'adapter rapidement aux changements dans la topologie [28]. Les protocoles sont classés en trois classes principales. Des classes sont les protocoles de routage proactifs, les protocoles de routage réactifs et les protocoles de routage hybrides.

Nous présentons dans cette section quelques protocoles de routage basés sur la topologie [6].

2.3.1.1. Les Protocoles réactifs (On-Demand Driven)

Les protocoles réactifs dans les réseaux VANET sont des protocoles de routage qui ne maintiennent pas d'informations de routage pour toutes les destinations possibles. Au lieu de cela, ces protocoles établissent des routes à la demande, c'est-à-dire lorsque les données doivent être transmises à une destination. Lorsqu'un nœud souhaite transmettre des données vers une destination pour laquelle il n'a pas de route valide, il lance la procédure de découverte de route. Les protocoles réactifs sont considérés comme plus adaptables aux changements de topologie et plus efficaces en termes d'utilisation de la bande passante que les protocoles proactifs [6].

Les avantages et les inconvénients des protocoles des protocoles réactifs dans les réseaux VANETs sont les suivants :

✓ **Avantages :**

- ❖ Les protocoles réactifs sont efficaces en termes de consommation de bande passante, car ils n'établissent des routes que lorsque cela est nécessaire.
- ❖ Ils sont également plus adaptables aux changements dynamiques de la topologie du réseau, car ils ne sont pas limités par des tables de routage statiques.
- ❖ Les protocoles réactifs sont particulièrement utiles dans les environnements de réseau densément peuplés, où il est peu probable que tous les nœuds soient actifs à tout moment.

✓ **Inconvénients :**

- ❖ Les protocoles réactifs peuvent nécessiter plus de temps pour établir une route, car une recherche active de la route doit être effectuée.

- ❖ Ils peuvent également entraîner une charge supplémentaire sur le réseau, car chaque demande de routage génère un certain trafic de signalisation.
- ❖ Les protocoles réactifs peuvent également conduire à une surcharge de la bande passante dans les zones densément peuplées, car de nombreuses demandes de routage peuvent être initiées simultanément.

Nous présentons ci-dessous les protocoles de routage réactif les plus populaires.

2.3.1.1.1. AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector)

AODV suivant RFC 3561 [29] est un protocole de routage pour les réseaux Ad Hoc, y compris les réseaux véhiculaires ad hoc (VANETs). Il s'agit d'un protocole de routage à la demande. AODV utilise des vecteurs de distance pour déterminer le chemin le plus court entre deux nœuds et met à jour ces vecteurs en fonction de la topologie.

AODV fonctionne en émettant une demande de route (RREQ) qui est propagée dans le réseau jusqu'à ce qu'elle atteigne le nœud destinataire. Si le nœud destinataire est atteint, ou si un nœud intermédiaire avec une route vers le nœud destinataire est atteint, un message de réponse de route (RREP) est renvoyé à l'émetteur. Les nœuds maintiennent également une liste des nœuds voisins et actualisent cette liste régulièrement.

Pour éviter les boucles dans le réseau, le protocole AODV utilise des numéros de séquence qui sont inclus dans les messages RREQ, RREP, RERR et Hello. Les nœuds ignorent les messages avec des numéros de séquence inférieurs à celui qu'ils ont déjà vu pour un nœud source ou destination particulier.

Le protocole AODV inclut également des mécanismes pour gérer les défaillances de liaison et les erreurs de routage, comme les messages d'erreur de routage (RERR), qui sont envoyés lorsque la liaison d'un nœud échoue. Les messages RERR se propagent dans le réseau pour informer les autres nœuds de la défaillance. La figure (2.1) et (2.2) montrent la procédure de découverte d'une route entre un nœud source et destination. Les deux paquets RREQ et RREP sont utilisés dans cette procédure.

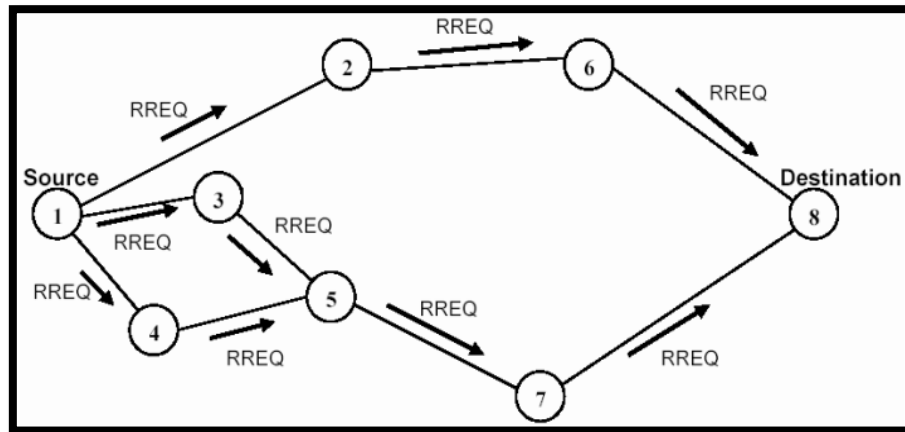


Figure 2.1: Propagation du paquet RREQ.

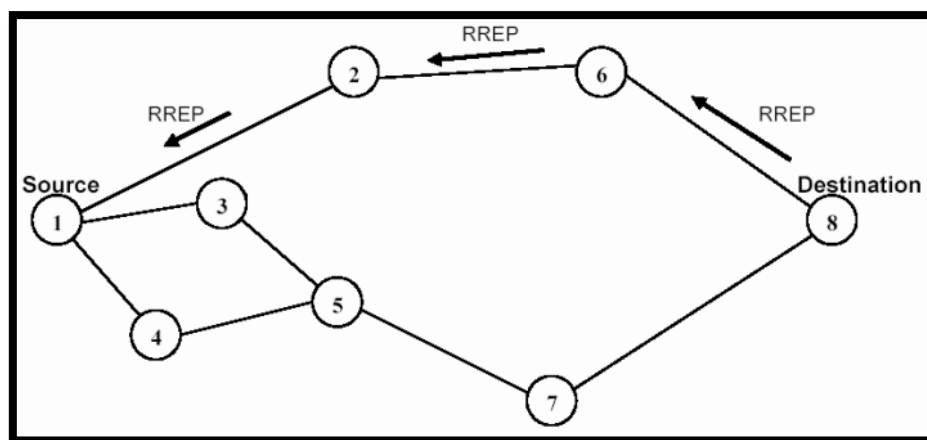


Figure 2.2: Chemin pris par RREP.

AODV utilise plusieurs paquets avec différent structure et champs. Les informations dans paquets jouent un rôle important dans le fonctionnement de l'opération du routage. Les figures (2.3), (2.4) et (2.5) montrent les champs du paquet RREQ, RREP et RRER respectivement.

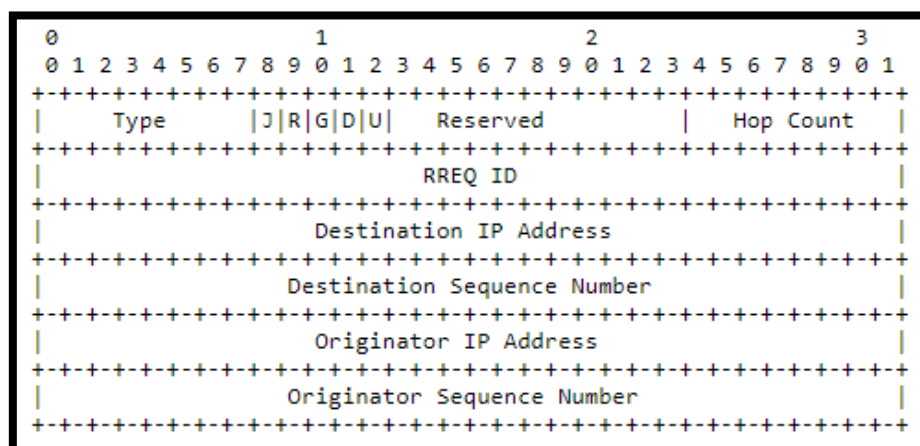


Figure 2.3: Format de paquet RREQ.

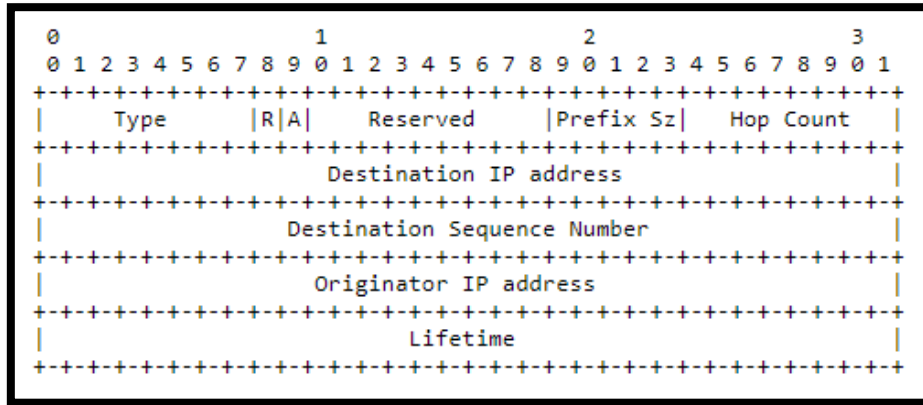


Figure 2.4: Format de paquet RREP.

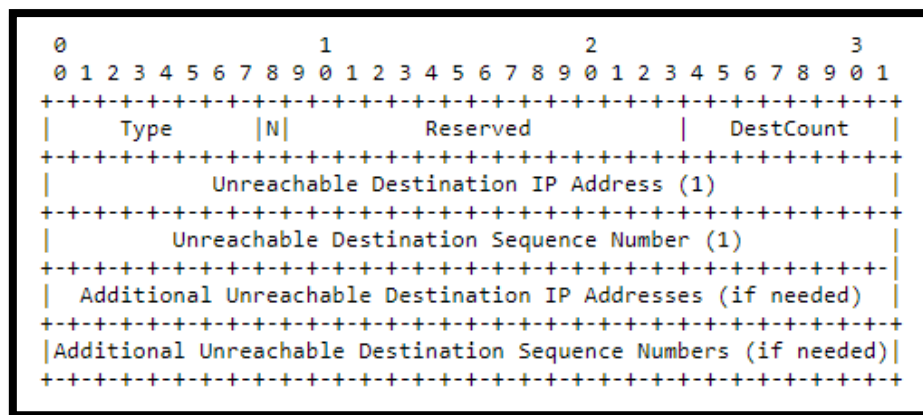


Figure 2.5: Format de paquet RRER.

La maintenance des routes en AODV est garantie par deux messages, qui sont les messages Hello et RRER. Les messages HELLO sont envoyés à tous les voisins pour signaler leur existence et contiennent la liste des nœuds connus par l'émetteur. Si un nœud ne reçoit plus de messages Hello d'un voisin, il peut déduire une rupture de lien. Ensuite, RRER sera envoyé afin d'informer les nœuds de la topologie.

2.3.1.1.2. DSR (Dynamic Source Routing)

DSR [30] est un protocole de routage à la demande pour les réseaux ad hoc sans fil. Il permet à un nœud de découvrir dynamiquement le chemin optimal vers une destination en utilisant une approche de requête réponse. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer un paquet à une destination, il envoie une demande RREQ à ses voisins pour trouver un chemin vers la destination. Les nœuds qui reçoivent la demande de route peuvent soit répondre directement s'ils ont une route vers la destination, soit transmettre la demande à leurs propres voisins pour trouver un nœud ayant une route valide vers la destination. Une fois que le nœud source reçoit une réponse de la destination ou d'un nœud intermédiaire avec une route valide, il peut envoyer les paquets de données en suivant le chemin découvert. Le DSR utilise également des mécanismes de mise en cache pour éviter de répéter la

découverte de route pour les destinations connues. Si un nœud découvre une route vers une destination, il peut stocker cette information dans sa table de cache.

Les figures suivantes montrent les étapes de l'installation, maintenance et sélection d'une route entre la source et la destination suivant DSR. Une fois la route est trouvée, les nœuds intermédiaires de cette route seront insérés dans l'entête de chaque paquet de communication suivant DSR.

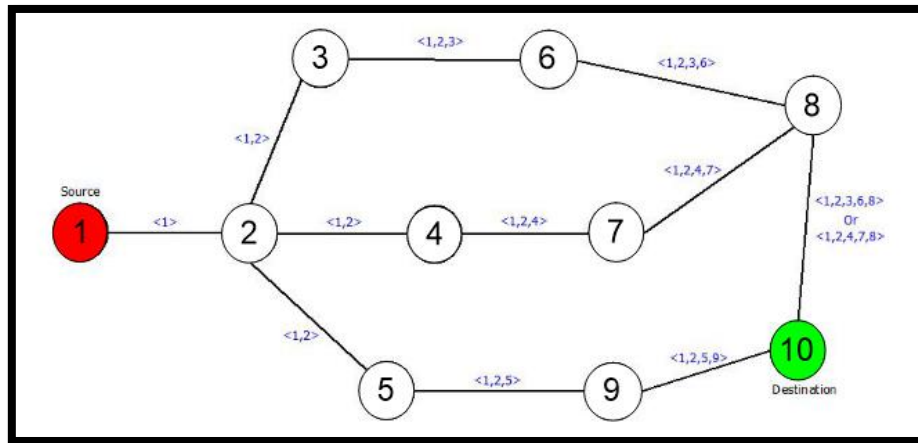


Figure 2.6: Découverte & maintenance de route.

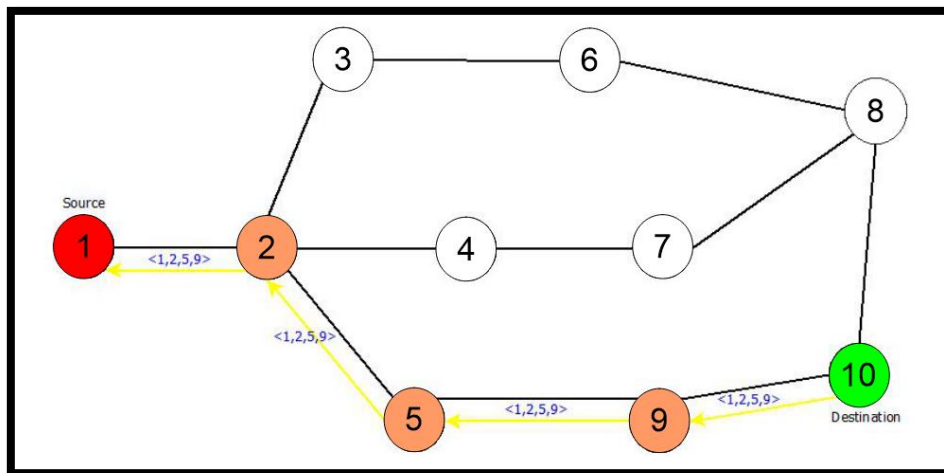


Figure 2.7: RREP dans le protocole DSR.

2.3.1.2. Les Protocoles proactifs (Table-Driven)

Les protocoles proactifs, également appelés protocoles basés sur des tables, sont des protocoles de routage qui maintiennent une table de routage à jour pour chaque nœud du réseau. Ces tables contiennent des informations sur les voisins immédiats et les nœuds distants accessibles à partir de ces voisins. Ainsi, chaque nœud est capable de calculer des chemins vers toutes les destinations possibles du réseau sans attendre une requête de routage spécifique. Cela signifie que ces protocoles mettent constamment à jour les tables de routage et nécessitent une communication constante entre les nœuds du réseau. Bien que ce type de protocole soit efficace pour les réseaux statiques. Cependant,

il est moins efficace pour les réseaux dynamiques comme les VANETs car il peut y avoir un coût élevé en termes de surcharge de communication et de ressources [28].

Les avantages et les inconvénients des protocoles proactifs dans les réseaux VANETs sont les suivants :

✓ **Avantages :**

- ❖ Les temps de réponse sont généralement plus rapides que pour les protocoles réactifs.
- ❖ Les nœuds ont une connaissance plus complète du réseau.
- ❖ Convient pour des réseaux de petite à moyenne taille et pour des zones avec une forte densité de nœuds.
- ❖ Les performances peuvent être prévisibles et stables.

✓ **Inconvénients :**

- ❖ Les tables de routage doivent être mises à jour régulièrement, ce qui nécessite une utilisation constante de la bande passante et de l'énergie des nœuds.
- ❖ Les performances diminuent dans les réseaux de grande taille ou avec une faible densité de nœuds, car les tables de routage doivent être maintenues pour tous les nœuds du réseau.
- ❖ Les routes pré calculées peuvent devenir obsolètes dans les environnements à haute mobilité, ce qui peut entraîner une diminution des performances et de la fiabilité du réseau.
- ❖ Les protocoles proactifs peuvent ne pas être aussi flexibles que les protocoles réactifs dans des scénarios imprévus ou inattendus.

2.3.1.2.1. GSR (Global State Routing) [31]

Le protocole GSR est un protocole de routage proactif à état de liens. Chaque nœud est capable de connaître la topologie globale du réseau, ce qui lui permet de calculer une route vers chaque destination. Contrairement à d'autres protocoles à état de liaison, les nœuds ne diffusent pas leur état de liaison à l'ensemble du réseau, mais uniquement à leurs voisins, ce qui permet de réduire le trafic de contrôle. Cependant, le protocole GSR peut souffrir de problèmes de taille de paquet de mise à jour (tables de topologie), qui peuvent devenir graves avec un grand nombre de nœuds. De plus, la détection des changements de topologie peut être lente.

GSR fonctionne en divisant le réseau en grilles géographiques et en maintenant une base de données mondiale des itinéraires disponibles dans chaque grille. Cette base de données est ensuite périodiquement mise à jour pour refléter les modifications du réseau. Lorsqu'un nœud veut envoyer

un message à un autre nœud, il consulte la base de données globale pour trouver la route la plus courte vers le nœud de destination.

2.3.1.2.2. DSDV (Dynamic destination Sequenced Distance Vector) [32]

DSDV est un protocole de routage vectoriel utilisé dans les réseaux de véhicules autonomes VANETs. Il utilise un vecteur de distance qui contient des informations sur la distance jusqu'à chaque destination et la séquence de sauts. Le protocole maintient une table de routage pour chaque nœud du réseau qui contient des informations sur les destinations accessibles, le nombre de sauts nécessaires pour atteindre chaque destination et la séquence des sauts les plus proches pour chaque destination. Les nœuds du réseau échangent périodiquement des informations de routage avec leurs voisins pour mettre à jour leurs tables de routage. DSDV utilise également des mécanismes pour traiter le flottement de route, tels que la détection de boucle et l'utilisation de numéros de séquence pour éviter les boucles de routage. Le protocole est considéré comme adapté aux réseaux à faible mobilité car il nécessite des mises à jour fréquentes de la table de routage pour s'adapter aux modifications de la topologie du réseau.

2.3.1.2.3. OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR (Optimized Link State Routing) [33] est un protocole de routage réseau ad hoc qui utilise des algorithmes d'état de lien pour déterminer les meilleures routes entre les nœuds du réseau. Contrairement au protocole de routage vectoriel équidistance DSDV, OLSR n'a pas besoin de transmettre périodiquement des informations de routage à tous les nœuds du réseau, réduisant ainsi la consommation d'énergie et la bande passante. Au lieu de cela, les nœuds OLSR échangent des informations de topologie uniquement avec leurs voisins immédiats et agrègent ces informations pour calculer les routes les plus courtes vers toutes les destinations possibles. OLSR utilise également des techniques d'optimisation pour minimiser le nombre de messages de contrôle nécessaires pour maintenir les routes, ce qui le rend adapté aux réseaux ad hoc à grande échelle.

Dans le protocole OLSR les relais multi-points (MPR, MultiPoint Relays) sont utilisés pour réduire la quantité de trafic de contrôle dans le réseau. Les nœuds MPR sont des nœuds qui sélectionnent un sous-ensemble de leurs voisins pour transmettre les mises à jour d'état de lien et les messages de topologie. Les nœuds MPR sont choisis pour leur capacité à fournir une couverture efficace de tous les nœuds dans le réseau, avec le moins de duplication de messages possible.

Le processus de sélection des nœuds MPR implique la transmission de messages de contrôle OLSR pour découvrir les voisins dans la zone de transmission de chaque nœud. Les nœuds MPR sont ensuite sélectionnés de manière à minimiser le nombre de répétitions de messages et à couvrir efficacement la zone de transmission de chaque nœud. Les nœuds non-MPR ne transmettent des messages de

contrôle que s'ils sont nécessaires pour atteindre un nœud MPR, ce qui réduit la quantité de trafic de contrôle dans le réseau.

2.3.1.3. Les Protocoles hybrides

Les protocoles hybrides sont des protocoles de routage, qui combinent les caractéristiques des protocoles proactifs et réactifs [28]. Ils cherchent à fournir une solution équilibrée en termes d'optimisation des performances du réseau. Dans les protocoles hybrides, une topologie partielle du réseau est maintenue de manière proactive, tandis que les routes sont établies de manière réactive en fonction des demandes de routage. Cela permet une mise à jour plus rapide des changements de topologie du réseau tout en évitant la surcharge due à une mise à jour constante de la topologie. Les protocoles hybrides sont utilisés dans les réseaux VANETs pour fournir un routage fiable et efficace pour les applications à temps réel telles que la sécurité routière et la gestion de la circulation.

Voici quelques avantages et inconvénients de cette approche :

✓ **Avantages :**

- ❖ Les protocoles hybrides peuvent offrir une plus grande flexibilité dans le choix de la meilleure approche de routage en fonction de la situation du réseau.
- ❖ Ils peuvent être plus efficaces que les protocoles proactifs en termes de gestion de la charge de trafic et de la consommation d'énergie des véhicules.
- ❖ Les protocoles hybrides peuvent être plus robustes que les protocoles réactifs en termes de gestion des défaillances et des pannes du réseau.

✓ **Inconvénients :**

- ❖ Les protocoles hybrides peuvent être plus complexes et plus difficiles à implémenter que les protocoles proactifs ou réactifs purs.
- ❖ Ils peuvent avoir des coûts de communication plus élevés que les protocoles proactifs en raison de la mise à jour des tables de routage et des messages de signalisation supplémentaires nécessaires pour maintenir la topologie du réseau.
- ❖ Les protocoles hybrides peuvent être plus sensibles à la sélection des paramètres de configuration pour obtenir une performance optimale dans des conditions de réseau spécifiques.

2.3.1.3.1. ZRP (Zone-Based Hierarchical Link State Routing Protocol)

ZRP est un protocole hybride utilisé dans les réseaux VANETs pour optimiser l'utilisation de la bande passante et minimiser la charge de routage. Le protocole divise le réseau en zones et utilise un

protocole de routage proactif pour maintenir la topologie à l'intérieur de chaque zone. Lorsqu'un nœud cherche à transmettre des données à un autre nœud situé en dehors de sa zone, il utilise un protocole de routage réactif pour trouver un chemin vers ce nœud. Donc le ZRP définit autour de chaque nœud une zone qui contient les nœuds voisins. Les algorithmes proactifs et réactifs sont utilisés par le nœud pour transférer les paquets, respectivement, dans et sauf la zone [6].

ZRP utilise également des tables de routage pour stocker les informations de routage, ce qui permet une mise à jour rapide des routes en cas de changement de topologie.

2.3.2. Protocoles de routage à base la localisation géographique

Pour surmonter la limitation du routage basé sur la topologie, un nouveau type de stratégie de routage, basé sur les informations de localisation. Les protocoles de routage avec localisation géographique dans les réseaux VANETs utilisent des informations de position géographique des nœuds pour déterminer les itinéraires optimaux. Ces protocoles peuvent être basés sur le principe de la diffusion de l'information ou de la recherche de chemin. Ils nécessitent l'utilisation de techniques de géolocalisation précises pour localiser avec précision les nœuds mobiles dans le réseau. L'avantage de ces protocoles est qu'ils peuvent réduire les délais de transmission et augmenter l'efficacité du routage en sélectionnant des itinéraires plus courts et plus efficaces en termes d'utilisation des ressources du réseau. Cependant, ils peuvent être plus sensibles aux problèmes de mobilité et de perte de connectivité, qui peuvent affecter la qualité des informations de localisation [6].

2.3.2.1. Protocoles géographiques tolérant aux délais (DTN)

Les protocoles géographiques tolérant aux délais (DTN) dans les réseaux VANETs sont conçus pour fonctionner dans des environnements où les nœuds ne sont pas connectés en permanence ou où la connectivité est intermittente. Ces protocoles permettent la transmission de données entre les nœuds qui peuvent ne pas être dans la portée de communication directe en utilisant des techniques de stockage et de transmission à retardement. Les messages sont stockés dans les nœuds intermédiaires jusqu'à ce qu'une opportunité de transmission se présente, par exemple, lorsque deux véhicules se croisent et sont dans la portée de communication. Les protocoles DTN sont donc particulièrement utiles pour les réseaux de véhicules où la connectivité est souvent intermittente en raison des déplacements rapides et des obstacles physiques. Ils sont également utiles pour les scénarios de communication inter-véhiculaire basés sur la géolocalisation, car ils peuvent aider à réduire la charge du réseau en évitant la transmission d'informations à des nœuds qui ne sont pas dans la portée de communication directe [34].

2.3.2.1.1. VADD (Vehicle-Assisted Data Delivery)

VADD est un protocole de routage dans les réseaux VANETs qui utilise des véhicules relais pour aider à livrer les données aux nœuds de destination. L'idée de base de ce protocole est d'utiliser des véhicules à proximité des nœuds de destination pour aider à transporter les données en utilisant une transmission multi-sauts. Les véhicules relais sont choisis en fonction de leur position géographique par rapport aux nœuds de destination et leur capacité à stocker et à transférer des données.

Le protocole VADD utilise une stratégie de routage hybride en combinant à la fois des techniques de routage géographique et de routage basé sur l'infrastructure. Les nœuds de destination sont d'abord localisés en utilisant une méthode de routage géographique, puis des véhicules relais appropriés sont sélectionnés pour transporter les données vers les nœuds de destination. Les véhicules relais stockent temporairement les données et les transferts vers d'autres véhicules relais ou directement vers les nœuds de destination.

Le protocole VADD est conçu pour être robuste et efficace dans des environnements à forte densité de véhicules, où les nœuds peuvent avoir des connexions intermittentes. Il est également capable de prendre en compte les changements fréquents de topologie du réseau en raison de la mobilité des véhicules. Le protocole VADD a été conçu pour améliorer les performances de la livraison de données dans les réseaux VANETs en utilisant efficacement les ressources disponibles, telles que les véhicules relais.

2.3.2.2. Protocoles géographiques non tolérant aux délais (Non-DTN)

Les protocoles géographiques non tolérant aux délais (Non-DTN) sont des protocoles de routage dans les réseaux de véhicules intelligents qui utilisent les informations de localisation pour transmettre les données d'un nœud à un autre nœud à travers un chemin déterminé en fonction de la position géographique de ces nœuds. Contrairement aux protocoles géographiques tolérant aux délais (DTN), les protocoles Non-DTN supposent que les nœuds sont toujours connectés les uns aux autres, et les paquets sont acheminés directement de la source à la destination. Ils utilisent des mécanismes tels que le routage à saut unique ou le routage en boucle inversée pour trouver le chemin le plus court entre la source et la destination. Les protocoles géographiques Non-DTN peuvent être efficaces pour les applications qui nécessitent une faible latence de transmission, mais peuvent avoir des performances médiocres dans des environnements avec une densité élevée de nœuds ou une topologie changeante.

2.3.2.2.1. Protocole GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR est un protocole de routage géographique pour les réseaux ad hoc basé sur le principe de la navigation sur le périmètre. Les nœuds du réseau sont localisés et chaque nœud utilise sa position

géographique pour prendre des décisions de routage. Lorsqu'un nœud a un paquet à transmettre à un autre nœud, il choisit le nœud voisin le plus proche de la destination en utilisant un algorithme de recherche en profondeur sur le périmètre du réseau. Si le nœud sélectionné ne peut pas transmettre le paquet, le nœud émetteur sélectionne le nœud suivant sur le périmètre. GPSR est considéré comme un protocole de routage réactif car il ne construit pas de table de routage globale pour tout le réseau, mais il effectue des calculs de routage sur demande. Le principal avantage de GPSR est sa simplicité et sa robustesse, mais son principal inconvénient est qu'il peut être inefficace dans des environnements de réseau densément peuplés ou avec des obstacles physiques qui empêchent le nœud de naviguer sur le périmètre.

Dans le protocole GPSR, la découverte de route commence lorsque le nœud source crée un paquet de données pour une destination donnée. Le nœud source détermine ensuite si la destination est dans son voisinage immédiat. Si oui, il envoie directement le paquet à la destination. Sinon, il utilise un algorithme de routage pour déterminer le prochain saut [35].

Le protocole GPSR utilise deux modes de fonctionnement suivant la densité du réseau, pour la découverte de route [35] : le mode Greedy et le mode périmètre.

Le mode Greedy (Greedy Forwarding) est utilisé lorsque le nœud émetteur a connaissance de la position exacte du nœud destinataire. Dans ce cas, le nœud émetteur envoie directement le paquet à son destinataire en suivant la direction qui minimise la distance euclidienne entre les deux nœuds. La figure suivante illustre un exemple de ce mode.

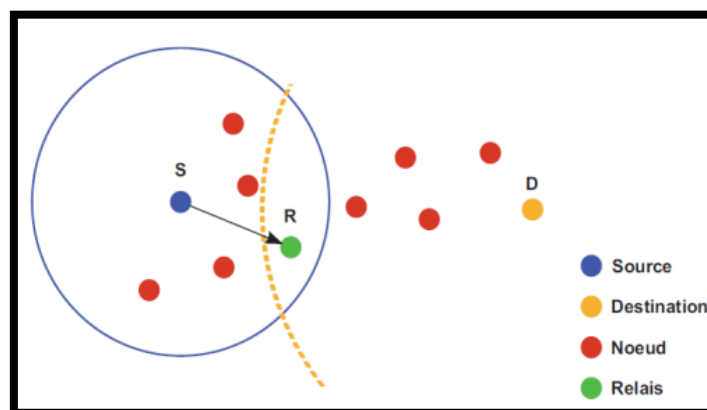


Figure 2.8: Greedy Forwarding.

Le mode Right-Hand (Périmètre Forwarding) ou règle de la main droite est utilisé dans le cas où le nœud émetteur ne connaît pas la position exacte du nœud destinataire ou si les chemins Greedy échouent en raison de l'absence de nœuds dans la direction souhaitée. Ce mode permet au protocole

GPSR de trouver une route même lorsque les informations de topologie sont incomplètes ou inexactes. Un exemple est présenté dans la figure (2.9).

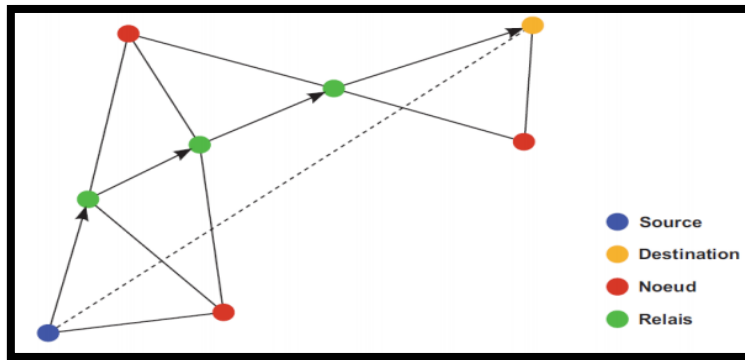


Figure 2.9: Périmètre Forwarding ou règle de la main droite.

2.3.2.2.2. Protocole GyTAR (Greedy Traffic Aware Routing protocol)

GyTAR est un protocole de routage géographique pour les réseaux VANETs qui vise à optimiser la qualité de service (QoS) du réseau en prenant en compte la charge de trafic et l'état du réseau. Contrairement aux protocoles de routage géographiques classiques, qui cherchent simplement le chemin le plus court pour atteindre la destination, GyTAR prend en compte la charge de trafic pour éviter les congestions et améliorer la QoS.

GyTAR fonctionne en utilisant des mécanismes de clustering, où les véhicules sont regroupés en clusters et chaque cluster est géré par un nœud de contrôle. Chaque nœud de contrôle est responsable de la décision de routage pour les membres de son cluster. GyTAR utilise également un mécanisme de prédiction de trafic pour anticiper les congestions sur les routes et éviter les chemins encombrés.

Lorsqu'un nœud doit transmettre un message à un nœud de destination, il utilise l'algorithme Greedy pour déterminer le nœud suivant dans la chaîne de routage. Cependant, si la route la plus courte est fortement encombrée, GyTAR peut choisir une route alternative plus longue mais moins encombrée pour éviter les congestions.

Le protocole GyTAR est conçu pour fonctionner dans les environnements urbains où la densité de trafic est élevée. Il améliore la QoS du réseau en minimisant le délai de livraison et le taux de perte de messages. En outre, GyTAR est également capable de s'adapter aux changements de topologie du réseau et de fournir une communication fiable dans des environnements dynamiques et imprévisibles.

2.3.2.3. Protocoles géographiques Hybride

Les protocoles de routage hybrides basés sur la position sont une combinaison de NON-DTN et DTN pour améliorer la performance globale du réseau. Ils utilisent à la fois la position géographique des véhicules et d'autres métriques telles que la qualité de la liaison, la charge de trafic et le niveau

de batterie pour prendre des décisions de routage. Les protocoles géographiques hybrides peuvent s'adapter aux différentes situations du réseau, comme les zones de haute densité de trafic ou les zones de faible densité, en utilisant des stratégies de routage basées sur des règles et des heuristiques spécifiques. En outre, les protocoles géographiques hybrides offrent une meilleure gestion de la consommation d'énergie des véhicules, une amélioration de la fiabilité des communications et une réduction des délais de transmission, tout en assurant une utilisation efficace de la bande passante du réseau.

2.3.2.3.1. Protocole GéoDTN+NAV (Geographic DTN Routing with Navigator Prediction for Urban Vehicular Environments)

GéoDTN+NAV est un protocole de routage géographique tolérant aux délais (DTN), est un protocole de routage de mélange qui combine entre le mécanisme Non-DTN et DTN [34], conçu pour les réseaux de véhicules (VANETs) dans des environnements urbains. Il utilise des informations de prédiction des déplacements des véhicules, appelées informations de navigateur, pour prendre des décisions de routage. Ces informations de navigateur sont collectées à partir des capteurs embarqués dans les véhicules tels que les GPS, les capteurs de vitesse et les capteurs d'accélération.

2.3.3. Protocoles de routage basés sur les clusters (groupes)

Les protocoles de routage basés sur clustering sont des protocoles qui utilisent la formation de groupes de véhicules pour faciliter la transmission de données et le routage des messages. Dans ces protocoles, les véhicules sont organisés en clusters en fonction de leur proximité géographique ou de leur mobilité. Chaque cluster est géré par un nœud de cluster, appelé (cluster head), chargé de coordonner la transmission des données dans le cluster. Les protocoles de routage basés sur les clusters peuvent être divisés en deux catégories : les protocoles de routage intra-cluster et les protocoles de routage inter-cluster. Les protocoles de routage intra-cluster sont utilisés pour la communication entre les membres du cluster, et les protocoles de routage inter-cluster sont utilisés pour la communication entre différents clusters. La figure (2.10) donne un exemple de clustering d'un réseau VANET.

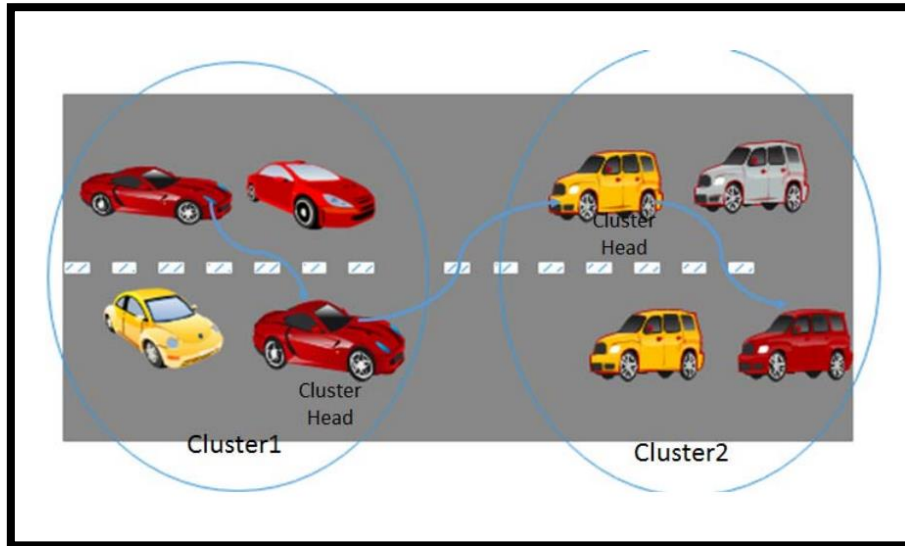


Figure 2.10: Cluster-based routing protocol.

2.3.3.1. Protocole CBLR (Cluster Based Location Routing)

CBLR est une technique de routage basée sur les clusters (groupes) dans les réseaux VANETs. CBLR utilise une combinaison de la géolocalisation et de la formation de clusters pour minimiser la consommation d'énergie et augmenter la fiabilité de la communication.

Le protocole CBLR utilise une stratégie de routage en deux étapes pour acheminer les données d'un nœud à un autre. Tout d'abord, le nœud source transmet la requête à son cluster head. Ensuite, le "cluster head" détermine le meilleur itinéraire pour acheminer les données au nœud destination en utilisant les informations de localisation des nœuds dans son cluster et les informations de localisation des cluster heads voisins. Ce protocole permet de réduire la quantité de trafic de diffusion dans le réseau en limitant les transmissions uniquement aux nœuds nécessaires pour acheminer les données, ce qui réduit la charge du réseau et améliore la qualité de service.

2.3.3.2. Protocole CBD RP (Cluster-Based Directional Routing Protocol)

CBD RP est un protocole de routage basé sur les clusters pour les réseaux VANETs. Comme son nom l'indique, ce protocole utilise des clusters pour optimiser l'acheminement des paquets de données entre les véhicules. Dans CBD RP, les véhicules sont regroupés en clusters en fonction de leur position géographique et de leur mouvement. Chaque cluster est dirigé par un nœud cluster Head (CH) qui est responsable de l'acheminement des données à destination et de la gestion du cluster [6].

Les auteurs de [6] ont montré que Le protocole CBD RP convient aux véhicules à grande vitesse circulant sur les autoroutes où une latence minimale est nécessaire. Le protocole CBD RP utilise des métriques de routage basées sur la direction pour déterminer le chemin le plus approprié pour les données à travers le réseau. Cette approche utilise des informations sur la direction de mouvement

des véhicules pour déterminer le meilleur chemin pour transmettre les données. Le protocole utilise également des mécanismes de réplication de données pour améliorer la fiabilité de la transmission des données.

2.3.4. Protocoles Géo-caste

Les protocoles de cette catégorie permettent de diffuser des messages à des destinations spécifiques en utilisant la géolocalisation des véhicules. Les protocoles de géo-cast peuvent être classés en deux catégories principales : les protocoles de diffusion géographique et les protocoles de diffusion de zone appelée ZOR (Zone de Pertinence). Les protocoles de diffusion géographique utilisent la position actuelle des véhicules pour diffuser les messages aux véhicules qui se trouvent dans une zone définie autour de la zone d'intérêt. Les protocoles de diffusion de zone, quant à eux, permettent la diffusion de messages à une zone géographique prédéfinie sans avoir besoin de la position exacte des véhicules.

Les protocoles de géo-cast présentent de nombreux avantages, notamment une réduction de la congestion du réseau en évitant les messages inutiles, une efficacité accrue de la communication en diffusant les messages uniquement aux véhicules situés dans la zone d'intérêt, ainsi qu'une meilleure résilience du réseau en cas de perte de connexion ou de panne de nœud. Cependant, ces protocoles peuvent également présenter des inconvénients tels que la difficulté de gérer les zones d'intérêt en constante évolution et la nécessité de synchroniser l'horloge des véhicules pour éviter les collisions de message [6].

2.3.4.1. Protocole IVG (Inter-Vehicle Geocast)

IVG est un protocole de diffusion géocast pour les réseaux de véhicules autonomes (VANETs). Il a été conçu pour transmettre des données à des groupes de véhicules situés dans des zones spécifiques, appelées zones de diffusion. L'objectif principal d'IVG est de minimiser la surcharge du réseau et d'assurer une diffusion efficace des messages [6].

IVG utilise une approche hybride pour diffuser les messages, en combinant les avantages des protocoles proactifs et réactifs. Le protocole utilise une table de routage pour stocker les informations de topologie des véhicules voisins. Les messages sont diffusés par des véhicules sélectionnés en fonction de leur position et de leur direction. Les véhicules sont sélectionnés en utilisant une fonction de métrique qui prend en compte la distance, la direction et la densité des véhicules dans la zone de diffusion.

IVG utilise également une technique de fragmentation des messages pour améliorer l'efficacité de la diffusion. Les messages sont fragmentés en plusieurs paquets qui sont envoyés en utilisant des

canaux différents pour réduire la collision des messages et améliorer la fiabilité de la diffusion. Les paquets de message sont regroupés à l'arrivée pour reconstituer le message original.

2.3.4.2. Protocole DRG (Distributed Robust Geocast)

DRG est un protocole de routage géocast pour les réseaux VANETs qui permet la diffusion de messages à des groupes de véhicules situés dans une zone géographique particulière. Contrairement aux protocoles de diffusion de messages classiques, qui diffusent des messages à tous les nœuds de la zone de diffusion, DRG utilise des mécanismes de filtrage géographique pour réduire la zone de diffusion. Cela permet d'économiser de la bande passante et de réduire le nombre de messages redondants.

2.3.5. Protocoles Broad-caste

La diffusion est un mécanisme de routage qui est utilisé pour trouver une route efficace vers la destination du nœud pendant la phase de découverte du routage de protocoles de routage unicast. Les protocoles de diffusion en broadcast dans les réseaux VANETs permettent aux véhicules de transmettre des messages à tous les autres véhicules de leur zone de couverture. Ces protocoles sont utilisés pour diffuser des informations de sécurité routière, ils sont conçus pour communiquer des messages de sécurité importants telles que la signalisation de travaux, les alertes d'accidents ou les informations de trafic. Les protocoles de diffusion en broadcast doivent être efficaces en termes de latence, de débit de transmission et de sécurité, tout en minimisant les interférences et les collisions entre les messages [6].

2.3.5.1. Protocole UMB (Urban Multihop Broadcast Protocol)

UMB est conçu pour les réseaux de capteurs sans fil déployés dans des environnements urbains denses. Il utilise une approche géographique pour le routage et la diffusion des messages, ce qui le rend particulièrement adapté aux réseaux de capteurs sans fil déployés dans des environnements urbains avec une densité élevée de nœuds.

Le protocole UMB utilise une technique de diffusion probabiliste pour minimiser la redondance des messages diffusés et réduire la probabilité de collision des messages. Les nœuds du réseau utilisent des informations sur leur propre position et celle de leurs voisins pour décider de la direction de diffusion des messages. Le protocole UMB utilise également des mécanismes de contrôle de congestion pour éviter la saturation du réseau. UMB est composé de deux phases : la première appelée diffusion directionnelle où la source sélectionne un nœud dans la direction de la distribution pour relayer les données sans aucune information sur la topologie, et la deuxième distribution (radiodiffusion) dans les intersections, diffuser les paquets dans toutes les directions. Le principal avantage d'UMB est la fiabilité de la diffusion multi-hop dans les canaux urbains [6].

Des expérimentations ont montré que le protocole UMB est efficace pour diffuser des messages dans des environnements urbains denses et complexes. Il présente également des avantages en termes de consommation d'énergie et de fiabilité de la transmission des messages par rapport à d'autres protocoles de diffusion multi-saut.

2.3.5.2. Protocole DVCAST (Distributed vehicular broadcast protocol)

Le protocole DVCAST est un protocole de diffusion basé sur la géolocalisation conçue pour les réseaux VANET. Ce protocole utilise l'information de position des véhicules pour déterminer les régions de diffusion et ainsi réduire la redondance de la diffusion de messages. Il permet une diffusion efficace des messages avec une utilisation minimale de la bande passante et une faible latence pour les messages urgents. En outre, il peut s'adapter aux différents environnements de mobilité en utilisant une méthode de seuil de déclenchement dynamique pour la diffusion de messages. Contrairement aux études existantes, le protocole DV-CAST proposé peut supprimer la tempête de radiodiffusion dans un environnement VANET dense en plus d'un routage dans un VANET peu connecté. L'algorithme repose uniquement sur les informations GPS des voisins à un seul emplacement et ne nécessite pas de nœud ou de cartes centralisés [36].

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de protocoles de routage dans les réseaux véhiculaires (VANET). Ces protocoles ont été conçus pour assurer une communication efficace et fiable entre les véhicules et les infrastructures routières. Nous avons décrit les protocoles de routage réactifs, proactifs et hybrides, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons présenté d'une classification de protocoles de routages. Le choix d'un protocole de routage dépendra des objectifs et des exigences spécifiques du réseau et d'application.

L'évaluation des protocoles de routage pour les VANETs est une étape indispensable. Elle nous permet de comprendre leur fonctionnement et choisir le bon protocole suivant les exigences. Dans le chapitre suivant nous allons présenter une étude comparative entre quelques protocoles de routages sur plusieurs topologies du VANET.

Chapitre 3 :

Simulations et Résultats

3.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'évaluation comparative des performances de quatre protocoles de routage (AODV, DSDV, OLSR et GPSR) dans les réseaux VANETs. Les simulations ont été réalisées à l'aide de NS-3 et SUMO afin de générer des scénarios réalistes. Les métriques d'évaluations incluent le débit, le taux de livraison des paquets et le MAC/PHY OverHead. Les résultats obtenus permettent de comparer les performances des protocoles et d'identifier leurs forces et faiblesses. Ces informations sont utiles pour le choix et l'optimisation des protocoles de routage dans les réseaux VANETs.

3.2. Outils de simulation

La simulation par logiciel joue un rôle crucial dans le développement d'un réseau VANET pour une application réelle. Elle offre une crédibilité supérieure aux modèles analytiques en permettant une reproduction plus réaliste du fonctionnement du système réel. On trouve deux types de simulateurs des réseaux véhiculaires ad hoc (VANET) : les simulateurs de trafic et les simulateurs de réseaux. Les simulateurs de trafic génèrent des scénarios de circulation réalistes en prenant en compte divers facteurs tels que la densité du trafic, les comportements des conducteurs et les conditions météorologiques. Ils définissent les modèles de mobilité des véhicules, essentiels pour évaluer les performances du réseau ad hoc dans différentes conditions. Les simulateurs de réseaux modélisent le comportement du réseau de communication entre les véhicules, simulant le mouvement des véhicules, la propagation des ondes radio, les protocoles de communication, les mécanismes de routage et la gestion des ressources. Ils permettent ainsi de reproduire les interactions complexes entre les véhicules et d'analyser les performances du réseau ad hoc dans différentes configurations.

3.2.1. Sumo

Simulation of Urban Mobility, également connu sous le nom de " SUMO ", est un logiciel open source utilisé pour simuler le trafic urbain. Il a été développé en 2000 pour faciliter la recherche dans ce domaine, SUMO est un outil de simulation du trafic routier qui n'exigeait pas la mise en place d'un réseau de véhicules réel [37].

SUMO permet de modéliser le comportement des véhicules et des piétons dans des environnements urbains. Il offre la possibilité de créer des scénarios de trafic réalistes en prenant en compte divers paramètres tels que la géométrie des routes, les feux de signalisation, les intersections, les arrêts de bus, les passages piétons, etc.

Le logiciel SUMO propose une interface graphique conviviale pour la création et la visualisation des scénarios de simulation. Il permet également d'analyser les performances du réseau routier en termes de congestion, de temps de trajet, d'émissions de polluants, etc.

3.2.2. Simulateur réseaux Ns-2

Network simulator NS-2 est simulateur d'évènement open source développé dans un projet de DARPA (defense advanced research projects agency) en 1995 pour la recherche dans le domaine des réseaux informatiques [38]. Ce logiciel permet la simulation, la conception, la gestion et l'évaluation des protocoles de communication dans les réseaux informatiques selon des scénarios prêts définis par l'utilisateur, en plus, il prend en compte les modèles de propagation [38] [39].

NS-2 utilise deux langages de programmation OTCL (Oriented Tool Command Language) et le C++, le premier sert à contrôler les applications et le deuxième pour implémenter les différents protocoles dans ce simulateur. Grâce à sa fiabilité (proche à la réalité) et sa facilité d'extension (ajouter des nouveaux modèles) NS-2 est le simulateur le plus utilisé ces dernières années [39].

3.2.3. Opnet

OPNET, l'un des logiciels de simulation de réseau largement utilisés dans la modélisation et la simulation de réseaux de communication, a un avantage distinct dans la conception de modèles, la collecte de données et l'analyse de performance. OPNET adopte un mécanisme de modélisation hiérarchique qui contient la couche réseau, la couche de nœud et la couche de processus, parallèlement naturellement à la structure des réseaux de communication réels, et effectue une simulation d'évènement discrète pour analyser le comportement et la performance des systèmes modélisés [40].

3.2.4. Omnet++

OMNeT++ [41], est une bibliothèque et un cadre de simulation C++ extensible, modulaire et basé sur des composants, qui comprend également un développement intégré et un environnement d'exécution graphique. Les fonctionnalités spécifiques au domaine (soutien à la simulation de réseaux de communication, de réseaux de files d'attente, d'évaluation des performances, etc.) sont fournies par des cadres modèles, développés en tant que projets indépendants. Il existe des extensions pour la simulation en temps réel, l'émulation réseau, le support des langages de programmation alternatifs (Java, C#), l'intégration de bases de données, l'intégration SystemC, HLA et plusieurs autres fonctions.

3.2.5. J-sim

J-Sim (appelé JavaSim) [42] est un simulateur de réseaux de communication open-source basé sur Java. Il est conçu pour simuler des réseaux de communication ad hoc mobiles, des réseaux sans fil et d'autres types de réseaux. Le simulateur offre un environnement de simulation hautement personnalisable avec des fonctionnalités telles que la prise en charge de multiples protocoles de routage, la modélisation de la mobilité des nœuds et la possibilité de définir des scénarios de

simulation réalistes. J-Sim fournit également une interface utilisateur graphique intuitive qui permet de configurer facilement les paramètres de simulation et de visualiser les résultats de la simulation en temps réel. En tant que simulateur de réseaux de communication largement utilisé.

3.2.6. Veins

Veins (Vehicles in Network Simulation) est un simulateur de réseaux de capteurs véhiculaires open source et gratuit pour la simulation de réseaux de véhicules. Il est conçu pour être utilisé en conjonction avec des simulateurs de trafic tels que SUMO (Simulation of Urban Mobility) pour simuler des réseaux de capteurs véhiculaires. Veins utilise le framework OMNeT++ pour simuler les communications entre les nœuds du réseau, en simulant la couche physique, la couche MAC et la couche réseau. Il prend également en compte les mouvements des véhicules, les interférences entre les signaux, les obstacles et les conditions environnementales. Veins est utilisé pour évaluer les performances des protocoles de communication et des algorithmes de routage dans les réseaux de capteurs véhiculaires [43].

3.2.7. NCTUns

NCTUns (National Chiao Tung University Network Simulator) [44] est un simulateur de réseaux informatiques open-source développé par le laboratoire Network System Lab de la National Chiao Tung University à Taiwan. Il permet de simuler des réseaux de grande envergure, notamment des réseaux sans fil, des réseaux mobiles, des réseaux ad hoc, des réseaux de capteurs et des réseaux de véhicules. Ce simulateur se distingue par sa capacité à simuler des réseaux complexes avec des centaines de milliers de nœuds en temps réel.

3.3. Choix de simulateur

Le choix du simulateur NS-3 pour simuler les réseaux VANET est justifié par sa popularité dans ce domaine (plus de documentations), sa flexibilité, sa capacité à prendre en charge plusieurs protocoles, ses modèles de mobilité réalistes (ns2 mobility model, random mobility model) et ses outils d'analyse avancés. Cela en fait un outil précieux pour la recherche et le développement de nouvelles technologies et stratégies visant à améliorer les performances des réseaux VANET.

3.3.1. Simulateur réseaux Ns3

3.3.1.1. Présentation

Le simulateur NS3 (Network Simulator 3) est un outil puissant de simulation open source largement utilisé dans le domaine des réseaux informatiques et de communications. Il permet de modéliser et d'évaluer le comportement des réseaux de manière réaliste et précise. NS3 offre une grande flexibilité en permettant aux utilisateurs de définir des scénarios de simulation personnalisés, d'intégrer différents protocoles de communication et de simuler divers environnements réseau. Grâce

à sa conception modulaire, NS3 permet également aux chercheurs et aux développeurs d'ajouter de nouvelles fonctionnalités et de personnaliser le simulateur en fonction de leurs besoins spécifiques.

Le simulateur NS3 est apprécié pour sa précision et sa capacité à reproduire fidèlement les comportements des réseaux réels. Il permet d'analyser les performances des protocoles de communication, de mesurer la qualité de service, de simuler des scénarios de mobilité et d'évaluer l'efficacité énergétique des réseaux. NS3 est également utilisé pour la recherche et le développement de nouvelles technologies de réseau, telles que les réseaux sans fil, les réseaux ad hoc, les réseaux de capteurs et les réseaux véhiculaires.

3.3.1.2. Terminologie

Afin de tirer pleinement parti du simulateur, il est essentiel de saisir pleinement le sens des termes utilisés ainsi que les abstractions qui ont été effectuées.

NS-3 fait usage de termes couramment utilisés dans le domaine des réseaux, mais ils peuvent revêtir une signification spécifique au sein du simulateur. Voici les termes clés à prendre en compte [45] [46] :

- **Node** : Englobe tout élément du réseau.
- **Application** : Un utilisateur peut écrire du code qui joue un rôle crucial dans le déroulement d'une simulation. Par exemple, pour permettre l'échange de paquets pendant la simulation, il est nécessaire de décrire une application spécifique au sein des nœuds participants, telle qu'une application `UdpEchoClientApplication` d'un côté et une application `UdpEchoServerApplication` de l'autre pour établir une communication client/serveur. Dans NS-3, il n'y a pas de distinction entre les "applications système" (généralement exécutées par le noyau) et les applications utilisateurs (exécutées dans l'espace utilisateur). Par la suite, ces applications peuvent être associées à un nœud.
- **Channel** : Correspond à la connexion entre les nœuds, spécifiquement aux `NetDevices` installés dans ces nœuds. Différentes classes spécialisées sont définies pour représenter ces connexions, telles que `CsmaChannel` qui modélise un lien Ethernet utilisant CSMA, ou `WifiChannel` qui modélise un lien WiFi.
- **NetDevice** : Connaît aussi par le terme "`NetDevice`", il fait référence à la représentation combinée du matériel (carte réseau) et du pilote nécessaire à la communication entre un ordinateur et d'autres dispositifs. NS-3 propose des spécialisations de la classe `NetDevice`, telles que `CsmaNetDevice`, cette dernière est une représentation simulée d'une carte réseau

Ethernet, et peut être connectée à un CsmaChannel, ainsi que WifiNetDevice qui est utilisée pour une liaison avec un canal de type WifiChannel. Ces spécialisations permettent de modéliser différents types d'équipements réseau et de faciliter la simulation des communications dans NS-3.

3.3.1.3. Modules de ns3

NS-3 est une bibliothèque C++ composée d'un ensemble de modèles permettant la simulation de réseaux. Ces modèles sont implémentés sous forme d'objets en C++ et sont enveloppés dans une interface Python [45] [46].

Les événements dans le simulateur NS-3 sont simplement des fonctions qui sont appelées et exécutées à des moments précis déterminés par l'ordonnanceur du simulateur. Ils sont programmés pour se produire à des instants spécifiques au sein de la simulation.

Ci-dessous, vous pouvez observer les modules de base de NS-3 dans la figure suivante :

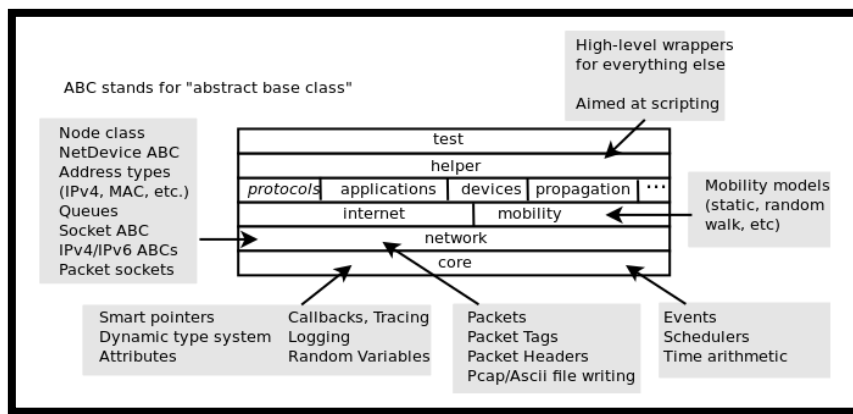


Figure 3.1: Les modules de NS3.

- **Core Module :** Il offre la possibilité de construire une hiérarchie de classes basée sur la classe Object de base, permettant ainsi la dérivation et la création de structures de classes. Ce module de base est autonome et indépendant.
- **Common Module :** Ce module facilite la gestion des opérations d'émission et de réception des paquets. Il se concentre principalement sur la classe Paquets, qui est utilisée pour la simulation de réseaux au niveau des paquets. Son utilisation permet d'améliorer l'efficacité de la gestion de la mémoire en adoptant une approche de copier-coller. De nombreux autres modules tirent parti de ses fonctionnalités pour optimiser leurs opérations.
- **Simulator Module :** Il offre des fonctionnalités avancées pour la gestion de la simulation des événements, en permettant explicitement la planification et l'exécution d'événements à des moments spécifiques.

La classe Time joue un rôle crucial dans la représentation du temps simulé à haute résolution. Elle utilise un entier de 128 bits et est considérée comme la classe la plus essentielle du simulateur, permettant de manipuler et de mesurer avec précision les intervalles de temps dans la simulation.

- **Mobility Module** : Ce module permet de spécifier la position des nœuds dans la simulation et d'associer un modèle de mouvement aux agents de la simulation.

Il offre la possibilité de définir les coordonnées spatiales des nœuds, ce qui est essentiel pour simuler des scénarios de réseau réalistes. De plus, il permet d'attribuer des modèles de mouvement aux agents de la simulation, ce qui leur permet de se déplacer et d'interagir de manière dynamique dans l'environnement simulé.

- **Node Module** : La classe Node peut héberger plusieurs NetDevices, chacun connecté à un canal spécifique pour envoyer et recevoir des paquets. De plus, un nœud peut avoir plusieurs gestionnaires de protocole pour traiter les paquets reçus par le NetDevice.

De plus, chaque nœud peut également inclure une liste d'applications afin d'initier des transferts de paquets. Ces applications sont chargées d'envoyer et de recevoir des paquets dans le cadre d'une simulation de réseau. Ainsi, un nœud peut jouer un rôle actif dans la communication en hébergeant différents appareils, gestionnaires de protocoles et applications.

- **Helper Module** : Ce modèle peut être considéré comme une abstraction de haut niveau qui simplifie la création de scénarios de simulation complexes et l'installation des différents modules dans des entités distinctes.

Il fournit une interface conviviale qui permet aux utilisateurs de configurer facilement des scénarios de simulation en rassemblant les différents modules nécessaires et en les configurant de manière appropriée. Ainsi, il simplifie le processus de construction de scénarios sophistiqués en offrant une encapsulation pratique des fonctionnalités et en facilitant la gestion des différentes entités impliquées dans la simulation.

- **Application Module** : NS-3 offre des applications intégrées qui peuvent être installées sur les nœuds de la simulation. Ces applications prêtes à l'emploi peuvent être démarrées ou arrêtées à des moments précis de la simulation. Elles fournissent une variété de fonctionnalités couramment utilisées dans les réseaux. En configurant ces applications selon leurs besoins, les utilisateurs peuvent modéliser et évaluer divers scénarios de réseaux, en simulant des comportements réalistes et en étudiant les performances du réseau dans différentes conditions.

- **InternetStack Module** : Les classes de ce module jouent un rôle essentiel dans la définition des protocoles TCP/IP des couches réseau trois et quatre.
- **Devices Module** : Ces éléments de ce type sont utilisés pour représenter des dispositifs réseau qui assurent la transmission de paquets à travers un canal virtuel vers d'autres instances de la même classe NetDevice.
- **Routing Module** : NS-3 propose deux algorithmes de routage différents. Le premier, appelé GlobalRouter, utilise des routes statiques pour le routage des paquets. Le deuxième algorithme met en œuvre le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) pour les réseaux ad-hoc dynamiques, permettant ainsi un routage adaptatif en fonction des changements dans la topologie du réseau.

3.4. Modèles de propagation dans ns3

3.4.1. Model de Friis

L'utilisation de la propagation estime la force du signal reçu lorsque l'émetteur et le récepteur n'ont pas de barrière, y compris à grande échelle qui peut prédire la puissance de la puissance reçue diminue avec une influence croissante à une distance entre l'émetteur et le récepteur. Ce modèle communique également des données autour du cercle de l'émetteur. Si le destinataire est dans un cercle, alors le paquet sera reçu et autrement [47].

3.4.2. Modèle Two Ray Ground

Ainsi que la modélisation des obstacles en bordure de route, les réflexions simples et doubles des bâtiments en bordure de route sont ajoutées au standard two-ray ground-propagation model, la répartition des véhicules dans un segment de rue est utilisée pour modéliser plus étroitement le rayon de réflexion au sol et la réflexion. Le coefficient est également ajusté en conséquence pour tenir compte des réflexions des véhicules. Les résultats ont été comparés à des études de mesure largement utilisées des rues de la ville dans la littérature, qui ont confirmé l'avantage global des améliorations.

Ce modèle ne fournit pas de résultats précis s'il s'agit d'un modèle de transmission à courte distance dû aux oscillations causées par la combinaison constructive et destructive d'ondes qui se déplacent dans différents canaux et effectuent la propagation de la radio à travers deux chemins.

Le modèle Two-Ray Ground suppose qu'il existe deux chemins de propagation principaux entre l'émetteur et le récepteur : un chemin direct (ligne de visée) et un chemin réfléchi par le sol. Ces deux rayons contribuent à la puissance reçue par le récepteur [3].

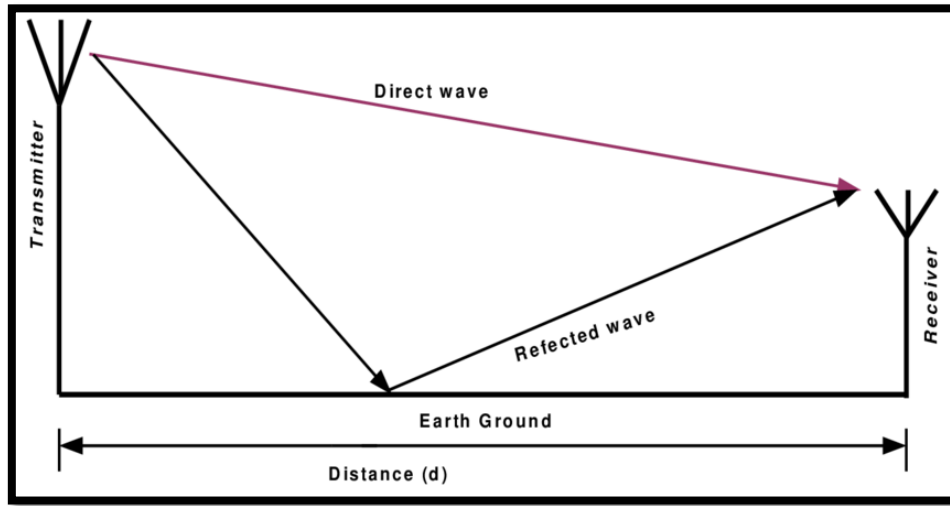


Figure 3.2: Le modèle Two-ray ground.

3.4.3. Modèle Nakagami-m Fast Fading

Le modèle Nakagami-m est un outil essentiel pour modéliser les variations de puissance dans les canaux sans fil et améliorer les performances des systèmes de communication. Ce modèle englobe les modèles Rayleigh et Rician, utilisés respectivement dans les environnements urbains et les communications avec une ligne de visée directe. Le modèle Nakagami-m est utilisé pour concevoir des systèmes sans fil plus robustes et fiables, en optimisant la qualité de la communication [48].

3.5. Métriques d'évaluation

3.5.1. BSM_PDR

On a utilisé le taux de livraison des BSM (Basic safety message). Il s'agit d'une métrique qui mesure le pourcentage de BSMs qui sont livrées avec succès d'une source vers une destination. Cette métrique est très importante dans les réseaux VANETs parce que les BSMs sont utilisés pour transmettre des renseignements de sécurité entre les véhicules [49].

BSM_PDR est calculé en divisant le nombre de BSMs qui sont livrés avec succès par le nombre total des BSMs qui sont envoyés. Cette mesure est généralement exprimée en pourcentage et reflète la fiabilité du réseau pour transmettre les BSMs. Le BSM_PDR est calculé par l'équation suivante :

$$BSM\ PDR = \frac{BSM\ Paquets\ reçus}{BSM\ Paquets\ Transmis} \quad (1)$$

Un ratio de livraison de paquets élevé indique que le VANET est capable de transmettre des BSM de façon fiable, ce qui est important pour assurer la sécurité routière. D'autre part, un faible ratio de livraison de paquets BSM indique que le réseau n'est pas capable de transmettre de manière fiable les BSM, ce qui peut poser un risque pour la sécurité des usagers de la route.

3.5.2. MAC/PHY Overhead

MAC/PHY Overhead a également été utilisé pour comparer les protocoles de routage. MAC/PHY est l'un des facteurs importants à considérer lors de la conception et l'optimisation des réseaux

informatiques [50]. La réduction de ces facteurs peut améliorer les performances du réseau en réduisant le temps et les ressources nécessaires à la transmission des données et en veillant à ce que les données soient transmises efficacement. MAC/PHY est défini comme suit :

$$MAC \therefore PHY = \frac{\text{Octets physiques totaux} - \text{Octets d'application totaux}}{\text{Octets physiques totaux}} \quad (2)$$

3.5.3. La moyenne de Débit utile (Average Goodput)

La moyenne de débit utile a également été utilisée comme mesure de test [51]. Il se réfère au taux de transfert de données d'un réseau, qui est une mesure du débit effectif d'un système après prise en compte de divers facteurs indirects tels que les erreurs, et d'autres inefficacités. Le débit utile est la quantité de données utiles transmises sur un réseau au cours d'une période de temps spécifique. Elle est généralement mesurée en bits par seconde (b/s) ou en octets par seconde (O/s). Le débit utile est une mesure clé pour évaluer le rendement d'un réseau parce qu'elle tient compte de l'efficacité du système. Il fournit une représentation plus précise de la quantité de données effectivement transmises sur un réseau par rapport au débit total, qui mesure simplement le total des données transmises.

3.6. Simulations

Dans cette Partie, nous présenterons les résultats de notre simulation. Un scénario sur la ville de Bouira en Algérie a été créé par SUMO afin d'évaluer les protocoles de routage dans les VANETs. Les performances des protocoles de routage AODV, DSDV, OLSR et GPSR ont été évaluées dans notre étude à l'aide de NS3.

Nous avons proposé trois scénarios, tel que les véhicules dans les trois simulations envoient 10 BSMs de 200 Ko chaque seconde. Chaque BSM peut être envoyé pour une portée de transmission déférente d'un autre BSM. Donc il est possible de spécifier jusqu'à 10 distances de transmission différentes pour calculer jusqu'à 10 BSM_PDR.

Les paramètres de simulation sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Les paramètres de simulation.

Paramètres	Spécifications
Configuration de la machine	Processeur : Intel i5 5200U. RAM : 8 GB DDR3. Disque dur : 1024 GB HDD.
Plateforme	UBUNTU 20.04.
L'outil de simulation	NS-3.29.
Scénario	SUMO.
Modèle de mobilité	ns2 mobility model.
Nombre de Véhicules	30, 50, 70.
La vitesse de Véhicules	10, 15, 20 (m/s max)
Path Loss	Le model de Friis.
La puissance de transmission	10 dBm.

La couche MAC	IEEE 802.11p.
La couche de transport	UDP
Protocoles de Routage	AODV, DSDV, GPSR, OLSR.
La Taille de Paquet	200 Ko
Délai de transmission max.	10 ms.
La zone de simulation	1000 x 1050 m ² .
Temps de simulation	70 s.

3.6.1. Simulation 1

Dans cette première analyse nous avons proposé une simulation avec une vitesse des véhicules qui varie entre 0 m/s jusqu'aux 10 m/s comme une vitesse maximale. Nous avons varié le nombre de véhicules entre 30, 50 et 70. Dans cette simulation nous avons évalué les protocoles de routage en termes de : débit, BSM_PDR et MAC/PHY overhead.

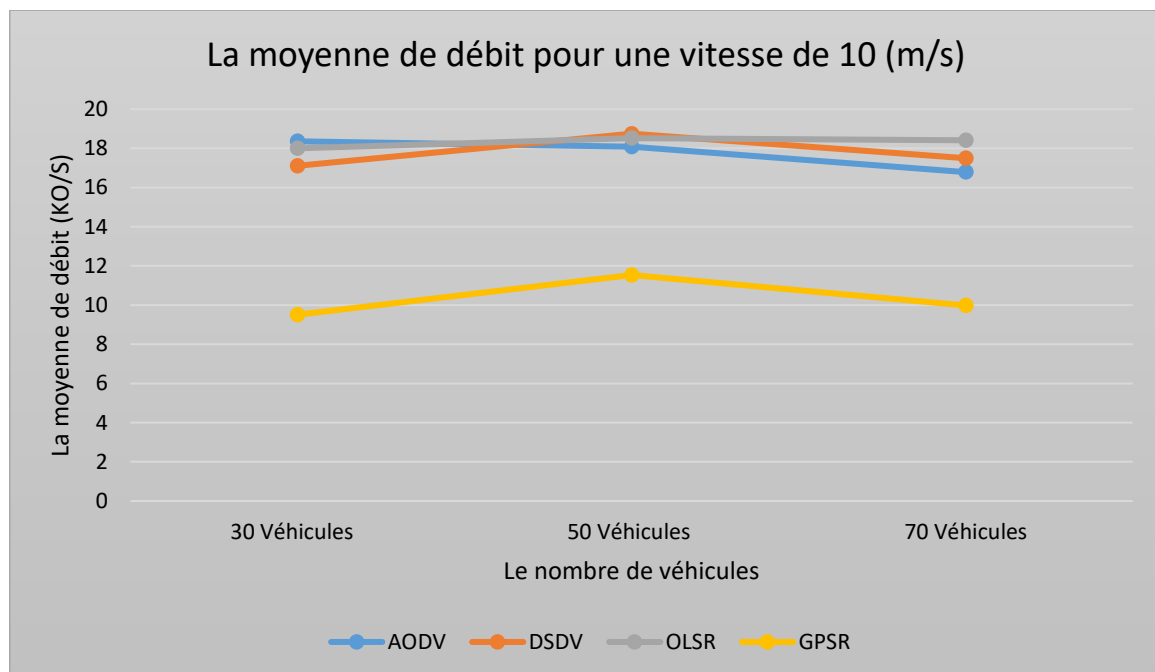


Figure 3.3: Analyse de débit pour une vitesse de 10m/s.

Les résultats obtenus dans la figure (3.3), montrent que le protocole GPSR offre le plus petit débit dans cette première analyse. Lorsque le nombre de véhicules égale à 30, le protocole AODV donne le plus grand débit (18.35 Ko/s), mais lorsque le nombre de véhicules égale à 50 ou 70 véhicules l'AODV offre un débit plus petit que le DSDV (18.74 et 17.5 Ko/s) et l'OLSR (18.51 et 18.41 Ko/s).

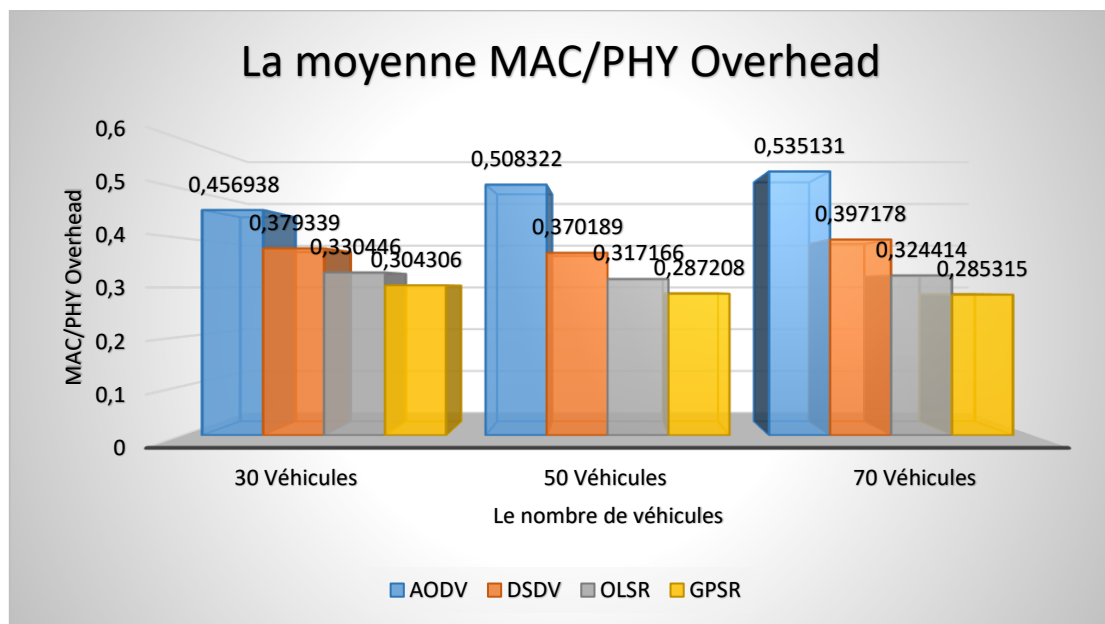


Figure 3.4: Analyse de MAC/PHY Overhead pour une vitesse de 10m/s.

Pour les résultats de MAC/PHY ont été illustrés dans la figure (3.4). Nous citons que la plus petite valeur de cette métrique représente la plus performante dans le réseau [52]. D'après la figure, nous constatons que le protocole GPSR possède la plus petite valeur pour toutes la densité de trafic (30, 50, 70). Le GPSR est basé sur l'emplacement de la destination qui est transportée dans le paquet de sorte que les nœuds de retransmission n'ont pas besoin d'utiliser le service de localisation à nouveau et cela réduit la valeur de MAC/PHY. Cependant, AODV a la grande valeur c'est-à-dire la plus mauvaise performance dans le réseau parce qu'il diffuse un grand nombre de paquets de messages HELLO pour maintenir la route.

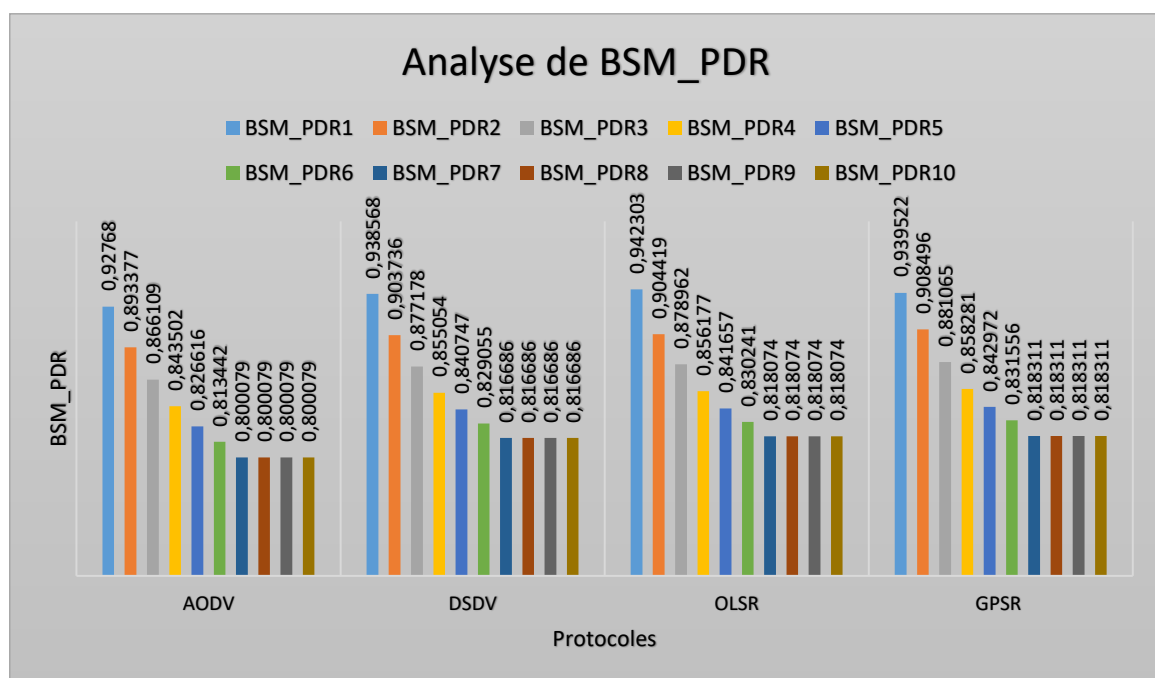


Figure 3.5: L'analyse de BSM-PDR pour 30 véhicules.

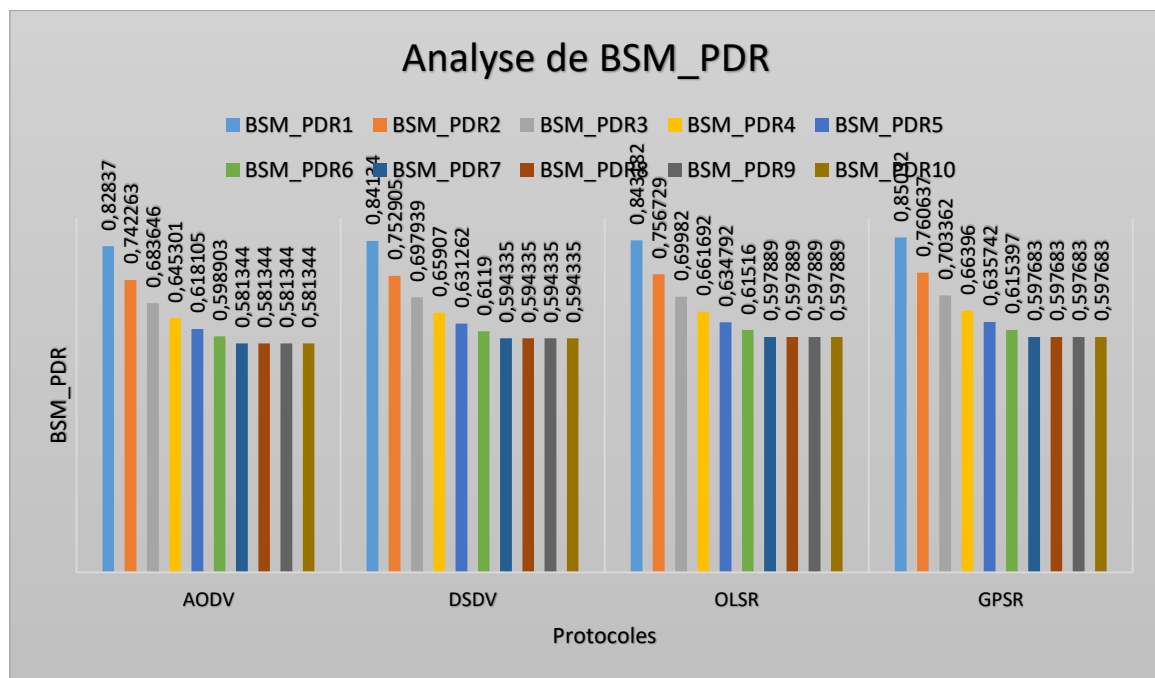


Figure 3.6: L'analyse de BSM-PDR pour 50 véhicules.

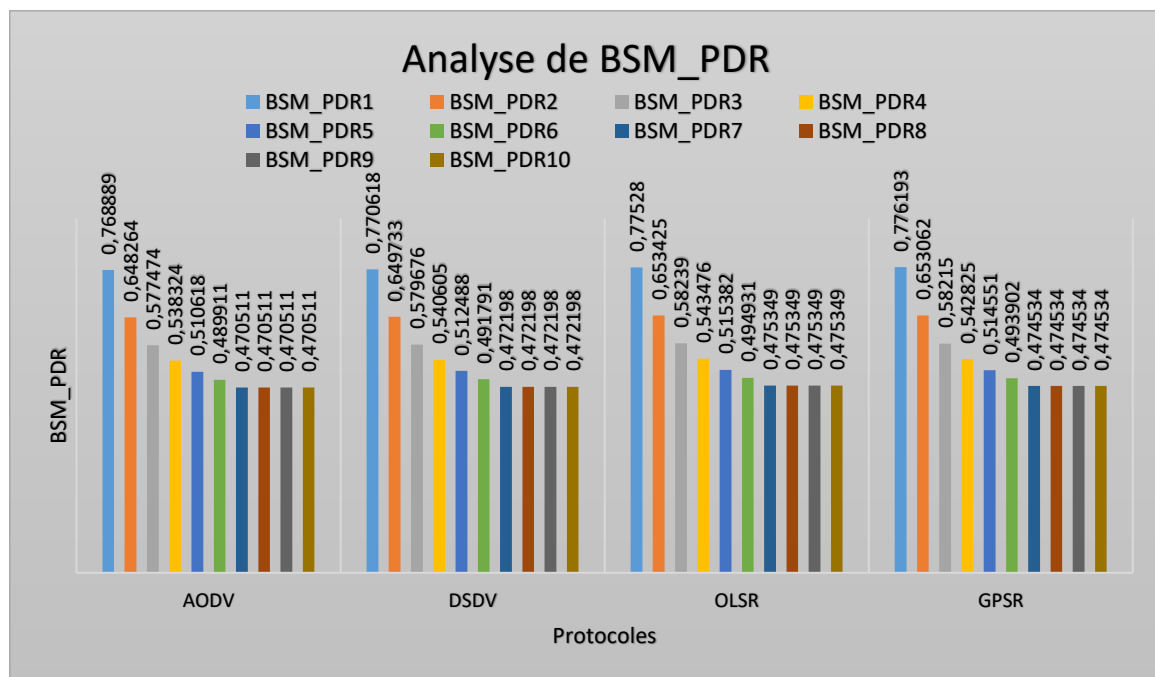


Figure 3.7: L'analyse de BSM-PDR pour 70 véhicules.

Les figures (3.5), (3.6) et (3.7) représentent le taux de livraison des quatre protocoles pour différents densité de véhicules. Pour une densité égale à 30 véhicules nous remarquons que le protocole GPSR possède une performance meilleure que les autres protocoles.

Dans la deuxième expérience dans laquelle le nombre de véhicules égale à 50 nœuds nous constatons que pour une portée de transmission du 50 m jusque 300 m le GPSR est le meilleur protocole mais pour les quatre derniers BSMs (350 m de portée). OLSR est le plus performant. Cependant, lorsque le nombre de véhicules est 70, nous remarquons que le début de GPSR donne des

résultats meilleurs que celles de AODV, OLSR et DSDV (jusqu'au 300 m de portée). Mais, pour les quatre derniers BSMs (350 mètres) nous trouvons que OLSR est au-dessous comme le protocole le plus performant.

3.6.2. Simulation 2

Dans cette deuxième simulation, nous modifions la vitesse maximale des véhicules à 15 m/s. Les protocoles de routage AODV, DSDV, OLSR et GPSR seront de nouveau comparés dans ce contexte. Nous examinerons les performances des protocoles dans les mêmes configurations de densité de trafic de la simulation précédente (30, 50 et 70).

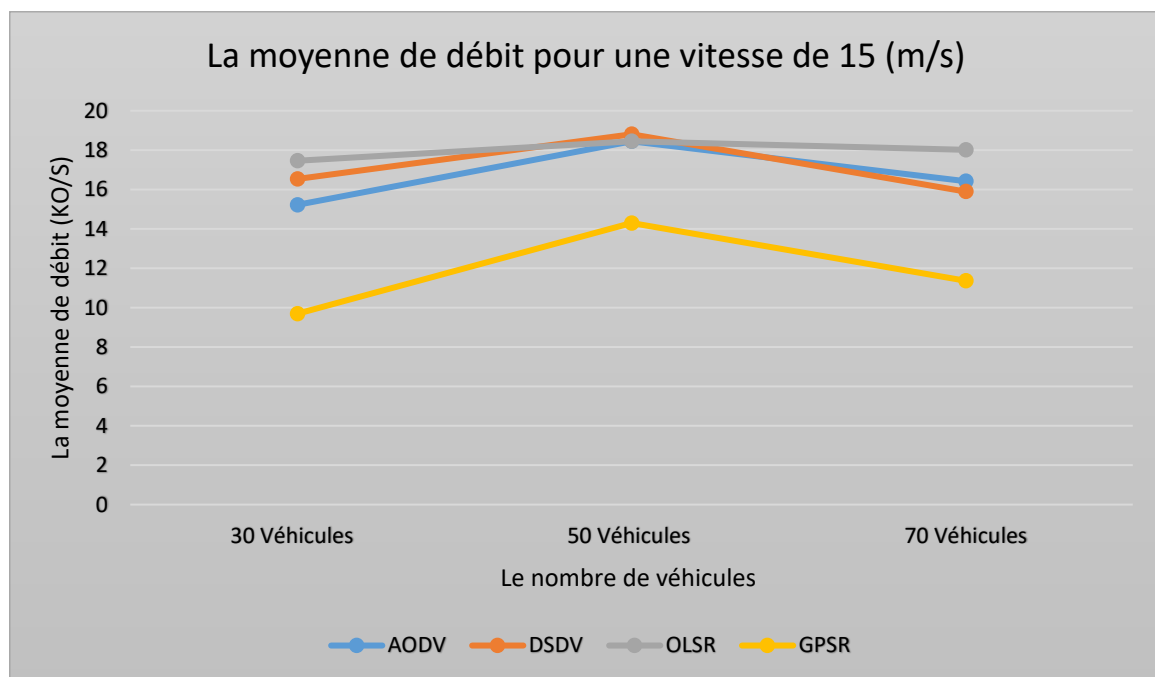


Figure 3.8: Analyse de débit pour une vitesse de 15m/s.

La figure (3.8), montre que le protocole OLSR donne une valeur de débit la plus performante lorsque la densité de trafic égale à 30 et 70 véhicules et reste stable en fonction de variations des nombres des véhicules grâce à son processus de sélection des nœuds MPRs. C'est stratégie performante afin de trouver la bonne route entre la source et la destination. Dans le cas où la densité égale à 50 véhicules, le protocole DSDV donne un débit plus grand par rapport aux AODV et OLSR. La courbe de GPSR reste en dessous des trois autres courbes dans les trois cas (30, 50, 70 véhicules).

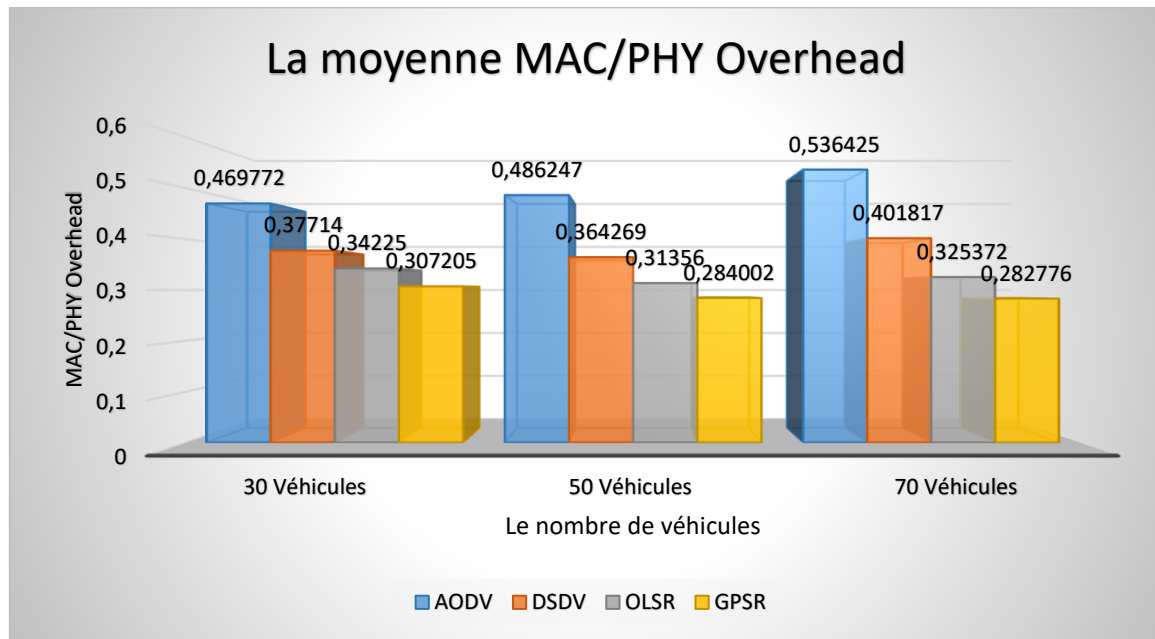


Figure 3.9: Analyse de MAC/PHY Overhead pour une vitesse de 15m/s.

Les résultats obtenus dans cette deuxième simulation concernant MAC/PHY sont illustrés dans la figure (3.9). AODV reste le plus mauvais protocole à cause de l'utilisation des messages HELLO et le protocole GPSR prend le dessus comme le protocole le plus performant, grâce à sa technique de routage (géographique).

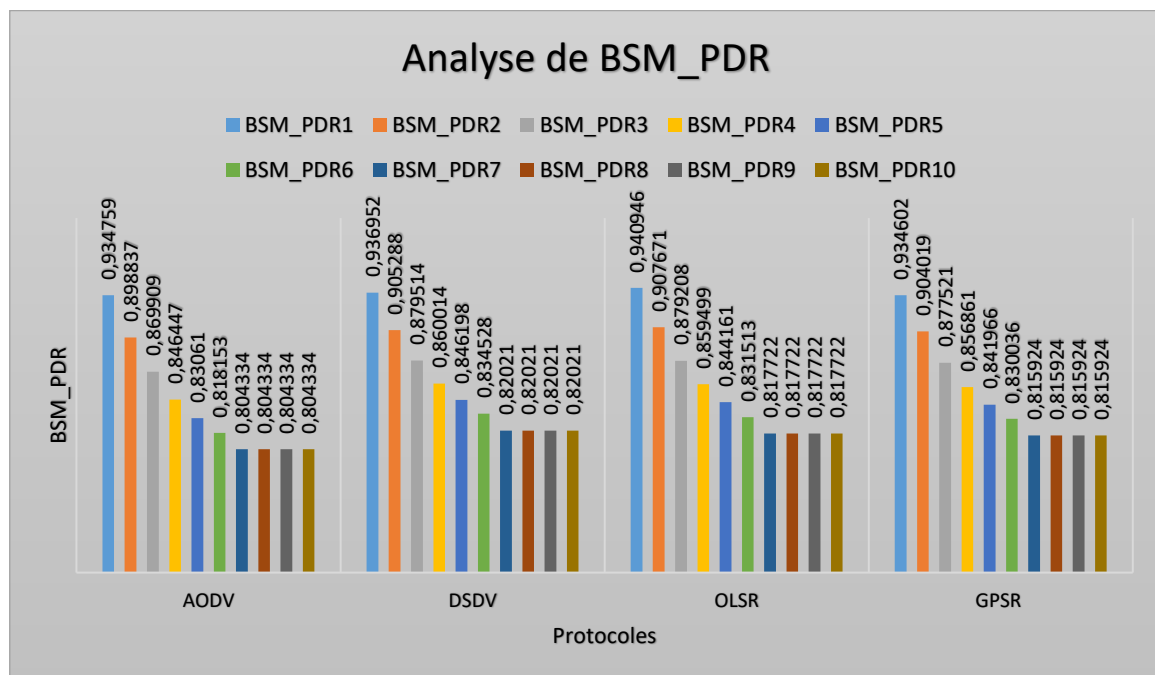


Figure 3.10: L'analyse de BSM_PDR pour 30 véhicules.

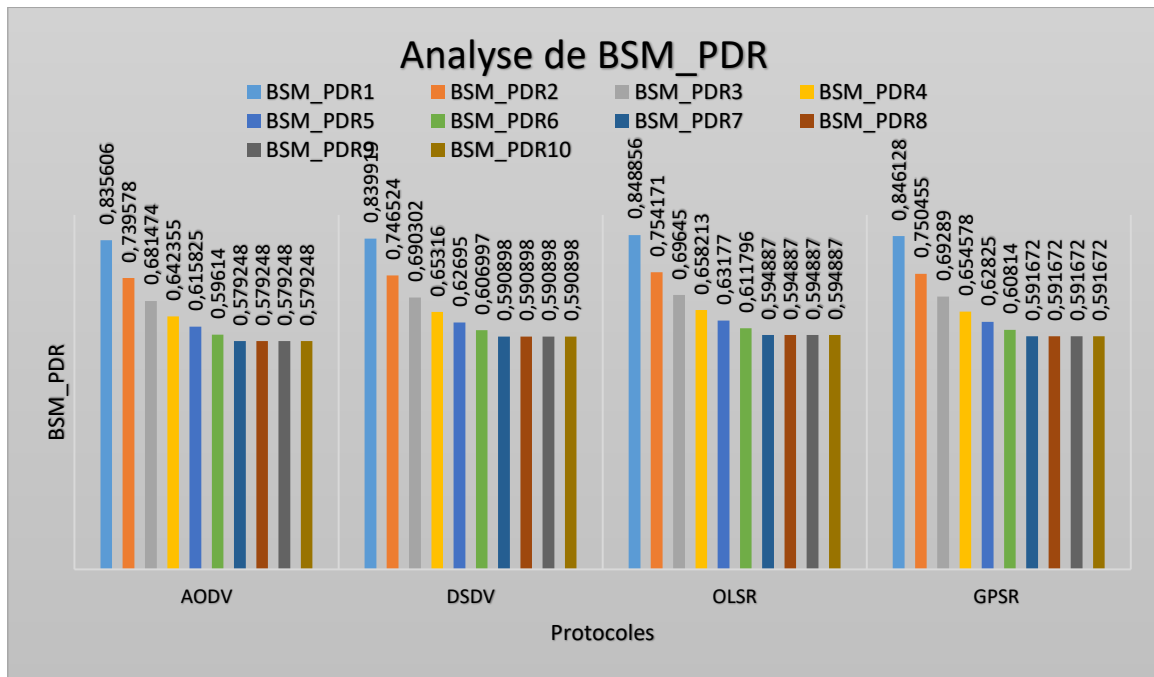


Figure 3.11: L'analyse de BSM_PDR pour 50 véhicules.

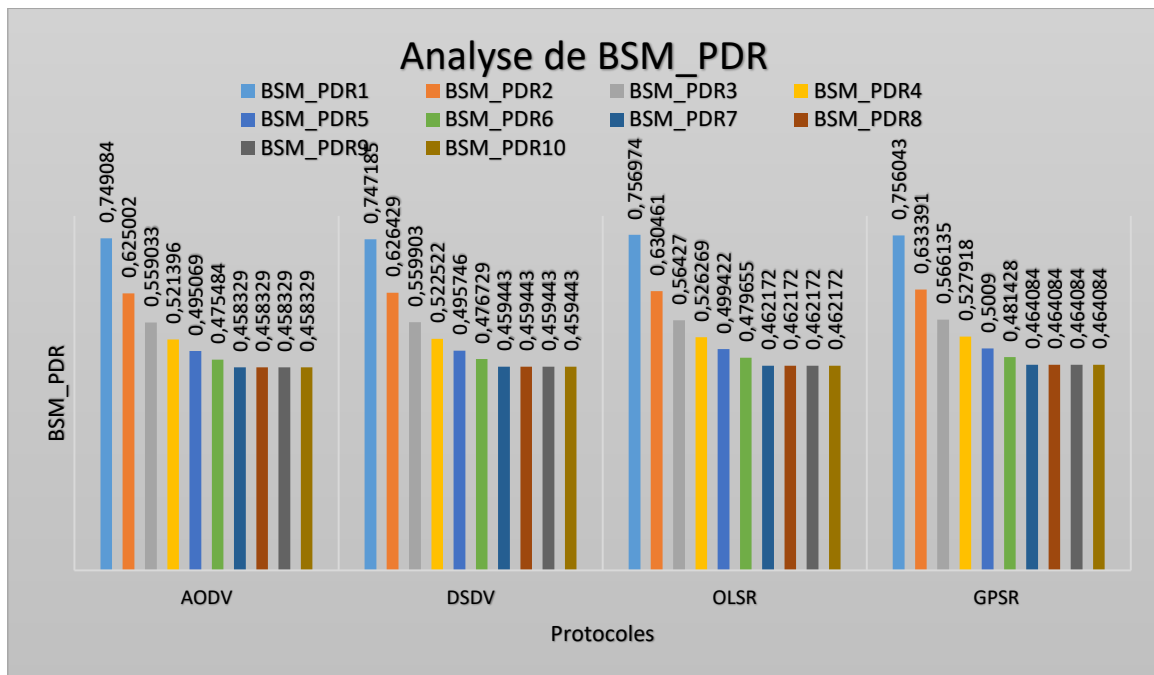


Figure 3.12: L'analyse de BSM_PDR pour 70 véhicules.

Dans cette deuxième simulation dans laquelle la vitesse des nœuds égale à 15 m/s, OLSR donne les meilleurs résultats lorsque la densité du trafic est 30 et 50 véhicules. Mais, lorsque le nombre de véhicule augmente jusqu'à 70 véhicules, GPSR est le plus performant.

3.6.3. Simulation 3

Dans cette troisième simulation, nous augmentons encore la vitesse maximale des véhicules à 20 m/s. Les protocoles de routage seront évalués dans les mêmes configurations de nombre de nœuds

(30, 50 et 70). L'objectif principal de cette simulation est d'analyser l'impact de la vitesse élevée des véhicules sur les performances des protocoles de routage dans un réseau VANET.

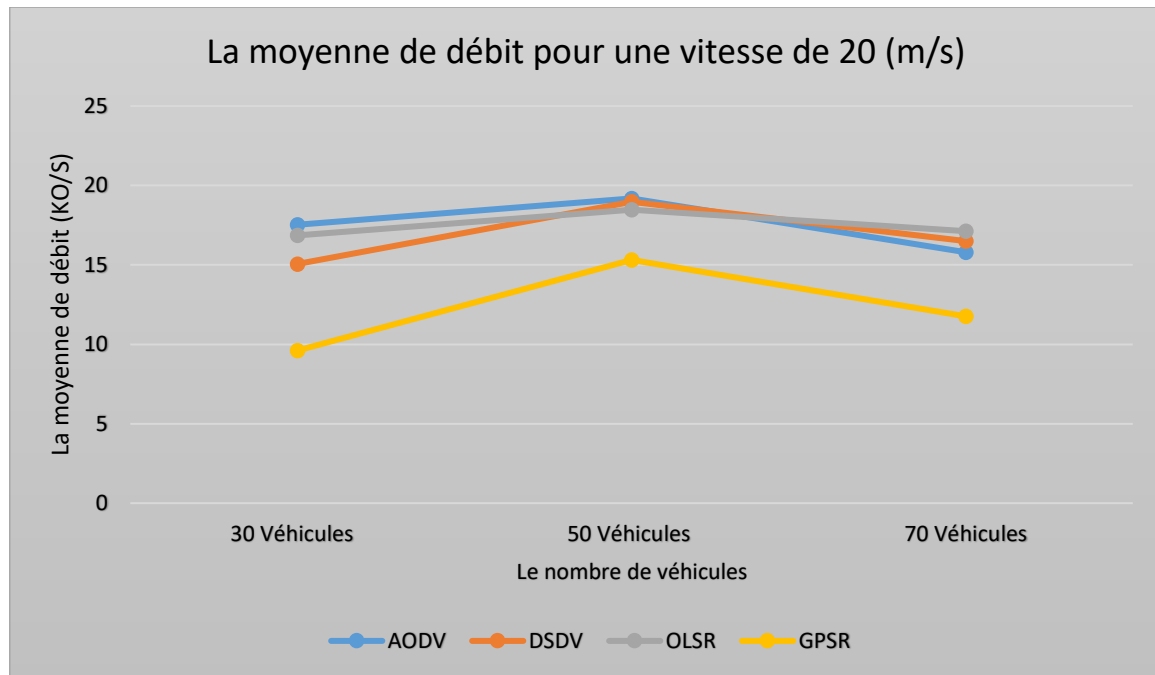


Figure 3.13: Analyse de débit pour une vitesse de 20m/s.

La figure (3.13) représente les valeurs de débit en fonction de variations de nombre des véhicules. Lorsque la densité égale à 30 et 50 véhicules, AODV présente les meilleurs résultats que les autres protocoles. Mais, dans le cas où la densité égale à 70 véhicules OLSR donne le meilleur résultat et la courbe de AODV est au-dessous de OLSR et DSDV. La courbe de GPSR est au-dessous des celles des trois protocoles.

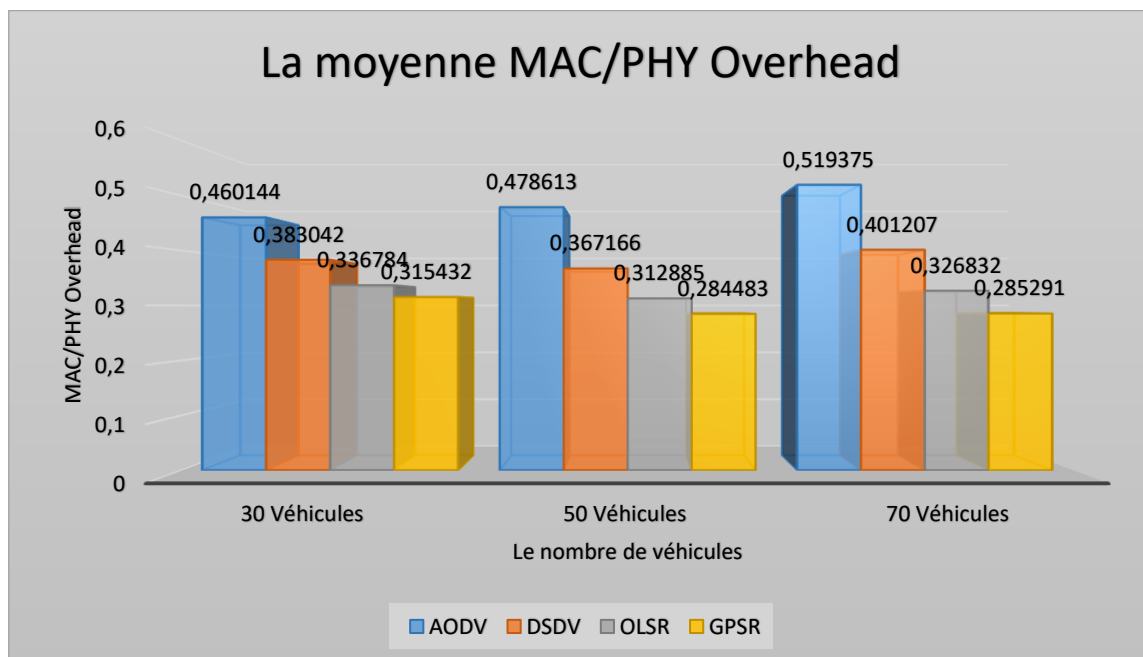


Figure 3.14: Analyse de MAC/PHY Overhead pour une vitesse de 20m/s.

Le calcul de MAC/PHY Overhead dans cette 3ème simulation montre des résultats de performance similaires à l'analyse 1 et l'analyse 2. Avec une vitesse de 20 (m/s) la plus petite valeur obtenue est celle de GPSR avec les trois densités de véhicules (30, 50 et 70). Le protocole AODV donne des valeurs grandes à chaque fois la densité de véhicules augmente.

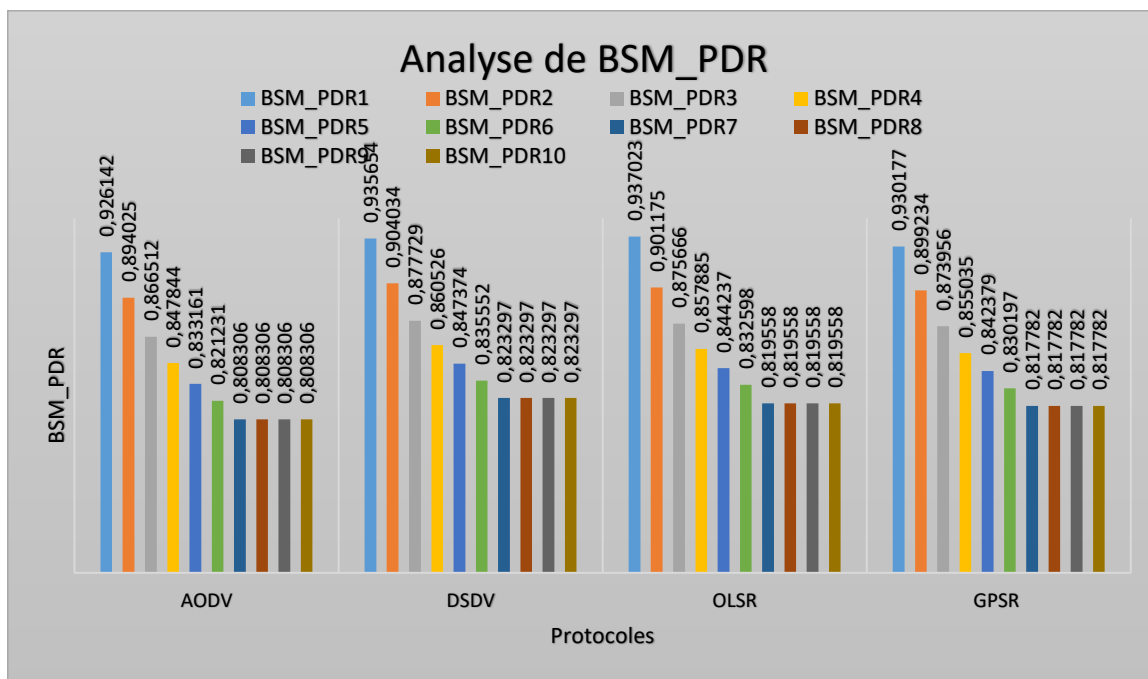


Figure 3.15: L'analyse de BSM-PDR pour 30 véhicules.

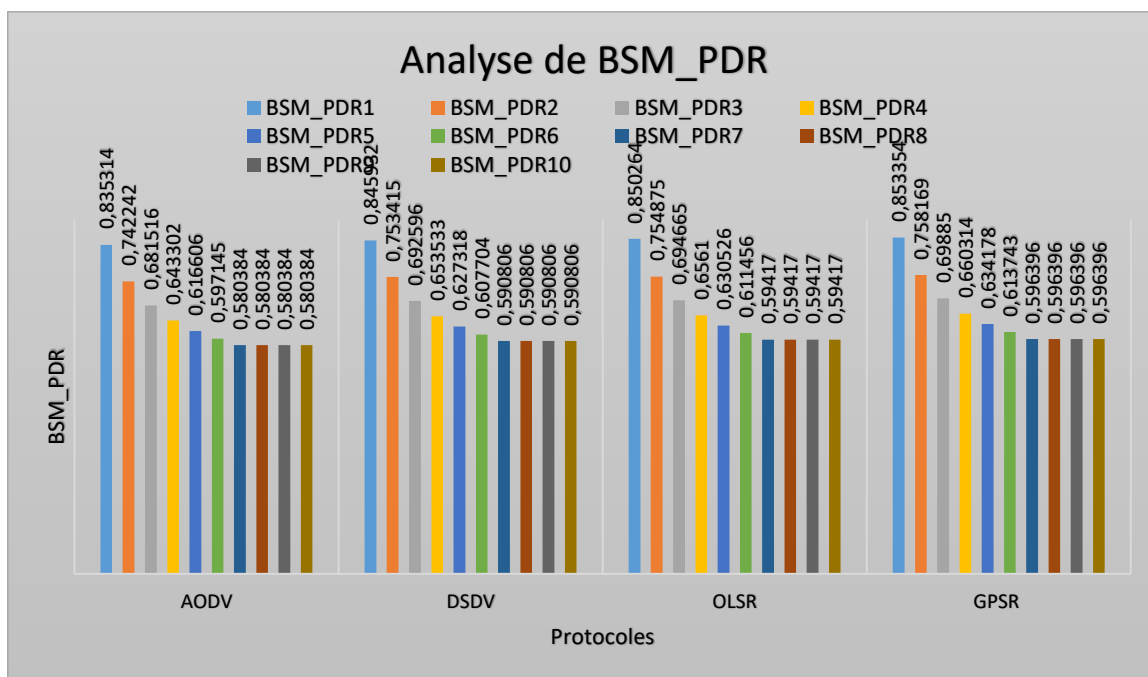


Figure 3.16: L'analyse de BSM-PDR pour 50 véhicules.

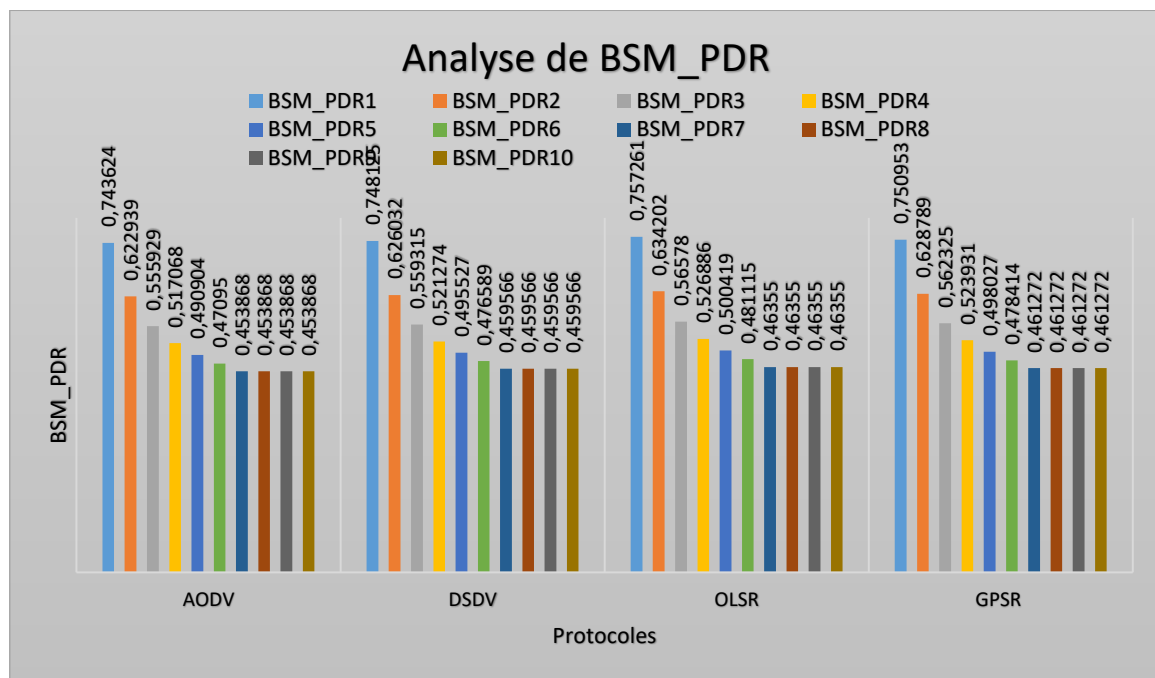


Figure 3.17: L'analyse de BSM-PDR pour 70 véhicules.

Le taux de livraison de la 3eme analyse est illustré dans les figures (3.15), (3.16) et (3.17). Pour 30 véhicules le DSDV est le meilleur. Mais, lorsque le trafic augmente à 50 véhicules, avec sa stratégie géographique de routage GPSR est le plus performant. OLSR a des résultats mieux que AODV. Avec un nombre de véhicule égale à 70, OLSR est le plus performant. Cependant, le plus mauvais protocole comme les autres simulations est AODV.

Le tableau suivant résume les résultats de nos trois simulations :

Tableau 3.2: Les résultats de toutes les simulations.

		Débit	MAC/PHY OverHead	BSM_PDR	
Scenario 1	30 nœuds	AODV	GPSR	GPSR	
	50 nœuds	DSDV	GPSR	Pour une portée de (50-300 m)	Pour une portée de (350 m)
				GPSR	OLSR
	70 nœuds	OLSR	GPSR	Pour une portée de (50-300 m)	Pour une portée de (350 m)
				GPSR	OLSR
	70 nœuds	OLSR	GPSR	OLSR	
Scenario 2	30 nœuds	OLSR	GPSR	OLSR	
	50 nœuds	DSDV	GPSR	OLSR	
	70 nœuds	OLSR	GPSR	GPSR	

Scenario 3	30 nœuds	AODV	GPSR	DSDV
	50 nœuds	AODV	GPSR	GPSR
	70 nœuds	OLSR	GPSR	OLSR

3.7. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons abordé plusieurs aspects liés à la simulation des réseaux VANETs. Nous avons commencé par la présentation de quelques simulateurs couramment utilisés dans ce domaine, en mettant l'accent sur le simulateur NS3. Ce simulateur offre de nombreuses fonctionnalités pour simuler les réseaux VANETs. Nous avons choisi d'utiliser ce simulateur afin d'évaluer les protocoles de routage dans le cadre des VANETs.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé trois scénarios de simulation. L'objectif de notre simulation est l'évaluation des performances de protocole AODV, DSDV, OLSR et GPSR. Cette évaluation a été effectuée suivant des paramètres comme la vitesse des véhicules (10 m/s, 15 m/s et 20 m/s) et la densité de trafic (30, 50 et 70).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le réseau VANET, les véhicules sont mobiles et peuvent quitter ou rejoindre le réseau à tout moment, ce qui entraîne des changements fréquents de topologie. Les protocoles de routage doivent tenir compte de cette fonctionnalité et trouver des routes stables entre le nœud source et le nœud de destination [6].

Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux Ad Hoc et VANETs. Le choix d'un protocole de routage est une tâche difficile. Comment on peut dire qu'un protocole est meilleur par rapport à un autre protocole. Afin de répondre à cette question, nous avons présenté les réseaux VANETs dans le premier chapitre. Ensuite, quelques protocoles de routage ont été illustrés dans le deuxième chapitre. Ces deux chapitres donnent une idée sur la transmission dans les réseaux VANETs et le rôle d'un protocole de routage.

Dans le troisième chapitre nous avons proposé des scénarios de simulation sur simulateur NS3 et SUMO. Certaines métriques de test ont été sélectionnées pour évaluer et comparer ces protocoles de routage. Les résultats de simulation prouvent que les protocoles de routage ont un impact énorme sur les performances de VANET et qu'il est très difficile de trouver le meilleur protocole de routage.

Effectivement, les résultats que nous avons obtenus ouvrent de nombreuses perspectives pour des travaux futurs. Il est intéressant d'optimiser des protocoles de routage tel que l'AODV. Par exemple l'amélioration de la sélection des chemins et l'optimisation des algorithmes du contrôle et de congestion.

Bibliographie

- [1] ATHMANI, Samir. Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil. 2010. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [2] BOUDJAADAR, Amina. Plateforme Basée Agents Pour l'Aide à la Conception et la Simulation des Réseaux de Capteurs Sans Fil. 2010. Mémoire de Magistère. Université 20 aout 55. Skikda.
- [3] OUIZA, Dadoun et OUIZA, Guendouz. Le routage dans les réseaux véhiculaires VANETs. 2017. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [4] SAOUD, Bilal. Wireless Sensor network Lifetime Improving Based on Whale Optimization Algorithm. Adhoc & Sensor Wireless Networks, 2022, vol. 54.
- [5] SIHAM, Yahi et FARIDA, Mallek. Sécurité et routage dans les réseaux Ad hoc. 2013. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [6] TASSOULT, Nadia, AMAD, Mourad, MOUMEN, Hamouma, et al. A Survey on vehicular ad-hoc networks routing protocols: classification and challenges. Journal of Digital Information Management, 2019, vol. 17, no 4, p. 227.
- [7] BERNSEN, James et MANIVANNAN, D. Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification. Pervasive and Mobile computing, 2009, vol. 5, no 1, p. 1-18.
- [8] RIVATON, Olivier. Le routage de l'information dans les réseaux véhiculaires mobiles. 2016. Thèse de doctorat. Université Laval.
- [9] Vehicle Infrastructure Integration –. <http://www.its.dot.gov/vii/>. Consulté le (01/05/2023 at 00 :08).
- [10] COSTA, José M. Systèmes de transport intelligents : Manuel sur les communications mobiles terrestres (y compris l'accès hertzien), Union internationale des télécommunications Secteur des radiocommunications, 2021, Vol. 4.
- [11] MOGHRAOUI, Kahina. Gestion de l'anonymat des communications dans les réseaux véhiculaires Ad hoc sans fil (VANETs). 2015. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [12] BOUSSADIA, Ahlam, BOUDERKA, Meryem, et al. Routage basé sur le clustering dans les réseaux VANETs. 2020. Thèse de doctorat. University of Jijel.
- [13] ADIGUN, Adetundji. Gestion de l'anonymat et de la traçabilité dans les réseaux véhiculaires sans fil. 2014. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [14] BEN CHAABENE, Seif, YEFERNY, Taoufik, et BEN YAHIA, Sadok. A roadside unit placement scheme for vehicular ad-hoc networks. In : Advanced Information Networking and Applications: Proceedings of the 33rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2019) 33. Springer International Publishing, 2020. p. 619-630.

- [15] YEFERNY, Taoufik et HAMAD, Sofian. Vehicular Ad-hoc Networks: Architecture, Applications and Challenges. IJCSNS, 2020, vol. 20, no 2.
- [16] LAHROUNI, Youssef. Détection d'intrusions dans les réseaux véhiculaires sans fil. 2017. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [17] Song Cheng, Gu Xinan, Ping Yuan, et al. Conditional privacy protection authentication scheme based on bilinear pairings for VANET. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2020, vol. 27, no 1, p. 62.
- [18] TALPUR, Anum et GURUSAMY, Mohan. Machine learning for security in vehicular networks: A comprehensive survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, vol. 24, no 1, p. 346-379.
- [19] LU, Zhaojun, QU, Gang, et LIU, Zhenglin. A Survey on Recent Advances in Vehicular Network Security, Trust, and Privacy. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, vol. 20, no 2.
- [20] CHIHI, Ines. Étude de l'attaque «Black Hole» sur le protocole de routage VADD (Vehicule-Assisted Data Delivery). 2017. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [21] PETIT, Jonathan. Surcoût de l'authentification et du consensus dans la sécurité des réseaux sans fil véhiculaires. 2011. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [22] TOOR, Yasser, MUHLETHALER, Paul, LAOUITI, Anis, et al. Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues. IEEE communications surveys & tutorials, 2008, vol. 10, no 3, p. 74-88.
- [23] BOUKSANI, Walid. Gestion de la protection de la vie privée dans les réseaux véhiculaires (VANET). 2017. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [24] TABARY, Dorine. Interopérabilité des technologies de communication dans les réseaux véhiculaires dans la ville intelligente. 2022. Thèse de doctorat. Université de Haute Alsace-Mulhouse.
- [25] ALI, Kahina Ait. Modélisation et étude de performances dans les réseaux VANET. 2012. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [26] SAOUD, Bilal. Simulation and Analysis of Routing Protocols in Wireless Sensor Network. In : 2021 International Conference on Recent Advances in Mathematics and Informatics (ICRAMI). IEEE, 2021. p. 1-5.
- [27] SAOUD, Bilal et MOUSSAOUI, Abdelouahab. New routing protocol in ad hoc networks. In : International Conference on Computer Networks and Communication Technologies: ICCNCT 2018. Springer Singapore, 2019. p. 443-452.
- [28] HAJLAOUI, Rejab. Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de vehicules. 2018. Thèse de doctorat. Université Bourgogne Franche-Comté.
- [29] PERKINS, Charles, BELDING-ROYER, Elizabeth, et DAS, Samir. RFC3561: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. 2003.

- [30] JOHNSON, David, HU, Yin-chun, et MALTZ, David. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4. 2007.
- [31] CHEN, Tsu-Wei et GERLA, Mario. Global state routing: A new routing scheme for ad-hoc wireless networks. In: ICC'98. 1998 IEEE International Conference on Communications. Conference Record. Affiliated with SUPERCOMM'98 (Cat. No. 98CH36220). IEEE, 1998. p. 171-175.
- [32] PERKINS, Charles E. et BHAGWAT, Pravin. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. ACM SIGCOMM computer communication review, 1994, vol. 24, no 4, p. 234-244.
- [33] CLAUSEN, Thomas et JACQUET, Philippe (ed.). RFC3626: Optimized link state routing protocol (OLSR). 2003.
- [34] BENGAG, Amina et EL BOUKHARI, Mohamed. Classification and comparison of routing protocols in VANETs. In : 2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV). IEEE, 2018. p. 1-8.
- [35] KARP, Brad et KUNG, Hsiang-Tsung. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In : Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. 2000. p. 243-254.
- [36] TONGUZ, Ozan K., WISITPONGPHAN, Nawaporn, et BAI, Fan. DV-CAST: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks. IEEE Wireless Communications, 2010, vol. 17, no 2, p. 47-57.
- [37] NADIA, Cherfaoui Nee Touati. Integration de l'application 'vanet-highway' dans le simulateur réseau NS3. 2014. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [38] <https://www.isi.edu/nsnam/ns/index.html>. Consulté le (12/05/2023 at 03 :54).
- [39] SALAMEH, Nadeen. Conception d'un système d'alerte embarqué basé sur les communications entre véhicules. 2011. Thèse de doctorat. INSA de Rouen.
- [40] Hao, J., Wu, J., & Guo, C. (2011). Modeling and simulation of CAN network based on OPNET. 2011. IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks.
- [41] Varga, A. (2010). OMNeT++. Modeling and Tools for Network Simulation, 35–59.
- [42] <https://sites.google.com/site/jsimofficial/>. Consulté le (13/05/2023 a 13 :21).
- [43] BENCHABANA, Ayoub & BENSACI, Ramla. Analyse des protocoles de routage dans les réseaux VANET. 2014. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah-Ouargla.
- [44] S.Y. Wang and Y.W. Li, "Evaluations of Intelligent Traffic Signal Control Algorithms under Realistic Landmark-based Traffic Patterns over the NCTUns Network Simulator,". 2012. IEEE ITSC 2012 (International Conference on Intelligent Transportation Systems). September 16 – 19. Anchorage. Alaska. USA.
- [45] <https://www.nsnam.org/>. Consulté le (15/05/2023 à 22:51).
- [46] NADIA, Cherfaoui Nee Touati. Integration de l'application 'vanet-highway' dans le simulateur réseau NS3. 2014. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

- [47] LASSABE, Frederic, CANALDA, Philippe, CHATONNAY, Pascal, et al. A Friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning. In : Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. IEEE, 2005. p. 382-387.
- [48] CHEN, Yunxia et TELLAMBURA, Chintha. Distribution functions of selection combiner output in equally correlated Rayleigh, Rician, and Nakagami-m fading channels. IEEE Transactions on Communications, 2004, vol. 52, no 11, p. 1948-1956.
- [49] IBTISSAM, SAADI. La prédiction de flux de trafic routier par une méthode d'apprentissage profond. 2020.
- [50] IEEE Standard for Information technology –Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11 les résultats de tous les simulations : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6 : Wireless Access in Vehicular Environments, IEEE Std., 2010.
- [51] MAMANE, Asmae, ELGHAZI, Mohamed, MAZER, Said, et al. Etude de l'impact de différents algorithmes d'ordonnancement pour les femto-cellules pour des trafics temps réel dans le réseau 5G. Revue Méditerranéenne des Télécommunications, 2018, vol. 8, no 2.
- [52] ABDEL GELIL, Walid. A survey on cross-layer design in VANET, issues and solutions. 2016.

Annexe

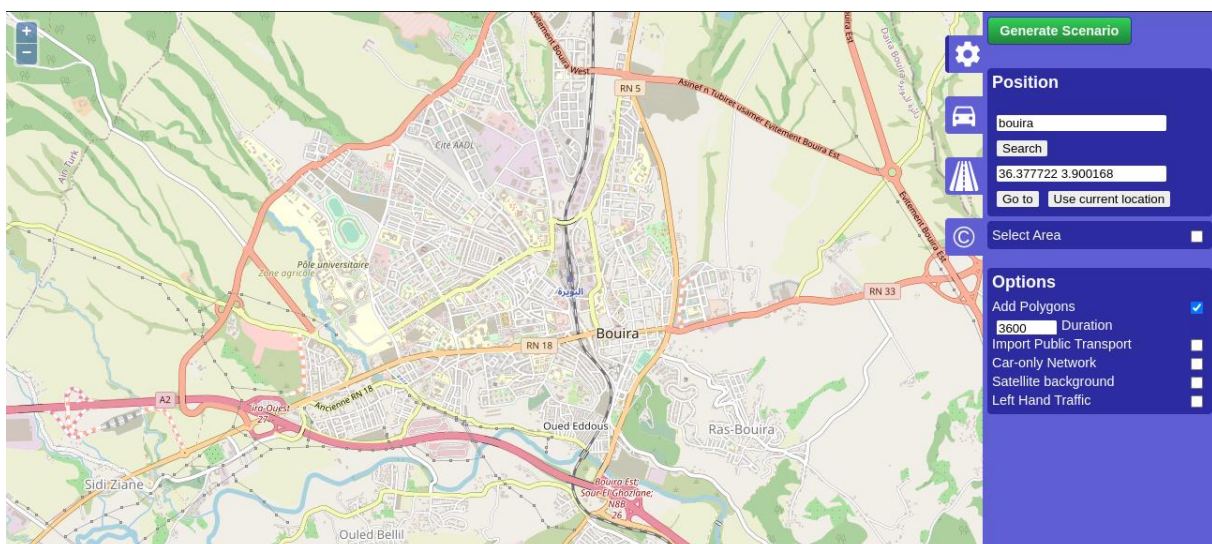
Le processus de simulation d'un réseau véhiculaire ad hoc (VANET) comprend plusieurs étapes. Initialement, SUMO requiert des fichiers d'entrée au format XML. Ces fichiers sont regroupés dans un fichier de configuration spécifique à SUMO, appelé (sumo.cfg). Ce fichier est ensuite traité par un programme en langage C++ fourni par SUMO, qui permet de créer un fichier utilisable par NS-3. À la fin de la simulation avec NS-3, deux fichiers de sortie sont obtenus : l'un contient la trace de toutes les communications entre les nœuds de la simulation, tandis que l'autre comporte les données de déplacement des nœuds pendant la simulation et peut être exécuté dans l'interface graphique de NS-3. Les détails de ce processus sont expliqués dans les paragraphes suivants. Pour faire cas on va utiliser la commande ci-dessous pour ouvrir la carte géographique dans le navigateur internet.

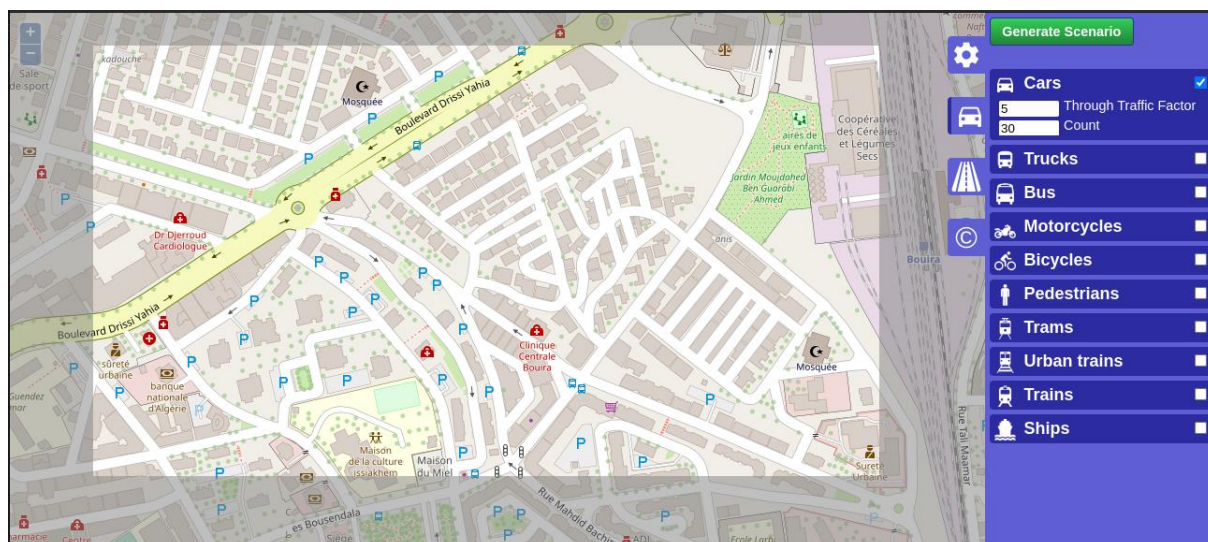
1) Création de scénario avec SUMO

- La première étape consiste à créer un scénario avec OSM par l'utilisation de la commande suivante :

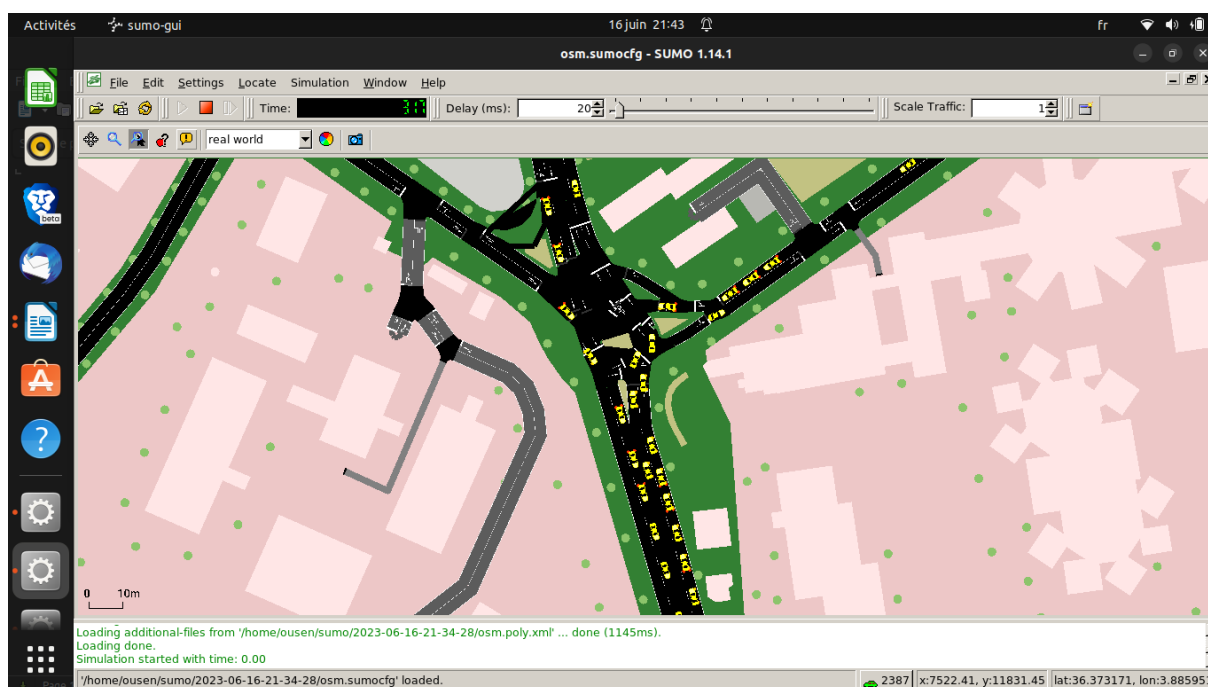
```
ousen@ousen-Inspiron-3543:~/sumo$ python tools/osmWebWizard.py
```

- Lorsque la carte sera ouverte dans le navigateur on peut sélectionner la zone de simulation, le nombre de véhicules, la durée de simulation et plusieurs d'autres paramètres.





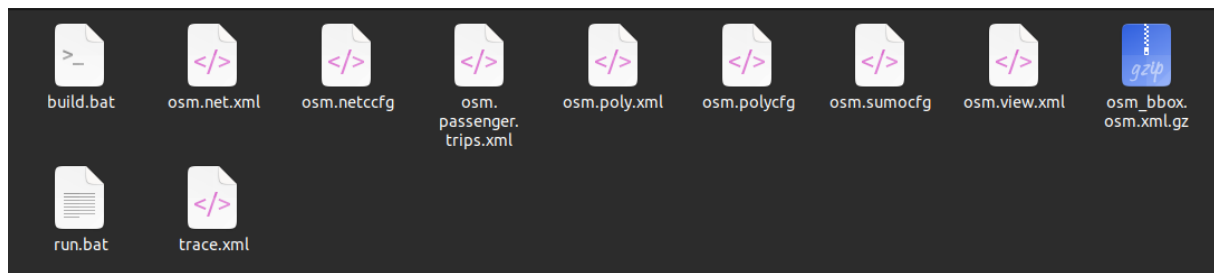
- On peut visualiser le scénario créer avec l'interface graphique de SUMO (sumo-gui).



- L'étape cruciale dans la création d'un scénario pour le simulateur de réseau, NS-3 dans ce cas, est la génération des fichiers de trace. Pour réaliser cela, nous utilisons le script TraceExporter.py qui est inclus par défaut dans SUMO. L'exportation se fait en deux étapes :

- Création d'un fichier de trace pour SUMO, nommé Trace.xml, en utilisant la commande suivante :

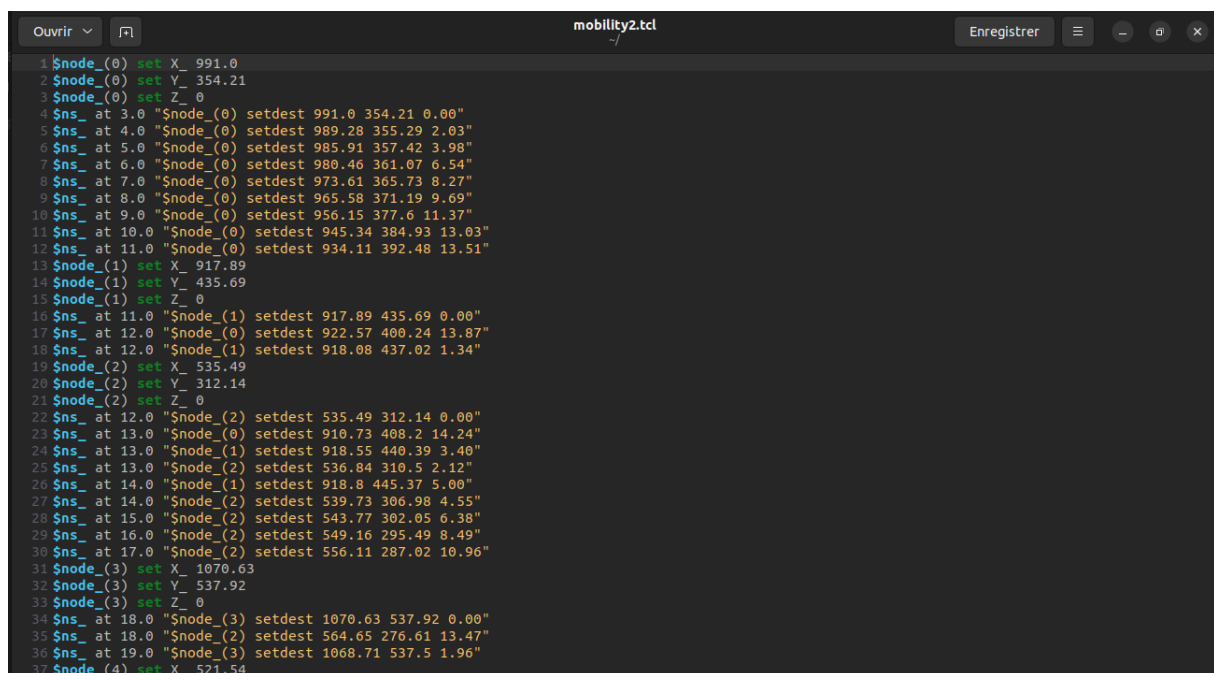
```
ousen@ousen-Inspiron-3543:~/sumo/2023-06-16-21-34-28-02$ sumo -c osm.sumocfg --fcd-output trace.xml
```



- Conversion du fichier de trace généré à l'étape précédente dans un format utilisable par un simulateur de réseau NS-3 :

```
ousen@ousen-inspiron-3543:~/sumo$ python tools/traceExporter.py -t 2023-06-16-21-38-02/trace.xml --ns2mobility-output=/home/ousen/mobility2.tcl
```

Voici le fichier de mobilité qu'on va utiliser avec les simulateur NS-3.



2) La simulation

Dans notre simulation nous avons utilisé le fichier vanet-routing-compare.cc qui est inclus par défaut dans le NS-3, mais nous avons utilisé une version modifier de NS-3 pour lequel le protocole GPSR a été ajouté (NS-3 vient avec 4 protocoles seulement AODV, DSDV, DSR et OLSR)

Pour intégrer le protocole GPSR dans le fichier vanet-routing-compare.cc, nous avons ajouté les lignes suivantes au code source.

```
108 #include "ns3/aodv-module.h"
109 #include "ns3/olsr-module.h"
110 #include "ns3/dsdv-module.h"
111 #include "ns3/dsr-module.h"
112 #include "ns3/gpsr-module.h"
```

```

551 void
552 RoutingHelper::SetupRoutingProtocol (NodeContainer & c)
553 {
554     AodvHelper aodv;
555     OlsrHelper olsr;
556     DsdvHelper dsdv;
557     DsrHelper dsr;
558     DsrMainHelper dsrMain;
559     GpsrHelper gpsr;
560     Ipv4ListRoutingHelper list;
561     InternetStackHelper internet;

```

```

596 case 4:
597     if (m_routingTables != 0)
598     {
599         gpsr.PrintRoutingTableAllAt (rtt, rtw);
600     }
601     list.Add (gpsr, 100);
602     m_protocolName = "GPSR";
603     break;

```

```

2035 cmd.AddValue ("sinks", "Number of routing sinks", m_nSinks);
2036 cmd.AddValue ("txp", "Transmit power (dB), e.g. txp=7.5", m_txp);
2037 cmd.AddValue ("traceMobility", "Enable mobility tracing", m_traceMobility);
2038 cmd.AddValue ("protocol", "1=OLSR;2=AODV;3=DSDV;4=GPSR;5=DSR", m_protocol);

```

Pour lancer la simulation il se fait d'utiliser la commande suivante :

```

ousen@ousen-Inspiron-3543:~/Bureau/ns3.29-with-gpsr-master/ns-3.29$ ./waf --run "scratch/vanet-routing-compare --scenario=1 --protocol=1 --lossModel=1 --txp=10 --speed=10 --nodes=70 --mobility=2 --totaltime=70"

```

On peut modifier les paramètres de simulation dans le terminal de Linux, la figure suivante présente quelques variables qui peut être modifier dans le terminal.

```

cmd.AddValue ("CSVfileName", "The name of the CSV output file name", m_CSVfileName);
cmd.AddValue ("CSVfileName2", "The name of the CSV output file name2", m_CSVfileName2);
cmd.AddValue ("totaltime", "Simulation end time", m_TotalSimTime);
cmd.AddValue ("nodes", "Number of nodes (i.e. vehicles)", m_nNodes);
cmd.AddValue ("sinks", "Number of routing sinks", m_nSinks);
cmd.AddValue ("txp", "Transmit power (dB), e.g. txp=7.5", m_txp);
cmd.AddValue ("traceMobility", "Enable mobility tracing", m_traceMobility);
cmd.AddValue ("protocol", "1=OLSR;2=AODV;3=DSDV;4=GPSR;5=DSR", m_protocol);
cmd.AddValue ("lossModel", "1=Friis;2=ItuR1411Los;3=TwoRayGround;4=LogDistance", m_lossModel);
cmd.AddValue ("fading", "0=None;1=Nakagami;(buildings=1 overrides)", m_fading);
cmd.AddValue ("phyMode", "Wifi Phy mode", m_phyMode);
cmd.AddValue ("80211Mode", "1=802.11p; 2=802.11b; 3=WAVE-PHY", m_80211mode);
cmd.AddValue ("traceFile", "Ns2 movement trace file", m_traceFile);
cmd.AddValue ("logFile", "Log file", m_logFile);
cmd.AddValue ("mobility", "1=trace;2=RWP", m_mobility);
cmd.AddValue ("rate", "Rate", m_rate);
cmd.AddValue ("phyModeB", "Phy mode 802.11b", m_phyModeB);
cmd.AddValue ("speed", "Node speed (m/s)", m_nodeSpeed);
cmd.AddValue ("pause", "Node pause (s)", m_nodePause);
cmd.AddValue ("verbose", "0=quiet;1=verbose", m_verbose);
cmd.AddValue ("bsm", "(WAVE) BSM size (bytes)", m_wavePacketSize);
cmd.AddValue ("interval", "(WAVE) BSM interval (s)", m_waveInterval);
cmd.AddValue ("scenario", "1=synthetic, 2=playback-trace", m_scenario);

```

Abstract

Among the application of Ad Hoc network, we have Vehicular Ad Hoc Network (VANET), which is an important data research domain today. VANET can improve the traffic road efficiency in order to overcome many problems and offer more services to customer. For instance, VANET can lead to reduce traffic jam or improve road safety by minimizing vehicle's accident. Like any wireless network without infrastructure, the routing task is the most difficult task especially when nodes are mobile. The mobility of nodes, which are vehicles in VANET, causes a rapid change of network topology and leads to disconnection the source and destination node. In this work, we will analyze some routing protocols in order to evaluate their performances. In this study we have proposed some scenarios of VANET routing protocols. The simulation has been done on NS3 simulator and SUMO. Simulation proves that routing protocol shave a huge impact on VANET network performances.

Keywords— VANET, Simulation, NS3, SUMO, Routing, AODV, DSDV, GPSR, OLSR.

Résumé

Parmi les applications du réseau ad hoc, nous avons le réseau ad hoc véhiculaire (VANET), qui est un domaine de recherche important aujourd'hui. VANET peut améliorer l'efficacité routière afin de surmonter de nombreux problèmes et d'offrir plus de services au client. Par exemple, VANET peut réduire les embouteillages ou améliorer la sécurité routière en minimisant les accidents de véhicules. Comme tout réseau sans fil sans infrastructure, la tâche de routage est la plus difficile, surtout lorsque les nœuds sont mobiles. La mobilité des nœuds, qui sont des véhicules dans VANET, provoque un changement rapide de la topologie du réseau mener à la déconnexion entre les nœuds source et destination. Dans ce travail, nous analyserons certains protocoles de routage afin d'évaluer leurs performances. Dans cette étude, nous avons proposé quelques scénarios de protocoles de routage VANET. La simulation a été faite sur le simulateur NS3 et SUMO. La simulation prouve que le protocole de routage a un impact énorme sur les performances du réseau VANET.

Mots clé : VANET, Simulation, NS3, SUMO, Routage, AODV, DSDV, GPSR, OLSR.

ملخص

من بين تطبيقات شبكات الـ ad hoc ، لدينا شبكة المركبات (VANET) ، وهي مجال مهم من مجالات البحث و دراسة البيانات في وقتنا الحالي. يمكن لـ VANET تحسين كفاءة حركة المرور على الطرقات من أجل التغلب على العديد من المشاكل وتقديم عديد الخدمات للعملاء. على سبيل المثال، يمكن أن تؤدي VANET إلى تقليل الازدحام المروري أو تحسين السلامة على الطرق عن طريق تقليل حوادث المرور. مثل أي شبكة لاسلكية بدون بنية تحتية، فإن مهمة التوجيه هي أصعب مهمة خاصة عندما تكون العقد في حالة تحرك مستمر. يؤدي تنقل العقد، وهي المركبات في VANET ، إلى تغيير سريع في طوبولوجيا الشبكة ويؤدي إلى قطع الاتصال بين عقدة المصدر والوجهة. في هذه المذكرة، سنقوم بتحليل بعض بروتوكولات التوجيه من أجل تقييم أدائهم. في هذه الدراسة، اقترحنا بعض سيناريوهات بروتوكولات توجيه VANET. تم إجراء المحاكاة على NS3 و SUMO. تثبت المحاكاة أن بروتوكول التوجيه له تأثير كبير على أداء شبكة VANET.

كلمات مفتاحية : شبكات المركبات المخصصة، محاكاة، NS3 ، SUMO ، AODV، توجيه، DSDV ، GPSR ، OLSR.