جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵉⵜ ⵙⵉⴷⵉ ⵎⵓⵃⵎⵎⴰⴷ ⴱⵏ ⵄⴱⴷⵍⵍⴰⵀ ⵏ ⴼⴰⵙ
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم والتقنيات فاس
ⵜⴰⵖⵉⵡⴰⵏⵜ ⵏ ⵜⵎⴰⵙⵙⴰⵏⵉⵏ ⴷ ⵜⵙⵏⵉⴳⵉⵜⵉⵏ
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

N° d'ordre : 71/2022

Centre des Études Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales
Formation Doctorale : Sciences de l'ingénieur, sciences physiques, mathématiques et informatique
Discipline : Informatique
Spécialité : Informatique
Laboratoire : Systèmes Intelligents et Applications

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

Étude, Évaluation des performances et Amélioration des protocoles de routage géographiques dans les Réseaux Véhiculaire Ad-hoc

Préparée par : **Safae Smiri**

Soutenue le 19/11/2022 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Pr. ZENKOUAR Khalid	PES	Faculté des Sciences et Techniques Fès	Président
Pr. OUMSIS Mohamed	PES	Ecole Supérieure de Technologie Salé	Rapporteur & Examinateur
Pr. EL OUADGHIRI Moulay Driss	PES	Faculté des Sciences Meknès	Rapporteur & Examinateur
Pr. MRABTI Fatiha	PES	Faculté des Sciences et Techniques Fès	Rapporteur & Examinateur
Pr. EL FADILI Hakim	PH	Ecole Nationale des Sciences Appliquées Fès	Examinateur
Pr. BOUSHABA Abdelali	PH	Faculté des Sciences et Techniques Fès	Examinateur
Pr. BEN ABBOU Rachid	PES	Faculté des Sciences et Techniques Fès	Directeur de thèse
Pr. ZAHI Azeddine	PES	Faculté des Sciences et Techniques Fès	Directeur de thèse

بسم الله الرحمن الرحيم



صدق الله العظيم

À ma mère,

À mon père (Puisse Dieu ait son âme),

À ma famille,

À tous ceux que j’aime,

Et à tous ceux qui m’aiment..

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le tout miséricordieux, de m'avoir donné le courage, la force et la patience pour mener cette thèse de doctorat. Le succès de cette thèse n'aurait pas été possible sans l'inspiration et le soutien d'un certain nombre de personnes que j'aimerais remercier en ce moment.

Je remercie sincèrement mes deux directeurs de thèse, professeur Azeddine Zahi et professeur Rachid Ben Abbou, pour leurs conseils, leurs orientations et leurs encouragement qui m'ont accompagnés tout au long de la réalisation de cette thèse. J'adresse un remerciement particulier au professeur R. Ben Abbou qui a initié et orienté ce travail de thèse et qui a toujours trouvé le temps de me guider et de m'encourager chaque fois qu'il était nécessaire. Je saisis cette occasion pour mentionner que je suis redevable envers lui pour ses suggestions et idées pertinentes. J'apprécie beaucoup son dynamisme, son sérieux et ses compétences qui ont fait de cette thèse un succès.

Je remercie le Professeur Abdelali Boushaba, qui a été mon encadrant durant la réalisation de cette thèse. Sans sa contribution, ses commentaires perspicaces et son encouragement, ainsi ses conseils avisés et son temps précieux, cette thèse n'aurait pu être achevée. Je remercie également le professeur Adil Ben Abbou, pour m'avoir encadré. Je le remercie pour ses efforts et ses conseils de grande qualité scientifique qui m'ont été d'un appui considérable dans mon travail de recherche.

Je tiens également, à remercier vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail. Je remercie le professeur Zenkouar Khalid d'avoir accepté de présider le jury. Ensuite, j'aimerais remercier, professeur Oumsis Mohamed, professeur El Ouadghiri Moulay Driss et professeurs Mrabti Fatiha qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse et d'avoir pris de l'intérêt pour mon travail. Je remercie aussi professeur El Fadili Hakim d'avoir accepté d'être examinateur de ma thèse.

Ma plus grande reconnaissance et gratitude va vers la personne qui m'est la plus chère et qui a eu un rôle capital de ma réussite. J'offre de tout mon cœur mes profonds remerciements à ma mère, qui m'a motivé et encouragé sans cesse, qui m'a toujours poussé en avant et qui attendait avec impatience que je réussisse notre rêve partagé. C'est pour elle que je consacre ce travail.

Ma profonde et sincère gratitude à ma famille et mes proches qui m'ont encouragé. Je vous remercie mes oncles Ahmed, Abdellah et Mohamed, mes cousin(e)s et mes tantes en particulier Rahma pour son soutien continu et mes sœurs. Je remercie Dieu de vous avoir dans ma vie. Je remercie également ma chère amie Hajar pour son soutien et son encouragement. Je remercie mes collègues du Laboratoire SIA pour leur amitié et leur aide. Je tiens également à remercier mes collègues Squalli Houssaini Zineb et Imane Zaimi pour leurs conseils prodigués. Enfin, mes remerciements vont à toute personne que je n'ai pas citée ici et qui, a contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Résumé

Les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANETs), qui font désormais partie des systèmes de transport intelligents (ITS), sont capables de prendre en charge de nombreuses applications telles que : la sécurité routière, le confort des conducteurs et les applications d'info-divertissement. Les VANETs constituent la technologie la plus récente dans le domaine des communications entre véhicules. En raison de la topologie hautement dynamique, le mécanisme de routage dans les VANETs est crucial, notamment pour les applications véhiculaires qui nécessitent une communication fiable et une Qualité de Service (QoS) satisfaisante. Le protocole GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) est l'un des protocoles de routage géographiques les plus prometteurs pour les réseaux VANETs. Toutefois, son effectivité est entièrement dépendante des informations sur la position géographique des nœuds. Par conséquent, le suivi et la gestion des informations sur la mobilité des véhicules constituent des paramètres essentiels qui doivent être pris en compte.

Dans cette thèse, nous proposons deux contributions pour gérer le problème de la mobilité et améliorer l'efficacité du protocole de routage GPSR. Nous proposons dans la première contribution un protocole nommé WA-GPSR (Weight-Aware GPSR), qui sélectionne le véhicule le plus approprié pour le prochain saut en se basant sur des critères supplémentaires et non seulement sur la distance la plus proche de la destination. Ensuite, le protocole WA-GPSR attribue des poids aux véhicules afin d'offrir une bonne qualité de service (QoS). Nous avons proposé une deuxième contribution QLG (Q-Learning GPSR) basée sur un mécanisme d'intelligence artificielle qui calcule de nouvelles mesures de routage en tenant compte de la mobilité, de la densité, du temps de communication accumulé et de la durée de vie des liaisons des véhicules.

Des simulations exhaustives ont été réalisées pour évaluer et prouver l'efficacité des améliorations proposées pour le protocole GPSR. Les résultats des simulations révèlent une amélioration significative des performances de nos deux améliorations en termes de taux de paquets délivrés, de délais de bout en bout, de coût de routage, et d’efficacité par rapport aux autres protocoles de routage étudiés.

Mots clés : Réseaux véhiculaires ad-hoc, VANET, protocole de routage géographique, intelligence artificielle, Q-Learning, QoS, NS-2, VANETMOBISIM.

Abstract

Vehicular ad-hoc networks (VANETs), which are part of Intelligent Transportation Systems (ITS), are capable of supporting many applications such as: road safety, driver comfort and infotainment applications. Due to the highly dynamic topology, the routing mechanism in VANETs is crucial, especially for vehicular applications that require reliable communication and satisfactory Quality of Service (QoS). The Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) protocol is one of the most promising geographic routing protocols for VANETs. However, its effectiveness is entirely dependent on information about the geographical position of the nodes. Therefore, the tracking and management of vehicle mobility information are essential parameters that need to be taken into account.

In this thesis, we propose two contributions to handle the mobility problem and improve the efficiency of the GPSR routing protocol. In the first contribution, we propose a protocol named WA-GPSR (Weight-Aware GPSR), which selects the most appropriate vehicle for the next hop based on additional criteria and not only on the closest distance to the destination. Secondly, the WA-GPSR protocol assigns the weight to the vehicles in order to provide a good quality of service (QoS). We proposed a second contribution QLG (Q-Learning GPSR) based on an artificial intelligence mechanism that computes new routing metrics taking into account the mobility, the density, the accumulated communication time and the link lifetime of vehicles.

Extensive simulations were carried out to evaluate and to prove the effectiveness of the proposed improvements to the GPSR protocol. The simulation results show a significant performance improvement of our two enhancements protocols in terms of packet delivery ratio, end-to-end delay, routing cost, and efficiency compared to the other studied routing protocols.

Keywords: Vehicular ad-hoc networks, VANET, geographic routing protocol, artificial intelligence, Q-Learning, QoS, NS-2, VANETMOBISIM

Table des matières

Remerciements 4

Liste des figures 10

Listes des tableaux 13

Introduction générale 16

1 État de l'art 20

Introduction 20

1.1 Réseaux mobiles ad-hoc (MANET) 21

1.2 Les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET) 22

1.2.1 Architecture des réseaux VANETs 23

1.2.2 Applications des réseaux VANETs 24

1.2.3 Caractéristiques des réseaux VANETs 29

1.2.4 Défis et contraintes des VANETs 30

1.2.5 Norme et standardisation dans les réseaux VANETs 33

1.3 Protocoles de routage des réseaux VANETs 34

1.4 Classification des protocoles de routage dans les VANETs 35

Conclusion 40

2 Évaluation des performances des protocoles de routage dans l'environnement VANET 41

Introduction 41

2.1 Principaux protocoles de routage des VANETs 42

2.1.1 Protocoles de routage réactif (à la demande) 42

2.1.2 Protocoles de routage proactif 43

2.1.3 Protocole de routage hybride 44

2.1.4 Protocole de routage géographique (basé sur la position) 44

2.2 Outils de simulation 46

2.2.1 Simulateur de mobilité 46

2.2.2 Simulateur de réseau 48

2.3 Paramètres de simulation 50

2.4 Critères d'évaluation 52

2.5 Scénario de l'environnement Urbain 53

2.5.1 Résultats des simulations en fonction de la variation de la charge de trafic CBR 54

2.5.2 Résultats des simulations en fonction de la variation la charge de connexion TCP 58
2.6 Scénario de l'environnement Manhattan 63
2.6.1 Résultats des simulations en fonction de la variation de la charge de trafic CBR 63
2.6.2 Résultats des simulations en fonction de la variation de la charge de trafic TCP 67
2.7 Discussion 71
Conclusion 72
3 Étude et implémentation des variantes du protocole GPSR 74
Introduction 74
3.1 Principe de fonctionnement du protocole géographique GPSR 74
3.1.1 Mode greedy 74
3.1.2 Mode périmètre (Règle de la main droite) 76
3.1.3 Gestion de voisinage 77
3.2 Amélioration des protocoles de routage de localisation basé sur le protocole GPSR 78
3.2.1 Le protocole géographique MM-GPSR (Maxdurataion-Minangle GPSR) 78
3.2.2 Le protocole géographique MGPSR (Modified Greedy Perimeter Stateless Routing) 80
3.3 Evaluation des performances 80
3.3.1 Paramètres d'évaluation 80
3.3.2 Résultats de simulation 81
Conclusion 85
4 L'amélioration du protocole de routage géographique GPSR : WA-GPSR 86
Introduction 86
4.1 Motivation et contribution 87
4.2 Travaux antérieurs 88
4.3 L'instabilité du saut suivant dans le mode greedy 90
4.4 Le protocole amélioré WA-GPSR (Weight Aware GPSR) 91
4.4.1 Zone de communication efficace ECA (Efficient Communication Area) 91
4.4.2 Gestion des messages HELLO et création de la table des voisins 93
4.5 Métriques de routage 95
4.5.1 La durée de vie du lien 95
4.5.2 Le temps de communication accumulée 95
4.5.3 La densité des nœuds 96

4.5.4 La mobilité des nœuds 96
4.5.5 Calcul des poids relatifs aux facteurs de routage 97
4.6 Evaluation des performances 99
4.6.1 Paramètres d'évaluation 99
4.6.2 Résultats d'expérimentations 101
Conclusion 108
5 Le protocole de routage géographique Q-Learning GPSR (QLG) basé sur l'Intelligence Artificielle 109
Introduction 109
5.1 Motivation et contribution 110
5.2 Travaux antérieurs 111
5.3 Modèle d'apprentissage Q-learning pour les VANETs 113
5.4 Le protocole QLG (Q-Learning based Geographic stateless routing protocol) 114
5.4.1 Le mécanisme de fonctionnement du protocole de routage QLG 114
5.4.2 Échange d'information entre voisins par le biais des messages HELLO 118
5.5 Résultats des simulations 120
5.5.1 Scénario 1 : résultats de la simulation pour la variation du nombre de connexions 122
5.5.2 Scénario 2 : Résultats de simulation pour la variation de la densité des véhicules 124
Conclusion 128
Conclusion et perspectives 129
Bibliographie 131
Liste des Publications 139

Liste des Figures

1.1 Exemple de transmission de messages dans les réseaux MANET 21
1.2 L'étendu du système de transport intelligent [3] 22
1.3 Architecture des réseaux VANETs 24
1.4 Application de sureté et de sécurité routière [14] 26
1.5 Avertissement de changement de voie [16] 28
1.6 Alerte du piéton [17] 29
1.7 Présentation de la pile du protocole WAVE 34
1.8 Taxonomie des différents protocoles de routage 37
2.1 Mécanisme de fonctionnement du protocole de routage AODV 42
2.2 Mécanisme de fonctionnement du protocole OLSR utilisant des relais multipoints (MPR) 43
2.3 Mécanisme de fonctionnement du protocole hybride ZRP 44
2.4 Système de simulation des VANETs basé sur les simulateurs NS-2 et VANETMOBISIM 47
2.5 Exemple de mouvement véhiculaire de notre simulation basée sur le modèle de mobilité IDM-LC (à gauche) et la topologie du réseau avec neuf RSU fixe (à droite) (a) scénario Manhattan (b) scénario Urbain 50
2.6 Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 54
2.7 Délai de bout en bout en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 55
2.8 Gigue en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 56
2.9 Le coût de routage en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 57
2.10 Efficacité en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 58
2.11 Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 59
2.12 Délai de bout en bout en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 60
2.13 Gigue en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 61
2.14 Coût de routage en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 62
2.15 Efficacité en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 62
2.16 Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 63
2.17 Délai de bout en bout (EED) en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 64
2.18 Gigue en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 65
2.19 Coût de routage en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 66

2.20 Efficacité en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 67
2.21 Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 68
2.22 Délai de bout en bout (EED) en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 68
2.23 Gigue en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 69
2.24 Coût de routage en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU 70
2.25 Efficacité en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilis*ation des RSU* 71
3.1 Un exemple de la fonctionnalité du protocole GPSR (mode greedy) 75
3.2 Transmission par le mode périmètre du protocole GPSR (Règle de la main droite) 77
3.3 Format d'une entrée de la table de voisinage 77
3.4 Schéma du protocole MM-GPSR [63] 79
3.5 PDR en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) faible valeur du poids (W=0.2) (b) valeur de poids élevée (W=0.7) 82
3.6 Délai de bout en bout en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) valeur de poids faible (W=0.2) (b) valeur de poids élevé (W=0,7). 82
3.7 Gigue en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) valeur de poids faible (W=0.2) (b) valeur de poids élevée (W=0.7) 83
3.8 Coût de routage en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) valeur de poids faible (W=0,2) (b) valeur de poids élevée (W=0,7). 84
3.9 Efficacité en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) faible valeur de poids (W=0,2) (b) valeur de poids élevée (W=0,7). 84
4.1 L'instabilité du saut suivant dans le transfert greedy. 91
4.2 Diagramme de la zone de communication efficace ECA 92
4.3 Organigramme du protocole de routage WA-GPSR 94
4.4 Taux de paquets délivrés en fonction de nombre de connexions CBR 102
4.5 Taux de paquet délivrés en fonction de nombre de véhicules 103
4.6 Délai de bout en bout en fonction de nombre de connexions CBR 104
4.7 Délai de bout en bout en fonction de nombre de véhicules 104
4.8 Coût de routage en fonction de nombre de connexions CBR 105
4.9 Coût de routage en fonction de nombre de véhicules 106
4.10 Efficacité du réseau en fonction du nombre de connexions CBR 107
4.11 Efficacité du réseau en fonction de nombre de véhicules 107
5.1 L'intéraction entre l'agent et l'environnement dans le Q-learning 113
5.2 Décision de la transmission du protocole GPSR 116
5.3 Décision de la transmission du protocole amélioré QLG 117
5.4 Le mécanisme de fonctionnement du protocole amélioré QLG 117
5.5 Format des messages HELLO du protocole QLG 119
5.6 Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de connexions CBR 122
5.7 Le délai de bout en bout en fonction du nombre de connexions CBR 123
5.8 Le coût de routage en fonction du nombre de connexions CBR 123
5.9 L'efficacité en fonction du nombre de connexions CBR 124
5.10 Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de densités 125
5.11 Le délai de bout en bout en fonction du nombre de densités 126

5.12 Le coût de routage en fonction du nombre de véhicules 127
5.13 L'efficacité en fonction du nombre de densités 127

Liste des Tableaux

2.1 Les avantages et les inconvénients des protocoles de routage étudiés 45
2.2 Paramètres de simulation..... 51
2.3 Paramètres du modèle de mobilité macroscopique 52
2.4 Paramètres du modèle de mobilité microscopique..... 52
3.1 Paramètres de simulation..... 81
4.1 Le format du paquet HELLO dans le protocole WA-GPSR 95
4.2 Paramètres du modèle de mobilité microscopique..... 100
4.3 Paramètres de simulation..... 100
5.1 Paramètres généraux de la simulation 121
5.2 Paramètres du modèle de mobilité microscopique..... 121

Liste des Abréviations

AODV . . . . .Ad-hoc On Demand Distance Vector

ASTM . . . . . .American Society for Testing and Materials

A-STAR . . . .Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing

AGF . . . . . .Advanced Greedy Forwarding

CanuMobiSim . . . . CANU Mobility Simulation Environment

CAR . . . . Connectivity-Aware Routing

COIN . . . .Clustering for Open Ivc Network

DSDV . . . . Destination Sequenced Distance Vector

DSR . . . . Dynamic Source Routing

DSRC . . . . . . Dedicated Short Range Communications

DTN . . . . . . Delay Tolerent Network

DV-CAST . . . . . . Distributed vehicular broadcast protocol

DYMO . . . . Dynamic MANET on Demand

EED . . . . . .End to End Delay

FSR . . . . . . Fisheye State Routing

GPCR . . . . Greedy Perimeter Coordinator Routing

GRANT . . . . Greedy Routing with Abstract Neighbor Table

GPS . . . . . . Global Positioning System

GPSR . . . . Greedy Perimeter Stateless Routing

GSR . . . . . Global State Routing Protocol

GyTAR . . . . Greedy Traffic Aware Routing

HLAR . . . . Hybrid Location-based Ad-hoc Routing

IDM . . . .Intelligent driving model

IDM-IM . . . . . Intelligent driving model with Intersection Management

IDM-LC . . . . Intelligent driving model with Lane Changing

ITS . . . . . Intelligent Transportations Systems

LORA-CBF . . . . Location Routing Algorithm with Cluster Based Flooding

MOBICAST . . . . MOBile Juste In Time MultiCASTing

MOVE . . . . Motion Vector Routing Algorithm

Liste des abréviations

NS-2 . . . . . Network Simulator 2

OBU . . . . On Board Unit

OLSR . . . . . Optimized Link State Routing

P2P . . . . . Peer-to-Peer

PDR . . . . . Packet Delivery Ratio

PRW. . . . . Pedestrian in Roadway Warning

QoS . . . . . Quality of Services

ROVER. . . . . RObust VEhicular Routing

RSU . . . . . Road Side Units

STAR . . . . . Source Tree Adaptive Routing Protocol

TIGER . . . . . Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing

To-GO . . . . . Topology- assist Geo-Opportunistic

TORA . . . . . Temporary Ordered Routing Algorithm

V2I . . . . Vehicle to Infrastructure

V2V . . . . Vehicle to Vehicle

VADD . . . . . Vehicle-Assisted Data Delivery

VANET. . . . . Vehicular Ad-hoc Network

WAVE . . . . . … Wireless Ability in Vehicular Environments

WRP . . . . Wireless Routing Protocol

ZOR . . . . . … Zone Of Relevance

ZRP . . . . Zone Routing Protocol

Introduction générale

Le développement récent des technologies sans fil et l'augmentation des accidents routiers ont entraîné l'évolution des approches de la sécurité routière, la gestion et le contrôle du traffic. Ainsi des applications de divertissement et de navigation dans les systèmes de transport intelligents (ITS) [1]. Afin de rendre le transport efficace et sûr, l'ITS (Intelligent Transportation System) supporte deux types de communication sans fil : La longue portée et la courte portée [2]. Les communications à longue portée font principalement appel à l'infrastructure existante, comme les réseaux cellulaires pour établir la communication. Au contraire, la communication à courte portée dépend de la technologie émergente IEEE 802.11, pour former un réseau ad-hoc. Pour l'interaction entre véhicules, on utilise principalement une communication à courte portée, qui comprend, les véhicules en mouvement et les unités de bord de route (RSU) stationnaires qui sont communément connus sous le nom de réseau véhiculaire ad-hoc (VANET) [3]. Il s'agit d'une intégration d'une nouvelle génération de réseaux sans fil dans les véhicules, qui communiquent entre eux de manière pair à pair (P2P), ou en prenant appui sur des réseaux existants ou en s'appuyant sur les RSU existantes. Le premier cas est appelé communication de Véhicule à Véhicule (V2V), tandis que le second est connu sous le nom de communication de Véhicule à Infrastructure (V2I). Dans l'ère actuelle, les véhicules sont indispensables pour le déplacement de beaucoup de personne. Par conséquent, l'augmentation de l'utilisation de transport privé accroît le taux d'accident. Plusieurs études ont montré qu'environ 60 % des accidents routiers peuvent être évités si le conducteur reçoit un message d'avertissement quelques secondes avant le moment de l'accident [4]. La présence d'OBU (On Board Unit) et de GPS (Global Positioning System), d'interfaces de réseaux dans les VANETs, donne aux véhicules sur la route la possibilité d'envoyer et de recevoir des informations [5]. Les véhicules collectent, traitent et transmettent des informations pour des raisons de sécurité. En effet, les applications véhiculaires exigent dans la plupart des cas une fiabilité de communication, une qualité de service (QoS) satisfaisante, mais également dans certains cas des communications en temps réel.

Compte tenu de ce qui précède, la motivation principale de cette thèse est de contribuer au développement des communications entre les véhicules. Un système de communication véhiculaire augmenterait la sécurité des voyageurs et vise à réduire le temps de trajet, la conservation de l'énergie et la protection de l'environnement. Ainsi, l'amélioration de l'efficacité du système de transport qui connaît une croissance rapide. La grande mobilité, la topologie dynamique et l'évolutivité des réseaux VANETs s'étendent sur une très grande échelle incluant de nombreux véhicules, ce qui fait du routage une tâche difficile et fortement influencée par le choix des protocoles de routage, avec un impact critique sur l'efficacité de la communication entre les véhicules. Par conséquent, les défis qui en résultent peuvent affecter la qualité de service des applications VANETs.

Pour relever les défis cités ci-dessus, il est nécessaire de résoudre certains problèmes des VANETs et améliorer la QoS. Toutefois, cela exige un environnement de simulation réaliste qui garantit des résultats fiables. Par ailleurs, une grande importance est accordée aux propositions, qui contribuent à augmenter les performances des protocoles de routage et du

réseau véhiculaire. En effet, la communication véhiculaire requiert des mécanismes de routage simples et efficaces qui doivent s'adapter efficacement aux changements rapides du réseau.

Pour parvenir à cet objectif général, nous avons abordé des objectifs partiels qui ont été identifiés comme suit :

- Examiner les protocoles existants et les études de recherche dans le domaine des réseaux véhiculaires ad-hoc ;
- Évaluer, par une étude comparative, les performances des protocoles de routage ordinaires existants dans le domaine des réseaux véhiculaires ad-hoc, afin d'extraire le meilleur protocole le plus adapté pour ce type d'environnement ;
- Améliorer sur plusieurs étapes le protocole de routage géographique sélectionné dans l'étape précédente nommé GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing protocol) [6] dans des scénarios réels pour atteindre des performances élevées du réseau et pour augmenter le taux de paquets délivrés tout en minimisant le délai de bout en bout et le coût de routage.

Pour accomplir les différents objectifs de notre recherche, nous avons suivi une méthodologie qui se résume dans les étapes suivantes :

La première étape est le choix du protocole de routage le plus approprié. Pour cela, nous nous sommes investis dans la recherche du protocole de routage le plus pertinent et le plus prometteur dans les réseaux véhiculaires ad-hoc. En effet, nous avons commencé par étudier les stratégies de routage adoptées par plusieurs protocoles de routage et nous les avons classifiés. Dans un second temps, nous avons décrit brièvement le principe de fonctionnement de sept différents protocoles de routage et nous les avons intégrés au sein du simulateur de réseau NS-2. Grâce à ce dernier et au générateur de mobilité VANETMOBISIM, nous avons évalué par une étude comparative les performances de ces protocoles afin d'arriver à élire le meilleur parmi eux en termes de QoS. Nos résultats, appuyés par les études réalisées des autres chercheurs, ont attesté que les protocoles de routage géographique sont les plus appropriés et les plus adaptés pour les réseaux véhiculaires fortement dynamiques. En revanche, dans le cadre de notre étude, nous avons accordé une attention particulière au protocole GPSR puisqu'il est un exemple typique des protocoles géographiques. Pour une meilleure amélioration du protocole GPSR, il était indispensable de bien cerner ce protocole, comprendre son mécanisme dans différentes situations et déterminer ses limites. Le protocole GPSR utilise deux principaux modes : Le premier est appelé mode greedy. Il est utilisé par défaut et consiste à transmettre les paquets de données au nœud voisin le plus proche de la destination finale. Le second mode est le mode périmètre qui n'est invoquée que lorsque le premier processus greedy échoue.

L'avantage le plus important du protocole GPSR est qu'il élimine certaines limitations du routage basé sur la topologie en utilisant des informations sur les positions géographiques des véhicules à l'aide d'un système de localisation comme le GPS. Néanmoins, nous avons constaté que GPSR a une certaine défaillance au niveau de la gestion de la mobilité des véhicules. Effectivement, le protocole GPSR utilise les messages HELLO envoyés périodiquement par les nœuds à leur voisinage pour assurer la connectivité et maintenir à jour les informations circulants dans le réseau. L'envoi périodique de ces messages contribue à la diffusion des informations dans tout le réseau en utilisant la méthode d'un seul saut (one-hop) ce qui

minimise la surcharge du réseau, mais, en même temps engendre plusieurs inconvénients, notamment, les inexactitudes des informations sur les positions des nœuds, surtout dans un réseau VANET, ce qui conduit facilement à de mauvaises décisions de routage. Puisque le mécanisme de routage du protocole GPSR dépend entièrement des informations de positions des nœuds, et puisque le besoin de gestion et de suivi de ces informations dans un environnement très dynamique dépasse les capacités de GPSR, alors, l'utilisation de diverses métriques de routage dans un tel environnement présente des avantages potentiels. Assurément, nous nous sommes basés, dans nos contributions, non seulement sur la position des nœuds, mais également sur d'autres métriques telles que ; la durée de vie du lien de communication, la mobilité des nœuds, la densité et le temps de communication accumulé des nœuds. Nous avons proposé comme première contribution une combinaison de ces multiples critères de routage cités ci-dessus, afin d'attribuer un poids aux véhicules voisins et le véhicule ayant le poids maximum sera sélectionné comme le prochain nœud de saut suivant. L'idée est d'exploiter les informations des voisins pour un chemin de routage plus stable et d'établir une zone de communication fiable qui prend en compte les diverses mesures de routage, afin de s'adapter à la situation d'instabilité du lien et de trouver un meilleur chemin de routage.

L'idée de notre deuxième contribution est d'appliquer l'apprentissage par renforcement, qui est la forme la plus pure d'apprentissage en intelligence artificielle. A cette fin, nous avons choisi d'intégrer et d'adapter l'algorithme Q-Learning dans le protocole de routage géographique GPSR, afin d'utiliser sa puissance et sa robustesse pour estimer la qualité des différents chemins de routage et de prendre des décisions de routage fiables sur la base de l'estimation de la valeur de la table Q. L'algorithme Q-learning est de plus en plus appliqué pour résoudre les problèmes de routage dynamique, il permet d'obtenir des décisions optimales sans connaissance préalable de l'environnement. Ce qui aidera à prendre de meilleures décisions de routage, et par conséquent, augmentera les performances du protocole GPSR. Les résultats de simulation obtenus attestent d'une amélioration remarquable des performances et de la qualité de service tout en réduisant le délai de bout en bout et le coût de routage.

Cette thèse est organisée comme suit : L'introduction décrit le problème du routage dans les VANETs, explique les motivations qui ont mené à la conception de nouvelles approches et présente la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs.

Le chapitre I introduit les réseaux ad-hoc (MANET et VANET) et présente un état de l'art des VANETs tout en ciblant les domaines d'applications, les caractéristiques et les défis liés à ce type de réseau. Aussi, dans le même chapitre une classification des différentes techniques de routage utilisées par les protocoles de routage est présentée.

Dans le chapitre II, nous présentons le principe de fonctionnement de sept protocoles de routage principalement utilisés dans les réseaux MANET, à savoir : AODV, OLSR, DSR, GPSR, AOMDV, ZRP et MDART. Nous avons confronté par simulations dans des scenarios VANET, à l'aide du simulateur réseau NS-2 et le générateur de mobilité VANETMOBISIM, les performances de ces sept protocoles de routage. Nous avons évalué l'impact de la densité des véhicules et de la charge du trafic sur le comportement de ces protocoles avec une communication V2V (Vehicle to Vehicle) et V2I (Vehicle to Infrastructure). Notre analyse s'est basée sur les métriques de performance suivantes : le taux de paquets délivrés, le délai de bout en bout, la gigue, le coût de routage et l'efficacité du réseau.

Le chapitre III se concentre sur le protocole GPSR, son intégration et son bon fonctionnement. En effet, nous avons, en premier lieu, présenté GPSR et sa politique de routage. Par la suite, nous avons présenté et étudié l'implémentation de trois protocoles de routage géographique, à savoir le protocole MM-GPSR (Maxduration-Minangle GPSR), le protocole MGPSR (Modified GPSR) et le protocole original GPSR. Enfin, les protocoles implémentés sont analysées par une étude expérimentale sous NS-2.

Dans le chapitre IV, nous présentons la première contribution de cette thèse. Nous décrivons le principe et le fonctionnement du protocole amélioré WA-GPSR, que nous avons implémenté sur NS-2. Les résultats de simulation ont été comparés avec ceux du MM-GPSR, MGPSR et GPSR original.

Dans le chapitre V, la deuxième contribution est présentée. Nous détaillons le principe, le fonctionnement et l'implémentation de notre amélioration QLG sur NS-2. Nous présentons aussi les résultats de comparaison avec plusieurs protocoles : WA-GPSR, GPSR original, MGPSR et MM-GPSR.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1

État de l'art

1 Introduction

Les réseaux informatiques constituent depuis quelques années un outil incontournable qui ne cesse de s'imposer comme l'un des plus grands besoins de notre société. Ces réseaux concurrencent les supports analogiques utilisés par la télévision ou la téléphonie. Si le problème est toujours le même, à savoir comment reproduire en un point donné l'information existante en un autre point, de nouvelles attentes sont apparues : Vitesse, besoin de sécurité plus important, information en continu et en temps réel.

Après l'avènement d'Internet via les réseaux filaires, nous entrons aujourd'hui dans une nouvelle ère technologique des réseaux sans fil où la demande de mobilité impose aux méthodes de transmission de données récentes de pouvoir s'abstraire le plus possible de l'environnement physique. Ces réseaux dits mobiles sont, selon les cas, plus ou moins liés à une architecture fixe préexistante. Dans le cadre d'une indépendance maximale on parle de réseaux ad-hoc. Destinés, à l'origine, à des fins militaires, ces derniers possèdent une structure caractérisée par l'absence d'infrastructure et de gestion centralisée.

Les réseaux sans fil ont connu ces dernières années un essor spectaculaire et s'imposent aujourd'hui de façon indéniable. Parmi les réseaux récentes de communication sans fil sont les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET), très inspiré des réseaux mobile ad-hoc (MANET), les véhicules sont considérés autrement que de simples moyens de transport, bien plus. Ils sont dotés d'une source d'intelligence par leur interaction avec l'environnement routier. En exploitant leurs récentes capacités de communication, la création d'un réseau dédié permet de rendre plus agréable le temps qu'on passe à bord, tout en améliorant la sécurité routière. Dans ce sens, les VANETs participent en permettant le partage, de manière collaborative, de différents types de données entre les véhicules. Leur élaboration s'appuie sur l'émergence des systèmes de transports intelligents (Intelligent transportation System- ITS), qui ont comme objectif d'intégrer les nouvelles technologies de l'information et de la communication afin de rendre plus efficace le système routier, la sécurité et le confort des usagers.

Ce chapitre a pour objectif de donner une vue d'ensemble des réseaux VANETs. Nous présentons dans un premiers temps les concepts de base des réseaux mobiles ad-hoc. Ensuite, nous décrivons l'architecture des réseaux véhiculaire ad-hoc (VANET), les différents types d'applications, les caractéristiques et les standards de communication. Enfin, nous présentons les principes des protocoles de routages ad-hoc les plus connus et les difficultés de routage dans les réseaux ad-hoc.

1.1 Réseaux mobiles ad-hoc (MANET)

Le réseau mobile ad-hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad-hoc Network) [1], est un système autonome composés des nœuds mobiles dynamiques interconnectés par des liens sans fil sans l'utilisation d'une infrastructure fixe et sans gestion centralisée. Les nœuds se déplacent dans le réseau en permanence, parfois d'une manière aléatoire, et par conséquent, ils peuvent provoquer un changement brutal dans le comportement et la structure du réseau.

Les réseaux ad-hoc sans-fil sont créés à la demande pour répondre à un besoin spécifique et sont capables de s'organiser spontanément et de manière autonome dans l'environnement dans lequel ils sont déployés sans infrastructure définie préalablement. La tâche de la gestion du réseau est repartie sur l'ensemble d'entités (appelés nœuds). Un réseau ad-hoc doit être facilement déployé, les nœuds peuvent joindre ou quitter le réseau de manière totalement dynamique sans informer le réseau. En effet, un nœud peut très vite se retrouver hors de la portée des nœuds auxquels il était relié, ou se trouver à la portée de nouveaux nœuds. La figure 1.1 illustre un exemple de réseau mobile ad-hoc dans lequel les nœuds connectés sont représentés avec leurs portées de transmission les uns des autres. Le nœud source veut communiquer avec le nœud de destination, mais puisqu'ils ne sont pas dans la même portée de transmission, le nœud source transmet son message aux nœuds intermédiaires qui sont dans la même portée radio et qui, à leurs tours, les relaient vers le nœud de destination.

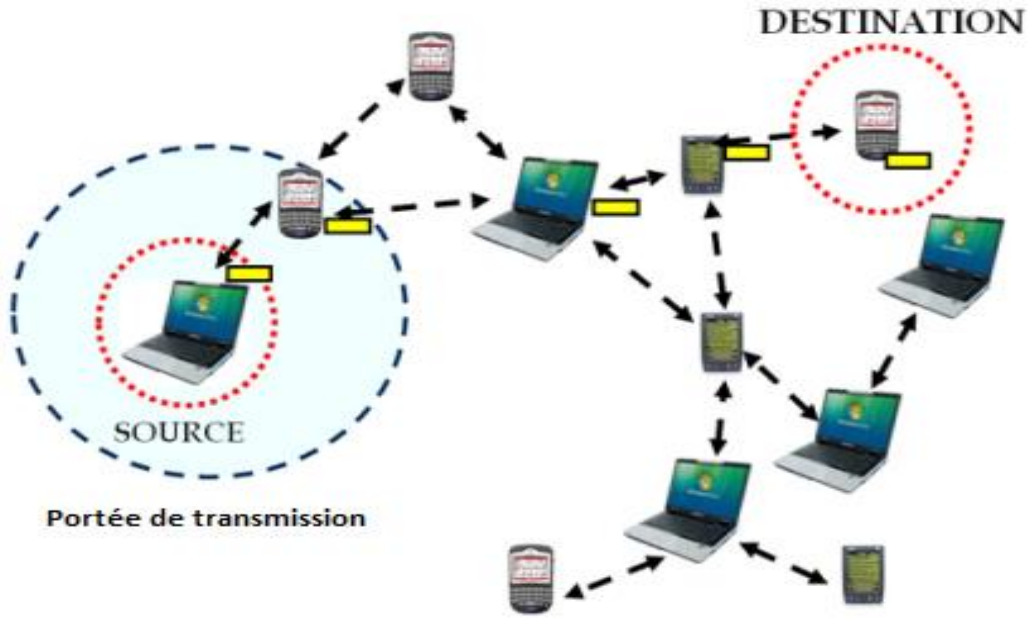


Figure 1.1 : Exemple de transmission de messages dans les réseaux MANET

1.2 Les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET)

Les réseaux VANETs se constituent d'un ensemble d'entités communicantes, composé de véhicules et d'unités de bord de route (RSU: Road Side Unit). Grâce aux différentes applications qui supportent les VANETs, ces réseaux sont considérés comme étant un moyen pour éviter les embouteillages et réduire le temps passé sur les routes. Dans un réseau VANET les nœuds sont les véhicules intelligents appartenant au réseau. Ils peuvent communiquer directement entre eux ; Véhicule à Véhicule (V2V : Vehicle to Vehicle) afin d'échanger des informations sur le trafic ou Véhicule à Infrastructure (V2I : Vehicle to Infrastructure) c'est-à-dire avec des stations de bases placées tout au long des routes en utilisant le réseau Internet. Ou encore, une combinaison des communications de véhicules à véhicules et les communications de véhicules à infrastructures où le véhicule n'est pas le seul nœud de communication, mais il devient une partie d'un système plus vaste où de nombreux éléments sont impliqués. Il appartient à la famille des systèmes de transport intelligents (ITS : Intelligent Transportation System) [2]. Cette vision ne se limite pas au transport routiers seulement, mais il comprendra d'autres modes de transport qui adoptent progressivement des STI afin de rendre la mobilité des personnes et des marchandises plus sûr, plus efficace, écologiquement et économiquement durables. Cette vision est représentée par la figure 1.2 qui montre le véhicule comme l'un des éléments d'un multimodal de son écosystème de communication entièrement intégrée**.**

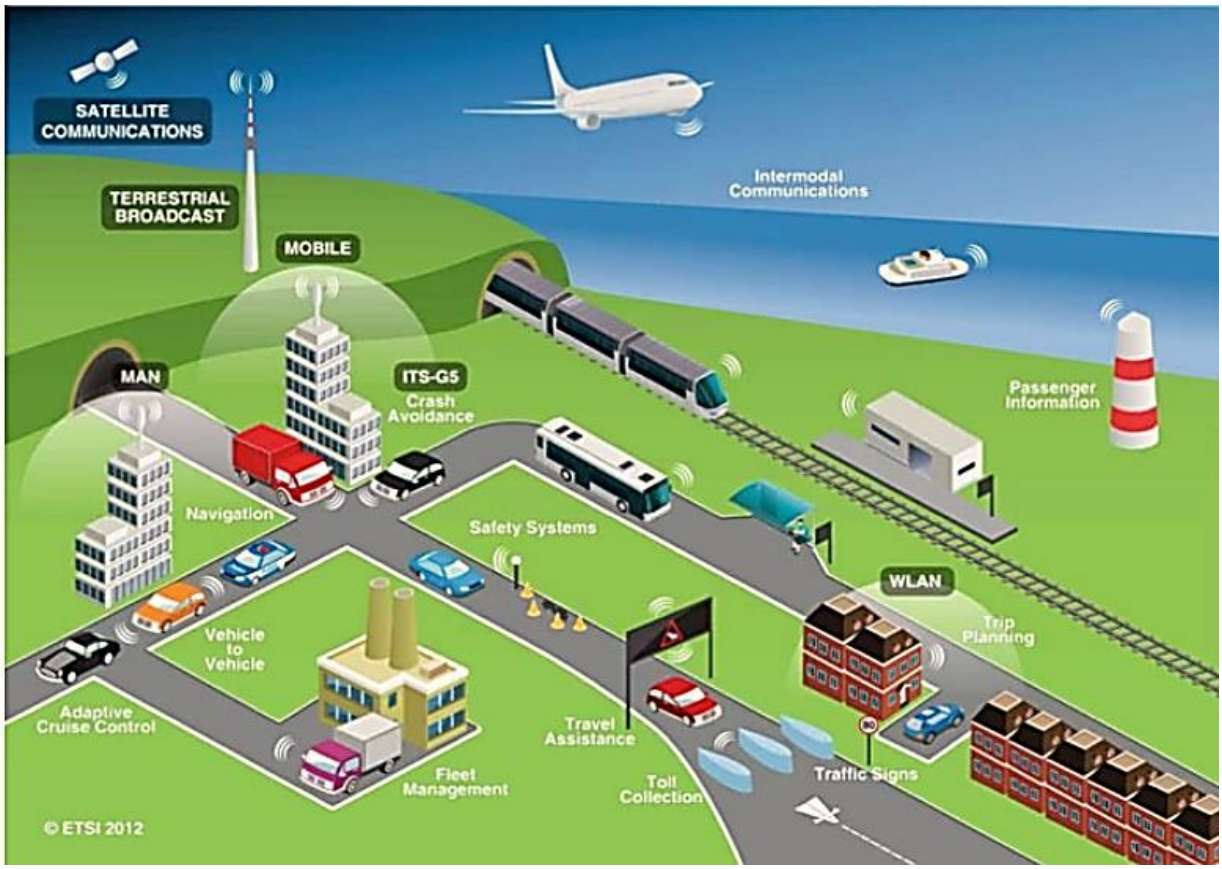


Figure 1.2 : L'étendu du système de transport intelligent [3]

1.2.1 Architecture des réseaux VANETs

Les progrès dans les communications mobiles et les tendances actuelles dans les réseaux ad-hoc permettent aux différentes architectures le déploiement des réseaux de véhicules dans les autoroutes, les milieux urbains et ruraux pour soutenir de nombreuses applications avec des exigences de qualité de service différentes.

L'objectif d'une architecture VANET est de permettre la communication entre les véhicules à proximité et entre les véhicules et les équipements routiers fixes menant aux trois modes de communication :

- **Communication Véhicule à Véhicule (V2V) :**

Dans ce mode de communication, aucune infrastructure n'est utilisée, aucune installation n'est nécessaire sur les routes, chaque véhicule est équipé pour communiquer directement avec un autre véhicule s'il se situe dans sa zone radio, ou bien par le biais d'un protocole multi-sauts qui se charge de transmettre les messages de bout en bout en utilisant les nœuds voisins qui les séparent comme des relais. Les communications V2V sont très efficaces pour le transfert des informations concernant les services liés à la sécurité routière[4].

- **Communication Véhicule à infrastructure (V2I) :**

Ce mode de communication permet une meilleure utilisation des ressources partagées, ainsi qu'il démultiplie les services fournis. Par exemple : Accès à Internet, échange de données de voiture-à-domicile, communications de voiture-à-garage, réparation pour le diagnostic distant, etc.

La communication entre véhicule et l'unité à bord de route est présentée dans la figure 1.3, où l'unité de bord de la route envoie un message en diffusion à tous les véhicules à proximité. Ces unités de bord de route prévues pour établir une communication de l'infrastructure vers les véhicules (I2V) et des véhicules vers l'infrastructure (V2I). Ainsi, le système coopératif résultant est désigné pour être capable d'assurer la continuité du passage de l'information de véhicules à véhicules en passant par les unités de bord de route. Cette entité installée au bord des routes peut être utilisée comme point d'accès au réseau pour connecter les véhicules aux autres réseaux à infrastructures comme Internet [5].

- **Communication hybride (V2V & V2I) :**

Ce mode de communication combine à la fois le système véhicule à véhicule (V2V) et le système véhicule à infrastructure (V2I). Dans ce scénario, un véhicule peut communiquer avec l'infrastructure routière soit en un seul saut, soit en plusieurs sauts, en fonction de la distance, c'est-à-dire s'il peut ou non accéder directement à l'unité routière. Il permet une connexion longue distance à l'Internet ou à des véhicules éloignés [4].

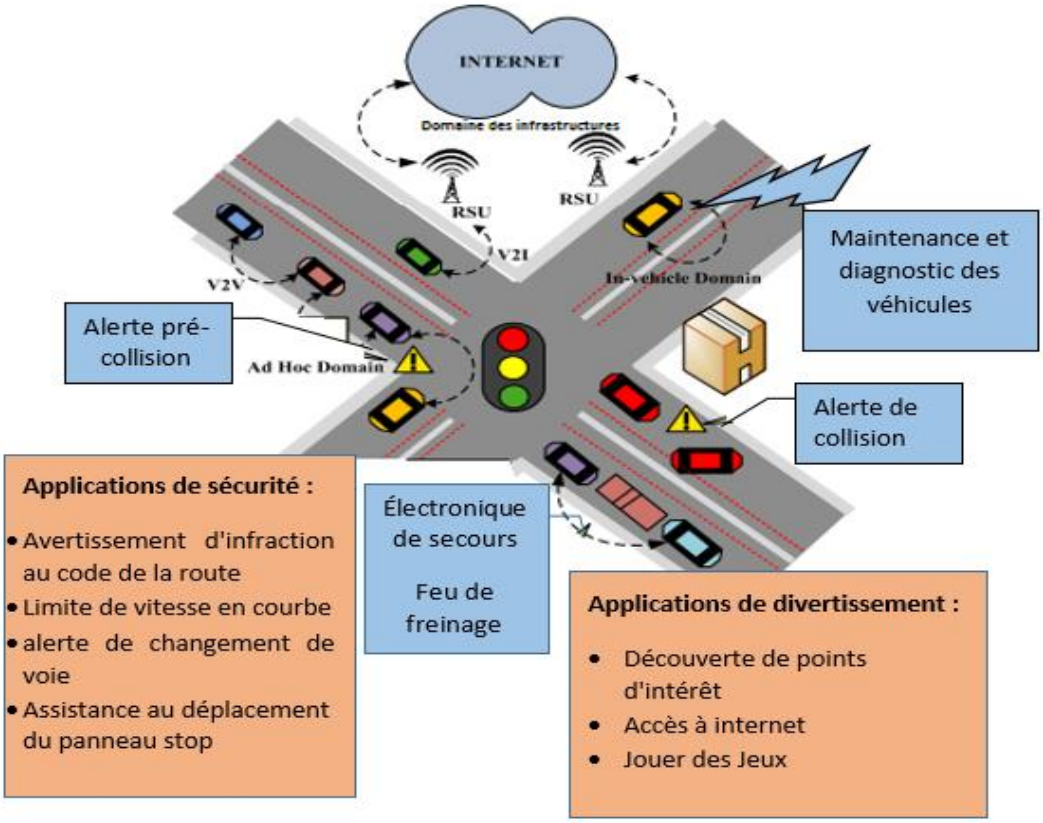


Figure 1.3 : Architecture des réseaux VANETs

1.2.2 Applications des réseaux VANETs

Les communications V2V et V2I permettent le développement d'un grand nombre d'applications et peuvent fournir un large éventail d'informations aux conducteurs et aux voyageurs. Plusieurs véhicules ont la capacité de collecter, traiter et diffuser des informations sur eux-mêmes et leurs environnements à d'autres véhicules. Cela conduit à l'amélioration de la sécurité routière et le confort des passagers.

Selon leurs principal objectif les applications VANET [6]–[8] peuvent être classées en :

- **Applications du confort des conducteurs et des passagers** : Cette catégorie d'applications visent à améliorer le confort des conducteurs et des passagers. L'accès à Internet est la technologie clé pour la plupart des applications de confort et, par conséquent, la plupart des travaux de recherche et développement de cette catégorie se concentre sur ce point. Par exemple, des fichiers multimédias, de la musique peuvent être téléchargés sur le système de divertissement de voiture. le conducteur pourrait recevoir de l'information concernant les restaurants, les hôtels, les annonces des stations d'essence [9]–[11].
- **Applications de sécurité :** Ces applications utilisent la communication sans fil entre les véhicules ou entre les véhicules et les infrastructures, afin d'améliorer la sécurité routière et d'éviter les accidents ; l'intention étant de sauver la vie des gens et de fournir un environnement sans accidents. Les applications des VANETs utilisées entre véhicules ou avec

infrastructure conduit à une augmentation du niveau de la sécurité routière. Les applications de sécurité peuvent être classées comme suit [12] :

- **Avertissement des risques de collision :** L'amélioration des systèmes pour éviter les collisions conduira à éviter de nombreux accidents de la route ; ces systèmes sont basés sur la communication I2V ou la communication V2I. Les capteurs de l'infrastructure collectent, traitent et analysent les informations provenant des véhicules, se déplaçant à proximité d'une intersection [13], en fonction de l'analyse des données ; s'il y a une probabilité d'un accident ou d'une situation dangereuse, un message d'avertissement est envoyé aux véhicules dans la zone d'intersection pour les avertir de la possibilité de l'accident afin qu'ils puissent prendre les mesures appropriées pour l'éviter. Il existe de nombreuses applications qui relèvent des collisions aux intersections des systèmes. nous pouvons citer :

✓ **Avertissement en cas de violation des feux de circulation**: Cette application est conçue pour envoyer un message d'avertissement aux véhicules pour avertir les conducteurs sur une situation dangereuse (risque d'accident) qui peut se produire si le véhicule ne s'arrête pas; lorsque le signal de trafic est en cours d'exécution et en indiquant un arrêt, le message qui est envoyé dépend de plusieurs facteurs ;tel que la vitesse du véhicule, la position du véhicule et la surface de la route [12].

✓ **Avertissement de violation des panneaux d'arrêt***:* Cette application est conçue pour envoyer un message d'avertissement à un véhicule pour avertir le conducteur de la distance actuelle entre le véhicule et le panneau d'arrêt et la vitesse nécessaire pour éviter la nécessité d'un freinage, de manière à empêcher le véhicule de violer un panneau d'arrêt, qui sera ensuite conduit à la prévention d'une situation dangereuse [13].

✓ **Avertissement de collision d'intersection :** Cette application collecte les informations sur l'intersection de la route via des capteurs et analyse ces informations, s'il y a une probabilité d'un accident, le système va générer et envoyer un message d'avertissement à tous les véhicules s'approchant de l'intersection. Les données recueillies par les capteurs comprennent la vitesse du véhicule, la position, l'accélération, etc [13].

- **Sécurité publique** : les applications de sécurité publique visent à aider les conducteurs en cas d'accident et pour soutenir les équipes d'urgence en réduisant leur temps de voyage et de fournir leurs services. Pour la plupart des véhicules d'urgence, le temps de réponse est gaspillé dans leur chemin vers la destination. Le temps moyen pour le véhicule d'urgence à la réponse de 6 à 7 minutes, alors que dans certains cas, cela peut être jusqu'à 25 minutes.

Les applications les plus connues dans cette catégorie sont :

✓ **Avertissement d'incidents** : Cette application vise à prévenir des incidents potentiels suite à une situation dangereuse. Par exemple, s'il y a du brouillard sur la voie, un véhicule en panne, suite à des problèmes mécaniques ou à un accident, envoie des messages d'avertissement aux véhicules les plus proches, circulant dans la même direction ou en direction opposée, en utilisant la communication V2I, afin de les informer de sa situation et de sa localisation. Un exemple de cette application est illustré dans la figure 1.4.

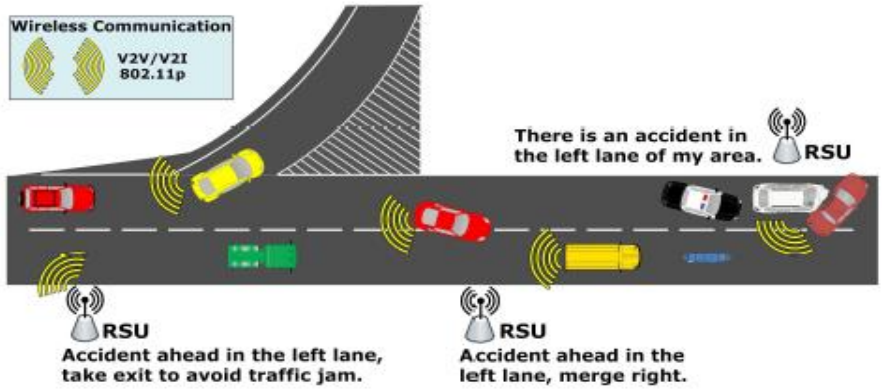


Figure 1.4 : Application de sureté et de sécurité routière [14]

- ✓ **SOS Services** : Le système SOS (Save Our Ship) fonctionne dans des conditions où une situation menaçante de la vie se produit ; en envoyant des messages SOS dans le cas d'accidents. Le signal SOS peut être déclenché automatiquement par un système ou un pilote. Les deux types de communication (V2V et V2I) peuvent être utilisés pour servir le système, en fonction de la situation, par exemple, le signal peut être envoyé au point d'infrastructure le plus proche directement.

- **Extension de signalisation** : L'objectif principal de cette application est d'alerter les conducteurs inattentifs aux signes qui sont placés sur le côté de la route pendant la conduite afin de prévenir les accidents.

Les applications peuvent être classées comme suit :

- ✓ **Signalisation de véhicule :** Cette application repose sur la RSU fixée dans une zone spécifique ; par exemple dans une zone scolaire, zone de l'hôpital pour envoyer des messages d'alerte aux véhicules approchant de la zone.
- ✓ **Avertissement de circulation d'un conducteur dans un sens interdit** : Ce système est conçu pour alerter un véhicule s'il se déplace dans la mauvaise direction. En utilisant la communication V2V, un véhicule circulant dans le mauvais sens peut alerter les autres véhicules autour de lui par l'intermédiaire des messages d'avertissement pour prévenir les accidents qui se produisent.
- ✓ **Avertissement de zone de travail** : Ce système repose sur l'installation de RSU afin d'avertir les véhicules qui s'approchent de la région de la zone de travail, l'envoi des messages d'avertissement s'effectue en mode I2V.

- **Diagnostic et maintenance des véhicules :** Cette application vise à envoyer des messages (notifications) aux véhicules afin de rappeler les conducteurs sur les défauts de sécurité et qu'il est le temps pour le véhicule de recevoir la maintenance. Ces applications reposent sur la communication et l'utilisation des messages de sécurité événementielles avec une plage de communication I2V de 400m, ces applications tel que : le rappel de sécurité où un message sera envoyer aux véhicules pour rappeler les conducteurs en cas de rappel émis.
- **Informations sur d'autres véhicules :** Ce type d'application utilisent les communications à courte portée entre un véhicule et d'autres véhicules à proximité, elle repose sur la

communication V2V ou V2I ou bien les deux pour exécuter d'autres applications [3] [15] qui peuvent être classifiées comme suit :

- ✓ **Alerte de diffusion de collision :** Ce système accomplit les objectifs nécessaires pour aider un véhicule à éviter de devenir impliqué dans un accident avec le véhicule circulant devant lui. Le système utilise la communication V2V afin d'envoyer des messages d'avertissement à un conducteur de la situation. Ces messages contiennent des informations sur la position, la direction, la vitesse et l'accélération, chaque véhicule traite ces informations après l'avoir reçu afin de décider le niveau de danger et ensuite le transmettre à d'autres véhicules.
- ✓ **Véhicule routier basé sur l'état d'alerte** : Cette application est basée sur la communication V2V. Le véhicule recueille suffisamment d'informations sur l'état de la route via les capteurs du véhicule, après avoir recueilli des informations routières, l'unité à bord du véhicule traite ces données pour déterminer la situation de la route afin de lancer un avertissement au conducteur ou d'envoyer un message d'avertissement à d'autres véhicules.

- ✓ **Avertissement de changement de voie :** cette application est conçue pour éviter les accidents qui pourraient se produire en raison de changement de voie qui est une décision prise par le conducteur. Le système recueille des données sur le véhicule et les véhicules voisins. Telles que la vitesse, la direction et la position du véhicule, et lorsque le conducteur décide de changer sa voie actuelle, le système traite les données recueillies et évalue si la décision va conduire à un accident ou non. Le système émet alors un avertissement pour alerter le conducteur sur la situation potentiellement dangereuse et utilise la communication V2V pour alerter les autres véhicules. La figure 1.5 (a) illustre l'application d'avertissement de changement de voie (LCW : Lane Change Warning), met en garde les conducteurs qui ont l'intention de changer de voie si leur voie de dépassement sera occupée par des véhicules suivants, créant ainsi une éventuelle collision. La figure 1.5(b) présente un scénario sans avertissement de changement de voie, le véhicule 1 procède à un changement de voie sans apercevoir le véhicule 2 qui s'approche rapidement. La figure 1.5 (c) avec l'application LCW montre que lorsque le véhicule 1 entame son changement de voie, le véhicule 1 est averti de l'existence de véhicule 2 et attend que le véhicule 2 passe avant de terminer le changement de voie.

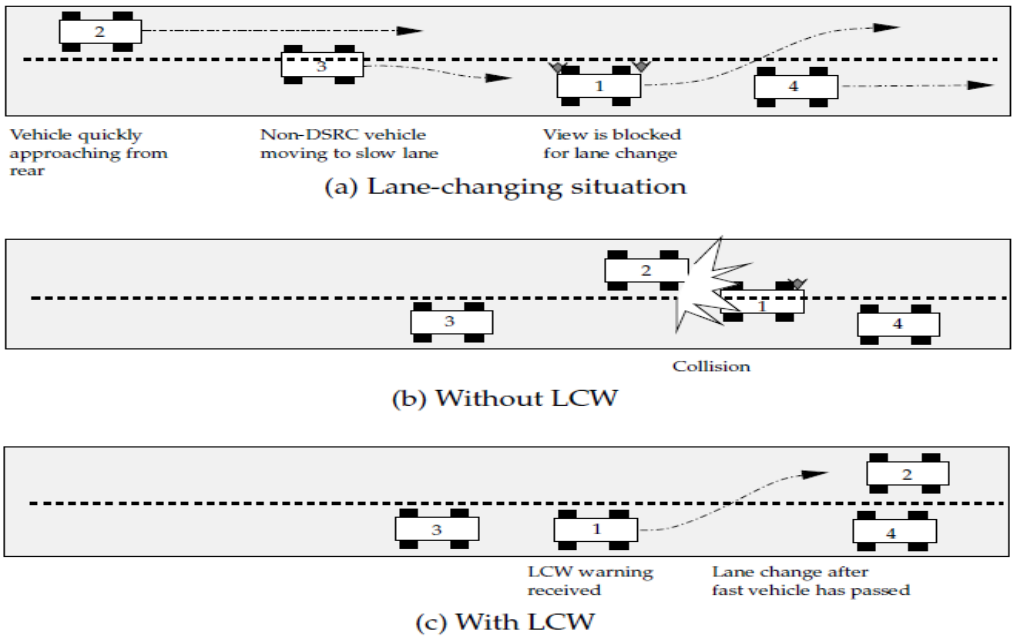
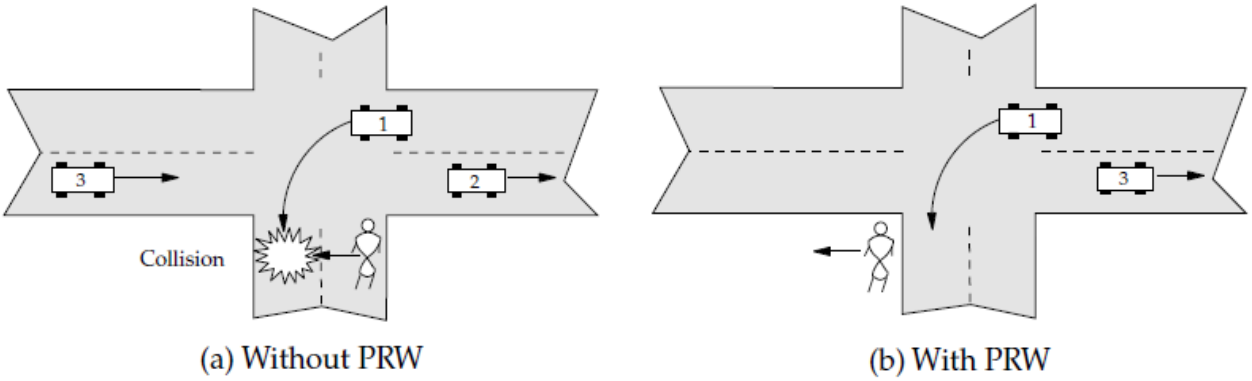


Figure 1.5 : Avertissement de changement de voie [16]

- ✓ **État d'alerte de la route :** Ce système alerte les véhicules sur les mauvaises conditions routières causées par des substances de la route, afin de prévenir les accidents. Les capteurs de bord de route recueillent des données relatives à la route afin de déterminer s'il y a des conditions dangereuses, puis diffuse des messages d'avertissement aux véhicules, ce qui suggère un ajustement de vitesse pour éviter les accidents.

La figure 1.6 illustre les collisions avec les piétons, résultant souvent lorsque les conducteurs précipitent leurs virages à gauche et à droite. L'avertissement du piéton (PRW) permet aux véhicules de prédire les collisions avec les piétons. La figure 1.6 (a) montre que le véhicule 1 décide d'exécuter son virage à gauche entre les véhicules 2 et 3, mais, avec sa rapidité, ne voit pas le piéton qui traverse la route. La figure 1.6 (b) montre le scénario avec PRW, où le conducteur du véhicule 1 est alerté du piéton traversant la chaussée. Le véhicule 1 retarde alors son virage à gauche jusqu'à ce que le véhicule 3 et le piéton traversent l'intersection.



PRW: Pedestrian in Roadway Warning

Figure 1.6 : Alerte du piéton [17]

1.2.3 Caractéristiques des réseaux VANETs

Les VANETs possèdent un nombre de caractéristiques spécifiques qui les différencient des autres types de réseaux sans infrastructure. Ces caractéristiques peuvent se traduire par des points forts ayant un impact sur la communication. Les caractéristiques principales des VANETs, lesquelles doivent être prises en compte par toute solution dédiée, sont :

- **Forte mobilité et topologie hautement dynamique**

La forte mobilité est le premier facteur qui distingue les VANETs des autres classes de réseaux sans fil, car la vitesse des véhicules varie selon l'environnement. Par exemple une voie à grande vitesse (autoroute), une route nationale, une zone urbaine (centre-ville). Les véhicules peuvent également se déplacer à des différentes directions et peuvent rapidement rejoindre ou quitter le réseau dans un très court laps de temps, ce qui conduit à des changements de topologie fréquents et rapides.

Le comportement des conducteurs influencés par les informations reçues du réseau, peut aussi causer des changements dans la topologie du réseau. Ceci génère :

- *Une densité variable du réseau* : la densité d'un VANET change en fonction de la densité du trafic routier, allant des densités très fortes, lors d'embouteillage à des densités très faibles, comme dans des routes très peu fréquentées.
- *Des déconnexions fréquentes* : En raison de la nature hautement dynamique de la topologie d'un VANET, sa connectivité change fréquemment. En particulier, quand la densité de réseau est très faible, ce qui augmente les risques de déconnexion.

- **Réseau à grande échelle**

  Lors du déploiement des VANETs dans des zones urbaines, des centres villes ou des autoroutes, qui sont très denses, l'échelle du réseau peut être très importante, ce qui peut influencer les performances des VANETs.

- **Absence de contrainte énergétiques et de puissance de calcul**

  Contrairement au contexte des réseaux MANET, les éléments du réseau VANET disposent suffisamment d'énergie qui peut alimenter les différents équipements électroniques d'une voiture intelligente. Etant donné que les nœuds composant un VANET sont relativement de grande taille et produisent eux même de l'énergie lors du mouvement. Ceux-ci peuvent être équipés de capteurs, de ressources énergétiques et de capacités suffisantes. Ainsi, qu'ils disposent d'une grande capacité de traitement et peuvent avoir plusieurs interfaces de communication (WIFI, Bluetooth et autres).

- **Collecte d'informations et perception de l'environnement proche**

  Le conducteur à bord de son véhicule peut disposer d'un certain nombre d'informations et d'une meilleure visibilité grâce aux différents capteurs de toutes catégories (Caméras, capteurs de pollution, capteurs de pluies, capteurs de l'état de la route et de voiture, etc…), et cela lui permet de réagir aux changements de son environnement proche d'une manière appropriée.

- **Environnement de déplacement et modèle de mobilité**

  La mobilité dans les VANETs est liée directement au comportement des conducteurs et leurs réactions face à des obstacles ou des situations différentes et complexes rencontrées aux structures des routes (intersections, panneaux de signalisation, etc…) ou aux stations de base routières (infrastructures) que ce soit dans les autoroutes ou au sein d'une zone métropolitaine. Ces contraintes affectent énormément le modèle de mobilité et la qualité des transmissions radio. Les VANETs supportent aussi les communications basées sur l'acheminement de données vers un groupe de véhicules désigné via sa localisation géographique. Ceci est en effet, possible du fait que les véhicules soient équipés le plus souvent du système de localisation efficace.

1.2.4 Défis et contraintes des VANETs

Pour satisfaire les exigences des différents types d'applications véhiculaires, de nombreux facteurs ayant un impact déterminant sur la réalisation de ces objectifs doivent être pris en compte. Il est donc essentiel de préciser les défis et les contraintes dans les VANETs, notamment les éléments ci-après :

- **Réseaux véhiculaires hautement hétérogènes :** De nombreuses technologies de réseaux sans fil non interopérables sont apparues avec le développement rapide et la disponibilité des systèmes et environnements informatiques mobiles. Par conséquent, la fourniture d'une connectivité transparente entre différentes technologies de réseaux sans fil dans une topologie

de réseau variable dans le temps est très complexe en termes d'adressage des nœuds, de qualité de service, de routage, de sécurité et de facturation. On s'attend donc à ce que la prochaine génération de systèmes de transport intelligents reflète une approche plus holistique des solutions réseau. Cela nécessiterait de soutenir la coexistence de plusieurs réseaux sans fil différents situés au même endroit afin de fournir un accès universel et omniprésent aux services à large bande.

- **Gestion et stockage des données :** Comme nous l'avons souligné plus haut, nous pouvons nous attendre à avoir des réseaux de véhicules à grande échelle avec des millions de véhicules, ce qui générera d'énormes quantités de données distribuées qui doivent être stockées d'une manière ou d'une autre et distribuées à travers les VANETs. En raison de cette caractéristique, comme le soulignent [18]**,** l'échelle massive, à la fois dans la taille du réseau et la quantité de données produites, ainsi que les propriétés dynamiques inhérentes des VANETs, posent de nouveaux défis à la gestion des données dans ce contexte.

- **Systèmes de localisation :** Les applications de sécurité critiques dans les VANETs nécessitent des systèmes de localisation plus fiables et plus précis. Une solution naturelle d'un système de localisation pour les VANETs est d'intégrer un dispositif de navigation dans chaque véhicule. Mais les systèmes de positionnement par satellite (par exemple, GPS, Galileo) présentent certains problèmes indésirables, comme le fait qu'ils ne sont pas toujours disponibles (par exemple, les problèmes de réception dans les tunnels dus à l'absence de signaux ou sur les ponts dus à l'imprécision de la position du véhicule : au-dessus ou au-dessous du pont). En outre, les systèmes de positionnement par satellite sont vulnérables à plusieurs types d'attaques telles que l'usurpation d'identité et le blocage. En outre, ils présentent une erreur de localisation de 10 à 30 m, ce qui ne répond pas aux exigences des applications critiques pour les VANETs et implique la nécessité d'autres techniques de localisation. Un certain nombre de techniques de localisation ont été proposées pour calculer la position des nœuds mobiles, à savoir la correspondance cartographique, la localisation à l'estime, la localisation cellulaire, le traitement des images et des vidéos, les services de localisation, la technique GPS différentielle et la localisation ad-hoc distribuée relative. Toutes ces techniques présentent des avantages et des inconvénients, mais aucune technique ne peut satisfaire simultanément toutes les exigences des applications critiques, telles que la disponibilité en tout lieu et à tout moment, avec une grande précision et un calcul de position fiable. Un système de localisation fiable et omniprésent à utiliser par les véhicules dans un VANET pour des applications critiques de sécurité et d'urgence sera probablement fourni par une combinaison de différentes techniques et de fusion de données. Cependant, les caractéristiques uniques des VANETs, telles que les contraintes de mobilité définies par les routes publiques, le comportement des conducteurs et la vitesse élevée des véhicules, entraînent de nombreux changements dans la topologie du réseau, ce qui conduit à la diffusion d'informations de position obsolètes. De plus, certaines solutions visant à augmenter la fréquence des messages génèrent une surcharge inutile, entravant la transmission d'autres données.
- **Sécurité et confidentialité :** Plusieurs problèmes de sécurité des réseaux ressemblent à ceux des réseaux sans fil traditionnels. Cependant, les défis de sécurité dans les VANETs sont

intrinsèques et uniques en raison de la taille du réseau, des changements fréquents de topologie, de la grande mobilité et des différentes classes d'applications et de services, avec des exigences contradictoires qui seront offertes à ces réseaux. Outre ces défis, il existe un compromis entre l'authentification et la non-répudiation et la confidentialité. Un autre problème majeur est d'empêcher les attaquants d'interférer à la fois avec l'intégrité des messages échangés et la disponibilité du système. Certaines caractéristiques des réseaux VANETs posent des problèmes pour répondre aux exigences de sécurité, ce qui exige de nouvelles solutions de protocole avec certaines des caractéristiques suivantes : faible surcharge due à la sensibilité au temps, communication avec un minimum de sauts entre les nœuds, informations préenregistrées sur les nœuds participants dans le routage et solutions de diffusion optimisées des données. Malgré les solutions existantes des problèmes de la sécurité dans les VANETs, de nouveaux protocoles de communication sécurisés doivent être étudiés en tenant compte des caractéristiques uniques des réseaux hétérogènes des véhicules.

- **Adressage géographique :** La position physique d'un véhicule ou sa région géographique est nécessaire à de nombreuses applications pour effectuer la communication de données, ce qui nécessite une adresse géographique. Trois familles d'adressage géographique sont présentées dans [14], [19]**:** les solutions de la couche application, la solution GPS-multicast et le routage IP unicast étendu pour traiter les adresses GPS. Ainsi, étant donné le modèle de mobilité des véhicules et le comportement des conducteurs, le suivi et la gestion des adresses géographiques pour prédire la position future d'un véhicule est un problème extrêmement difficile.
- **Suivre une cible :** La communication est un aspect fondamental de tout réseau et, dans les VANETs, elle dépend de l'emplacement physique des véhicules. Par conséquent, le suivi d'une cible est une fonctionnalité fondamentale dans les réseaux VANETs pour les protocoles de communication, mais aussi pour les applications et les services qui peuvent bénéficier de ce type d'information. Le suivi nécessite la création d'un mécanisme permettant d'identifier le chemin suivi par un nœud dans le réseau et de prédire les prochaines positions si nécessaire. Comme nous l'avons déjà souligné, les solutions conçues doivent tenir compte des questions de confidentialité.
- **Coopération avec d'autres réseaux :** On peut s'attendre à ce que les conducteurs et les passagers d'un VANET interagissent avec des personnes, des applications et des services d'autres réseaux. Cette coopération peut être utile pour fournir un bon service à l'utilisateur, comme des informations sur les conditions de circulation, la météo et les itinéraires. Ces informations peuvent être obtenues par des interactions avec des réseaux de capteurs, l'Internet et d'autres services.
- **Densité variable du réseau :** Dans les scénarios urbains, la topologie VANET peut compter des centaines de véhicules dans une région relativement petite. Dans ce cas, il est nécessaire de concevoir des protocoles de contrôle d'accès au support pour éviter les collisions et les erreurs de transmission. Cependant, dans les scénarios d'autoroute, la topologie est plus éparse et la connectivité est plus intermittente. Ce scénario suggère la nécessité de protocoles conscients de ces déconnexions. En outre, les véhicules qui circulent dans les deux scénarios doivent adapter leur comportement aux variations de la densité du réseau afin d'assurer un bon transfert de données.

- **Fragmentation du réseau** : C'est un défi pour les concepteurs de réseaux car elle rend certains nœuds inaccessibles. La fragmentation du réseau peut se produire dans des scénarios de faible trafic ou dans des zones rurales. En outre, on s'attend à ce que le déploiement initial des radios VANET, dans lequel seul un petit pourcentage de véhicules sera équipé d'émetteurs-récepteurs, entraîne une fragmentation fréquente du réseau. Les solutions protocolaires traditionnelles, telles que celles qui reposent sur les informations de topologie d'un nœud, ne sont pas adaptées aux réseaux VANETs et de nouvelles approches sont nécessaires.

  Les contraintes spatio-temporelles des réseaux VANETs et l'hétérogénéité des véhicules en termes de vitesse et de mobilité sont des facteurs de conception à prendre en compte dans le développement d'algorithmes et de protocoles pour les réseaux VANETs. Par exemple, en prenant en compte les voitures et les camions par rapport aux bus et aux tramways : les voitures et les camions ont des vitesses différentes et ont tendance à suivre un modèle de mobilité imprévisible, alors que les bus et les tramways ont une vitesse régulière et plus lente et un modèle de mobilité prévisible.

1.2.5 Norme et standardisation dans les réseaux VANETs

Les normes IEEE utilisées dans les MANETs sont également appliquées dans un environnement VANET, il est connu que la norme IEEE 802.11 n'est pas bien adaptée à l'environnement VANET et des nouvelles technologies sont en cours de normalisation pour les communications véhiculaires. Un groupe de travail IEEE a développé une nouvelle série de normes qui est conçu pour les VANETs: l'accès sans fil dans les réseaux véhiculaires (WAVE) dont la composante essentielle est la modification de IEEE 802.11p [20], [21].

- **IEEE 802.11p (WAVE) :**

Pour que des véhicules puissent communiquer entre eux, l'ASTM (American Society for Testing and Materials) a adopté en 2002 une norme sans-fil appelée DSRC (Dedicated Short Range Communication) [22]. En 2003, le groupe de travail IEEE a repris ces travaux pour définir un nouveau standard dédié aux communications inter-véhicules, nommé WAVE (Wireless Ability in Vehicular Environments) et aussi connu sous le nom de IEEE 802.11p [20]. Cette norme assure les communications pour les applications de sécurité et les autres services du Transport Intelligent. Cette norme répond à un manque d'homogénéité entre les véhicules et fournit un mode d'opération pour la communication véhiculaire. WAVE fournit un ensemble de services et d'interfaces qui permettent d'assurer une communication V2V et V2I sécurisée. WAVE se base sur la famille des protocoles IEEE1609 pour opérer dans la bande DSRC. Cette pile protocolaire présentée sur la figure 1.7 est formée des standards suivants :

- ***IEEE 1609.0 - WAVE architecture,*** décrit l'architecture WAVE et les services nécessaires pour que les équipements DSRC/WAVE puissent communiquer dans un environnement véhiculaire.
- ***IEEE 1609.1 - WAVE Ressource Manager,*** pour la gestion des ressources au niveau des trois couches supérieures du modèle OSI. Il décrit les services de gestion et de données offerts dans l'architecture WAVE. Il définit le format des messages de commandes et la

réponse appropriée à ces derniers, format de stockage de données utilisées par les applications pour communiquer entre les composantes de l'architecture et le format des messages.

- ***IEEE 1609.2 - WAVE Security Services* for Applications and Management Messages,** pour la transmission et le traitement sécurisé des messages au niveau de la couche de transport. Il définit aussi les circonstances de l'utilisation d'un échange sécurisé et comment ces messages doivent être traités selon le but de l'échange.
- ***IEEE 1609.3 – WAVE Networking Services***, définit les services de la couche réseau et transport incluant l'adressage et le routage pour le support d'échange de données sécurisés.
- **I*EEE 1609.4- WAVE Multi-Channel Operations,*** fournit une amélioration de la couche Medium Access Control (MAC) 802.11 afin de supporter les opérations de WAVE, la coordination et la gestion des sept canaux dans la bande DSRC et la gestion des files d'attentes et de l'ordre de priorité de l'accès au medium.
- ***IEEE 802.11p- Data Exchange Protocol for ITS,*** définit les services et le format des messages sécurisés pour le support du paiement électronique sécurisé. Les extensions de 802.11p MAC concernant la gestion de la priorité des messages pour mieux gérer les applications sensibles au retard. Dans les VANETs, la version avancée de 802.11 est 802.11p, qui présente un standard pour les nœuds de haute mobilité. Il apportera une meilleure performance de communication et vise à décrire les services requis par les stations WAVE.

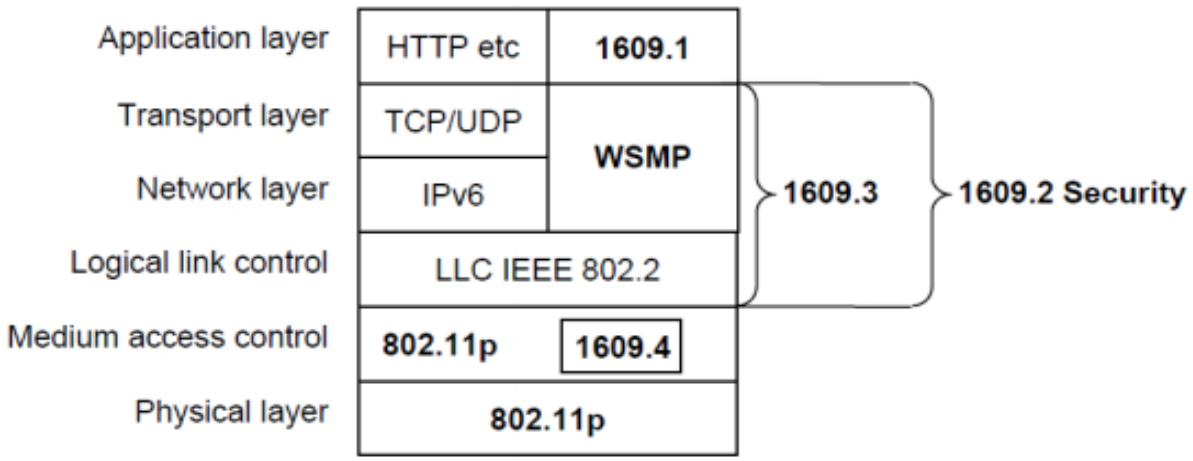


Figure 1.7 : Présentation de la pile du protocole WAVE

1.3 Protocoles de routage des réseaux VANETs

Le routage dans un réseau VANET consiste à transmettre des informations à travers le réseau, d'un véhicule source à un véhicule de destination, via un chemin approprié, dans le but d'accroître la sécurité routière et d'améliorer le confort de déplacement. Les informations relatives à la sécurité routière avertissent les véhicules d'une poussée imminente. Par conséquent, un routage efficace exige que les applications de contrôle des accidents soient

desservies avec un taux de paquets délivrés élevé dans un scénario dense, avec un faible surcoût de routage et un délai de bout en bout réduit [8]. De plus, les applications liées au confort, telles que la recherche du restaurant le plus proche, d'une place libre dans un parking, de l'heure du film dans la salle de cinéma la plus proche, ne sont pas très sensibles au délai.

Les protocoles de routage évaluent l'ensemble des routes disponibles afin de sélectionner la meilleure pour délivrer le message. Ces routes sont évaluées sur la base de certains paramètres tel que : la bande passante, la connectivité, le délai de bout en bout. Ces paramètres sont utilisés par les algorithmes de routage pour sélectionner le chemin optimal vers la destination. Pour une bonne diffusion de messages, un algorithme de routage efficace est nécessaire pour fournir trois services principaux. Tout d'abord, rechercher le chemin le plus approprié pour envoyer des données de la source vers la destination, puis mettre à jour les routes périodiquement pendant le temps d'exécution si une meilleure route est disponible, et enfin maintenir une route alternative si un véhicule intermédiaire ne parvient pas à transférer l'information. Cependant, les recherches visant à remplir ces objectifs de base dans tous les scénarios et situations sont encore ouvertes.

L'efficacité du routage dépend du nombre de véhicules présents dans le réseau qui peuvent renforcer la connexion pour transmettre l'information de la source vers la destination. Cependant, la densité des véhicules n'est pas le seul facteur à prendre en compte, d'autres paramètres tels que la distribution du trafic, la direction, les services GPS, etc. sont également importants.

La présence de diverses contraintes telles que les obstacles, la vitesse élevée des véhicules, la variation de la densité du trafic, rend la connexion entre les véhicules non fiable dans un laps de temps. Plus ou moins, il a été conclu qu'il y a plusieurs facteurs à prendre en compte pour avoir des protocoles de routage efficaces. Sur la base de la formation de la route, les protocoles de routage dans les réseaux VANETs sont classés en deux catégories : les protocoles basés sur la topologie et ceux basés sur la localisation. Les protocoles de routage basés sur la localisation sont hautement préférés pour les réseaux VANET. La raison de ce choix est expliquée dans la section suivante.

1.4 Classification des protocoles de routage dans les VANETs

De nombreux protocoles de routage ont été développés dans la littérature pour les réseaux VANETs, qui sont classés selon de nombreux aspects afin de fournir des chemins optimaux entre les nœuds du réseau. Dans notre travail, nous proposons une taxonomie détaillée des différentes approches de routage dans les réseaux VANETs. Où, les stratégies de transmission sont classées en quatre catégories : anycast, unicast, broadcast, et multicast. Et le mode de transmission est divisé selon deux types : le premier basé sur la topologie et le second basé sur la position géographique. Cette description nous permet d'avoir une vue globale sur les différents protocoles de routage et leur classification sous différents classes. Dans cette classification, nous considérons deux critères : les stratégies de transmission qui décrivent la manière adoptée par un nœud pour transiter les données et les modes de transmission qui se divise en un routage basé sur la topologie et un routage basé sur la position géographique.

Depuis le début des années 1980, les chercheurs ont mis au point plusieurs protocoles de routage pour les réseaux ad-hoc sans fil. Le protocole de routage pour les MANETs ne parvient pas à s'adapter efficacement à la mobilité rapide des réseaux de véhicules. Pour les VANETs, les protocoles de routage peuvent être classés sur la base de plusieurs paramètres. En fonction de la formation de la route, les protocoles de routage existants peuvent être caractérisés comme suit : protocoles de routage basés sur la topologie et protocoles de routage basés sur la position géographique. Dans le routage basé sur la topologie, avant la transmission des données, la route entre la source et la destination prévue est formée par un paquet de contrôle. Ainsi, avant la transmission des données, tous les véhicules du réseau connaissent à l'avance la topologie du réseau. Il utilise l'état de connectivité du lien entre deux nœuds (mobiles ou immobiles) pour établir et maintenir la connexion. Si la position géographique des nœuds est accessible, la méthode basée sur la topologie peut exploiter ces informations supplémentaires pour augmenter l'efficacité [23]. Par exemple, si la source connaît l'emplacement géographique d'un véhicule ou d'une destination, elle peut s'abstenir d'effectuer des recherches sur l'ensemble du réseau et peut également empêcher le réseau d'être submergé. Dans le routage basé sur l'emplacement géographique, le nœud utilise les informations liées à la position pour sélectionner le meilleur voisin relais suivant au moment du transfert des données.

- **Stratégie de transmission :**

Le principe de cette stratégie est de diffuser l'information d'une source vers une destination. Il peut être classé selon la transmission :

- **Unicast** qui diffuse des informations d'une source unique vers une seule destination. La livraison des informations se fait entre des sources uniques et des destinations uniques via un support sans fil à bonds multiples, où les véhicules intermédiaires agissent comme un agent de transmission.
- **Broadcast :** dans ce mode de transmission, le nœud inonde le paquet de données vers tous les nœuds disponibles dans le domaine de diffusion. Ce mode est utilisé lorsque le nœud de destination est hors de portée du nœud source. La plupart du temps, ces modes sont utilisés dans le cadre d'applications liées à la sécurité, telles que l'alerte sur les conditions routières et météorologiques, les messages d'alerte d'urgence, etc. Parmi les exemples de protocoles de routage par diffusion, citons le protocole de diffusion distribuée sur le véhicule (DV-CAST) [24] comme le montre la figure 1.8. Le point positif de ces protocoles est leur fiabilité. Néanmoins, ces types de protocoles consomment plus de bande passante et de nombreux paquets dupliqués seront reçus par les nœuds de destination, ce qui influence les performances du protocole.
  Les protocoles de routage par diffusion diffusent le paquet dans le réseau à tous les véhicules résidant dans le domaine de diffusion. Cependant, en raison de la diffusion du paquet répliqué encore et encore, il consomme une grande partie de la bande passante du réseau.

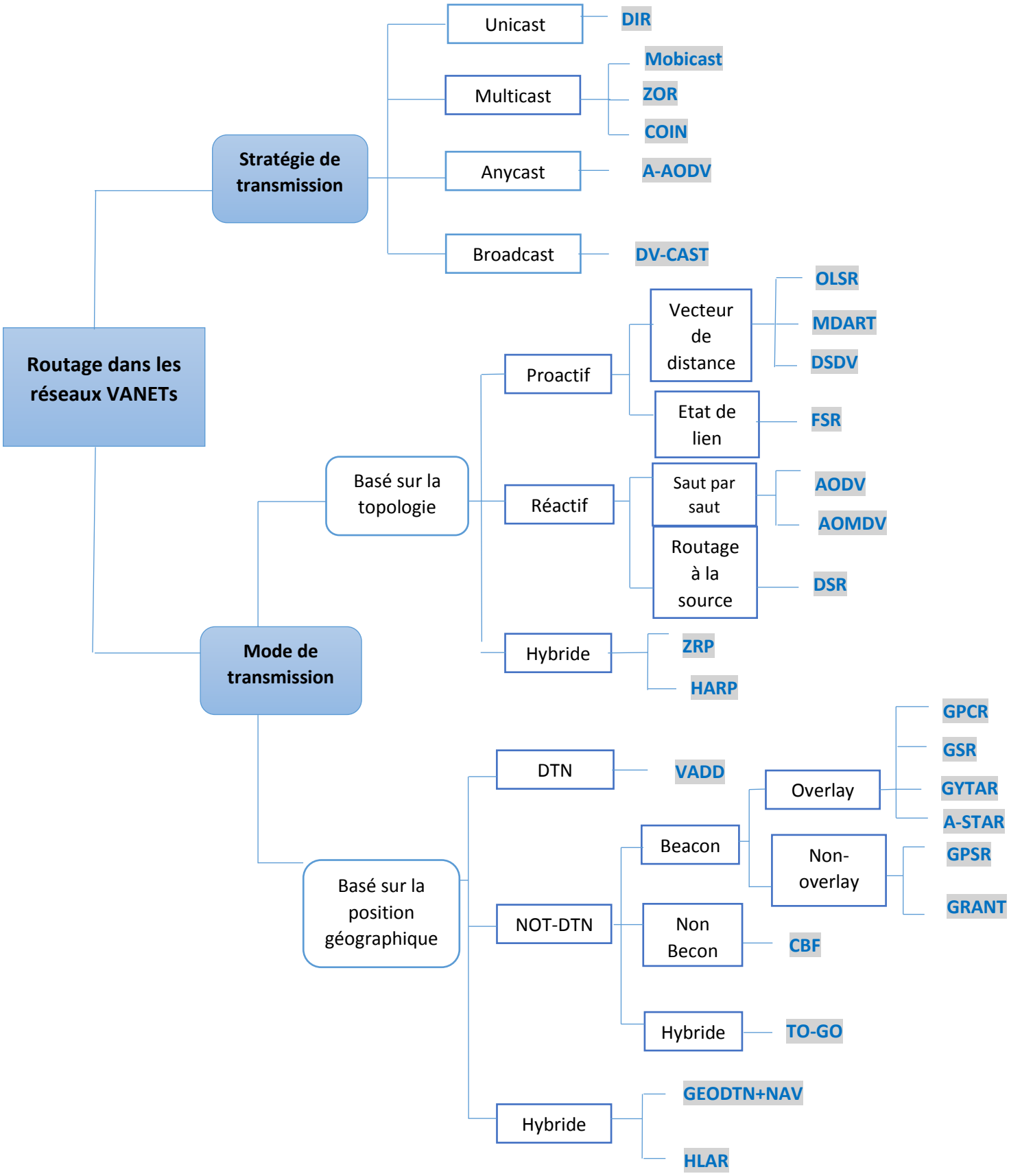


Figure 1.8 : Taxonomie des différents protocoles de routage

- **Anycast** qui redirige les données vers le nœud le plus proche ou le plus efficace selon la politique de routage et de diffusion.
- **Multicast :** La multidiffusion dans les réseaux VANETs est de deux types : Geocast et cluster. Le groupe Géocast offre un service de multidiffusion dans lequel un seul véhicule transmet des paquets à tous les autres véhicules situés dans une zone spécifique appelée zone de pertinence (ZOR : Zone Of Relevance). L'appartenance d'un véhicule à une zone change lorsqu'il sort de la ZOR, et dans ce cas, le paquet est abandonné. la zone de transfert (ZOF : Zone Of Forwarding) est la zone dédiée aux nœuds de cette région. L'objectif principal de ce protocole est de rendre la communication possible entre les véhicules présents dans la ZOR. La multidiffusion consiste à envoyer des paquets de données d'une source unique à un certain groupe de membres via une communication sans fil à bonds multiples. Les protocoles de routage géocast disponibles sont ROVER, MOBICAST, etc[25]. Alors que les protocoles de routage multicast basés sur les clusters créent des clusters de véhicules ayant des caractéristiques similaires telles que la même direction, la même vitesse, etc. Cette procédure rend le réseau plus évolutif ; cependant, le maintien du cluster dans une topologie en constante évolution crée une surcharge et un délai supplémentaires pour le réseau. Certains protocoles de routage basés sur les clusters sont COIN, LORA-CBF [26], etc.

- **Mode de transmission :**

Les protocoles de routage appartenant à cette classe sont divisés en deux catégories : protocoles basés sur la topologie et protocoles basés sur la position (figure 1.8).

Routage basés sur la topologie : Les protocoles de routage basé sur la topologie utilisent des informations sur la table de routage pour transférer les paquets de données de la source vers la destination. Cette approche est divisée en routage proactif, réactif et hybride.

- **Protocoles de routage proactifs** : Le principe des protocoles proactifs consiste à conserver pour chaque nœud une table de routage dans laquelle les informations sur les routes pour tous les nœuds du réseau sont disponibles immédiatement. La mise à jour périodique des informations de routages permet d'agir mieux face aux changements fréquents de route. Ils ont en permanence un itinéraire pour chaque destination du réseau, mais génèrent en retour un volume de trafic important. Les protocoles de routage proactifs les plus connus sont : OLSR, DSDV et FSR. Chaque nœud du réseau maintient une table contenant la connaissance complète de la topologie du réseau. Ces tables sont périodiquement mises à jour pour représenter les nouvelles routes d'un véhicule vers tous les autres véhicules du réseau. En d'autres termes, si une source veut envoyer des données, elle dispose, avant la transmission des données, d'informations à jour sur toutes les routes possibles vers toutes les destinations possibles [27]. Par conséquent, il n'y a pas de retard car l'itinéraire vers la destination prévue est immédiatement disponible lorsque le véhicule doit envoyer des données. Le maintien de la table de routage exige que chaque nœud diffuse régulièrement son état, ce qui entraîne une surcharge importante du réseau. La route entre deux nœuds est formée en utilisant les algorithmes du plus court chemin [28].

- **Protocoles de routage réactifs (à la demande) :** Contrairement aux protocoles de routage proactif, les informations de routage ne sont pas mise à jour périodiquement, mais calculées à la demande. Dans le routage réactif ou à la demande, les chemins calculés à la demande, ce qui permet de réduire considérablement les coûts généraux du réseau, car ils ne maintiennent pas de route lorsqu'il n'y a pas de trafic de données. Les routes sont formées entre les hôtes lorsqu'ils ont besoin de transmettre un paquet en inondant le réseau avec un paquet de demande de route [29]. Lorsque ce paquet de demande d'itinéraire atteint le nœud ou la destination souhaitée, un paquet de réponse d'itinéraire est renvoyé à la source par la destination, et en cas de livraison réussie, l'information est envoyée par ce chemin. Les exemples de protocoles de routage réactifs sont AODV, DSR etc [30].
- **Protocoles de routage hybride :** Cette catégorie de protocoles combine les avantages des protocoles proactifs et réactifs afin de fournir une fiabilité pour la découverte de route et pour le processus de maintenance. Chaque nœud divise le réseau en zones, il utilise le mécanisme proactif à l'intérieur de la zone et utilise le mécanisme réactif pour atteindre les nœuds de la zone extérieure. En effet, le routage hybride vise à minimiser le coût de routage de l'approche proactive en maintenant les informations sur les routes actives uniquement. De plus, il réduit le temps moyen du processus de découverte de route dans les approches réactives [31]. Pour une communication fiable, chaque véhicule divise le réseau en deux régions : la région intérieure et la région extérieure. Dans la région intérieure, les routes sont maintenues en utilisant une approche basée sur les tables de routage, c'est-à-dire que chaque véhicule se trouvant dans la région intérieure diffuse périodiquement le paquet de contrôle et maintient la table de routage contenant le chemin vers tous les autres véhicules de la région intérieure. Si la destination prévue n'est pas présente dans la région intérieure, le mécanisme de découverte de route est utilisé pour localiser la destination dans la région extérieure [32]. Les exemples de protocoles de routage hybrides sont ZRP, HARP, etc [33].

- **Routage basé sur la position**

Dans le routage basé sur la position géographique, le nœud utilise les informations basées sur sa position, la position de la destination et la position du prochain voisin, obtenu à partir du système GPS. L'utilisation des paquets envoyés périodiquement, permet d'avoir un réseau évolutif et adapté à un environnement dynamique tel que les VANETs. Contrairement au transfert de données basé sur la topologie, le routage basé sur la position n'établit pas et ne maintient pas la route avant la transmission des données ; il utilise plutôt les informations liées à la position pour sélectionner le meilleur voisin relais suivant au moment du transfert des données. Il exploite principalement les coordonnées géographiques des véhicules pour acheminer les paquets, au lieu des adresses IP, afin de rendre le système plus adaptable à la mobilité [34]. Par conséquent, les décisions de routage basées sur l'emplacement sont basées sur des informations locales, ce qui est très efficace dans les cas où la topologie est très dynamique. Pour cette raison, les protocoles de routage basés sur la localisation ont été reconnus comme l'un des mécanismes le plus satisfaisant pour les réseaux VANETs.

- **Protocoles de type Delay Tolerant Network (DTN) :** En raison de la topologie dynamique, les protocoles de routage souffre des déconnexions de communication, la latence et le taux d'erreur élevé. A partir des études intensives, il a été montré que les protocoles DTN [35] surmontent ces problèmes et maintient la connectivité du réseau, en utilisant une stratégie de transfert des paquets basé sur le stockage des messages dans le cache jusqu'à ce qu'il y ait un nœud adéquat pour transmettre le paquet.

- **Protocoles de type Not Delay Tolerant Network (Not DTN):** Cette catégorie des protocoles de routage NON-DTN [36] a pour but de surmonter les problèmes rencontrés avec l'approche greedy. En effet, cette approche permet d'envoyer le paquet vers le nœud le plus proche à la destination. Cependant, il se peut que le nœud transitaire lui-même soit le plus proche de la destination. De nombreux types de protocoles NON-DTN ont été développés pour gérer cette défaillance, à savoir, Beacon, No-Beacon et protocole hybride [37].
- **Protocoles de routage hybrides :** Les protocoles de routage hybrides bénéficient à la fois des stratégies des protocoles de routage basés sur la position (DTN et Non-DTN), ils fusionnent les deux stratégies de routage pour résoudre les problèmes de déconnexion des réseaux VANETs. Ils exploitent la connectivité partielle du réseau [32].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cerné les réseaux véhiculaires ad-hoc en décrivant un état d'art le plus global possible. Nous avons présenté et détaillé les modes de communication, les contextes d'applications liés à la technologie VANET, les caractéristiques principales ainsi que les défis et contraintes des VANETs. Ensuite, nous avons cité les problèmes liés au routage, nous avons décrit les protocoles de routage dans les réseaux véhiculaire ad-hoc. Dans le chapitre qui suit, nous proposons d'écrire et d'étudier le comportement de plusieurs protocoles de routage, ainsi d'évaluer par simulation leurs performances dans divers scénarios VANET.

Chapitre 2

Évaluation des performances des protocoles de routage dans l'environnement VANET

2 Introduction

Le mécanisme de routage est crucial pour soutenir les Systèmes de Transport Intelligents (STI) en raison de la topologie hautement dynamique qui caractérise ce type d'application. Récemment, la plupart des protocoles de routage exploitent d'une part, les informations de topologie du réseau qui définissent les liens de communication entre l'émetteur et le récepteur et, d'autre part, les informations basées sur la position géographique. Néanmoins, le problème principal des réseaux VANETs est l'exploitation d'environnements hautement dynamiques. En effet, la vitesse élevée des véhicules et la déconnexion des liaisons entraînent des fluctuations importantes dans le réseau. Ainsi, le conducteur ne peut pas recevoir les données de l'expéditeur. Pour répondre à ces besoins, de nombreux protocoles de routage ont été développés et peuvent être classés selon de nombreux aspects pour fournir des chemins optimaux entre les nœuds du réseau VANET.

Dans ce chapitre, nous étudions et comparons les performances de sept protocoles de routage ad-hoc : AODV, OLSR, DSR, GPSR, AOMDV, ZRP et MDART. Parmi les sept protocoles étudiés, GPSR est un protocole basé sur la position parait le plus adapté pour les réseaux VANETs. Afin d'aider les chercheurs à mieux comprendre le comportement de ces protocoles, nous considérons deux types de trafic de données et nous utilisons une variété de protocoles pour fournir des références sur les différentes classes de protocoles de routage dans le but est de soutenir la Qualité de Service (QoS) pour les améliorations futures.

Le simulateur réseau NS-2 et le simulateur de mobilité VANETMOBISIM sont utilisés pour l'évaluation des performances. Le mécanisme de fonctionnement de sept protocoles étudiés et les scénarios de notre simulation avec leurs analyses seront présentés dans la suite de ce chapitre.

2.1 Principaux protocoles de routage des VANETs

Dans les paragraphes suivants, nous abordons le principe de fonctionnement des sept principaux protocoles de routage des réseaux VANETs, les inconvénients et les avantages de chacun d'entre eux. Les protocoles de routage que nous avons étudiés sont divisés en deux catégories : protocoles basés sur la topologie et protocoles basés sur la position (protocole géographique). Le routage basé sur la topologie est classé en trois catégories : proactive (périodique), réactive (à la demande) et hybride.

2.1.1 Protocoles de routage réactif (à la demande)

Ad-hoc **O**n-Demand **D**istance **V**ector **(AODV)** [30] est un protocole de routage réactif à la demande basé sur l'algorithme à vecteur de distance DSR et DSDV. Il utilise à la fois une transmission de données par paquets Unicast et Multicast. Dans AODV, lorsqu'un nœud souhaite envoyer un message, le processus de découverte de route est lancé. En effet, la source diffuse un message RREQ de demande d'itinéraire à ses voisins (figure 2.1). Ensuite, lors de la réception du RREQ par la destination, un paquet de réponse de route RREP est envoyé au nœud source. Chaque nœud conserve un chemin vers la destination, contenant l'adresse IP de destination, l'adresse IP du nœud à partir duquel il est arrivé, le nombre de sauts et la durée de vie. En cas d'échec de lien, un message d'erreur de routage est envoyé à la source et un nouveau processus de découverte d'itinéraire est lancé.

Ad-hoc On-demand **M**ultipath **D**istance **V**ector **(AOMDV)** [38] est une amélioration du protocole de routage réactif AODV. Lors de la découverte de route, chaque nœud maintient un ou plusieurs chemins vers une destination qui correspond au plus grand numéro de séquence connu pour cette destination. Comparé à d'autres protocoles de routage multi-trajets à la demande, AOMDV fournit une récupération plus rapide et efficace des pannes d'itinéraires dans un réseau dynamique, en calculant plusieurs chemins dans une seule tentative de découverte de route. Mais quand tous les chemins échouent, une nouvelle découverte d'itinéraire est nécessaire.

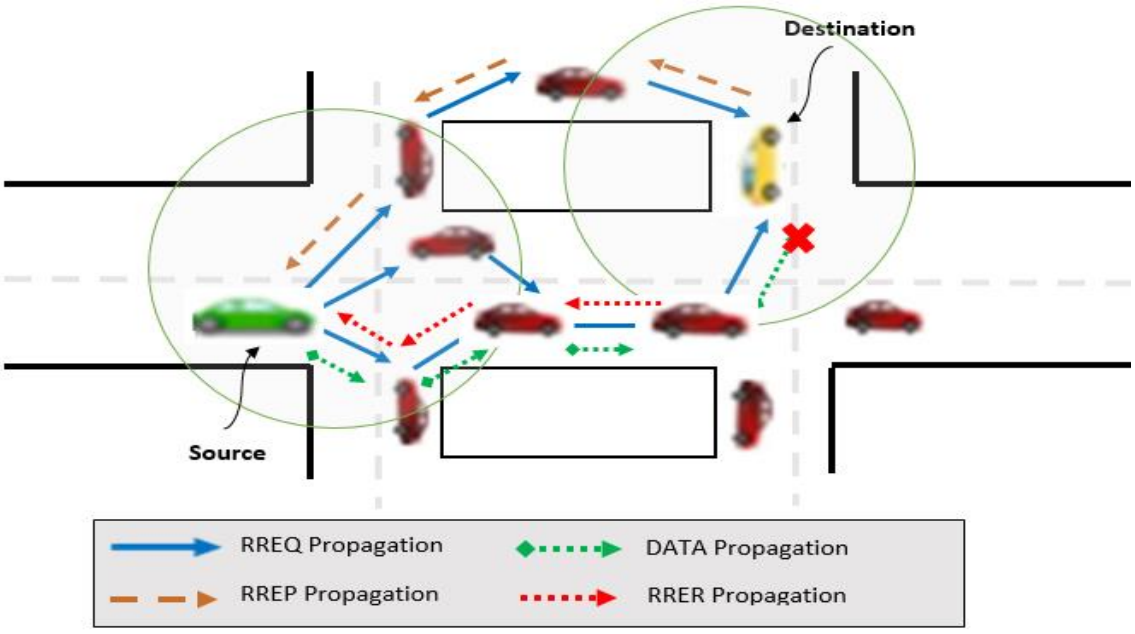


Figure 2.1 : Mécanisme de fonctionnement du protocole de routage AODV

Dynamic **S**ource **R**outing **(DSR)** [39] est un protocole de routage réactif basé sur le concept de routage source qui nécessite beaucoup plus d'informations de routage. Chaque nœud mobile maintient un cache de routes menant aux destinations accessibles. Le protocole DSR fonctionne selon deux mécanismes pour permettre la maintenance des routes sources :

- **Découverte de route :** ce mécanisme permet à un nœud source d'envoyer un paquet à un nœud destinataire afin d'établir un itinéraire vers la destination. La fonction de

découverte d'itinéraire n'est utilisée que lorsqu'un nœud essaie d'envoyer un paquet à la destination et ne connaît pas l'itinéraire vers la cible.

- **Maintenance de la route :** Dans cette phase, le nœud source est capable de détecter le chemin vers la destination. Mais si la liaison échoue et il ne peut pas se déplacer vers un nœud de destination, le nœud source tente un autre chemin stocké dans le cache, si aucun chemin de routage n'est trouvé pour envoyer les données, il effectue la découverte de la route en donnant plus de messages de demande RREQ au réseau.

2.1.2 Protocoles de routage proactif

Optimized **L**ink **S**tate **R**outing (**OLSR**) [40] appartient à la catégorie des protocoles de routage proactifs. Il échange les informations de topologie avec les autres nœuds du réseau d'une manière optimisée (figure 2.2). En effet, chaque nœud établit son voisinage à un et à deux sauts à partir des messages HELLO, puis sélectionne parmi ses voisins à un saut (premier niveau) un ensemble des Relais Multipoint -MPR (Multi Point Relay) [41], [42] qui permet d'atteindre la totalité des voisins à deux sauts (deuxième niveau). La sélection des Relais Multipoints (MPR) est la principale fonctionnalité du protocole OLSR, qui permet de fournir un mécanisme efficace de diffusion des messages TC (Topology Control) par la réduction du nombre de retransmission requis et possède l'avantage d'avoir immédiatement les routes disponibles lors de la demande due à sa nature proactive.

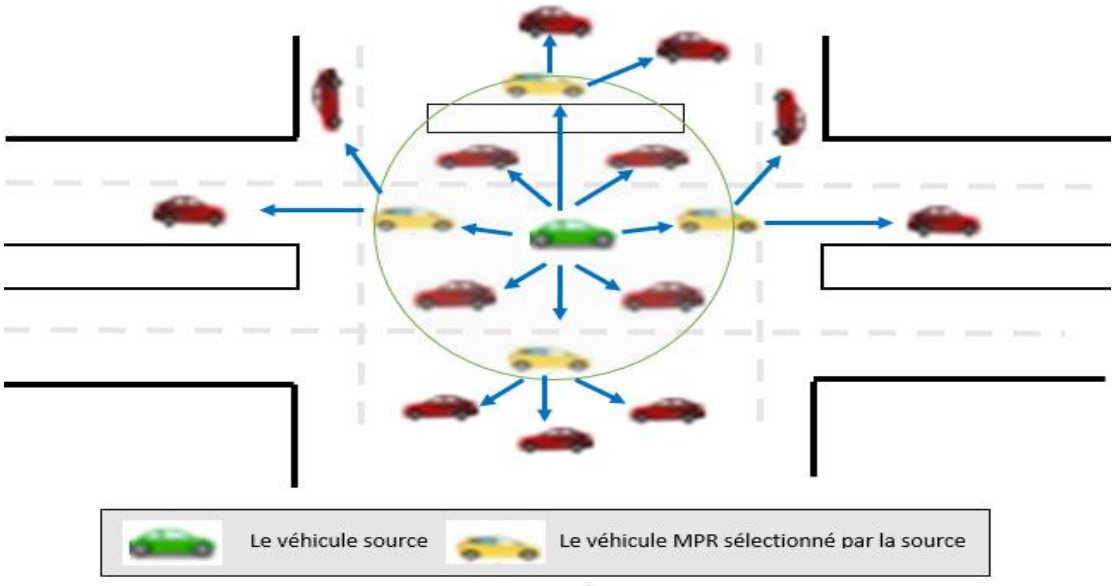


Figure 2.2 : Mécanisme de fonctionnement du protocole OLSR utilisant des relais multipoints (MPR)

MDART (**M**ulti-**P**ath **D**ynamic **A**ddress **R**outing) est une extension du protocole DART [43]. Ce dernier est basé sur le schéma de chemin le plus court. C'est un protocole de routage multivoies proactif. En effet, chaque nœud suit les routes redondantes pour faire face aux changements de la topologie. Ainsi, il garantit le transfert vers plusieurs trajets sans introduire un surcoût de communication supplémentaire par rapport à DART. La grande mobilité et l'instabilité des routes dans les réseaux VANET présente un défi majeur où, le routage devient une tâche difficile. Par conséquent, les protocoles de routage géographiques sont considérés les

plus adaptés et fonctionnels pour les réseaux à grande échelle comme les VANETs. Ce qui nous a amenés à nous intéresser, dans notre étude, au protocole GPSR.

2.1.3 Protocole de routage hybride

Zone **R**outing **P**rotocol **(ZRP)** [33] : c'est l'un des premiers protocoles de routage hybride, conçu pour les réseaux à grande échelle. Il repose sur la notion de zones de routage ce qui nécessite de conserver une petite quantité d'informations de routage dans chaque nœud (figure 2.3). Il met en place deux protocoles :

- **IARP** (IntrA-zone Routing Protocol) : Utilisé dans le routage proactif, chargé de mettre à jour l'état du réseau et de maintenir les routes vers les nœuds en dehors de la zone de routage.
- **IERP** (IntEr-zone Routing Protocol) : Utilisé dans le routage réactif qui garde les nœuds à l'intérieur de la zone. Un point majeur de préférence de ce protocole est qu'une demande de route unique peut donner lieu à plusieurs réponses de route sans problème de boucle ou surcharge des ressources.

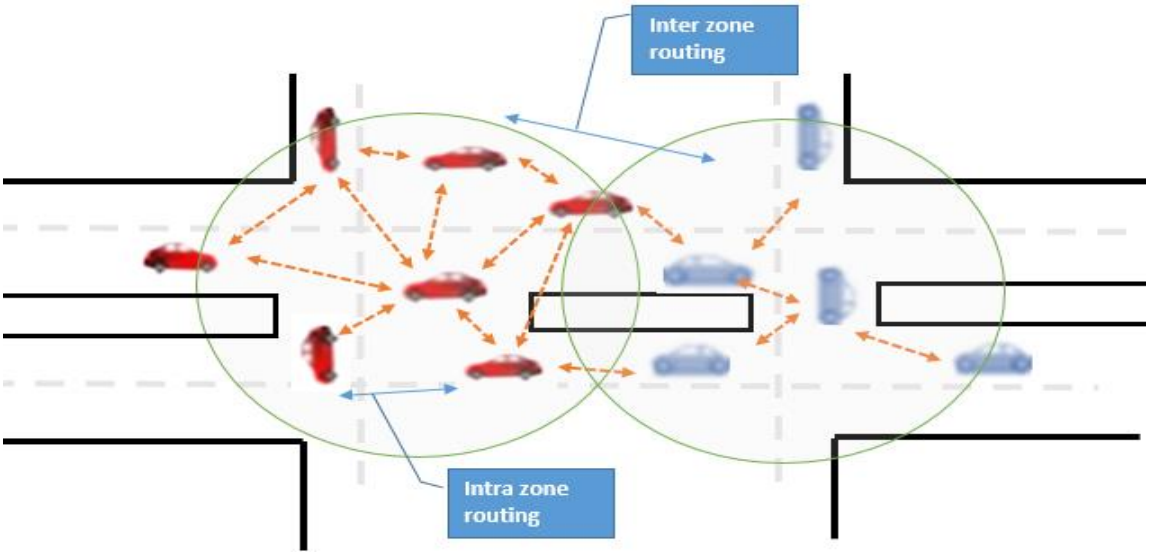


Figure 2.3 : Mécanisme de fonctionnement du protocole hybride ZRP

2.1.4 Protocole de routage géographique (basé sur la position)

Greedy **P**erimeter **S**tateless **R**outing **(GPSR)** [44] : c'est l'un des protocoles les plus connus qui est basé sur le concept du routage basé sur la position géographique. Il implémente deux stratégies pour transmettre le paquet en fonction de la situation des nœuds communicants, à savoir, le mode de transfert greedy (Greedy Forwarding- GF) et le mode de transfert de périmètre (Perimeter Forwarding- PF). Lorsqu'un nœud source a besoin d'envoyer un paquet, il utilise la stratégie greedy pour trouver le nœud ayant la plus courte distance à la destination. Mais si le nœud source est plus proche à la destination, à ce moment, la seconde stratégie d'acheminement périmétrique (PF) contourne ce problème et l'algorithme récupère en routant

autour du périmètre de la région jusqu'à trouver un nœud plus proche de la destination. Ensuite, la stratégie greedy reprend le relais. *L*e tableau 2.1 récapitule les avantages et les inconvénients des protocoles de routage présentés.

Tableau 2.1 ***:*** *Les avantages et les inconvénients des protocoles de routage étudiés*

Protocoles	**Avantages**	**Inconvénients**
AODV	-Mise à jour du chemin vers la destination. -Faible besoin de traitement et de surcharge de la mémoire. -Elimine la boucle de routage dû à l'utilisation des numéros de séquence de la destination. -Dispose d'un mécanisme pour l'échec de route. -Approuve le réseau ad-hoc à grande échelle.	-Provoque un délai important dû au processus de découverte de route. -Induit une incohérence dans la route. -Produit une forte surcharge des messages de contrôle diffusé dans le réseau. -Consomme une bande passante supplémentaire.
OLSR	- Adapté au réseau à grande densité. -Réduit le délai de transmission des paquets. - Supporte les applications en temps réel.	-Provoque une congestion sur le réseau à cause de l'envoi fréquent de paquets de contrôle.
DSR	-Inclue les routes dans l'entête des paquets ce qui élimine les boucles de routage. -Mise à jour des entrées dans le cache lorsque de nouvelle route sont découverte.	-L'augmentation de la mobilité dégrade les performances. - Provoque des délais de transmission et des pertes additionnelles de données dans le réseau.
ZRP	-Conçu pour les réseaux à grande échelle. -Conserve une quantité d'information de routage dû à la notion de zones de routage utilisé. - Approche IERP réactif permet de gérer le retard dans le réseau.	- La topologie hautement dynamique n'est pas prise en charge. - la taille de la zone est prédéfinie et ne peux pas être modifiée.
GPSR	-Utilise la technique GF pour transmettre un paquet. -Adapté à l'évolutivité.	- Inefficace dans les environnements urbains.
MDART	-Utilise de multiple route entre la source et la destination pour faire face aux changements de topologie.	- Produit un nombre de paquets de contrôle élevé dans un réseau à grande mobilité.

	-Fournit une protection contre les défaillances de routes en diffusant du trafic à un ensemble de chemins disjoints.	
AOMDV	- Fournit une tolérance de panne efficace dans un réseau dynamique. - Gère la charge dans le réseau et évite la possibilité de congestion. - Maintient la connectivité.	- Induit une augmentation des frais de messages pendant la découverte de route en raison de l'inondation des messages RREQ aux multiples nœuds.

2.2 Outils de simulation

L'utilisation des outils de simulation permettent de simuler une topologie dans laquelle il est possible de faire transiter les données. Les véhicules dans les réseaux VANETs ne peuvent se déplacer que sur les routes ou les chemins définis dans cette topologie et doivent obéir aux règles de circulation, et d'autre part, par la prise en compte de l'interaction entre les véhicules. Par conséquent, il y'a une liberté dans leurs mouvements et ils sont limités par les signalisations routières telles que des panneaux d'arrêt, les feux de circulation, etc.

Dans la suite de cette section, nous présentons les différents simulateurs réseaux et nous décrivons l'architecture du simulateur NS-2 et VANETMOBISIM. Ensuite, nous finissons par un schéma qui décrit le processus de notre simulation.

2.2.1 Simulateur de mobilité

Les auteurs de [45], [46] ont présenté une comparaison des différents générateurs de mobilité comme VanetMobiSim[47], SUMO [48], MOVE [49], FreeSim [50] et Citymob [51], et ils ont montré qu'il n'y a pas un générateur de mobilité qui peut répondre à toutes les fonctionnalités souhaitées requises par la communauté de recherche. FreeSim et Citymob présentent de bonnes caractéristiques de logiciels, mais leurs plus grandes limitations sont la génération des traces qui n'est pas supportée par NS-2. Par contre, SUMO, MOVE et VanetMobiSim tous ont de bonnes caractéristiques comme la portabilité, l'open source, l'interface graphique, la console, la documentation, la facilité d'installation et d'utilisation. En particulier, VanetMobiSim fournit un excellent support de trace et peut importer des cartes de base de données TIGER / Line et VORONOI [52].

Dans notre travail, nous avons utilisé VanetMobiSim qui est une extension de CanuMobiSim, un simulateur de mobilité basé sur Java et peut générer la mobilité dans différents formats, supportant différents outils de simulation pour les réseaux mobiles (NS-2, QualNet, etc). CanuMobiSim fournit une architecture de mobilité efficace, facilement extensible. VanetMobiSim vise à élargir le soutien à la mobilité des véhicules de CanuMobiSim à un degré plus élevé de réalisme. Le système de simulation VANET est montré sur la figure 2.4. Après la définition d'un scénario de mobilité dans un fichier XML, on lance le simulateur

VanetMobiSim qui est nécessaire pour produire un fichier de trace de mobilité en format NS-2 (identificateur de nœud, le temps, la position, la vitesse, etc). Ce fichier doit être intégré dans le fichier de définition des communications du simulateur NS-2, afin de produire en sortie un fichier trace de simulation des VANETs. VanetMobiSim a été sélectionné parce que les modèles de mobilité générés avec cet outil répondent à plusieurs exigences. En outre, il a été choisi parce qu'il est disponible gratuitement et ses traces de mobilité résultantes peuvent avoir plusieurs formats pour être compatibles avec plusieurs simulateurs de réseaux.

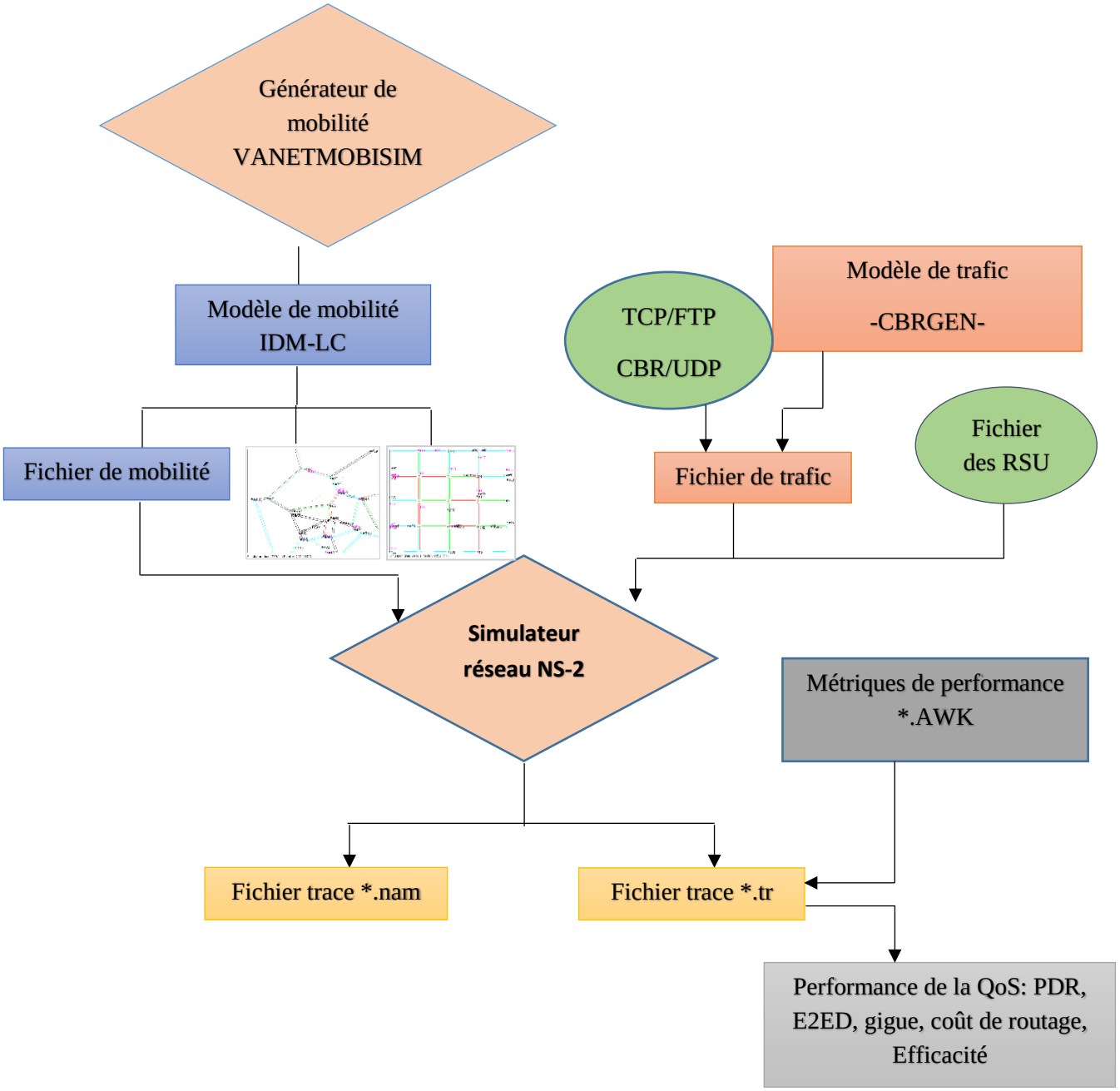


Figure 2.4 : Système de simulation des VANETs basé sur les simulateurs NS-2 et VANETMOBISIM

L'évaluation des performances des protocoles dans les réseaux ad-hoc nécessite donc des tests dans des conditions réelles. Or, dans NS-2 il est possible d'intégrer des modèles de mobilité des nœuds pour rendre les simulations proches de la réalité. Un modèle de mobilité permet de générer un scénario de mouvement des nœuds, qui présente un modèle plus proche du comportement humain normal. Les modèles de mobilité utilisés pour la simulation des VANETs sont les suivants :

- **Intelligent Driver Model (IDM)** [53] : est un modèle de mobilité pure, qui ne considère que l'ajustement de la vitesse du véhicule sur la base des paramètres du véhicule «accélération/décélération». Chaque véhicule est limité par la vitesse du véhicule qui le précède, cela fonctionne bien avec les routes d'une seule voie, tandis que dans la plupart des scénarios (c -à- d. urbain ou autoroute) où les routes sont plus susceptibles d'être avec des voies multiples. En raison de cette limitation, l'IDM a été étendu avec les changements de voie (IDM-LC) et les gestions de l'intersection (IDM-IM) [15], [18].
- **IDM-IM (**Intelligent Driver Model with Intersection Management) : est une extension du modèle IDM, qui est capable de gérer d'une manière intelligente les intersections ainsi que de ralentir et s'arrêter ou agir selon des feux de circulation. Dans les deux cas, le conducteur doit réagir seulement en fonction du premier véhicule sur chaque route. Lorsqu'un véhicule se dirige vers une intersection gouverné par des feux de signalisation, il est informé par la description macroscopique de l'état. Si la couleur est verte, le passage est accordé et la voiture conserve sa vitesse actuelle à travers l'intersection. Si la couleur est rouge, la traversée est rejetée et la voiture est forcée de ralentir et s'arrêter à la jonction de la route.
- **IDM-LC (**Intelligent Driver Model with Lane Changes) : s'étend à l'origine du modèle IDM, c'est un modèle de mobilité qui offre des possibilités pour les véhicules d'alterner les voies et de dépasser les autres véhicules, en présence de routes à plusieurs voies «Multi-voies ». Ces deux caractéristiques se produisent avec la séparation des flux de trafic sur les différentes voies des routes similaires. Cependant, comme le nombre de voies peut varier d'une route à l'autre, dans le cas où un véhicule s'approche d'une intersection, il peut décider de continuer à circuler sur la même voie dans le côté de la route ou essayez de fusionner à sa droite (si la voie n'est pas présente dans le nouveau segment). Sinon, le véhicule doit ralentir ou arrêter jusqu'à ce qu'une place devienne disponible.

Le modèle qui nous semble le plus approprié pour notre travail est le modèle IDM-LC. La trace de mobilité obtenue est utilisée comme entrée dans le simulateur réseau que nous décrivons dans la section suivante.

2.2.2 Simulateur de réseau

Divers outils de simulation ont été utilisés pour évaluer et simuler les performances des protocoles de routage dans les VANETs, d'où la nécessité de pouvoir comparer différents simulateurs réseaux en utilisant les critères d'évaluation, tels que : NS-2[54], OMNET++ [55], GLOMOSIM [56] , Jist [57], Jsim [58],etc. Il en résulte que NS-2 reste sans doute le simulateur

le plus documenté, le plus polyvalent et le plus utilisé par la communauté scientifique. Il demeure un très bon simulateur. Quant à Glomosim, on ne peut s'empêcher de noter qu'il est très performant pour la simulation des réseaux sans fil (il intègre un large panel de protocoles de routage). NS-2 possède l'outil de visualisation NAM (Network AniMator) de simulation et la documentation peut cependant sembler assez légère pour NS-2. Jsim est celui le plus à plaindre quant à la documentation : très difficile d'en trouver. C'est ce qui explique le manque de certitude lors de l'évaluation de ce simulateur. On sait toutefois qu'il est très performant (ce qui est dû au moteur codé en Java). L'ensemble de ces simulateurs sont multi-plateforme (Windows et Linux principalement).

Présentation de l'outil NS-2

NS-2 est un logiciel de simulation des réseaux informatiques, le plus populaire utilisé par les chercheurs. Il a commencé comme une variante du simulateur de réseau REAL en 1989 et a évolué au cours des dernières années. En 1995, son développement a été soutenu par la DARPA à travers le projet Virtual InterNetwork Testbed (VINT) [59]. Actuellement, le développement est réalisé par l'institut des sciences de l'information en Californie. La majorité des protocoles du modèle TCP/IP sont implémentés dans ce simulateur. Il supporte aussi le mode sans fil et dispose de modèles de propagation pour gérer l'atténuation de signal. Il est possible de créer plusieurs scénarios et générer du trafic de données. Des outils graphiques sont disponibles pour gérer les topologies. Les inconvénients rapportés sont la complexité du logiciel, et la grande quantité de ressources utilisées. Il fonctionne sur les plates formes UNIX et Windows. NS-2[54] a la possibilité d'utiliser des nœuds mobiles et offre aux utilisateurs un moyen pour spécifier les protocoles réseau et simuler leurs comportements. En raison de sa flexibilité et sa nature modulaire, la mobilité de ces nœuds peut être spécifiée soit directement dans le fichier de simulation ou en utilisant un fichier de mobilité de trace. Dans notre étude, le fichier de trace est généré par VanetMobiSim[60].

NS-2 a une riche librairie d'objets réseau et protocoles. Il se compose de deux langages principaux : Une librairie d'objets écrite en C++ et un interpréteur de script OTcl (Object Tool Command Language). Le C ++ définit le mécanisme interne, à savoir, un arrière-plan des objets de simulation, le langage OTcl met en place l'assemblage et la configuration des objets. Ces derniers sont reliés entre eux en utilisant tclcl [50]. Chaque simulation dans NS-2 est exécutée à partir d'un script écrit en Tcl (Tool Command Language), qui est un langage de commande interprété, multiplateforme, puissant, conçu pour être facilement inclus dans une application (C, C++). Dans ce script, on spécifie les paramètres de simulation (temps de simulation, modèle de mobilité, nombre de nœuds dans le réseau, transmission radio, type de protocole, type de trafic, etc).

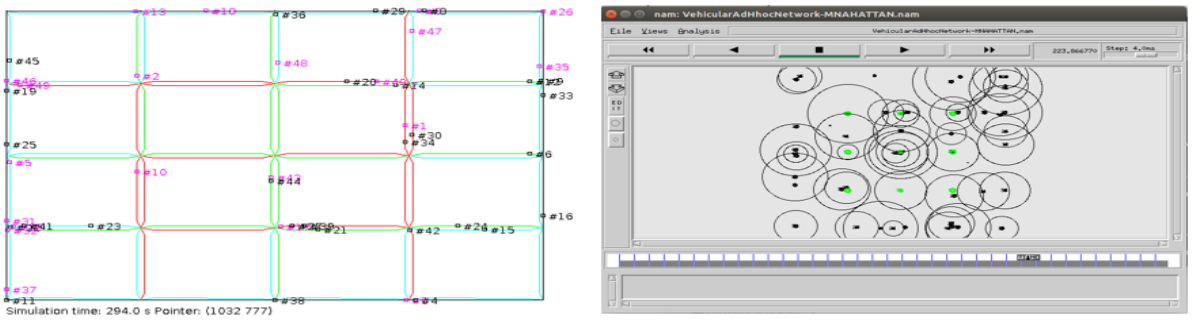
Processus de simulation

L'accent majeur de notre travail dépend de l'analyse des protocoles de routage dans les VANETs. Ces protocoles sont intégrés dans le simulateur NS-2 et sont configurés par le script TCL. La figure 2.4 montre les étapes de simulation pour évaluer les performances des

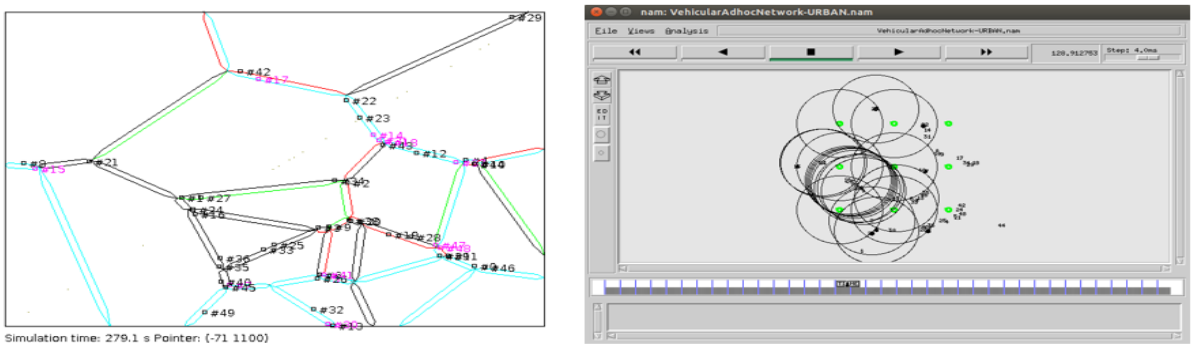
protocoles de routage étudiés. Dans un premier temps, les fichiers de mobilité et de trafic associé au trois scénarios sont générés et compilés séparément avant d'associer la simulation avec NS-2, qui serait alors dans le format de réception pour NS-2. Ces fichiers sont fusionnés avec le script réel TCL. Afin d'y avoir des fichiers trace et NAM contenant les données qui seront filtrées à l'aide du script AWK pour le calcul des métriques de performance des protocoles de routage simulés. En effet, AWK est un langage de script qui traite les fichiers de données, et plus particulièrement les lignes de ces fichiers. Il lit l'entrée d'une ligne à la fois, puis la ligne est analysée et ensuite l'action associée est exécutée.

2.3 Paramètres de simulation

Dans notre simulation, nous utiliserons deux environnements VANET, le scénario Manhattan et le scénario urbain illustré dans la figure 2.5, qui montre un exemple de mouvement de véhicule de notre simulation pour les deux environnements simulés, à savoir, Manhattan et urbain, en considérant la communication purement ad-hoc et la communication avec les infrastructures (Road Side Unit-RSU). Les RSU sont illustrés dans la figure 2.5 avec une couleur verte.



(a)



(b)

Figure 2.5 : Exemple de mouvement véhiculaire de notre simulation basée sur le modèle de mobilité IDM-LC (à gauche) et la topologie du réseau avec neuf RSU fixe (à droite) (a) scénario Manhattan (b) scénario Urbain

En outre, les véhicules se déplacent de façon aléatoire à des vitesses différentes jusqu'à 100 km/h. Par conséquent, l'utilisation de la norme 802.11p est très compatible aux réseaux VANET à haute mobilité. Nous comparons différents protocoles de routage ad-hoc dans l'environnement VANET, en utilisant le simulateur de réseau NS-2en fonction de deux types de trafic de données requis par l'utilisateur. Il s'agit du protocole de transfert de fichiers FTP/TCP et du protocole de débit constant CBR/UDP. Un graphe aléatoire de rues est généré par VanetMobiSim, avec un nombre variable de connexions et une topologie réseau avec neuf RSUs. Afin d'augmenter le taux de paquets délivrés et de diminuer le délai moyen, nous utilisons la norme IEEE802.11p, qui convient à un réseau VANET. Les principaux paramètres de simulation et les caractéristiques du réseau décrivant les scénarios étudiés sont présentés dans le tableau 2.2. Les paramètres du modèle de mobilité macroscopique et microscopique sont présentés dans le tableau 2.3 et le tableau 2.4.

***Tableau* 2.2:** Paramètres de simulation

Paramètres utilisés pour le modèle de trafic	***Valeur***
Type de trafic de données	CBR/UDP FTP/TCP
Nombres de connexions	10,15,20,25,30,35,40
Taille des paquets	512 paquets
Taux de paquets	8 paquets/s
Temps de simulation	300 s
Paramètres de simulation et caractéristiques du réseau	
Version du simulateur	NS-2.35
Protocoles des couches MAC et PHY	IEEE 802.11p
Portée de communication	250 m
Modèle de propagation	Two-ray ground
Type d'antenne	Omni Antenna
Paramètres utilisés pour le modèle de mobilité	
Dimensions de la zone de simulation	1000 x 1000 m²
Nombre de véhicules	50
Modèle de mobilité	IDM-LC
Direction du trafic	Multidirectional

Tableau 2.3 : Paramètres du modèle de mobilité macroscopique

Paramètre	**Description**	**Valeur**
I	Longueur des véhicules	5 m
A	Accélération maximale	0.6 m/s²
B	Décélération	0.5 m/s²
Ath	Seuil d'accélération	0.2 m/s²
S0	Distance d'embouteillage	2 m
T	Distance de sécurité	1.5 s
P	Politesse	0.5 s
Mainstay	Durée minimale de présence du noeud	5 s
Maxstay	Durée maximale de présence du noeud	30 s

Tableau 2.4 : Paramètres du modèle de mobilité microscopique

Clusters	*Obstacles par 100 x 100 m²*	*Clusters dans la zone de simulation (%)*	*densité des clusters (1000x1000m²)*	*Vitesse (km/h)*
Centre-ville	2	10	4	60
Résidentiel	5	40	4	40
Suburbain	1	50	4	100

2.4 Critères d'évaluation

Afin d'analyser et d'évaluer les performances des protocoles de routage, il est très important de comprendre tous les critères d'évaluation qui seront utilisés dans notre travail :

PDR (Packet Delivery Ratio) : est le rapport entre le nombre total de paquets de données reçus et le nombre de paquets de données envoyés. Cette métrique révèle la fiabilité et l'efficacité d'un protocole en garantissant la livraison des paquets. L'équation suivante est utilisée pour calculer le PDR :

$$\mathrm{PDR} = \frac{\textit{N}\text{ombre total de paquets de données reçus}}{\textit{N}\text{ombre total de paquets de données envoyés}} \quad (1)$$

Le délai de bout en bout (EED ou E2ED) : est le temps moyen pris par les paquets de données entre la source et la destination. L'E2ED doit être faible pour une transmission de données de bonne qualité. L'équation suivante est utilisée pour calculer E2ED :

$$\text{E2ED} = \frac{\text{Temps de la transmission des paquets}}{\text{Nombre total de paquets de données reçus}} \quad (2)$$

La variation du délai des paquets (gigue) : est la différence moyenne entre les délais de deux paquets successifs (X_{i+1} et X_i) reçus par un nœud et appartenant au même flux de données. Elle est calculée comme suit :

$$\text{Gigue} = \frac{\sum (\text{Délai du paquet } X_{i+1} - \text{Délai du paquet } X_i)}{\text{Nombre total de paquets de données reçus}} \quad (3)$$

Coût de routage : est la quantité d'informations de routage nécessaires pour recevoir un paquet de données. Il est calculé sur la base du nombre des paquets de routage et des paquets de contrôle, divisé par la somme du nombre de paquets de données reçus. Il se calcule comme suit :

$$\text{Cout de routage} = \frac{\text{Nombre total de paquets de routage envoyés}}{\text{Nombre total de paquets de données reçus}} \quad (4)$$

L'efficacité du réseau : est une mesure importante pour montrer la quantité de paquets de routage envoyés efficacement vers la cible. Elle est calculée comme suit :

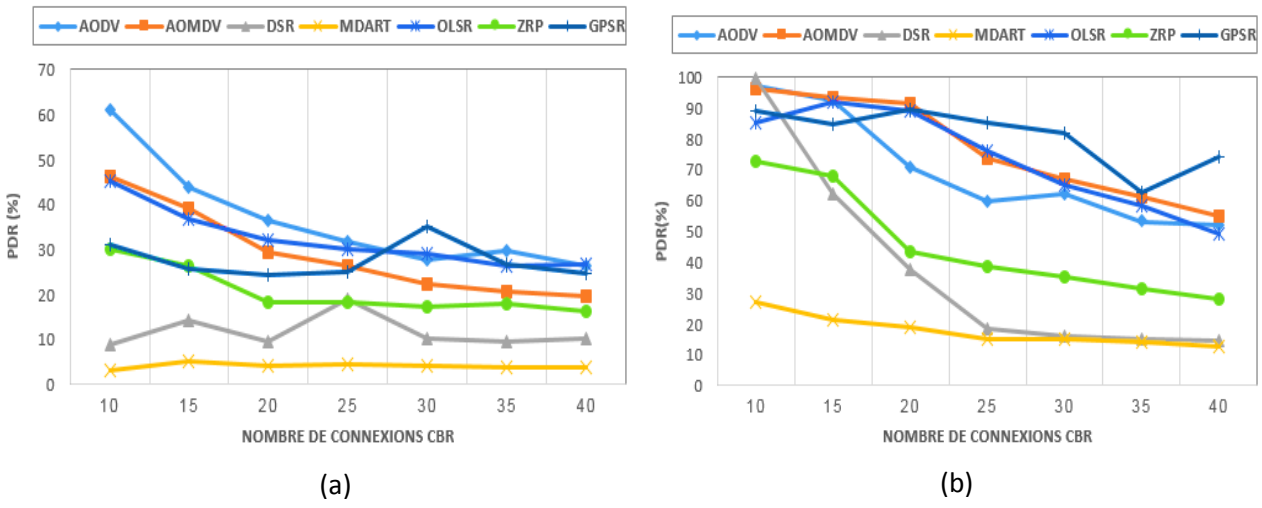
$$\text{Efficacité du réseau} = \frac{\text{Nombre total de paquets de données envoyés}}{\text{Nombre total de paquets de routage envoyés} + \text{Nombre total de paquet de données envoyés}} \quad (5)$$

2.5 Scénario de l'environnement Urbain

Dans cette section, nous étudions la variation des métriques de routage en fonction de la charge de trafic de données CBR/TCP avec et sans Road Side Unit (RSU). La charge du trafic augmente en raison de la forte probabilité de collisions, et par conséquent, le nombre de paquets délivrés diminue. Dans un scénario simple où un nœud veut générer un paquet, le protocole de routage trouvera une route vers la destination via le mécanisme de découverte. Cependant, si la couche MAC est incapable de transférer un paquet parce qu'il n'y a pas de nœuds alternatifs, le paquet sera perdu.

2.5.1 Résultats des simulations en fonction de la variation de la charge de trafic CBR

La figure 2.6(a) et la figure 2.6(b) montrent que les meilleurs résultats en termes PDR sont obtenus avec les protocoles réactifs (AODV et AOMDV), puisque ceux-ci ont la capacité de maintenir la route lors de l'envoi des données. Sur la même figure 2.6, nous pouvons voir que l'utilisation des RSUs conduit à un PDR plus élevé pour les protocoles de routage illustrés sur la figure 2.6 (b) que pour ceux de la figure 2.6(a). Un PDR plus faible est observé pour le protocole DSR dans le scénario sans RSU, car il est incapable de réparer les liens brisés localement. Les meilleures performances sont obtenues pour la communication entre les RSU et les véhicules pour un faible nombre de connexions CBR. Le protocole DSR utilise une route alternative, parce qu'il peut stocker plus d'un chemin dans le cache. En outre, le protocole géographique GPSR obtient de meilleures performances pour la majorité des nombres de connexions CBR, en raison de sa méthode de routage, qui consiste à trouver le voisin ayant la distance la plus faible par rapport à la destination et aux informations de localisation précises, qui présentent un facteur important pour obtenir un PDR élevé. Le protocole proactif MDART est moins performant que les protocoles réactifs dans les deux scénarios (avec et sans RSU), car la congestion causée par la diffusion de paquets RREQ peut entraîner la perte de paquets. Le protocole OLSR est le meilleur, car il peut réduire la retransmission des paquets de données et peut maintenir le meilleur chemin possible, réduisant ainsi la congestion et la surcharge du réseau. On constate que le protocole MDART a obtenu des résultats faibles, montrant une baisse significative puis une stabilisation en fonction des connexions CBR. Dans les scénarios avec RSU illustrés sur la figure 2.6(b), les protocoles proactifs ont obtenu un PDR plus élevé que ceux dans le scénario sans RSU. Le protocole OLSR a atteint 85 % pour un faible nombre de connexions et 49 % pour 40 connexions, tandis que le protocole hybride ZRP a diminué progressivement dans les deux scénarios et constitue un choix inefficace pour une topologie hautement dynamique telle qu'un réseau VANET.

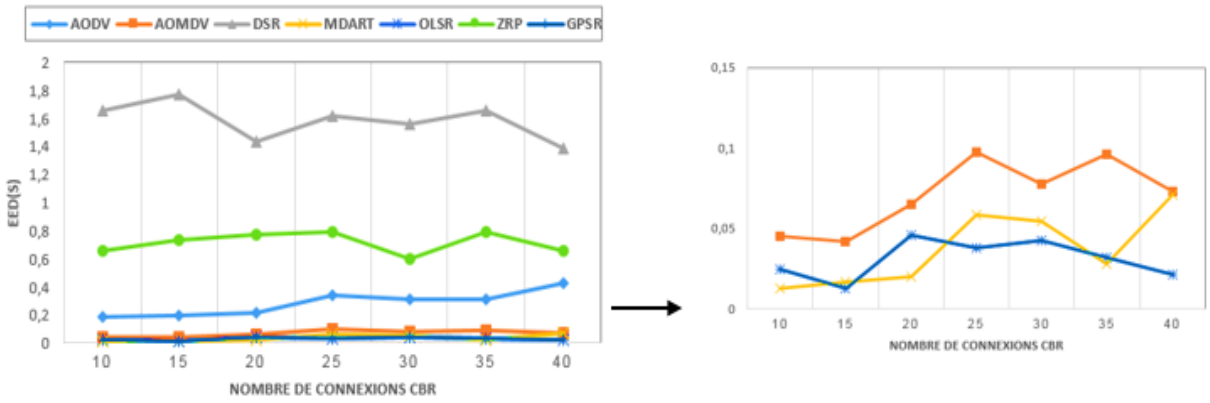


(a) (b)

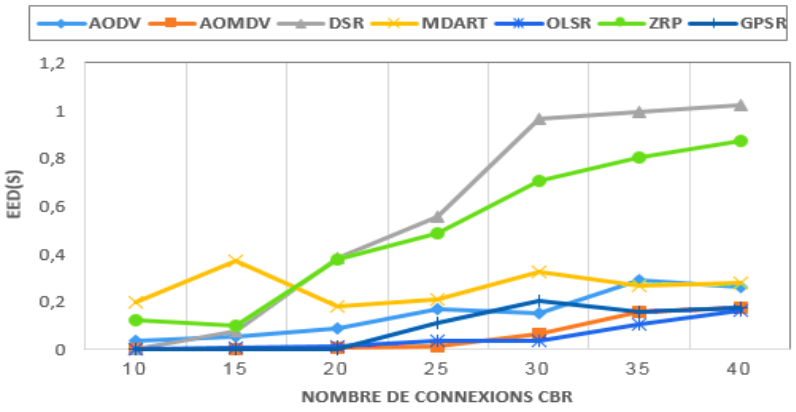
Figure 2.6 : Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

Le délai total comprend les délais causés par la mise en mémoire tampon pendant la transmission au niveau de la couche MAC, la congestion et la découverte de route. En effet, les paquets générés par les véhicules ne sont pas tous envoyés à leur destination. Pour cela, les véhicules les mettent dans la file d'attente. Ainsi, la performance de chaque protocole est générée en fonction de sa propre stratégie. Comme le montrent les figures 2.7(a) et 2.7(b), le protocole de routage basé sur la position GPSR est plus performant que le protocole réactif DSR et le protocole hybride ZRP. L'efficacité du GPSR dans différents scénarios de trafic de données peut s'expliquer par son utilisation des nœuds voisins lors de la transmission des paquets aux nœuds du prochain saut. Cela minimise le nombre de sauts, et donc le temps nécessaire pour transmettre les paquets au nœud cible.

Tous les protocoles de routage montrent de bonnes performances dans les deux scénarios. Nous pouvons remarquer que GPSR est le protocole le plus efficace dans le scénario avec RSUs. Les protocoles réactifs obtiennent de meilleures performances dans le scénario avec RSUs que celui sans RSUs, ainsi, ils donnent de meilleure découverte d'itinéraire rapide avec la présence de RSU le long de la route. Le protocole proactif OLSR produit un délai relativement faible, tandis que le contraire est vrai pour les protocoles DSR et ZRP.



(a)



(b)

Figure 2.7 : Délai de bout en bout en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La figure 2.8 montre les résultats de la performance des protocoles de routage en termes de gigue, qui sont très similaires à ceux obtenus pour le délai. Les protocoles simulés sont les plus efficaces dans le scénario avec RSUs. Nous constatons que le protocole GPSR, basé sur la position, est le plus efficace et qu'il atteint une faible gigue de livraison des données pour une faible charge de trafic de données CBR. Il convient de noter que la majorité des protocoles présentent des performances stables (à l'exception DSR, ZRP et AODV) avec un nombre élevé de connexions en mode de communication sans infrastructure. Cependant, lorsque la charge CBR du réseau est supérieure à 20 connexions, le protocole hybride ZRP et le protocole réactif DSR donnent de faibles résultats dans le scénario avec RSU, en comparaison avec le protocole géographique GPSR. Pour le protocole hybride ZRP, le retard est dû aux méthodes IERP et IARP qu'on a décrit précédemment.

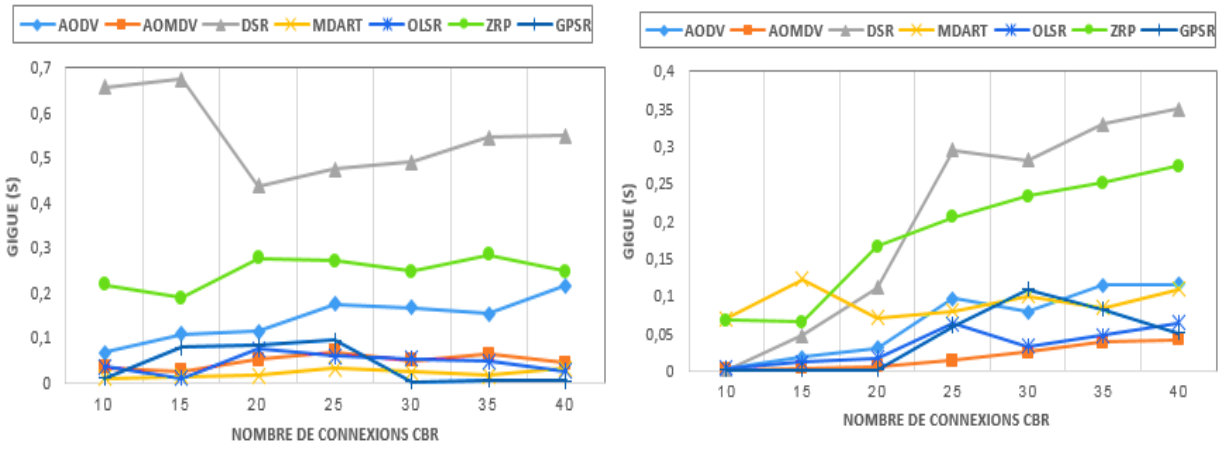


Figure 2.8 : Gigue en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

Comme nous l'avons déjà précisé dans le premier chapitre, un réseau VANET est un réseau dynamique où les véhicules échangent des informations via des liaisons sans fil. Si nous fixons le nombre de nœuds, le coût de routage diminue lorsque nous augmentons le nombre de connexions CBR. Les coûts de routage des sept protocoles pour les deux modes de communication en fonction de la charge de trafic de données CBR sont présentés dans les figures 2.9(a) et 2.9(b). Les coûts de routage des différents protocoles restent presque stables pour les deux scénarios. En outre, lorsque nous augmentons le nombre de connexions CBR entre les nœuds, le nombre de paquets de contrôle reste presque le même. Les protocoles de routage dans le scénario avec RSUs ont un coût inférieur à 35 paquets. Les protocoles GPSR, AODV, AOMDV, MDART et OLSR ont un faible coût. Tandis que le protocole DSR a le coût le plus élevé dans les deux scénarios, suivi par le protocole hybride ZRP.

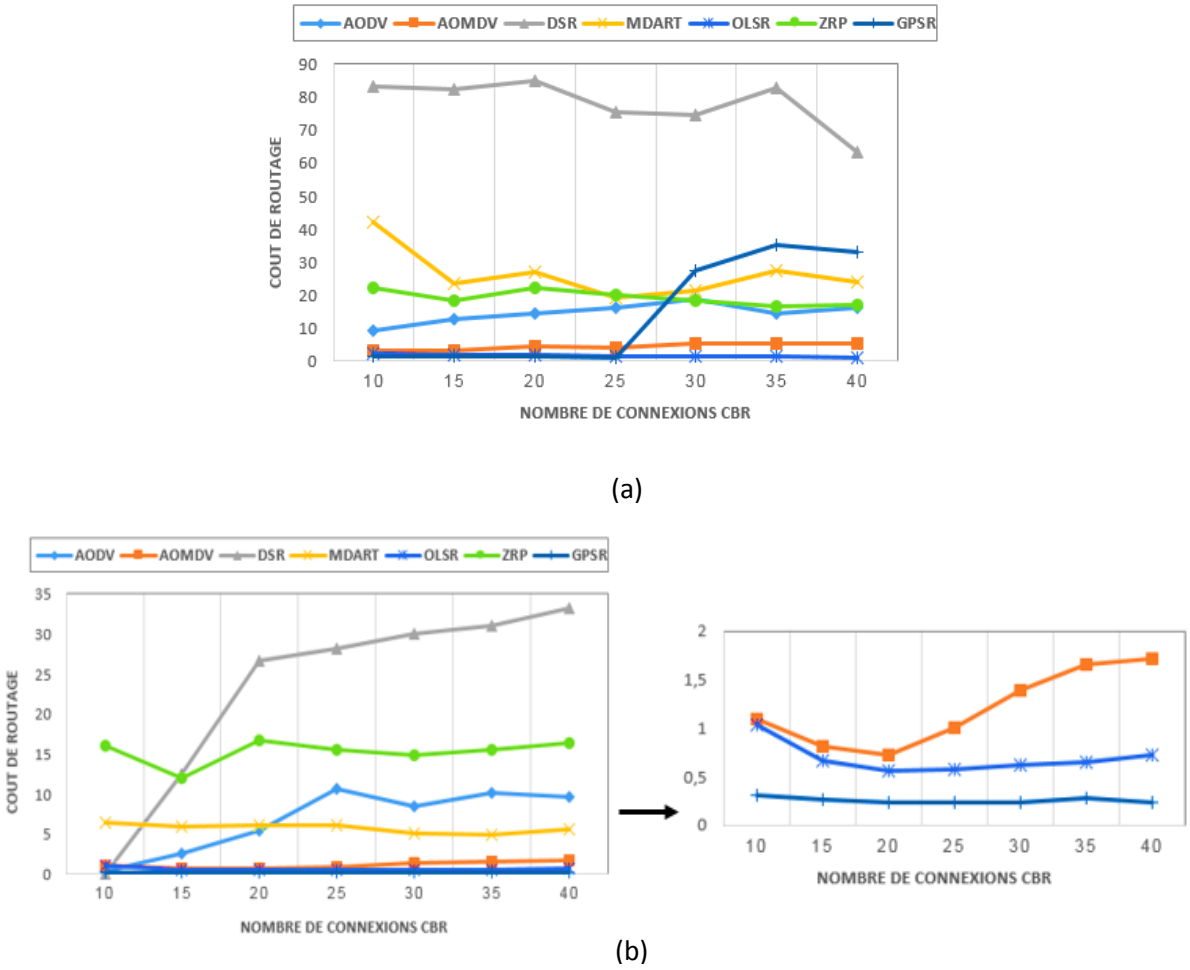


Figure 2.9 : Le coût de routage en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

Les figures 2.10(a) et 2.10 (b) montrent l'efficacité de différents protocoles de routage avec la variation de la charge de trafic de données CBR. Le protocole géographique GPSR atteint un taux supérieur à 80% avec l'utilisation de RSU en fonction des connexions CBR. Il montre une augmentation graduelle lorsque le nombre de connexions CBR augmente. Les protocoles MDART, OLSR et AOMDV obtiennent également de bons résultats avec un nombre croissant de connexions entre les nœuds et les RSUs. L'efficacité des protocoles mentionnés ci-dessus devient presque stable, avec un taux supérieur à 50%. Le protocole réactif AOMDV dépasse 50% tandis que les protocoles MDART, GPSR et OLSR atteignent une efficacité supérieure à 75% pour 30 connexions et 40 connexions. De plus, ils surpassent DSR, AODV et ZRP dans les deux scénarios.

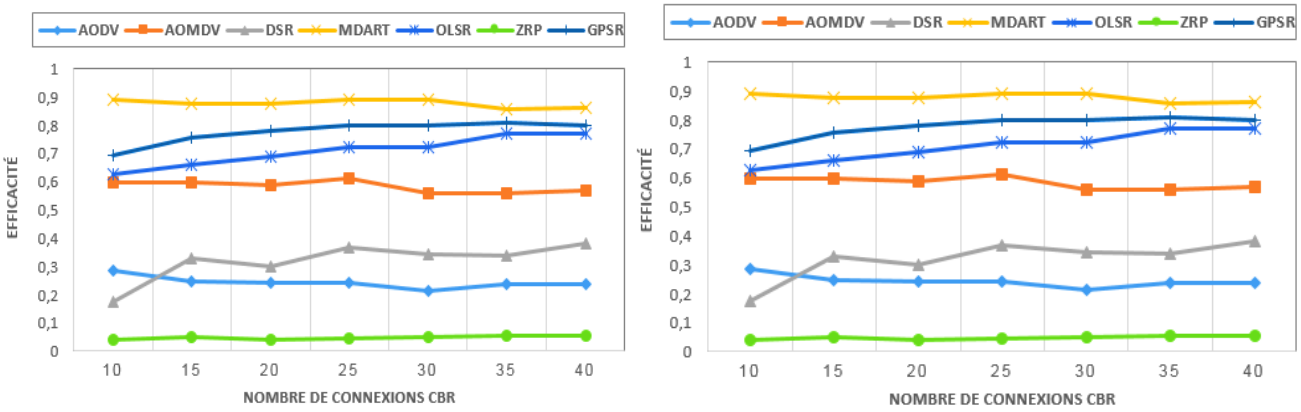


Figure 2.10 : Efficacité en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

2.5.2 Résultats des simulations en fonction de la variation la charge de connexion TCP

D'après les figures 2.11(a) et 2.11(b), les meilleurs résultats sont ceux des protocoles réactifs AODV, AOMDV et DSR dans le scénario utilisant des RSU. Cela est dû à leur capacité à construire des informations de routage et à maintenir une route lorsqu'il est nécessaire d'envoyer des données. Le protocole DSR donne les meilleures performances car il peut stocker plus d'un chemin dans le cache. Tous les protocoles de routage sont performants, avec un taux supérieur à 97 % pour tous les nombres de connexions TCP. Ce dernier assure la livraison des données de la source à la destination. Ainsi, les performances des différents protocoles de routage dans les deux scénarios sont efficaces. L'utilisation des RSU avec le trafic TCP fournit de bonnes performances et une charge de connexion généralement élevée et le taux dépasse 98% pour le protocole géographique GPSR, les protocoles proactifs OLSR et MDART, les protocoles réactifs AODV, AOMDV et DSR, et le protocole hybride ZRP. Le scénario sans RSU donne de faibles performances pour les protocoles OLSR, AODV et ZRP par rapport aux autres protocoles du même scénario. La communication entre les véhicules et les RSU atteint donc de bonnes performances en utilisant le trafic de données TCP, car il est plus facile d'envoyer un paquet à une cible fixe telle qu'une RSU qu'à une destination mobile. En outre, plus les zones de couverture augmentent dans le réseau, plus le nombre de véhicules et de RSU communiquent entre eux et plus la possibilité qu'un véhicule se trouve dans la zone de couverture d'un autre est élevée. Par conséquent, la transmission des paquets de la source à la destination sera fiable.

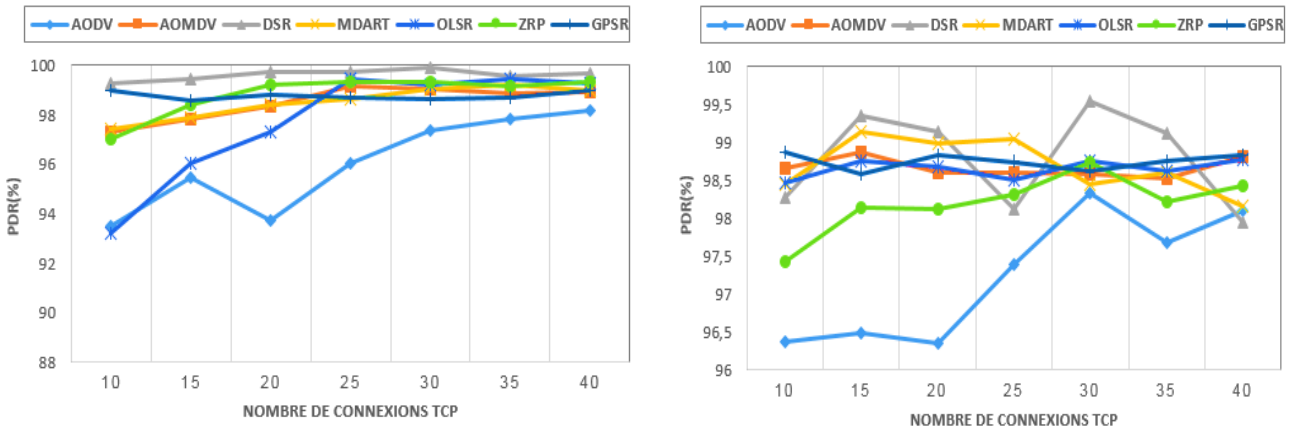
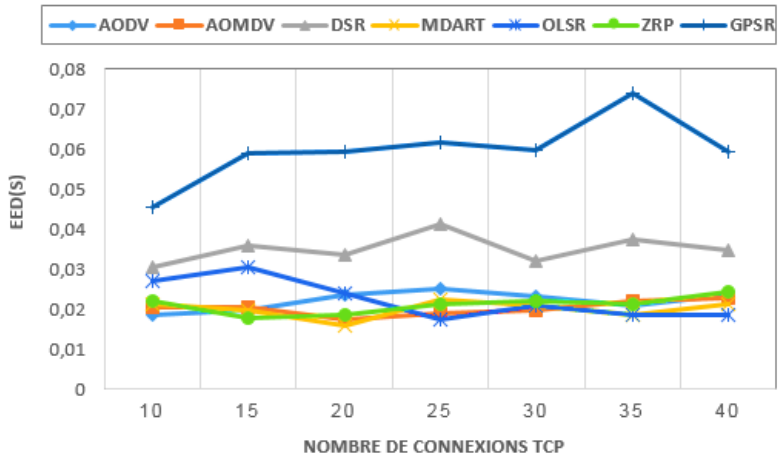


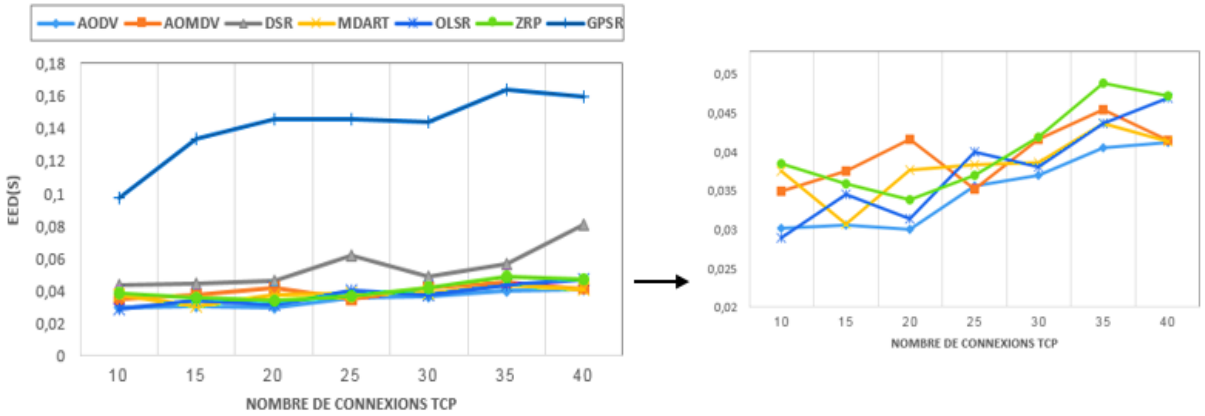
Figure 2.11 : Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU.

Comme le montrent les figures 2.12(a) et 2.12(b), les protocoles de routage donnent de bons résultats dans les scénarios de communication V2V et V2R en termes de délai (E2E), sauf pour le cas de GPSR, qui donne un délai plus long, car lorsqu'une décision est prise, le schéma de circulation du véhicule n'est pas pris en compte, ce qui donne un long délai. Le protocole réactif DSR présente un délai de livraison des données relativement élevé en raison de sa nature réactive. En ce qui concerne les performances des autres protocoles avec les deux modes de communication, nous constatons que les protocoles proactifs OLSR et MDART, les protocoles réactifs AODV et AOMDV et le protocole hybride ZRP sont plus performants que les autres protocoles. Ces protocoles semblent être stables et performants, avec un délai qui varie de 15 à 25 ms, comme le montre la figure 2.12(a). Cependant, lorsque des RSU sont ajoutés, on observe une variation inattendue entre les protocoles en fonction de la variation de la charge du trafic de données TCP. Les protocoles AODV, AOMDV, OLSR, MDART et ZRP donnent de bonnes performances avec une augmentation de la charge de connexion TCP. Un réseau VANET est constitué de véhicules, ces nœuds peuvent tomber en panne à tout moment en raison de défaillances logicielles et de manipulations matérielles, ce qui entraîne la génération de nœuds défectueux dans le système.

Si un véhicule envoie des données à un véhicule défectueux au moment du routage, alors les données peuvent être abandonnées et des anomalies sont obtenues. Le protocole DSR utilise plus d'une route pour transférer les paquets du nœud source au nœud de destination, ce qui entraîne des retards car il n'utilise pas toujours le chemin le plus court pour livrer les paquets de données du nœud source au nœud de destination. Pour le protocole DSR, les nœuds stockent les itinéraires vers la destination dans leurs caches. Lorsque de nouvelles routes sont apprises par les nœuds, les entrées dans le cache sont mises à jour pour ces nouvelles routes. Ces anomalies peuvent être dues au fait que le DSR maintient un cache de routes.



(a)



(b)

Figure 2.12 : Délai de bout en bout en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

On remarque sur les figures 2.13(a) et 2.13(b) que la gigue pour le protocole GPSR basé sur la position, est influencée par la charge du trafic de données TCP. GPSR donne de mauvais résultats par rapport à DSR dans les deux scénarios. Et ceci est dû à la position du nœud voisin qui est très susceptible de changer, ce qui signifie que le prochain saut est très susceptible de se déplacer hors de la portée de communication, et la gigue est alors légèrement plus longue. Les protocoles DSR et AODV donnent de mauvaises performances par rapport aux protocoles proactifs et au protocole hybride ZRP dans le scénario avec RSUs. L'alternance des valeurs obtenues et l'intersection entre les courbes peuvent être expliquées par le comportement de chaque protocole dans le réseau ; les changements dans la topologie du réseau au cours du temps et la présence d'obstacles, ce qui provoque la rupture des liens. Ceci conduit à la dégradation des performances en fonction de la charge du trafic de données TCP.

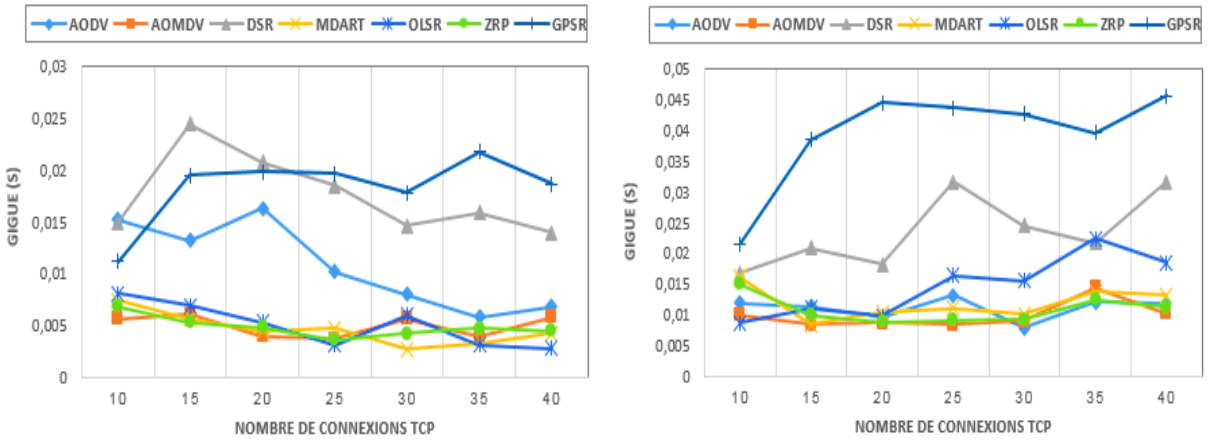


Figure 2.13 : Gigue en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

L'impact du coût de routage dans les différents protocoles en fonction de la variation du nombre de connexions TCP est illustré dans les figures 2.14(a) et 2.14(b). Le nombre de paquets de contrôle diminue lorsque le nombre de connexions entre les nœuds et les RSU augmentent. La meilleure performance est obtenue par le protocole GPSR avec une communication V2V et V2R. L'évaluation des performances montre que les coûts de routage des protocoles GPSR, OLSR et AOMDV dans un réseau avec RSU sont faibles et constants pour un nombre variable de connexions TCP par rapport aux autres protocoles. Les valeurs les plus élevées sont observées pour le protocole réactif DSR et le protocole hybride ZRP. Comme mentionné dans les sections précédentes, DSR et ZRP sont inefficaces et modifient rapidement leur topologie dans un réseau à forte mobilité tel qu'un VANET.

Les protocoles de routage réactifs tels que AODV souffrent également lorsque le réseau est inondé par le trafic de routage, au moment du démarrage ou s'il y a des niveaux élevés de trafic de données entre la majorité des nœuds du réseau. Si une métrique autre que le nombre de saut est utilisée, il y aura une grande quantité de trafic supplémentaire. De plus, les véhicules de chaque réseau sont répartis aléatoirement dans un environnement réel selon une distribution rectangulaire. Par conséquent, il y aura une grande probabilité de déconnexion de route lorsque la route est longue. L'évolutivité est limitée en raison d'un facteur important. En fait, dans les petites zones, le besoin d'inonder chaque message RREQ à travers le réseau est dû au faible nombre de véhicules.

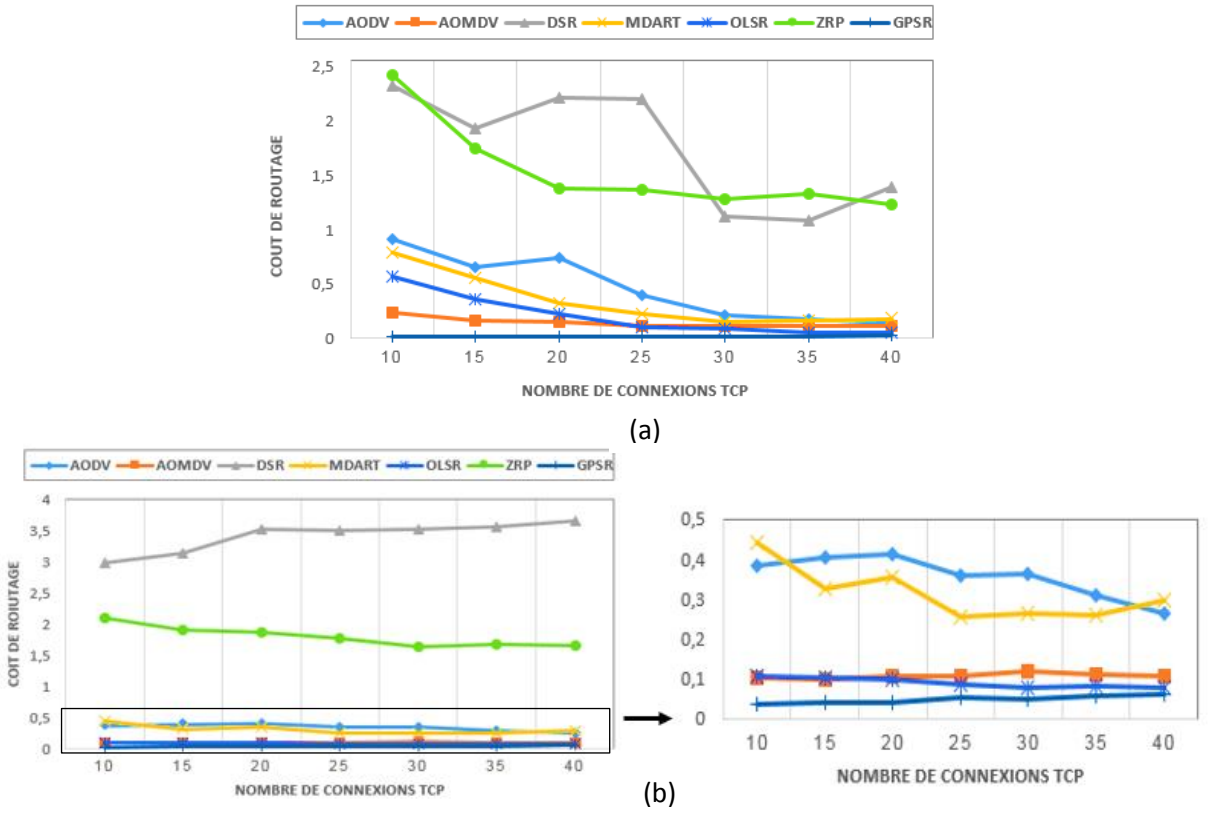


Figure 2.14 : Coût de routage en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

En termes d'efficacité, les figures 2.15(a) et 2.15(b) montrent que le protocole géographique GPSR est le plus performant avec et sans RSU. Il atteint un taux de 90%, qui reste stable pour un nombre variable de connexions. Cela nous permet de conclure que GPSR est efficace dans les réseaux denses et dynamiques. AOMDV et OLSR atteignent des niveaux d'efficacité stables et de meilleurs taux que les protocoles MDART et AODV. Le protocole réactif AODV montre une augmentation de l'efficacité lorsque le trafic augmente. Néanmoins, pour DSR et ZRP, la performance de ces protocoles atteint un taux supérieur à 88% dans le scénario avec RSUs, puis se stabilise pour un nombre élevé de connexions TCP.

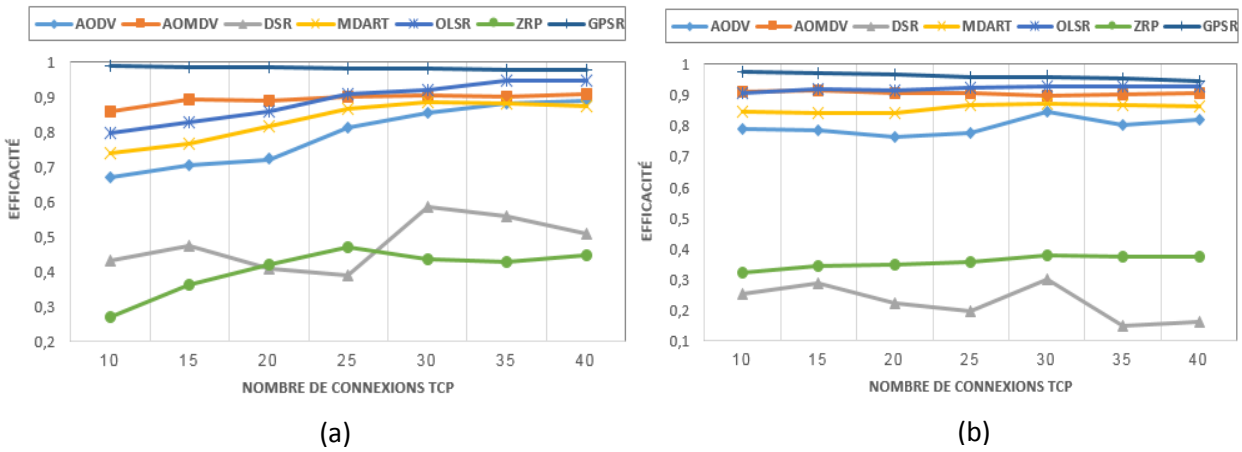


Figure 2.15 : Efficacité en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

2.6 Scénario de l'environnement Manhattan

2.6.1 Résultats des simulations en fonction de la variation de la charge de trafic CBR

Le taux de paquets délivrés avec succès (PDR) en fonction de la charge du trafic CBR est présenté dans la figure 2.16. Il est montré que les meilleurs résultats sont ceux des protocoles de routage avec une unité de bord de route (figure 2.16(b)). Cela prouve que la présence de l'unité de bord de route conduit à une amélioration des performances, car plusieurs véhicules seront couverts les uns par les autres et par l'infrastructure de l'unité de bord de route, ce qui joue un rôle très important dans l'amélioration du PDR de la source à la destination. Les protocoles réactifs AODV, DSR et AOMDV sont performants grâce à leurs mécanismes de construction des informations de routage et de maintien de la route. De même que le cache utilisé par le protocole DSR lui permet d'avoir de bonnes performances. Ils atteignent un taux de 99% variant de 10 à 20 connexions. Suivis par les protocoles proactifs OLSR et MDART, le protocole géographique GPSR et le protocole hybride ZRP sont moins performants que les protocoles réactifs. Parmi ces protocoles, le protocole OLSR est le meilleur en termes de PDR. Il atteint 89% à une charge de 25 connexions grâce à l'utilisation de relais MPR pour la diffusion des messages de contrôle, ce qui réduit la congestion du réseau. Néanmoins, il reste meilleur que ceux simulés sans tenir compte des RSU. Il faut noter que la variation des différents protocoles de routage est presque stable et inférieure à un taux de 23% en fonction de la charge de trafic CBR. La diminution des performances est due à la mobilité des véhicules face aux obstacles sur la route, ce qui entraîne la déconnexion des liens de communication.

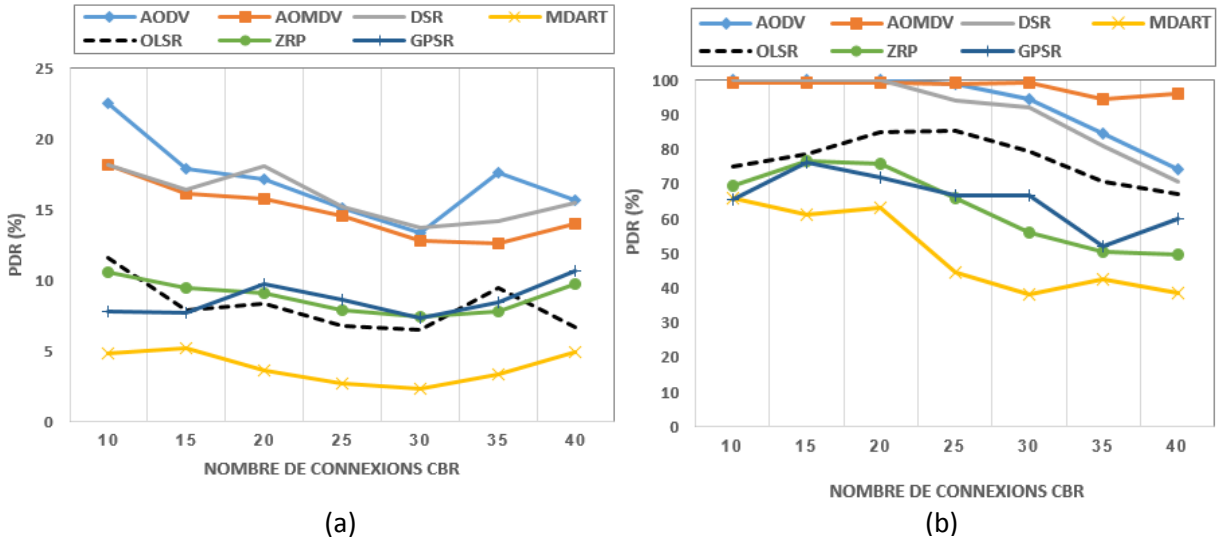


Figure 2.16 : Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La figure 2.17 illustre le délai de bout en bout (E2ED) en fonction de la variation de la charge de trafic CBR pour les communications V2V et V2R. Comme nous pouvons le constater, l'ajout d'unités routières (RSU) a permis d'obtenir de bonnes performances tout en faisant varier le

nombre de connexions CBR. Principalement, les protocoles de routage proactifs OLSR et MDART, les protocoles réactifs AODV, AOMDV et DSR et le protocole géographique GPSR acheminent les paquets vers leurs destinations le plus rapidement possibles. Le délai de tous ces protocoles varie dans une plage inférieure à 0,5 s, à l'exception du protocole réactif DSR qui présente un délai élevé avec un nombre de connexions entre 30 à 40 connexions, car il utilise le cache pendant la découverte de la route, ce qui augmente le temps de transmission des paquets. Ensuite, nous constatons que pour le protocole ZRP, le délai accroit avec l'augmentation de la charge de connexions CBR. En ce qui concerne le mode de communication V2V, nous constatons que les pires performances sont pour les protocoles DSR et ZRP. En effet, le protocole DSR montre une instabilité en fonction de la variation du nombre de connexions CBR. Il augmente à un délai de 3s pour un nombre de 10 connexions et diminue à 1,7s pour une charge élevée de 40 connexions. Alors que le protocole ZRP varie dans l'intervalle 1s -1.6s avec stabilité en fonction de la variation de la charge de trafic CBR. Cependant, il ne reste pas meilleur que le protocole réactif AODV qui a obtenu un délai inférieur aux deux autres protocoles mentionnés ci-dessus (DSR et ZRP). A faible nombre de connexion TCP, il atteint un délai de 0.6 s, qui tend à diminuer avec l'augmentation de la charge de connexion jusqu'à se stabiliser avec les autres protocoles de routage pour la communication V2V et ceux avec les unités routières mentionnés ci-dessus.

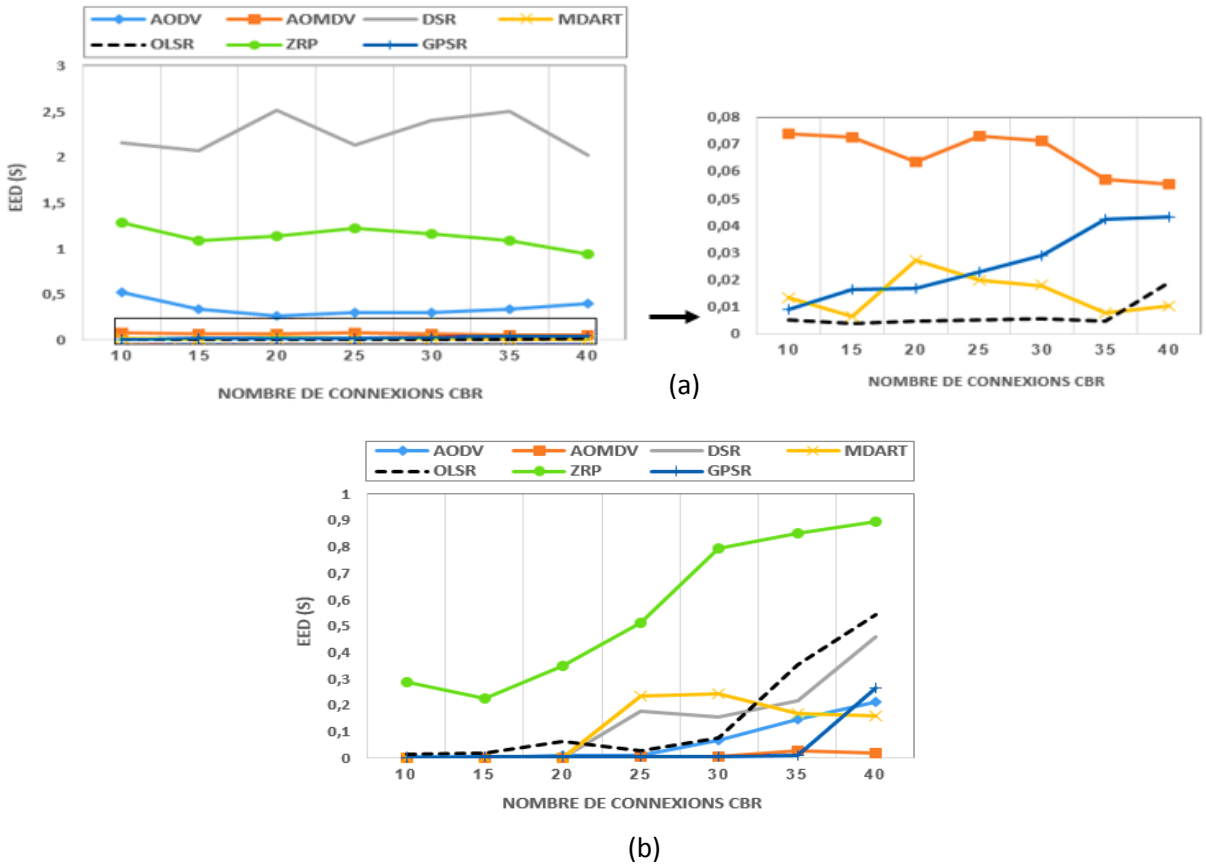


Figure 2.17 : Délai de bout en bout (EED) en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La variation de la gigue en fonction de nombre de connexions CBR est illustrée dans la figure 2.18. Nous montrons que la variation de la gigue de plusieurs protocoles de routage pour les deux modes de communication (V2V et V2R) est efficace sauf pour le protocole DSR avec une communication V2V, qui a connu une instabilité pour tous les nombres de connexions CBR à cause de son mécanisme de fonctionnement présenté précédemment et des différents obstacles rencontrés dans le scénario Manhattan. Cependant, en ajoutant des unités de bord de route dans ce scénario, il y a une petite variation en termes de gigue entre les protocoles de routage simulés. Pour la plupart des protocoles, la gigue varie dans un intervalle de moins de 0,3 s tout en augmentant le nombre de connexions CBR. En outre, le protocole GPSR est performant en termes de gigue qui tend vers zéro jusqu'à 35 connexions. Ensuite, elle augmente à 0,2 s pour une charge élevée de 40 connexions. Cependant, le choix du protocole GPSR reste le meilleur puisqu'il garantit les délais minimums pour les applications temps réel, en tenant compte des deux modes de communication V2V et V2R.

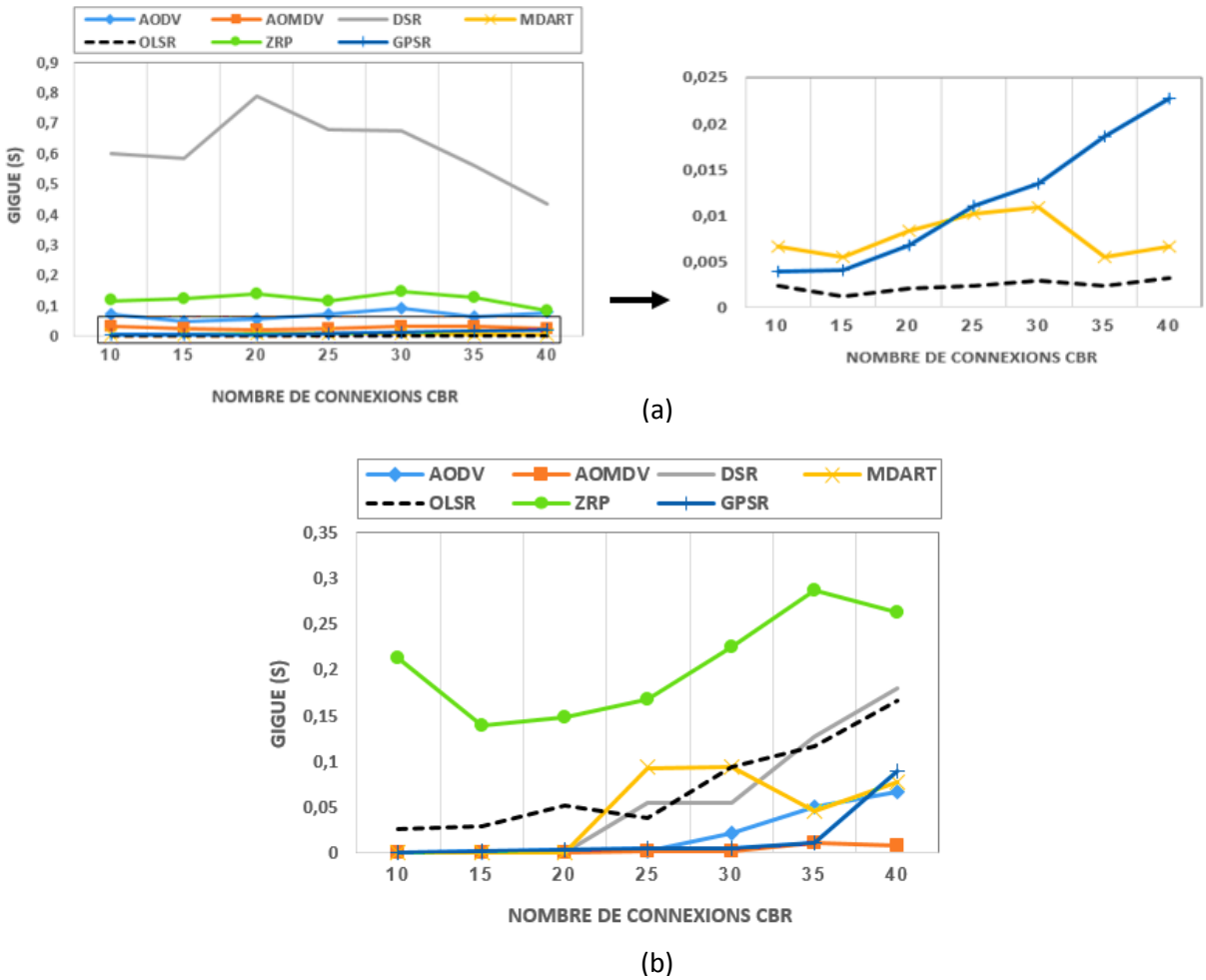


Figure 2.18 : Gigue en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La figure 2.19 montre le coût de routage pour chaque protocole de routage simulé. Le scénario utilisant l'unité de bord de route (RSU) est à nouveau le plus efficace comparé à celui n'utilisant pas l'infrastructure RSU. Le protocole géographique GPSR, les protocoles réactifs et proactifs gèrent la topologie du réseau avec moins de messages de contrôle. A l'exception du protocole hybride ZRP qui a un coût élevé pour une faible charge de 5 connexions et qui tend à diminuer lorsque le nombre de connexions augmente. Cela est dû aux changements fréquents de topologie qui nécessitent une relance fréquente du processus de découverte de route, ce qui entraîne la diffusion d'un grand nombre de messages de contrôle dans le réseau. Cependant, il reste meilleur que le protocole proactif multi-trajet MDART sans utilisation de l'unité de bord de route, qui a connu une instabilité en fonction de la variation du nombre de connexions. Ensuite, il y a le protocole hybride ZRP, qui génère un nombre de messages plus faible que le protocole MDART et qui a tendance à diminuer avec l'augmentation de la charge du trafic CBR. Cependant, il n'est pas meilleur que les protocoles GPSR, OLSR, AOMDV et DSR, qui réduisent le nombre de paquets de contrôle par rapport à ceux mentionnés ci-dessus. Pendant ce temps, les protocoles DSR et AODV ont un coût faible et ensuite s'avère stable jusqu'à 40 connexions. Nous pouvons expliquer cette diminution et cette stabilité par le fait que la densité utilisée dans le scénario de Manhattan, est stable et fixée à 50 véhicules. Par conséquent, le coût de routage diminue lorsque le nombre de connexions CBR augmente.

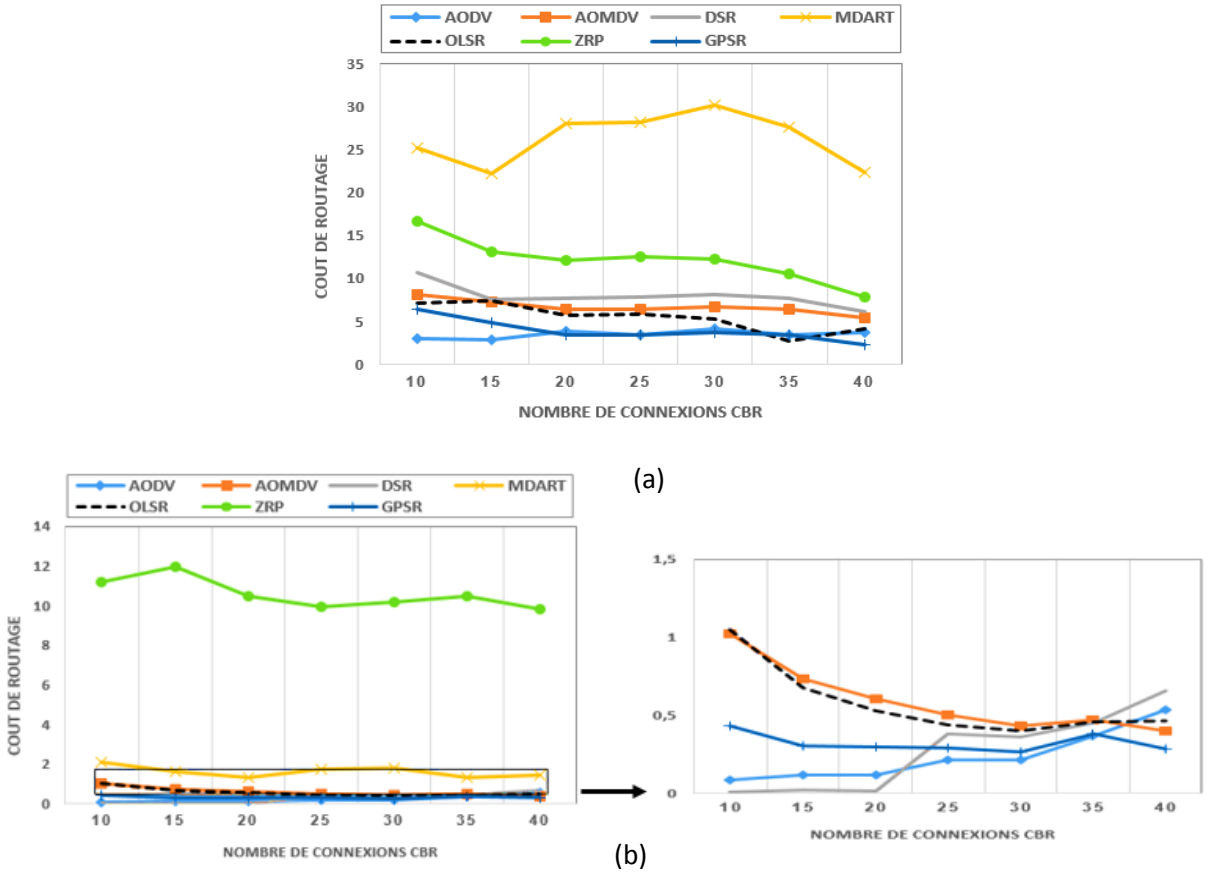


Figure 2.19 : Coût de routage en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La figure 2.20 montre que l'efficacité des protocoles DSR et AODV avec RSU est meilleure par rapport aux autres protocoles dans l'intervalle 10-25 connexions. Ils dépassent un taux d'efficacité de 90%. Suivi par le protocole proactif MDART sans utilisation de l'unité routière, qui montre une augmentation à 10 connexions et se stabilise ensuite avec les autres protocoles susmentionnés (DSR et AODV) jusqu'à 25 connexions CBR. L'efficacité atteinte par GPSR, dans les deux modes de communication V2V et V2R, et les protocoles OLSR, AOMDV et MDART avec l'utilisation de l'unité de bord de route est pratiquement similaire. Les protocoles les moins efficaces dans le mode de communication V2V sont AODV, DSR, AOMDV et OLSR, qui ont une variation d'efficacité dans l'intervalle 10-20 connexions. Cependant, par la suite, ils sont stables en fonction de l'augmentation de la charge des connexions CBR de 20 à 40 connexions. Le pire impact est montré dans le protocole hybride ZRP pour les deux modes de communication qui a une stabilité de l'efficacité qui ne dépasse pas 9% tout au long de l'augmentation des connexions CBR.

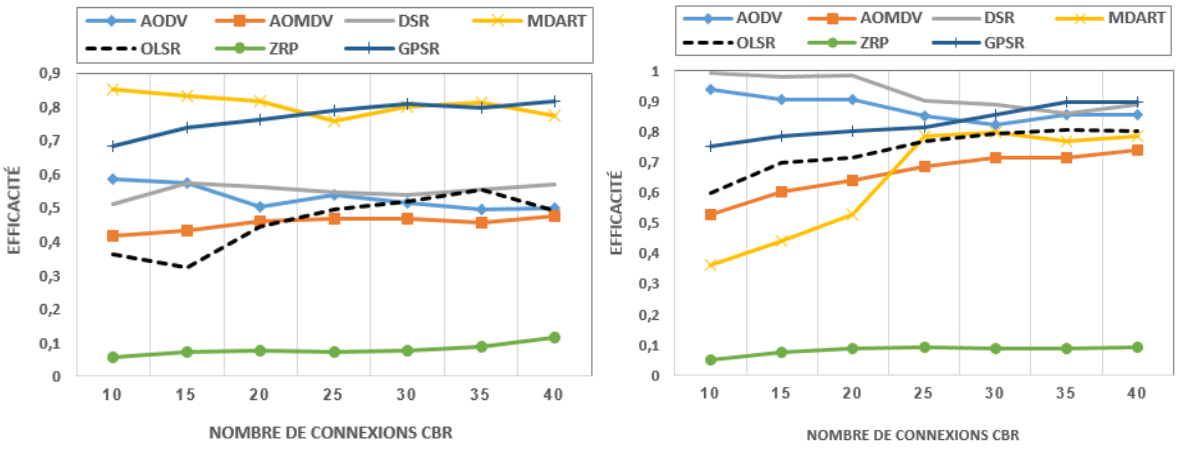


Figure 2.20 : Efficacité en fonction de la charge de trafic CBR : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

2.6.2 Résultats des simulations en fonction de la variation de la charge de trafic TCP

Le taux de paquets délivrés avec succès en fonction de la charge du trafic de données TCP est illustré dans la figure 2.21. On constate que le PDR des différents protocoles en fonction de la variation de la charge de trafic TCP est efficace. En effet, ils obtiennent un taux supérieur à 90% lorsque le nombre de connexions augmente dans l'environnement Manhattan. Ce qui peut s'expliquer par la fiabilité du protocole TCP à transmettre les données en garantissant la bonne réception par la destination. De plus, l'ajout de l'unité de bord de route dans le scénario Manhattan facilite la communication entre les véhicules qui peuvent trouver rapidement la bonne destination.

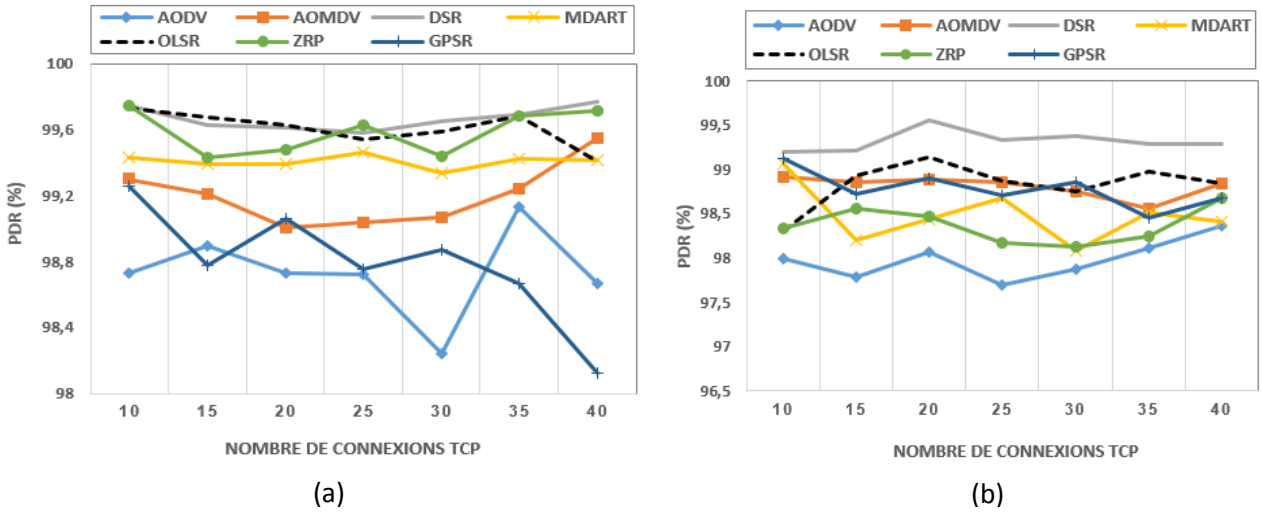


Figure 2.21 : Taux de paquets délivrés en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

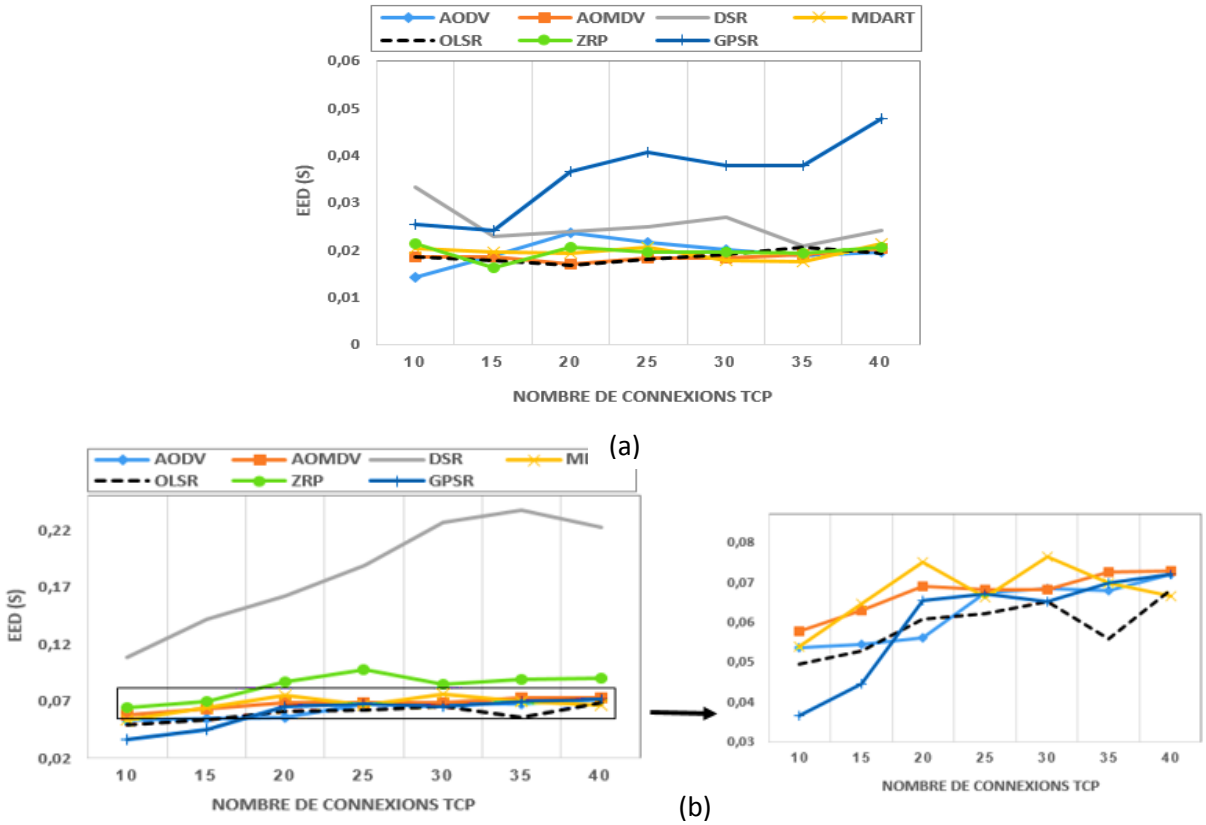


Figure 2.22 : Délai de bout en bout (EED) en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La figure 2.22 montre que l'utilisation de RSU avec le trafic TCP augmente un peu le délai pour la majorité des protocoles simulés. Le protocole géographique GPSR présente un délai court. De même que les protocoles proactifs et le protocole hybride offrent des résultats faibles.

Cependant, le cache utilisé par le protocole DSR avec utilisation des RSUs conduit à un délai beaucoup plus long que les autres protocoles. De manière générale, le protocole DSR reste inefficace pour les applications qui nécessitent un temps minimum pour acheminer les paquets vers leur destination.

La figure 2.23 présente la gigue en fonction de la charge du trafic de données TCP pour les sept protocoles de routage étudiés. Nous constatons que malgré une petite différence des valeurs, le scénario sans utilisation de l'unité de bord de route (RSU) est plus performant que celui qui nécessite des RSU pour les différents protocoles de routage. A l'exception du protocole DSR, qui augmente avec l'augmentation de la charge du trafic TCP. Le scénario avec RSU pourrait être bien classé s'il n'avait pas de sérieux problèmes et difficultés avec les réseaux denses et les différentes caractéristiques de l'environnement de Manhattan mentionnés dans les sections précédentes.

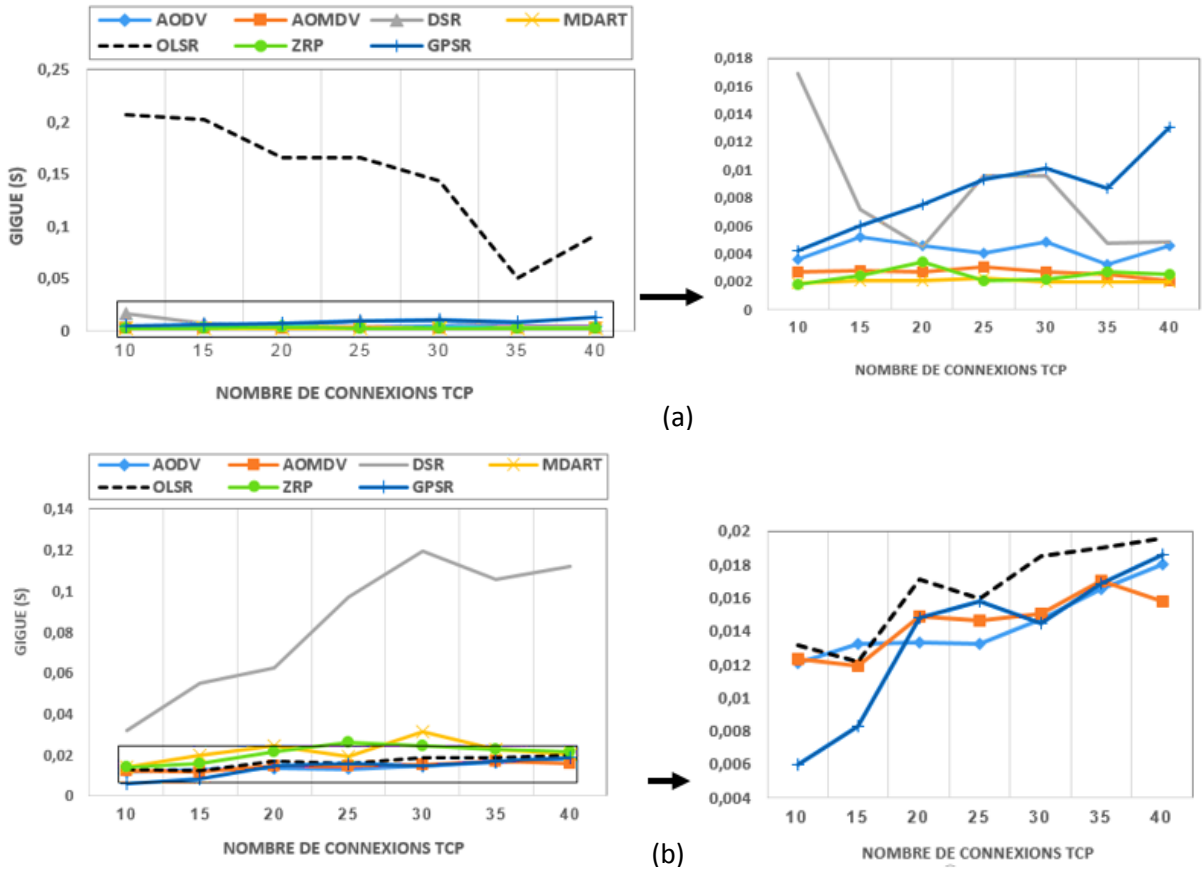
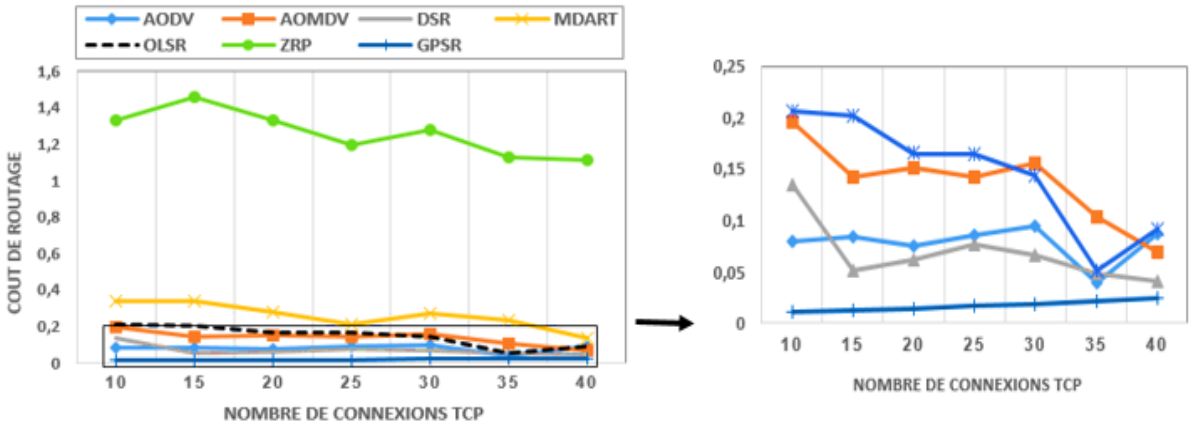


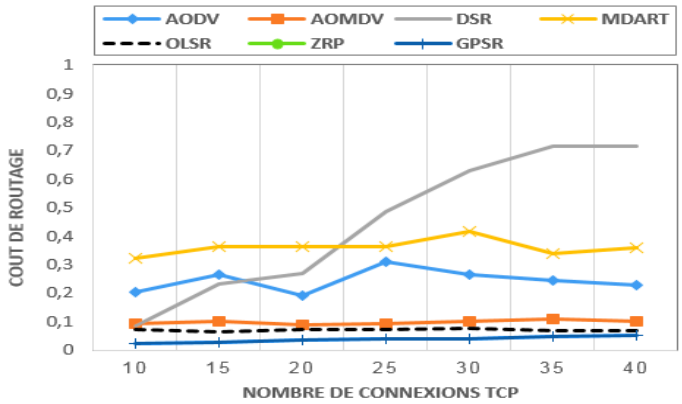
Figure 2.23 : Gigue en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

Le coût des protocoles de routage dans les deux modes de communication en fonction de la charge des connexions TCP est illustré dans la figure 2.24. Lorsque le nombre de connexions augmente, le coût de routage est presque stable et augmente pour certains protocoles. En particulier, pour les protocoles DSR et AODV avec une charge élevée de connexions utilisant l'unité de bord de route. Cependant, les protocoles GPSR, AOMDV et OLSR pour les deux

modes de communication, avec et, sans RSU, offrent un coût stable et faible par rapport aux autres, ce qui signifie qu'aucune charge supplémentaire n'est produite. La faible performance a été constatée pour le protocole ZRP en fonction de la variation de la charge TCP. Cela peut s'expliquer par le nombre de messages de contrôle générés par la présence de RSU, qui surcharge le réseau et entraîne un coût élevé et significatif.



(a)



(b)

Figure 2.24 : Coût de routage en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU

La figure 2.25 montre l'impact de l'efficacité en fonction du nombre de connexions TCP. Comme on peut le voir, l'efficacité des différents protocoles offre de bonnes performances. Pour les deux modes de communication, les protocoles GPSR, OLSR, AODV et AOMDV obtiennent des valeurs stables avec un taux d'efficacité supérieur à 70% pour tous les nombres de connexions TCP. C'est le cas pour le protocole DSR et MDART.

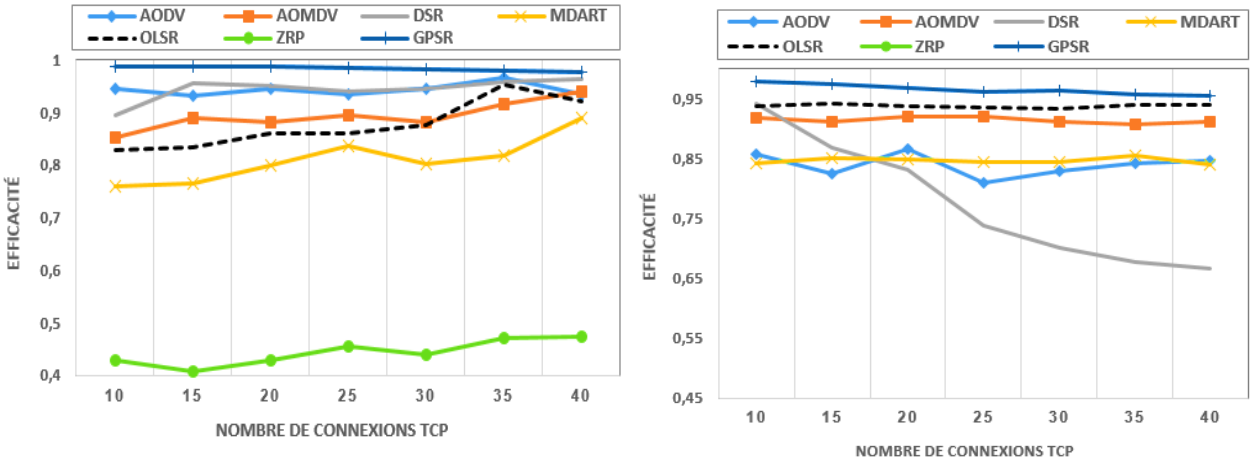


Figure 2.25 : *Efficacité en fonction de la charge de trafic TCP : (a) sans utilisation des RSU (b) avec utilisation des RSU*

Cependant, nous notons que le protocole MDART a tendance à augmenter avec l'augmentation de la charge de trafic et le protocole DSR offre des valeurs déclinées avec des connexions à forte charge mais pas meilleures que le protocole hybride ZRP qui offre de faibles performances par rapport aux autres protocoles simulés dans les deux scénarios ; avec et sans utilisation de RSU. En raison de la topologie réseau dynamique, ainsi que de la taille de la zone prédéfinie du protocole ZRP (voir section 2), les performances sont minimisées dans l'environnement de Manhattan.

2.7 Discussion

L'étude réalisée met en évidence plusieurs résultats très importants concernant l'évaluation des différents protocoles de routage, afin d'analyser le problème du routage dans les réseaux ad-hoc véhiculaires. Grâce à cette étude, nous avons pu déduire que l'utilisation d'une infrastructure routière est très pertinente en termes de la QoS par rapport à une communication sans infrastructure. À cette fin, nous avons choisi de comparer deux environnements de simulation utilisant des unités de bord de route (RSU) ; Urban et Manhattan. A partir de notre analyse, nous avons constaté que les meilleurs performances pour minimiser le nombre de messages de contrôle et assurer la transmission d'un taux de paquets délivrés est celle du protocole GPSR, selon les deux types de trafic CBR et TCP. En ajoutant les RSUs au réseau, les véhicules peuvent s'aider de ces infrastructures fixes le long de la route. De plus, l'utilisation de la position géographique permet d'obtenir de bonnes performances. Cependant, ces unités de bord de route (RSU) dégradent les performances de certains protocoles réactifs et proactifs. Ceci est logique en raison de leurs mécanismes de fonctionnement qui sont différents d'un protocole à l'autre. De plus, l'ajout de RSU entraîne un nombre élevé de messages de contrôle

diffusés dans le réseau. En effet, la présence d'unités de bord de route lors de la transmission d'un paquet de données nécessite la génération de plusieurs messages de contrôle par les véhicules et les RSU. Par conséquent, les performances en termes d'efficacité seront influencées, puisque la métrique d'efficacité dépend du nombre de messages de contrôle. Ce qui est clair dans les résultats présentés dans les sections précédentes, par exemple le protocole DSR offre un coût de routage élevé. Ce qui entraîne une dégradation en termes d'efficacité. Néanmoins, il augmente avec la réduction du nombre de messages de contrôle, comme le cas du protocole GPSR pour les deux environnements simulés. Les deux protocoles DSR et GPSR précités accusent un retard significatif pour une charge de connexion CBR et TCP, en raison de la perte de paquets de données et de la vitesse élevée qui atteint 100 km/h dans l'environnement urbain. D'où les véhicules peuvent être très éloignés les uns des autres, ce qui entraîne un délai important.

Ces observations nous ont permis de nous rendre compte de l'importance de l'acheminement des messages en utilisant des RSUs le long du trajet. Dans le cas concret de l'environnement Urbain et Manhattan, les véhicules ont tendance à rouler à des vitesses différentes face à plusieurs obstacles. Ils devraient donc être capables de modifier les itinéraires pour chaque nombre de connexions CBR et TCP.

Conclusion

Ce chapitre propose une étude complète des différentes catégories des protocoles de routage dans les réseaux VANET, en décrivant un modèle de simulation basé sur deux types de trafic. Une grande variété de protocoles est comparée dans deux environnements réalistes avec des conditions différentes en termes de QoS. Compte tenu des problèmes et de difficultés rencontrées dans les réseaux VANETs, nous avons étudié le comportement de ces protocoles de routage pour la communication V2R, en utilisant des infrastructures fixes (RSU) et la communication entre les véhicules (V2V). L'objectif de ce travail est de fournir aux chercheurs et aux concepteurs une meilleure analyse et comparaison pour soutenir la qualité des services et d'avoir une référence intéressante et pratique pour les travaux futurs. Selon l'analyse des résultats, on peut déduire que l'utilisation des RSUs a amélioré les performances des protocoles de routage par rapport à une communication sans infrastructure. Le protocole basé sur la localisation a de bonnes performances par rapport aux autres protocoles dans les deux environnements.

L'objectif principal de notre travail comparatif est d'évaluer l'évolutivité de sept protocoles de routage (OLSR, AODV, DSR, GPSR, ZRP, AOMDV et MDART) dans un scénario à grande échelle avec un modèle de mobilité réaliste généré par VANETMOBISIM. Les cinq mesures de performance sélectionnées sont : le taux de paquets délivrés (PDR), le délai de bout en bout (EED), la gigue, le coût de routage et l'efficacité. Sur la base de l'analyse des résultats obtenus, on peut conclure que les protocoles réactifs sont performants en termes de PDR, de coût de routage et d'efficacité. Néanmoins, en termes de délai et de gigue, les protocoles proactifs

offrent de meilleures performances en raison de leur nature proactive. En comparaison avec le protocole hybride ZRP, le protocole géographique GPSR a obtenu de meilleurs résultats en termes de délai et de nombre de paquets de contrôle pour les deux types de trafic (CBR et TCP). Cependant, en raison de son principe de localisation, il montre une dégradation du taux de paquets délivrés avec succès. Selon cette étude menée sur les caractéristiques et l'analyse des différents protocoles de routage, nous pouvons extraire des résultats qui seront cohérents pour une future simulation. Ainsi que la recherche peut être orientée vers l'amélioration des protocoles de routage existants avec d'autres métriques de routage.

Chapitre 3

Étude et implémentation des variantes du protocole GPSR

3 Introduction

Au cours des dernières décennies, les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANETs) dans lesquels les véhicules communiquent entre eux dans une topologie très dynamique et à grande vitesse, ont suscité une attention considérable. Par conséquent, le routage doit être soigneusement conçu pour gérer les changements rapides du réseau et divers protocoles de routage géographiques ont été mis en œuvre pour résoudre ce problème. Dans le chapitre précèdent, nous avons montré que les protocoles de routage basés sur la topologie ne sont pas efficaces dans les réseaux hautement dynamiques, et que des performances satisfaisantes peuvent être atteintes en utilisant des protocoles de routage basés sur la localisation. Le protocole GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [44] est l'un des protocoles de routage géographique le plus prometteur pour les réseaux VANETs. Il est considéré comme le routage géographique le plus approprié pour un réseau à grande échelle, car il combine à la fois les méthodes de transmission greedy et de transmission périmètre. Chaque nœud diffuse périodiquement dans le protocole GPSR, des informations sur sa propre position à ses voisins. Cependant, la communication avec les véhicules voisins peut devenir instable en raison du réseau hautement dynamique, et lorsque le paquet est transmis par la méthode du mode périmètre, il peut y avoir une redondance dans les chemins de routage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter et étudier l'implémentation de trois protocoles de routage géographique, à savoir le protocole MM-GPSR (Maxduration-Minangle GPSR), le protocole MGPSR (Modified GPSR) et le protocole original GPSR. En outre, nous effectuons une évaluation globale des performances des protocoles géographiques que nous avons implémentés avec différents nombre de connexions dans un environnement urbain. Une simulation est également réalisée sur NS-2 en termes du taux de paquets délivrés (PDR), du délai de bout en bout (E2ED), de gigue, de coût de routage et d'efficacité afin d'aider les chercheurs à déterminer le meilleur protocole pour les applications des VANETs et d'ouvrir la voie à l'amélioration de la robustesse du protocole de routage basé sur la localisation GPSR.

3.1 Principe de fonctionnement du protocole géographique GPSR

3.1.1 Mode greedy

Le mode de transmission greedy [44] maintient l'information locale des voisins. Le routage basé sur la position géographique permet à un nœud intermédiaire d'acheminer les paquets des

données vers le voisin direct qui est le plus proche de la position géographique de la destination. Un nœud détermine sa propre position en utilisant le système de positionnement GPS [61]. La décision de routage à chaque nœud est alors basée sur la position de la destination contenue dans le paquet et la position des voisins du nœud d'acheminement. L'avantage majeur de la stratégie greedy est qu'il maintient la position actuelle du nœud d'expédition. Ainsi, en utilisant cette stratégie, la distance entre un nœud n_i et une destination D, respectivement de coordonnés (Xn_i, Yn_i) et (X_D, Y_D), (équation (6)) diminue et les paquets peuvent être transmis dans un laps de temps.

$$\text{distance } (n_i,D) = \sqrt{(x_D - x_{ni})^2 + (y_D - y_{ni})^2} \quad (6)$$

La figure 3.1 présente un exemple de la transmission au prochain saut en mode greedy. Où, le nœud source (véhicule vert) reçoit ou génère un paquet destiné à la destination (véhicule jaune). La source relaye le paquet à R, car la distance entre la destination et R est inférieure à celle entre la destination et n'importe quel autre voisin de la source. Ce processus de transfert greedy se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne la destination. En outre, dans le cas de la transmission greedy, chaque nœud qui doit transmettre un paquet choisit un nœud relais qui est géographiquement le plus proche du nœud de destination. Cela nécessite des informations de localisation de la part des nœuds voisins. Cette approche maximise la progression de la distance par un saut, ce qui permet de réduire le nombre de saut et d'utiliser efficacement le canal sans fil.

La situation de l'échec de cette stratégie est représentée par l'exemple du véhicule T, qui sera sélectionné comme prochain relais, mais il se trouve hors de la portée radio de la destination. Par conséquent, elle est inaccessible en un seul saut. Dans ce cas, la transmission du mode greedy ne peut pas être appliquée. A cette fin, pour surpasser ce blocage le véhicule exécute la stratégie de transmission par périmètre.

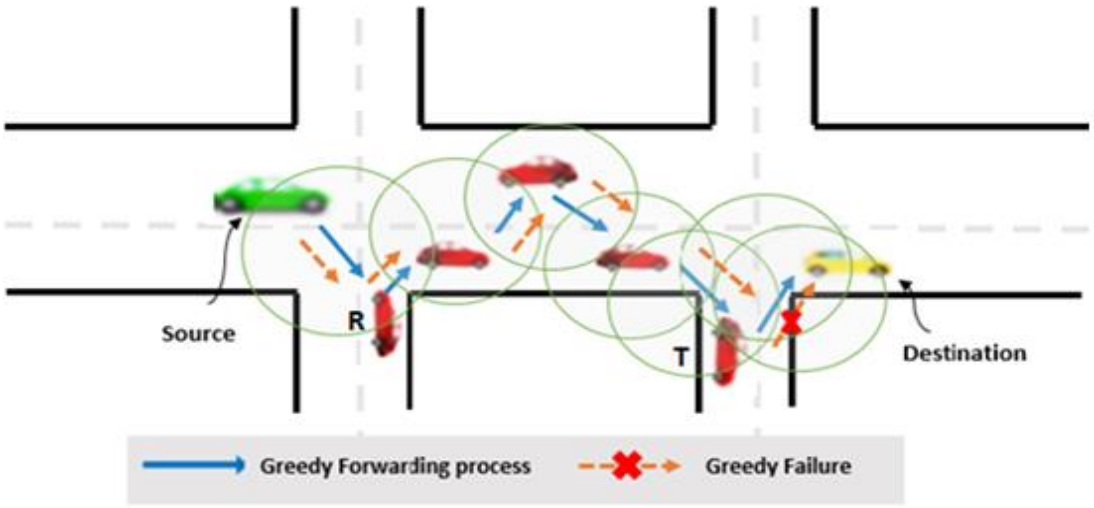


Figure 3.1 : Un exemple de la fonctionnalité du protocole GPSR (mode greedy)

Le processus de recherche du meilleur prochain relais de la transmission greedy est expliqué dans l'algorithme 1. Nous ne considérons que l'en-tête d'un paquet "PQT" contient la position géographique de sa destination "P_D". Ainsi, nous estimons que chaque véhicule possède une liste de voisins "N", dont chacune des entrées est une paire (n_i, Pn_i) constituée d'un identifiant et une position géographique du véhicule n_i. L'identifiant et la position géographique du véhicule émetteur sont, respectivement, my_id et my.P.

Algorithme 1 : Transmission greedy d'un paquet (PQT)

Voisin $_{proche}$ ← my_id

distance $_{min}$ ← distance (my.P, P_D)

Pour tout véhicule v d'identifiant n_i et de position P_{ni} appartenant à N **Faire**

d reçoit distance (P_{ni}, P_D)

Si d < distance $_{min}$ **Alors**

Voisin $_{proche}$ ← v

distance $_{min}$ ← d

Fin Si

Fin Pour

Si voisin $_{proche}$ = my_id **Alors**

Retourne échec de la transmission greedy

Sinon

Envoi PQT à Voisin $_{proche}$

Retourne succès de la transmission greedy

Fin Si

3.1.2 Mode périmètre (Règle de la main droite)

Le deuxième mécanisme d'acheminement du protocole GPSR est le mode périmètre. Ce mode est invoqué lorsque le mode greedy échoue. Ce mode consiste à tracer un graphe planaire constitué du véhicule qui possède le paquet et ses voisins. Ensuite, le paquet traverse le graphe en utilisant la règle de la main droite "Right-Hand Rule" pour contourner l'impasse et atteindre un voisin. Une fois la région vide est contournée, le processus "greedy" initial prend le relais. Comme le montre la figure 3.2, la règle de la main droite utilisée dans le mode périmètre est définie comme suit : Lorsque le véhicule v10 reçoit un paquet de la part du véhicule v9, le

chemin à suivre est le prochain qui se trouve dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en partant de v10 et par rapport au segment [v10v9] tout en évitant les routes déjà parcourue.

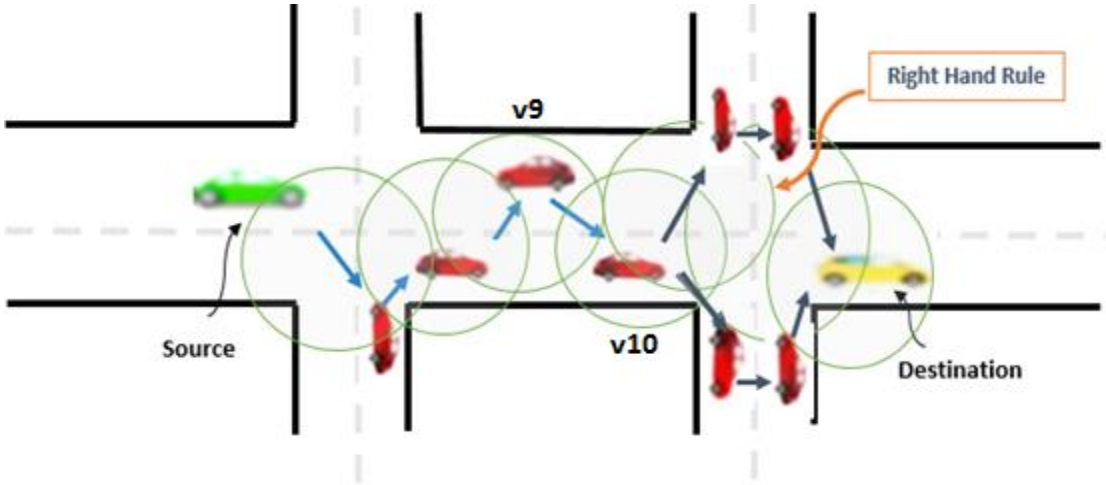


Figure 3.2 : Transmission par le mode périmètre du protocole GPSR (Règle de la main droite)

3.1.3 Gestion de voisinage

Un algorithme greedy simple fournit à tous les nœuds les positions de leurs voisins. Périodiquement, chaque nœud transmet un paquet HELLO à l'adresse MAC de diffusion, ne contenant que son propre identifiant (adresse IP) et sa position géographique. Tous les véhicules transmettent périodiquement le paquet HELLO à leurs plus proches voisins (à un saut). Avec les informations de ce paquet HELLO, les nœuds créent une nouvelle entrée dans la table des voisins (TV) ou la mettent à jour. La TV par défaut du GPSR possède une entrée pour chaque voisin. Chaque entrée possède l'identification du voisin (adresse IP), les coordonnées X et Y, et l'horodatage du dernier paquet HELLO reçu (figure 3.3). En effet, lorsque les nœuds voisins à un saut reçoivent des paquets HELLO, ils mettent à jour la table de voisinage. Si le nœud qui a envoyé le paquet HELLO figure déjà dans la table de voisinage, seules les informations de localisation de ce nœud doivent être mises à jour, mais si la table de voisinage ne contient aucune information sur ce nœud, les informations correspondantes de ce nœud seront insérées dans la table de routage cette fois-ci. Et si les informations sur certains nœuds de la table de voisinage n'ont pas été mises à jour pendant une longue période, les entrées correspondantes de ces nœuds doivent être supprimées, car ces nœuds ont peut-être quitté la portée de transmission. Grâce à ce processus, le nœud connaît toujours la topologie partielle de son réseau.

Identifiant du voisin	Coordonnées géographiques des voisins	Temps de réception du dernier message HELLO

Figure 3.3 : Format d'une entrée de la table de voisinage

Lors du choix d'un véhicule relais, GPSR ne prend pas en compte la vitesse et le sens de déplacement des voitures, il considère uniquement l'information sur la position géographique des voisins. Mais, quand la dynamique augmente dans le réseau, l'information sur la position enregistrée à un instant ‘t’, aura une durée de vie limitée. Cette imprécision dans les positions peut influencer négativement sur les performances de l'approche greedy du protocole GPSR. Le choix du véhicule relais n'est pas optimal dans le sens où le véhicule sélectionné n'est pas forcément le véhicule le plus proche de la destination.

3.2 Amélioration des protocoles de routage de localisation basé sur le protocole GPSR

Le routage basé sur l'emplacement géographique est devenu la solution la plus efficace et la plus prometteuse pour la communication de données dans les VANETs. Il utilise un mécanisme d'acheminement pour transmettre des informations à la destination, en utilisant uniquement les emplacements géographiques de la source, la destination et les véhicules voisins. Parmi les nombreux protocoles de routage basés sur la localisation, qui exploitent les informations géographiques des véhicules, nous citons le protocole GPSR [44], GSR (Geographic Source Routing) [39], DREAM (Distance Effect Routing Algorithm for Mobility) [62], MM-GPSR (Maxdurataion-Minangle GPSR) [63], LAR (Location-Aided Routing)[64], MGPSR (Modified Greedy Perimeter Stateless Routing) [65] et GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing) [66].

Dans ce chapitre, nous mettons en œuvre les améliorations récentes du protocole GPSR que nous implémentons et simulons, à savoir, le protocole MM-GPSR et le protocole MGPSR que nous décrivons par la suite.

3.2.1 Le protocole géographique MM-GPSR (Maxdurataion-Minangle GPSR)

MM-GPSR vise à résoudre les limites du protocole GPSR en introduisant un nouveau concept pour trouver le meilleur nœud de saut suivant dans le transfert greedy et le transfert périmètre. Le mode de transmission greedy est basé sur la durée de communication accumulée T et le paramètre λ prédéfini (λ=0,3) qui dépend de la taille de la zone de communication nommée Q (figure 3.4). Lors de la transmission d'un paquet, la source S trouve le nœud le plus proche de la destination D, en calculant la distance entre le nœud S et le nœud B "d_{SB}" (équation (7)) et la distance entre le nœud B et D "d_{BD}". Dans la figure 3.4, l'intersection de deux cercles (le premier avec la destination comme centre et d_{max} comme rayon, le second avec la source comme centre et R comme rayon), ce qui forme la zone de communication autorisée Q. Où chaque nœud dans Q est proche de D et il est donc approprié pour être sélectionné comme le prochain nœud de saut suivant de la source. La distance maximale sera calculée par l'équation (7) :

$$d_{max} = d_{BD} + \lambda * d_{SB} \quad (7)$$

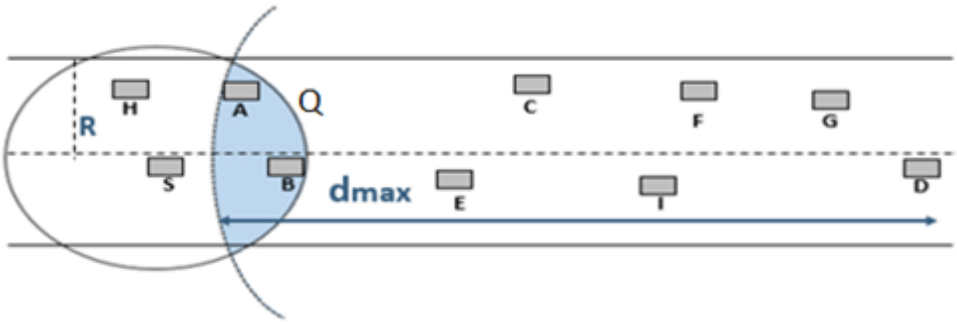


Figure 3.4 : Schéma du protocole MM-GPSR [63]

Le nœud voisin ayant la durée de communication cumulative maximale Ti (Equation (8)) dans la zone Q représente le nœud voisin le plus stable, et il est donc sélectionné comme nœud de saut suivant. Dans l'équation (8), Ti est calculé comme la somme de la dernière communication accumulée et le temps moyen de réception du paquet HELLO.

$$T_i = T_{i-1} + t_i - t_{i-1} \quad (8)$$

En cas d'échec de l'acheminement par le mode greedy, le mode de récupération (mode périmètre) amélioré prend en compte une méthode améliorée d'angle minimum qui divise le plan en deux parties et le nœud dont la valeur d'angle est la plus faible sera sélectionnée pour recevoir les données. Afin d'éviter la redondance de chemin, cette méthode vise à trouver un nœud de saut suivant qui ne s'écarte pas de D. Si nous traçons un rayon de S à D, puis nous traçons des rayons de S à n'importe quel nœud voisin de S, chaque rayon passant par un nœud voisin formera un angle avec le rayon passant par D, et cet angle est appelé θ. En analysant et en comparant les θ correspondants de tous les nœuds voisins de S, un saut suivant optimal de S sera sélectionné. Lorsque le nœud voisin n est dans l'un des quatre quadrants, avec les coordonnées (x_{n1}, y_{n1}). L'angle θ_{droite} est calculé en utilisant l'équation (9) :

$$\text{Cos}\theta_{droite} = \frac{Yn1 - Ys}{\sqrt{(x_s - x_{n1})^2 + (y_{n1} - y_s)^2}} \quad (9)$$

Avec : $$\theta_{droite} = \arccos(\text{Cos}\theta_{droite})$$

Lorsque le nœud voisin n est dans un autre quadrant, comme un tel voisin n_2 avec les coordonnées (x_{n2}, y_{n2}). L'angle θ_{gauche} est calculé en utilisant l'équation (10) :

$$\text{Cos}\theta_{gauche} = \frac{Yn2 - Ys}{\sqrt{(x_s - x_{n2})^2 + (y_{n2} - y_s)^2}} \quad (10)$$

Avec : $$\theta_{gauche} = \arccos(\cos\theta_{gauche})$$

Dans le transfert de périmètre amélioré, le nœud voisin avec un angle **θ** minimum sera sélectionné comme prochain nœud de saut pour la source **S**. Ce qui élimine la redondance du chemin dans une large mesure. Le nœud actuel calcule et compare d'abord les angles des nœuds voisins correspondants, puis sélectionne le nœud voisin avec l'angle minimum comme prochain saut pour transmettre le paquet.

3.2.2 Le protocole géographique MGPSR (Modified Greedy Perimeter Stateless Routing)

MGPSR [65] implique une modification de la stratégie d'acheminement par la transmission greedy. Si un nœud a plusieurs voisins, la possibilité de choisir le nœud le plus proche de la destination est élevée. Pour envoyer les paquets de données au prochain saut le plus proche de la destination, le nœud avec le résultat minimum du paramètre **Prochain-Saut** (équation (11)) sera sélectionné comme nœud de saut suivant. Les informations sur le nœud voisin, telles que le nombre de voisins et les entités de poids des nœuds, sont utilisées pour calculer le meilleur saut suivant.

$$\text{Prochain-Saut} = D(n,dest) - (W*N_n) \quad (11)$$

Où D (n, dest) est la distance entre le nœud voisin (n) et la destination (dest), N_n est le nombre de voisins du nœud n, et W est l'entité de poids, qui n'est pas spécifiée par les auteurs de l'article [6], ainsi qu'une valeur fixe du poids W peut ne pas être adaptée à une meilleure performance. Dans notre travail, ce paramètre peut être varié dans l'intervalle [0,1], afin de trouver un bon chemin vers la destination. Le paramètre W permet de donner un degré de préférence au paramètre N_n pour faciliter la sélection du prochain saut calculé par l'équation (11).

Malgré les différentes études proposées pour analyser et évaluer les performances des protocoles de routage. La plupart d'entre elles sont basées sur les protocoles de routage de topologie. Par conséquent, ce chapitre étudie et analyse la mise en œuvre des protocoles de routage basés sur l'emplacement géographique, en utilisant différentes valeurs de poids du protocole MGPSR. Ainsi, nous comparons et nous analysons leurs performances dans un environnement urbain.

3.3 Evaluation des performances

3.3.1 Paramètres d'évaluation

Les simulations ont été réalisées par le simulateur NS-2 dans une zone urbaine. Le protocole GPSR n'étant pas inclus dans le simulateur NS-2, il a été intégré dans NS-2 dans un premier temps, puis les protocoles MGPSR et MM-GPSR qui ont été implémentés et ajoutés séparément à la simulation. Le simulateur de mobilité VANETMOBISIM a été utilisé pour créer des mouvements de véhicules réalistes. Nous avons utilisé différents nombres de connexions CBR et valeurs de poids pour le protocole MGPSR. Nous avons choisi de comparer les cinq mesures de performances ; le PDR, le E2ED, la gigue, le coût de routage et l'efficacité.

Pour évaluer l'impact du débit binaire constant (CBR) existant dans le réseau VANET, le nombre de connexions CBR varie de 5 à 40 connexions pour chaque paire source-destination. Afin d'ajuster les performances de la méthode de transfert greedy, nous avons fait varier le facteur de poids dans le protocole MGPSR dans l'intervalle [0,1] dans de nombreuses expériences, et nous avons constaté que les meilleures performances ont été observées pour des valeurs de poids égal à 0,2 et 0,7. Les résultats dans ces deux cas ont été comparés à ceux

obtenus avec GPSR et MM-GPSR. Les paramètres de simulation utilisés dans notre travail sont résumés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Paramètres de simulation

Description	Valeur	Unité
Temps de simulation	300	s
Taille de la zone de simulation	1000 x 1000	m²
Taille des paquets	512	octets
Taux de paquets	8	paquet/s
Nombre de connexions CBR	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	-
Nombre de véhicules	50	-
Portée radio	250	m
Protocole MAC	IEEE802.11p	-
Type de paquets de données	CBR	-
Modèle de mobilité	IDM-LC	-
Modèle de propagation	Two-Ray-Ground	-
Facteur de MGPSR	0.2, 0.7	-
Facteur de MM-GPSR	0.3	-

3.3.2 Résultats de simulation

La figure 3.5 montre le taux de paquets délivrés (PDR) en fonction de nombre de connexions pour deux valeurs d'entité de poids. En général, le PDR pour MM-GPSR et MGPSR augmente dans les deux scénarios. Pour un poids de 0,2 (figure 3.5(a)), MM-GPSR et MGPSR présentent de meilleures performances que le protocole GPSR. Pour un faible nombre de connexions, nous constatons que le protocole MGPSR est plus performant par rapport à MM-GPSR, qui peut être expliqué par le fait que MM-GPSR prend dans certains cas de mauvaises décisions en mode de récupération (périmètre). Dans le cas du protocole GPSR, un nœud voisin qui se déplace hors de la portée de communication peut être sélectionné, ce qui entraîne une diminution du PDR. Avec un poids plus élevé de 0.7 (figure 3.5(b)), MM-GPSR est le plus performant pour la majorité des nombres de connexions CBR. Les protocoles MGPSR et GPSR ont un faible PDR, ainsi pour 5 et 20 connexions, MGPSR obtient de meilleures performances que MM-GPSR d'environ 6% et 3%, respectivement.

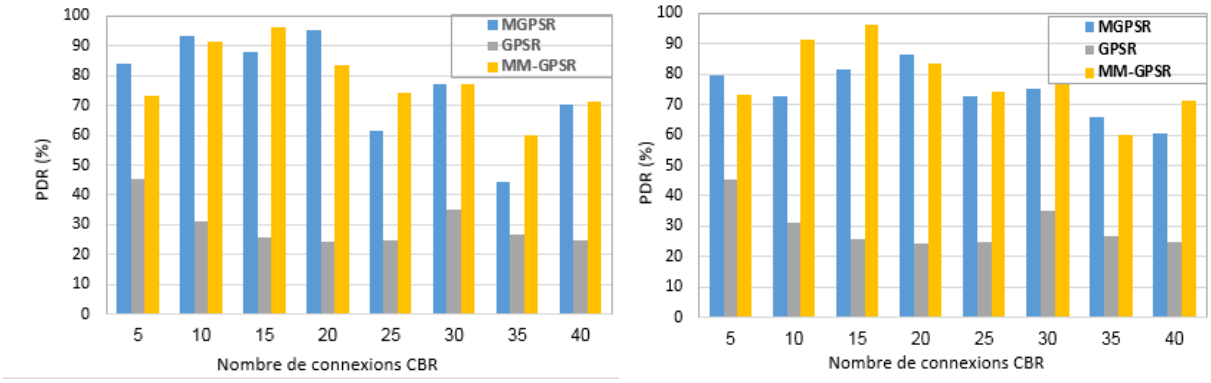


Figure 3.5 : PDR en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) faible valeur du poids (W=0.2) (b) valeur de poids élevée (W=0.7)

La figure 3.6 montre une comparaison du délai de bout en bout pour différents nombres de connexions et valeurs de poids. Lorsque le nombre de connexions CBR augmente, le délai de bout en bout augmente également pour tous les protocoles géographiques. Les valeurs du délai pour MGPSR et MM-GPSR sont inférieures à 3 ms. Tandis que le protocole GPSR atteint une valeur plus élevée pour un faible nombre de connexions CBR. Pour une faible valeur de poids dans la figure 3.6(a), MGPSR est plus performant que MM-GPSR dans certains cas, comme pour 40 connexions, la différence est d'environ 15%. La principale raison de ce résultat est que le MGPSR peut maintenir des connexions stables dans un réseau aléatoire de véhicules. La figure 3.6(b) illustre le délai de bout en bout pour différents nombres de connexions pour une valeur élevée de poids. Lorsque le nombre de connexions CBR augmente, le délai de bout en bout du MGPSR augmente également, en raison de l'utilisation d'un facteur fixe pour déterminer la distance maximale pour le transfert des paquets, ce qui entraîne un chemin incorrect vers la destination. Cependant, les délais obtenus avec ces deux protocoles (MM-GPSR et MGPSR) sont inférieurs à ceux obtenus avec le protocole GPSR. Comme les véhicules se déplacent plus rapidement, les informations de position changent fréquemment, et donc le délai augmente.

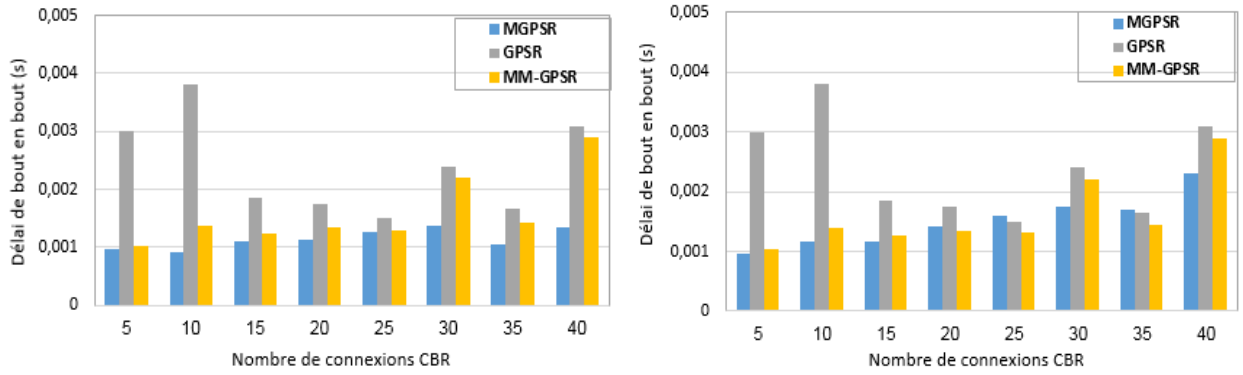


Figure 3.6 : Délai de bout en bout en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) valeur de poids faible (W=0.2) (b) valeur de poids élevé (W=0,7).

La figure 3.7 montre l'évolution de la gigue pour différents nombres de connexions CBR. La figure 3.7(a) montre que la gigue du MGPSR et du MM-GPSR est inférieure à celle du protocole GPSR pour un petit nombre de connexions CBR ; cela est dû au fait que la redondance de chemin dans le GPSR, résultant de l'utilisation de la règle de la main droite, conduit à la pire performance. Cependant, pour 15, 20 et 25 connexions, MM-GPSR obtient un retard inférieur à MGPSR, car il réduit la redondance de chemin lors de la transmission des paquets et construit des chemins stables. En général, la figure 3.7(b) montre que GPSR a une gigue plus élevée que MGPSR et MM-GPSR. Le protocole MGPSR donne un retard plus faible pour le cas de 30, 35 et 40 connexions. Cependant, pour un faible nombre de connexions CBR, MM-GPSR est plus performant. La principale raison de ce résultat est l'utilisation de l'angle minimum et de la règle de la main gauche dans l'algorithme du protocole MM-GPSR, ce qui permet au protocole de trouver le meilleur chemin vers la destination.

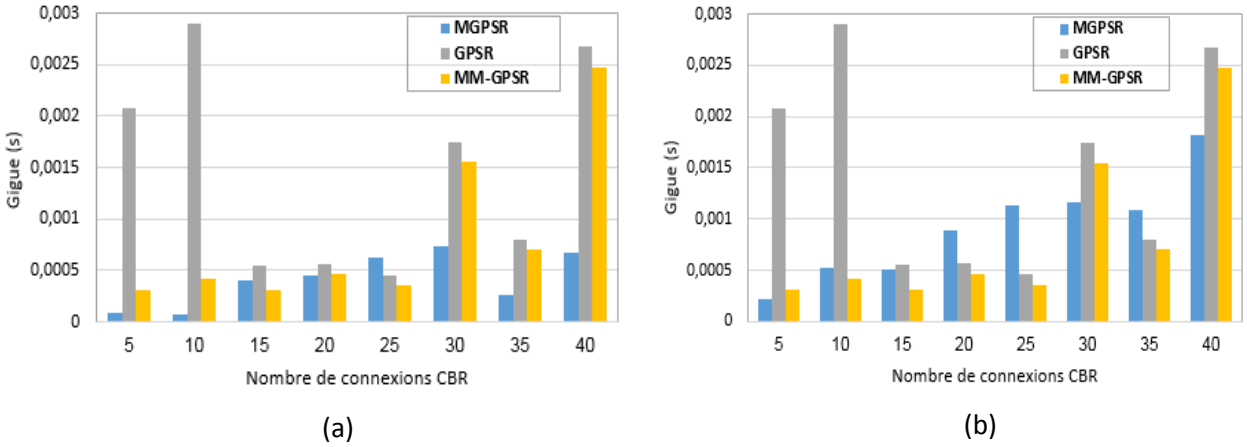


Figure 3.7 : Gigue en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) valeur de poids faible (W=0.2) (b) valeur de poids élevée (W=0.7)

La figure 3.8 illustre le coût de routage pour différents nombres de connexions CBR et d'entités de poids. La figure 3.8(a) montre que le coût de routage est le plus élevé pour GPSR à cause de la sélection du mauvais chemin vers la destination ce qui conduit à avoir un optimum local et donc le mode de récupération va prendre la relève. Et comme nous avons constaté dans la figure 3.5 et la figure 3.6, le protocole GPSR a un PDR inférieur et un délai supérieur, respectivement, et donc une dégradation de performance en termes de coût de routage est normale. Les performances de MGPSR et MM- GPSR sont meilleures que celles de GPSR pour une petite entité de poids égale à 0,2, car avec l'augmentation de la connectivité du réseau, le mode de transfert greedy réduit le nombre de sauts pour atteindre la destination et diminue le nombre de paquets de contrôle. Sur la figure 3.8(b), le coût de routage du MGPSR diminue avec l'augmentation de la connectivité du réseau, et tend à être inférieur à celui du protocole GPSR.

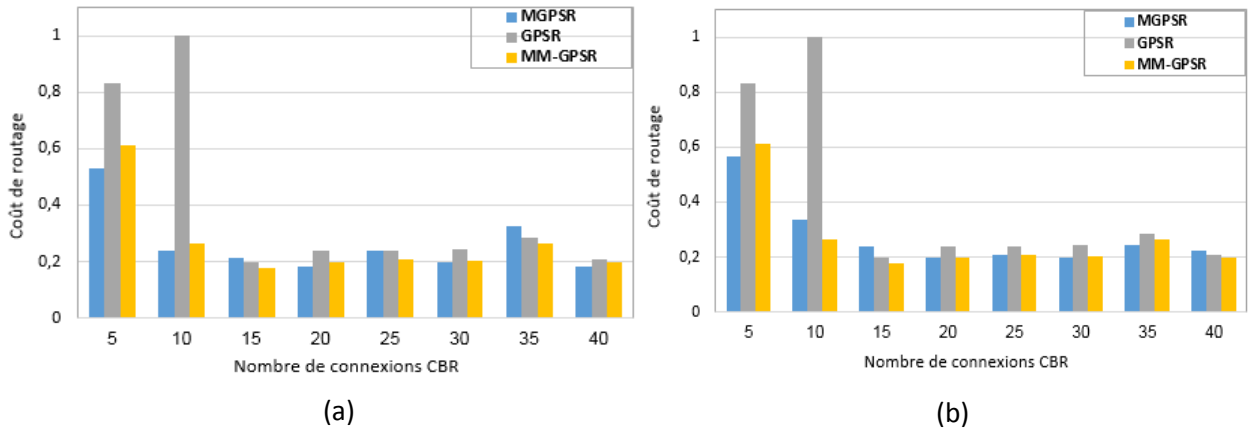


Figure 3.8 : Coût de routage en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) valeur de poids faible (W=0,2) (b) valeur de poids élevée (W=0,7).

La figure 3.9 montre l'efficacité de différents protocoles de routage avec de faible et grande valeurs d'entité de poids. En général, lorsque le nombre de connexions CBR augmente, GPSR a une faible efficacité, en particulier pour les niveaux élevés de trafic de données avec 30 et 35 connexions. En revanche, MGPSR (figure 3.9(a)) et MM-GPSR sont plus performants que GPSR dans tous les cas. Cela peut s'expliquer par le fait que MM-GPSR utilise plusieurs routes pour atteindre la destination et aussi l'utilisation de l'angle minimal en mode de récupération, car lorsque le réseau est fortement connecté, les véhicules passent souvent en mode périmètre. La figure 3.9(b) montre l'efficacité pour différentes valeurs de l'entité de poids. GPSR donne presque les mêmes résultats que ceux obtenus dans la figure 3.9(a), tandis que MM-GPSR et MGPSR ont clairement une efficacité supérieure à GPSR. En effet, lors de la transmission des paquets, les protocoles tiennent compte de la stabilité des voisins sélectionnant les prochains sauts qui possèdent l'angle minimum dans le cas du mode périmètre.

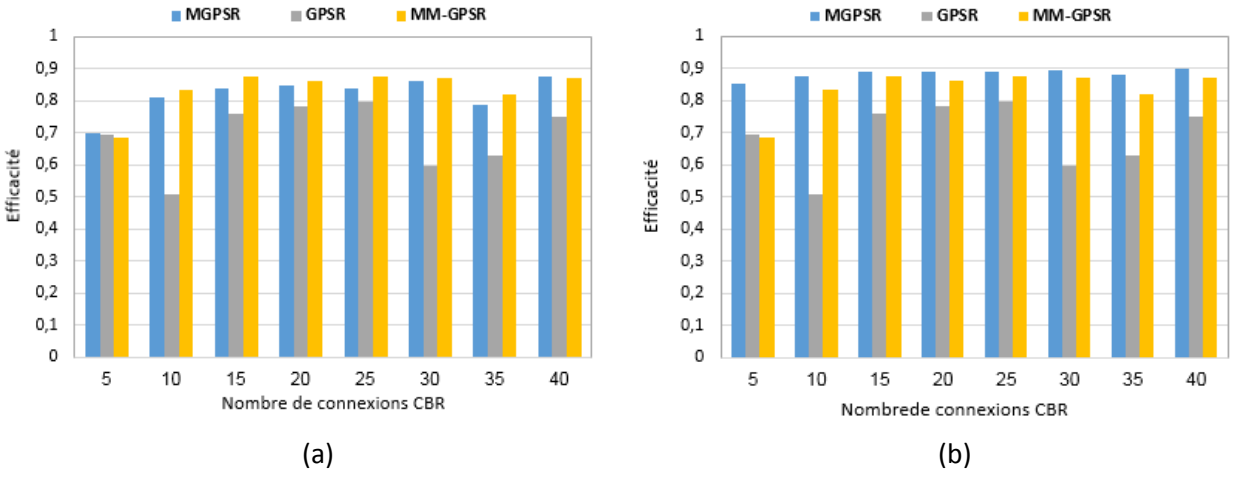


Figure 3.9 : Efficacité en fonction de la charge du trafic de données CBR pour : (a) faible valeur de poids (W=0,2) (b) valeur de poids élevée (W=0,7).

Conclusion

Ce chapitre examine l'amélioration des performances de trois protocoles de routage GPSR, MGPSR et MM-GPSR dans un réseau VANET, en utilisant un poids d'entité et plusieurs métriques de routage dans un scénario urbain. Ce chapitre comporte deux contributions principales ; Premièrement, nous avons donné un aperçu des améliorations les plus récentes sur des protocoles de routage basés sur la localisation et nous avons mis en œuvre l'implémentation de leurs algorithmes sous NS-2. Deuxièmement, nous avons procédé à des modèles réalistes de mobilité du trafic des véhicules basés sur le modèle IDM-LC et le simulateur VANETMOBISIM. Les résultats de simulation montrent que pour un faible poids, les protocoles MM-GPSR et MGPSR sont plus performants pour la plupart des métriques de routage, en particulier, le protocole MGPSR atteint un PDR élevé, un faible délai de bout en bout, une faible gigue et un faible coût de routage.

Le présent travail sera étendu pour améliorer la stabilité de la communication du protocole GPSR, en sélectionnant le nœud de saut suivant optimal dans un environnement urbain, que nous allons le décrire plus en détail dans le chapitre suivant. Ce dernier va prendre en compte plusieurs métriques de routage telles que la durée de vie du lien de communication, la mobilité, la densité des véhicules, ainsi que d'autres métriques et paramètres de routage.

Chapitre 4

L’amélioration du protocole de routage géographique GPSR : WA-GPSR

4 Introduction

Dans les VANETs, le routage vise à transmettre des informations de la source à la destination via un chemin approprié pour améliorer les applications de confort de déplacement. À cette fin, un algorithme de routage efficace doit donner le chemin le plus approprié pour envoyer des paquets de données avec la meilleure QoS. Comme nous avons déjà constaté dans les chapitres précédents, les protocoles de routage peuvent être classés selon deux catégories : le routage basé sur la topologie et le routage basé sur la position géographique. La littérature atteste que le routage géographique tend à être le plus puissant et le plus attrayant [67], [68]. Les chercheurs de [5] montrent que le routage géographique a de nombreux mérites et caractéristiques, tels qu'une grande évolutivité due à l'utilisation des informations de localisation, de bonnes performances lorsque la vitesse des véhicules est élevée et diverses informations peuvent être incluses dans les informations d'état comme la localisation géographique, l'horodatage, la vitesse et l'échange via un service basé sur la localisation.

Le protocole de routage géographique le plus reconnu est le GPSR [44] qui exploite les informations géographiques des véhicules pour donner des performances satisfaisantes en fonction des caractéristiques du réseau VANET. Il permet aux nœuds d'obtenir les informations de mouvement par le système de positionnement GPS et de les diffuser périodiquement à ses nœuds voisins (nœuds à un saut). Le protocole GPSR utilise deux modes de fonctionnement : Le mode de transfert greedy et le mode de transfert périmètre, qui ont pour objectif de construire un chemin de routage. En effet, le mode greedy choisit le véhicule le plus proche de la destination comme prochain saut. Le mode périmètre est invoqué lorsque le processus greedy rencontre un échec.

Dans ce chapitre, nous proposons une variante améliorée du protocole GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) appelée Weight Aware GPSR (WA-GPSR). La variante que nous proposons sélectionne le prochain véhicule le plus approprié en se basant sur des critères supplémentaires, et pas seulement sur la distance la plus proche de la destination, comme dans le cas du protocole original GPSR. Le protocole WA-GPSR prend en compte différentes mesures de routage et attribue des poids par le biais de caractéristiques supplémentaires. Il permet d'offrir une meilleure qualité de service (QoS), en essayant d'éviter les chemins instables

dans le cas de mobilité rapide. Dans ce travail, nous évaluons et nous comparons notre variante WA-GPSR amélioré avec le protocole GPSR original et le protocole MM-GPSR (Maxduration-Minangle GPSR) [63], en utilisant des mesures de la QoS. D'après les résultats expérimentaux, WA-GPSR montre une meilleure performance en termes de taux de paquets délivrés (PDR), de délai de bout en bout, de coût de routage et d'efficacité du réseau.

Au début de ce chapitre, nous présentons nos motivations et contributions. Par la suite, nous définissons les différentes approches et améliorations basées sur le protocole GPSR. Ensuite, nous détaillons nos propositions, et finalement nous évaluons les protocoles par une étude expérimentale en utilisant les simulateurs NS-2 et VanetMobisim.

4.1 Motivation et contribution

Le routage dans les VANETs pose différentes limites en raison de sa topologie dynamique, de sa grande évolutivité et de ses fréquentes fragmentations. Le chemin de routage fiable entre les nœuds de véhicules pour transmettre les paquets de données est toujours un défi. Comme les véhicules intelligents sont équipés de systèmes de navigation, les protocoles de routage géographique sont plus adaptés pour les VANETs car ils dépendent des informations de position géographique [69]. La plupart des protocoles de routage existants basés sur la position adoptent une approche simple greedy pour transmettre les paquets de données en utilisant les coordonnées géographiques des véhicules [44]. L'approche greedy a été associée à quelques inconvénients, que nous citons ci-dessous :

- On ne peut pas se fier à l'information sur la position pour décider le nœud d'acheminement.
- La sélection du nœud qui progresse le plus vers la destination peut ne pas être un choix optimal dans toutes les situations.
- Les protocoles de routage peuvent souffrir d'un problème de l'optimum local.

Notre travail propose une nouvelle variante de GPSR nommée WA-GPSR, qui est basée sur des métriques de routage multiples et indépendantes telles que la mobilité, la durée de vie du lien de communication, le temps de communication accumulé du nœud et la densité du nœud. Les métriques de routage ainsi que les coordonnées géographiques établissent un chemin de routage stable avec une stratégie d'acheminement efficace. Les contributions de WA-GPSR peuvent être soulignées comme suit :

- Le véhicule source calcule le poids de ses voisins à un saut en tenant compte de la densité des nœuds, la durée de vie des liaisons, les informations sur la mobilité et le temps de communication accumulé des nœuds dans les décisions de transfert. Le véhicule voisin avec le poids maximum est sélectionné comme le prochain nœud de transmission. Le protocole WA-GPSR a été adopté pour combiner ces multiples critères de décision et pour s'adapter aux priorités changeantes des critères pour différents scénarios.

- Puisque le mouvement d'un véhicule dépend de divers facteurs tels que la topologie de la route, la vitesse de déplacement et la direction, de multiples mesures de mobilité sont prises en compte avec d'autres paramètres interdépendants pour la décision d'acheminement.
- Les canaux de communication sans fil réalistes sont sujets à des erreurs dues à l'atténuation du signal causée par les obstacles dans un scénario urbain réaliste. Par conséquent, la durée de vie de la liaison entre les véhicules est estimée et elle est prise en considération lors de la décision de routage.
- Puisque la densité du trafic est une métrique de routage importante, la densité des nœuds à un saut est utilisée.
- Une analyse de simulation effectuée assure l'efficacité de notre protocole WA-GPSR avec plusieurs mesures de routage.

4.2 Travaux antérieurs

Dans un réseau VANET, la grande mobilité et la vitesse élevée des véhicules entraînent une mise à jour fréquente de la table de routage et une distribution irrégulière des véhicules. Par conséquent, les protocoles géographiques sont la solution la plus prometteuse pour le routage. Le GPSR est le protocole de routage géographique le plus adapté. Plusieurs études ont été menées sur les protocoles de routage basés sur la position et leurs améliorations. Certaines d'entre eux sont décrites ci-dessous :

Les auteurs de [66] propose le protocole Greedy Perimeter Coordinator Routing (GPCR), qui considère les rues et les jonctions en formant un graphe planaire, où il n'a pas besoin d'informations externes pour transmettre le paquet. Lors de la sélection des véhicules de transfert, les véhicules de la jonction sont préférés. Une approche restreinte est adoptée jusqu'à ce qu'un véhicule à une intersection soit atteint. Les auteurs de [70] ont proposé un autre protocole de routage géographique GpsrJ+ qui améliore le GPCR en prédisant un schéma intuitif aux intersections. Ils utilisent plusieurs métriques telles que la vitesse et la direction pour améliorer le mode d'acheminement greedy. Geographic Source Routing (GSR) [71] utilise la carte de la ville pour calculer la séquence de carrefours, en utilisant l'algorithme de Dijkstra par lequel le paquet de données doit être acheminé. La principale faiblesse du GSR est qu'il considère les informations statiques pour sélectionner le chemin le plus court, ce qui entraîne une réduction des performances de routage. Une autre alternative de protocole de routage géographique appelée DGR (Directional Greedy Routing) [72] prédit les informations de mobilité pour résoudre les inconvénients du protocole GPSR. Le DGR combine deux stratégies d'acheminement pour améliorer la position de communication. La première stratégie est l'acheminement en premier des véhicules, qui consiste à trouver le nœud le plus proche de la destination comme prochain saut. Étant donné la direction d'acheminement préférée d'un paquet, la première stratégie tente de trouver le nœud le plus proche de la destination comme prochain saut. La deuxième stratégie est la stratégie de direction en premier sélectionnera les

nœuds qui se déplacent vers la destination. Parmi ces nœuds, celui qui est le plus proche de la destination sera choisi comme prochain saut. Ce schéma vise à réduire les boucles de routage dans le processus d'acheminement. Les mêmes auteurs de [73] proposent une version étendue du DGR appelée PDGR (Predictive Directional Greedy Routing) qui utilise la métrique de mobilité actuelle et future prédictible afin d'améliorer la sélection du saut suivant. Les stratégies proposées réduisent les défaillances de liens et surpassent les solutions existantes en termes de taux de paquets délivrés, de délai de bout en bout et de surcharge de routage. Le protocole LSGO (Link State Aware Geographic Opportunistic) [74] combine l'emplacement géographique et les informations sur l'état des liaisons comme mesure de routage. Les auteurs utilisent ETX (Expected Transmission Count) [75] amélioré pour mesurer la qualité de la liaison et l'algorithme d'ordonnancement basé sur le temps comme mesure de priorité. Les nœuds de plus haute priorité transmettent le paquet vers la destination directement, au contraire, les nœuds de basse priorité doivent attendre une minuterie prédéfinie, si la minuterie expire et que les nœuds de haute priorité ne transmettent pas le paquet, alors, ce nœud de basse priorité peut envoyer le paquet. Dans ce mécanisme, le coût de routage de LSGO est plus élevé que celui des protocoles GpsrJ+ et GyTAR [76]. Le protocole HLAR (Hybrid Location-based Ad-hoc Routing)[77] combine les caractéristiques du routage basé sur la localisation avec les protocoles de routage réactifs pour trouver la meilleure route adéquate. Les résultats de l'analyse et de la simulation montrent que le protocole proposé conduit à une solution de routage évolutive. Dans [78], les auteurs ont proposé GPGR (Grid-based Predictive Geographic Routing) qui utilise des données cartographiques et prédit la prochaine position des nœuds le long de la route afin de réduire le problème de transmission de l'optimum local, améliorant ainsi les communications inter-véhicules.

Les auteurs de [79] ont présenté un protocole appelé MGEDIR (Multi-metric Geographic Routing) pour la sélection du prochain véhicule dans les environnements urbains en considérant la position future, la force du signal, la distance à la destination et la direction. Les résultats de la simulation montrent que MGEDIR augmente le débit et réduit le délai de bout en bout par rapport aux protocoles de routage étudiés. De la même manière, GPSR+Predict [80] améliore le protocole GPSR en estimant la position future des véhicules pour sélectionner le meilleur saut suivant. La technique proposée permet d'obtenir une meilleure qualité de service. Une autre approche utilisée par le protocole P-GPSR [81] vise à sélectionner le véhicule relais adéquat en exploitant des informations supplémentaires comme la stabilité de la liaison, la vitesse et la direction du véhicule. Une expérience de simulation est réalisée pour évaluer le protocole proposé avec GPSR-L [82] et GPSR. La proposition présentée comme un protocole de routage géographique multi-métrique (AMGRP) [83] adopte un processus AHP analytique hiérarchique basé sur la durée de vie du lien, la densité des nœuds et le statut des nœuds pour sélectionner un nœud de saut suivant. Un mécanisme AHP est utilisé pour combiner plusieurs critères de décision en une seule fonction de pondération, améliorant ainsi le protocole de routage sur un certain nombre de paramètres. La simulation est effectuée dans un scénario urbain réaliste avec une modélisation des obstacles. Les résultats de la simulation ont montré que le protocole AMGRP est plus performant que les protocoles GPSR et SLD-GEDIR simulés. Les auteurs de

[67] proposent le protocole Adaptive GPSR (AGPSR) qui inclut des informations supplémentaires pour sélectionner le meilleur nœud candidat pour transmettre les paquets, en considérant un nouveau champ sur la table des voisins. Les résultats de l'évaluation des performances montrent que le protocole AGPSR est amélioré en termes de taux de paquets délivrés, de délai et de nombre de sauts par rapport à GPSR. Yang et al. [63] proposent le protocole MM-GPSR (Maxduration-Minangle GPSR) qui utilise une nouvelle mode pour trouver le nœud de saut suivant dans le mécanisme de transfert greedy, en définissant la stabilité du voisin et la zone de communication. MM-GPSR sélectionne uniquement les nœuds ayant une communication maximale comme prochain saut. Dans le mode de transfert périmètre, ils ont introduit un nouveau concept d'angle minimum pour trouver le meilleur nœud de saut suivant, qui est le plus proche de la destination. Le travail proposé dans [84], présente un routage basé sur la transmission greedy, qui sélectionne le prochain saut en fonction de la qualité du lien et de la distance entre les nœuds voisins. Le nœud ayant la valeur de priorité la plus élevée est sélectionné pour le transfert. Les auteurs définissent la quantité de nœuds voisins et le nombre de nœuds de la source vers la destination, dont nous ne pouvons pas connaître le nombre exact des nœuds vers la destination dans le processus d'acheminement greedy.

Malgré des décennies de recherche, nous n'avons pas trouvé un nombre significatif de travaux qui répondent à plusieurs métriques de routage basées sur une zone de communication fiable et sur un poids de tous les véhicules voisins. Afin d'améliorer les applications de contrôle des accidents avec la meilleure QoS dans les VANETs, nous avons besoin d'un algorithme plus généralisé pour gérer n'importe quel scénario de réseau. Nous proposons un protocole de routage amélioré WA-GPSR, sans état du périmètre géographique tenant en compte le poids des nœuds, en se basant sur des caractéristiques supplémentaires pour améliorer les performances des réseaux VANETs. Nous concentrons notre travail sur les scénarios urbains où les informations de routage sont plus complexes en raison de la présence d'intersections, de bâtiments et de feux de circulation. Le protocole WA-GPSR utilise les informations des nœuds à un seul saut pour la décision de transfert jusqu'à ce que le paquet atteigne la destination. Le protocole WA-GPSR amélioré prend en compte différentes mesures de routage et attribue des poids obtenus par un grand nombre de configurations de paramètres pour améliorer la décision de transfert. Nous avons comparé les performances de WA-GPSR avec le protocole de routage GPSR original et une proposition récente appelée MM-GPSR. En analysant les mesures de performance telles que le taux de paquets délivrés, le délai de bout en bout, le coût de routage et l'efficacité du réseau, nos résultats montrent que notre protocole WA-GPSR amélioré augmente la QoS du réseau.

4.3 L'instabilité du saut suivant dans le mode greedy

Dans le mode de transfert greedy, le véhicule choisit le meilleur voisin en fonction de la position géographique de la destination et du nœud voisin, sans tenir compte d'autres informations supplémentaires telles que la vitesse, la direction du mouvement, etc. En raison de la grande mobilité et les divers obstacles dans les VANETs, le protocole GPSR conduit à

des décisions erronées dans la transmission des paquets. Généralement, le nœud sélectionné comme le meilleur prochain saut est situé à la limite de la portée de communication. Par conséquent, en raison des changements rapides du nœud voisin, le nœud suivant sélectionné peut se trouver hors de la portée de communication et donc le nœud suivant ne peut pas recevoir le paquet. Dans la figure 4.1, nous présentons S comme le nœud source (nœud actuel), D comme le nœud de destination, et le nœud B comme le nœud le plus proche de D dans la zone de communication de S. Après le déplacement des nœuds, les positions de S, A et B se déplacent respectivement, vers les positions S', A' et B'. En outre, dans le transfert greedy, lorsque S sélectionne B comme prochain nœud à transmettre les paquets, B s'est déplacé hors de la portée de transmission pour atteindre la position B'. Par conséquent, le nœud B ne peut pas recevoir le paquet. En effet, le lien de communication est rompu et l'échec du transfert greedy dégrade les performances du réseau.

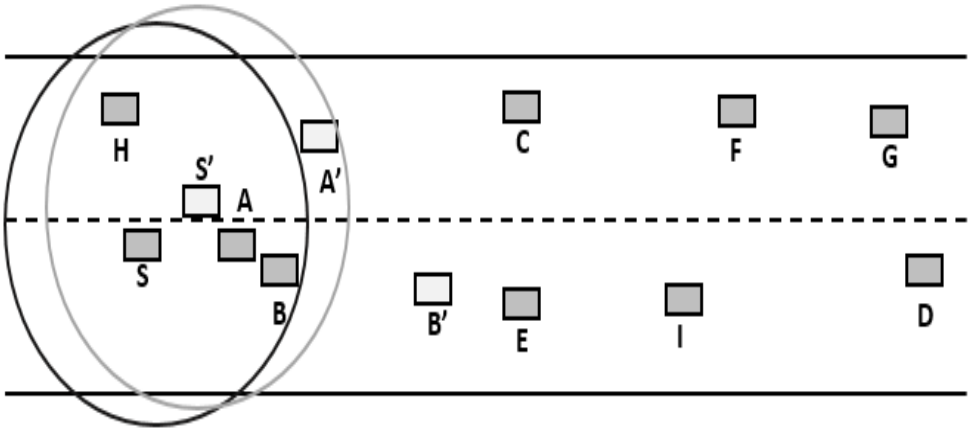


Figure 4.1 : L'instabilité du saut suivant dans le transfert greedy.

4.4 Le protocole amélioré WA-GPSR (Weight Aware GPSR)

Afin de résoudre les problèmes mentionnés, qui entraînent une dégradation des performances, nous proposons une amélioration basée principalement sur le mode de transfert greedy du protocole GPSR. Dans cette section, nous proposons les améliorations suivantes :

4.4.1 Zone de communication efficace ECA (Efficient Communication Area)

Comme illustre la figure 4.2, lorsqu'un nœud source **S** tente d'envoyer des paquets vers un nœud destinataire **D**, il choisit parmi ses voisins (A, B et H) le nœud B qui est plus proche de **D**. Ensuite, en tenant compte de plusieurs paramètres, la source est évaluée, puis le nœud de saut suivant le plus stable est sélectionné. Les coordonnées de S et D sont représentées par (x_S, y_S) et (x_D, y_D), respectivement. Le nœud S envoie des paquets à D, lorsque les paquets sont

transmis en mode greedy, S trouve le nœud le plus proche de la destination dans sa propre liste de voisins, et donc le nœud le plus proche est B avec les coordonnées (x_B, y_B). Nous pouvons calculer la distance entre B et D par l'équation (12) et entre B et S par l'équation (13) :

$$\text{Distance (B,D)} = \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2} \quad (12)$$

$$\text{Distance (B,S)} = \sqrt{(x_S - x_B)^2 + (y_S - y_B)^2} \quad (13)$$

La zone de chevauchement ECA de deux cercles ; le premier cercle avec la destination **D** comme centre et $\mathbf{d_{max}}$ comme rayon, et le deuxième cercle avec la source S comme centre et **R** comme rayon. La partie bleue représente cette zone nommée ECA (Efficient Communication Area). Chaque nœud de la zone ECA est non seulement proche du nœud de destination **D**, mais également dans la portée de communication du nœud **S,** et peut être sélectionné comme nœud de saut suivant de **S**. La distance maximale est calculée par la formule suivante :

$$d_{max} = \text{Distance (B,D)} + \lambda^* \text{ Distance (B,S)} \quad (14)$$

Dans l'équation (14), $\lambda \in [0, 1]$. Il apparaît que λ affecte la taille de la zone ECA. Lorsque λ s'approche de 0, ECA devient plus petite, par la suite le prochain saut dans la zone ECA est facilement sélectionné comme le nœud proche de D. La distance entre le nœud et la source S devient plus longue et la stabilité du lien peut être détériorée, produisant une augmentation de la perte de paquets. Lorsque λ approche de 1, ECA devient plus long et le prochain saut dans ECA est sélectionné comme le nœud proche de S, cependant le nombre de sauts pour ce nœud vers D peut augmenter. Après plusieurs simulations avec variation du facteur λ dans l'intervalle [0,1], des performances satisfaisantes dans le mode de transfert greedy sont obtenues avec la valeur λ fixée à 0,3.

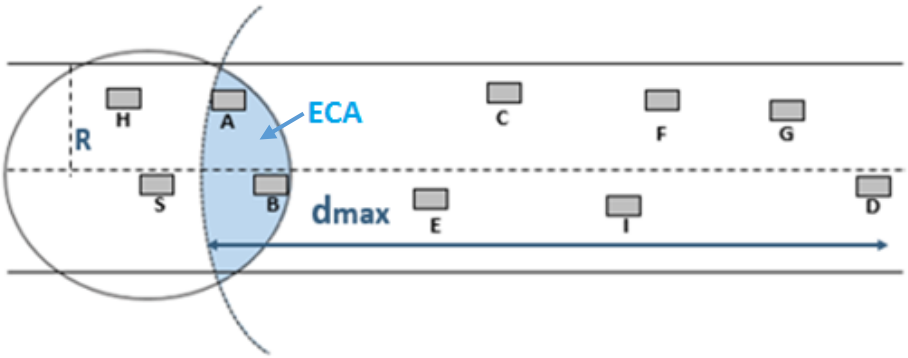


Figure 4.2 : Diagramme de la zone de communication efficace ECA

4.4.2 Gestion des messages HELLO et création de la table des voisins

L'organigramme du protocole de routage amélioré WA-GPSR est présenté dans la figure 4.3. Tout d'abord, à l'étape (1), les nœuds voisins sont identifiés et les tables de voisinage sont créées, en diffusant des messages HELLO dans le voisinage. Ensuite, à l'étape (2), la zone de communication efficace (ECA) est définie comme étant l'intersection des deux zone de communication ; l'une avec d_{max} comme rayon et l'autre avec R comme rayon. Par la suite, à l'étape (3), la valeur de poids de chaque nœud voisin est calculée et le nœud ayant la valeur de poids la plus élevée est sélectionné comme prochain nœud de transmission. À l'étape (4), nous vérifions s'il existe un nœud voisin dont la valeur de poids est supérieure à celle du nœud actuel. Si oui, à l'étape (5), lors du transfert des paquets à chaque nœud intermédiaire, nous vérifions si l'identifiant (ID) du nœud actuel est le même que l'ID de destination ou non. Si oui, à l'étape (6), le paquet est envoyé à la destination finale. Sinon, l'algorithme revient à l'étape (3) et le processus sera répété.

Dans le protocole WA-GPSR, les messages HELLO sont étendus (comme indiqué dans le tableau 4.1) et utilisés pour échanger les informations requises entre les nœuds voisins afin de construire les tables de voisinage. Les paquets HELLO sont diffusés entre les nœuds voisins par une communication à saut unique. Lorsqu'il reçoit un message HELLO d'un voisin, chaque nœud crée une entrée de routage dans sa table de voisinage pour ce voisin. Dans le système du WA-GPSR, chaque nœud obtient des informations sur sa position, sa vitesse de déplacement et le nombre de ses voisins. Ensuite, il insère ces informations dans un paquet HELLO et les diffuses à ses voisins à un saut. À la réception des paquets HELLO, le nœud source calcule la vitesse de déplacement, la mobilité, la durée de vie du lien et le temps de communication accumulée et les stocke avec le reste des informations.

Enfin, à la réception des messages HELLO, les tables de voisinage sont mises à jour à chaque nœud. Pendant le processus d'acheminement, les mesures de routage seront utilisées pour calculer le poids de tous les nœuds dans la table des voisins du nœud source (nœud actuel). Ensuite, le paquet est transmis au nœud voisin qui sera le prochain saut, ayant le poids le plus élevé.

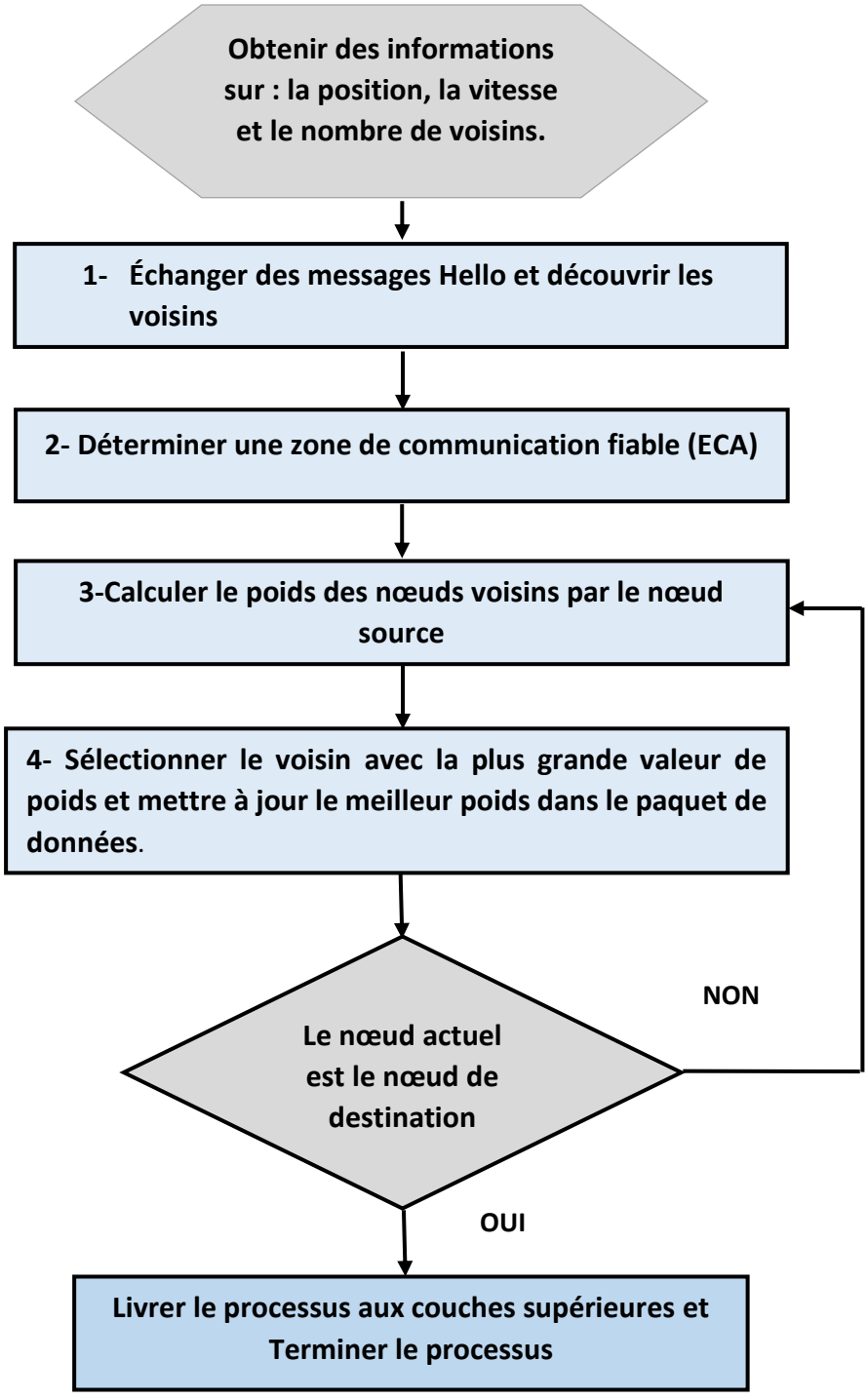


Figure 4.3 : Organigramme du protocole de routage WA-GPSR

Tableau 4.1 : Le format du paquet HELLO dans le protocole WA-GPSR

Les champs d'information	Description
ID	L'identifiant unique du nœud
Position du nœud (X_, Y_)	Les coordonnées (x, y) de la position du véhicule
Horodatage (time stamp ou ts_)	Le temps actuel
Vitesse	Vitesse de déplacement du véhicule (m/s)
Nombre de voisins	Nombre de voisins du véhicule
Seqno_	Numéro de séquence des messages d'accueil

4.5 Métriques de routage

4.5.1 La durée de vie du lien

La topologie du réseau change en raison du mouvement des nœuds, ce qui conduit à un effet sur la stabilité du lien. La durée de vie du lien entre les nœuds est définie comme la plus petite durée entre les nœuds qui restent en communication pour transmettre les paquets. En raison de la variation de la vitesse et des différents obstacles, la topologie du lien change, et les liens des nœuds se rompent fréquemment. Si le lien connecté est valide pendant une courte période de temps, cela peut conduire à la reconstruction de la route. Par conséquent, l'information de la prédiction de la durée de vie du lien peut être utilisée comme l'une des métriques de routage pour la sélection du prochain saut. En outre, lorsque la durée de vie est longue, le chemin de routage sera stable, ce qui se traduit par un meilleur taux de paquets délivrés.

Soit R la portée de communication, (x_i, y_i) et (x_s, y_s) sont respectivement, les coordonnées du voisin i et du nœud source S, et leurs vitesses correspondantes sont données par v_i et v_s ($v_s < v_i$). La durée de vie du lien entre le nœud source S et le nœud voisin i est calculée à l'aide de l'équation (15) [85] :

$$LLTs, i = R - \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}}{v_s - v_i} \quad (15)$$

4.5.2 Le temps de communication accumulée

Le temps de communication accumulée T_i construit un chemin stable et évite la reconstruction fréquente du routage due aux positions changeantes des nœuds en mode greedy. En comparant les T_i des nœuds voisins avec les T_i des nœuds actuels (nœud source ou nœud émetteur), le nœud avec la durée maximale de communication T_i sera proche de la destination et sera sélectionné au début comme le nœud de saut suivant de la source.

T_i est calculé comme le montre l'équation (16) ci-dessous [63] :

$$T_i = T_{i-1} + \Delta t \quad (16)$$

Avec : $\Delta t = t_i - t_{i-1}$

Dans l'équation (16), T_i (t) est le temps de communication accumulée actuelle, T_{i-1} est le dernier temps accumulé. t_i est le temps de réception actuel du message HELLO, t_{i-1} est le temps de réception du dernier message HELLO. En transférant les paquets en utilisant le T_i maximum, la probabilité d'avoir un lien de communication rompu sera réduite. Nous supposons que le premier moment de réception du paquet HELLO est t_1 et le temps accumulé est initialisé d'abord à $T_1 = 0$, en comparant T_i dans la zone ECA (figure 4.2), le nœud avec T_i maximal sera sélectionné comme le prochain nœud de saut suivant de la source S (le nœud est stable pour S et proche de D).

4.5.3 La densité des nœuds

La densité des nœuds est une métrique importante pour déterminer le chemin de routage efficace. Pour éviter l'interruption de la connectivité et le maximum local qu'un paquet peut atteindre, le nœud avec une densité élevée est sélectionné comme nœud de saut suivant. La densité de trafic du nœud voisin v est calculée comme suit [86] :

$$\text{Densité}_v = \frac{N_{voisin}}{R} \quad (17)$$

Où : N_{voisin} représente le nombre de voisins dans la table des voisins. **R** désigne la portée de communication du véhicule. Le chemin source dans le protocole GPSR s'interrompt lorsqu'il n'y a pas de voisin près du véhicule expéditeur pour transmettre le paquet. En revanche, le protocole WA-GPSR que nous proposons établit un chemin de routage stable en tenant compte de la densité des nœuds de trafic.

4.5.4 La mobilité des nœuds

La mobilité d'un nœud voisin **v** est la différence de vitesse entre le nœud source **s** et le nœud voisin **v**. Avec une valeur de mobilité minimale, les véhicules **s** et **v** se rapproche resteront plus longtemps dans la zone de communication l'un de l'autre, dans le cas où ils ont le même sens de déplacement. En utilisant la métrique de mobilité, le nombre de paquets de données de route disponibles augmente et, par conséquent, le taux de paquets délivrés à la destination sera élevé. La mobilité des nœuds est calculée à l'aide de la formule suivante [87]:

$$\text{Mobilité}_v = |\text{vitesse}_s - \text{vitesse}_v| \quad (18)$$

Où, vitesse_s et vitesse_v sont, respectivement, les vitesses des nœuds source **s** et son voisin **v**. En choisissant une valeur minimale de Mobilité_v, les véhicules **s** et **v** resteront donc plus longtemps dans la zone de communication.

4.5.5 Calcul des poids relatifs aux facteurs de routage

Pour calculer le poids du nœud voisin dans le protocole de routage WA-GPSR, la durée de vie du lien de communication, Le temps de communication accumulée, la densité des nœuds et la mobilité des nœuds sont considérées. Le poids est attribué à chaque nœud et il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$POIDS_v = W_1 \times LLT_{s,i} + W_2 \times T_i + W_3 \times Densité_v + W_4 \times \left(\frac{1}{Mobilité_v}\right) \quad (19)$$

Avec : $|W_1| + |W_2| + |W_3| + |W_4| = 1$

Dans l'équation (19), $POIDS_v$ désigne le poids du véhicule, $LLT_{s,i}$ désigne la durée de vie de communication entre le nœud expéditeur s et le nœud voisin i, T_i désigne le temps de communication accumulée du nœud, $Densité_v$ désigne la densité des nœuds, $Mobilité_v$ désigne la mobilité du nœud v et Wi (i= 1,2,3,4) sont des coefficients constants.

Le pseudo code du protocole de routage WA-GPSR est décrit dans l'algorithme 2. Tout d'abord, nous vérifions si le nœud de destination est voisin du nœud actuel. Si c'est le cas, le paquet est transmis directement au nœud de destination. Ensuite, lorsque le paquet est transmis en utilisant le mode de transmission greedy, les messages HELLO sont diffusés au voisin à un saut. Ensuite, le nœud actuel calcule la distance entre chaque nœud voisin et la destination (équation (12)) pour trouver le nœud avec la plus petite distance comme nœud de saut suivant. Pour notre protocole WA-GPSR, dans le transfert greedy, le nœud actuel doit trouver le nœud voisin avec la distance minimale à la destination (équation (12 et 13)), et ensuite, d_{max} est calculée pour déterminer la zone ECA (équation (14)). Nous calculons et comparons le poids (équation (15)) de chaque nœud voisin dans la zone ECA, le nœud voisin ayant la valeur de poids la plus élevée est sélectionné comme nœud de saut suivant pour transmettre le paquet.

Algorithme 2 : Pseudo-code du protocole de routage WA-GPSR

Initialisation:

voisin ← NULL

$voisin_{min}$ ← NULL

d_{max} ← 0

prochain-saut ← NULL

λ ← 0.3

Note:

$voisin_{min}$: le voisin avec la distance minimale vers la destination

Courant: Nœud courant

Dest: Nœud de destination

n: voisin

Distance (d_{voisin}, Dest) : La distance entre le nœud voisin et la destination

Distance ($d_{courant}$, Dest) : La distance entre le nœud courant et la destination

ECA (Efficient Communication Area): Zone de communication Efficace

$IPaddr_n$: Adresse IP du nœud voisin

$IPadddr_{Dest}$: Adresse IP du nœud de la destination

Assomption : Chaque nœud obtient ses informations géographiques via le système de positionnement GPS

Entrée : Nœud source, liste des voisins, coordonnés de la destination

Sortie : Meilleur nœud voisin comme prochain saut

Pour tout n dans liste_voisin **Faire**

Si $IPaddr_n = IPadddr_{Dest}$ **Alors**

Envoyer (paquet, $IPaddr_n$)

Fin Si

Fin Pour

Si en mode d'acheminement greedy **Alors**

Pour tout n dans liste_voisin **Faire**

Calculer d_{voisin} **à** Dest en utilisant l'équation (12)

Si Distance (d_{voisin}, Dest) < Distance ($d_{courant}$, Dest) **Alors**

Distance ($d_{courant}$, Dest) ← Distance (d_{voisin}, Dest)

$voisin_{min}$ ← n

Fin Si

Fin Pour

Calculer Distance ($d_{courant}$, $voisin_{min}$) en utilisant l'équation (13)

d_{max} ← Distance ($d_{courant}$, Dest) + $\lambda \times$ Distance ($d_{courant}$, $voisin_{min}$)

Déterminer ECA

Pour tout n dans ECA **Faire**

Calculer $Poids_{voisin}$ en utilisant l'équation (19)

Si ($Poids_{voisin} > Poids_{max}$) **Alors**

$Poids_{max} \leftarrow Poids_{voisin}$

prochain-saut ← n

Fin Si

Fin Pour

Mise à jour du paquet puis transmission du paquet au prochain saut

Fin Si

4.6 Evaluation des performances

Dans cette section, nous avons évalué les performances du protocole de routage WA-GPSR que nous proposons par rapport au protocole MM-GPSR et au protocole GPSR original. Les simulations de tous les protocoles de routage ont été effectuées pour différents scénarios, chaque scénario ayant un nombre différent de charge de trafic de données CBR et un nombre différent de véhicules. Le protocole de routage GPSR original est intégré dans NS-2 (v2.35). Par ailleurs, nous avons implémenté WA-GPSR et MM-GPSR dans le simulateur de réseau NS-2 [54]. Une comparaison des protocoles entre GPSR et MM GPSR a été réalisée dans [63]. Cependant, certains paramètres supplémentaires présentés dans le tableau 4.2 et le tableau 4.3 n'étaient pas détaillés dans le travail présenté dans [63]. Pour plus de cohérence, nous avons utilisé le même générateur de mobilité VANETMOBISIM [88] dans un milieu urbain.

4.6.1 Paramètres d'évaluation

La simulation des véhicules a été réalisée dans une zone de 1000m². La position initiale des véhicules était distribuée de manière aléatoire. Pour simuler un réseau clairsemé, nous avons varié le nombre de connexions entre 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40 connexions. Et le nombre de véhicules entre 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100 véhicules. L'intervalle des paquets HELLO était fixé à 1 seconde. Une antenne omnidirectionnelle a été installée dans chaque véhicule. Nous avons utilisé le modèle de propagation radio terrestre à deux rayons. Nous avons considéré le trafic de données à débit binaire constant (CBR) pour chaque paire source-destination. L'évaluation des performances basées sur l'impact du trafic de données existant dans le réseau a été réalisée avec un nombre variable de connexions CBR et diverse valeurs de densités. Nous avons supposé qu'UDP était le protocole de la couche transport pour notre étude. Pour chaque simulation, la durée a été configurée à 300 secondes. Le tableau 4.2 et le tableau 4.3 résument tous les paramètres supplémentaires des simulations. Les mesures de performance utilisées dans la simulation sont le taux de paquets délivrés avec succès (PDR), le délai de bout en bout, le coût de routage et l'efficacité du réseau.

Tableau 4.2 : Paramètres du modèle de mobilité microscopique

Paramètre	**Description**	**Valeur**
l	Longueur des véhicules	5 m
A	Accélération maximale	0.6 m/s²
B	Décélération	0.5 m/s²
Ath	Seuil d'accélération	0.2 m/s²
S0	Distance entre les jams	2 m
T	Distance de sécurité	1.5 s
P	Politesse	0.5 s
Mainstay	Durée minimale de présence du nœud	5 s
Maxstay	Durée maximale du séjour du nœud	30 s

Tableau 4.3 : Paramètres de simulation

Description	Valeur	Unité
Couche physique et couche liaison		
Portée de communication	250	m
Protocole MAC	IEEE802.11p	-
Modèle de propagation	Two-Ray-Ground	-
Temps de simulation	300	s

Modèle de trafic		
Type de Trafic	CBR	-
Nombre de connexions	5-10-15-20-25-30-35-40	-
Taux de paquets de trafic	8	paquets/seconde
Taille des paquets de trafic	512	bytes
Sens de la circulation	Multidirectional	-
Taille de la zone de simulation	1000 x 1000	m^2
Nombre de densité	50	-
Modèle IDM-LC	20 to 100	km/h
Vitesse des véhicules	2	-
Voie par direction	10	s
Feu de circulation		

4.6.2 Résultats d'expérimentations

- **Taux de paquets délivrés**

Le taux de paquets délivrés (PDR) de WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR est présenté sur la figure 4.4. Nous observons que lorsque le nombre de connexions CBR augmente, le PDR augmente également, en particulier pour WA-GPSR et MM-GPSR. La raison principal est que le réseau devient plus connecté en raison de l'augmentation du nombre de véhicules, la probabilité de rencontrer des problèmes de maximum local est diminuée. Les résultats de simulation de la figure 4.4 montrent que le protocole WA-GPSR obtient de meilleures performances que le protocole GPSR et MM-GPSR. À l'exception avec 35 connexions où MM-GPSR atteint la destination par l'utilisation de paramètres de stabilité, conduit à une route différente et donc, nous obtenons un PDR plus élevé. Pour un trafic de données CBR élevé, MM-GPSR peut aider à équilibrer la charge à travers le réseau et, par conséquent, augmenter le PDR. Néanmoins, dans ce cas, la différence entre WA-GPSR et MM-GPSR est très faible (< 8%).

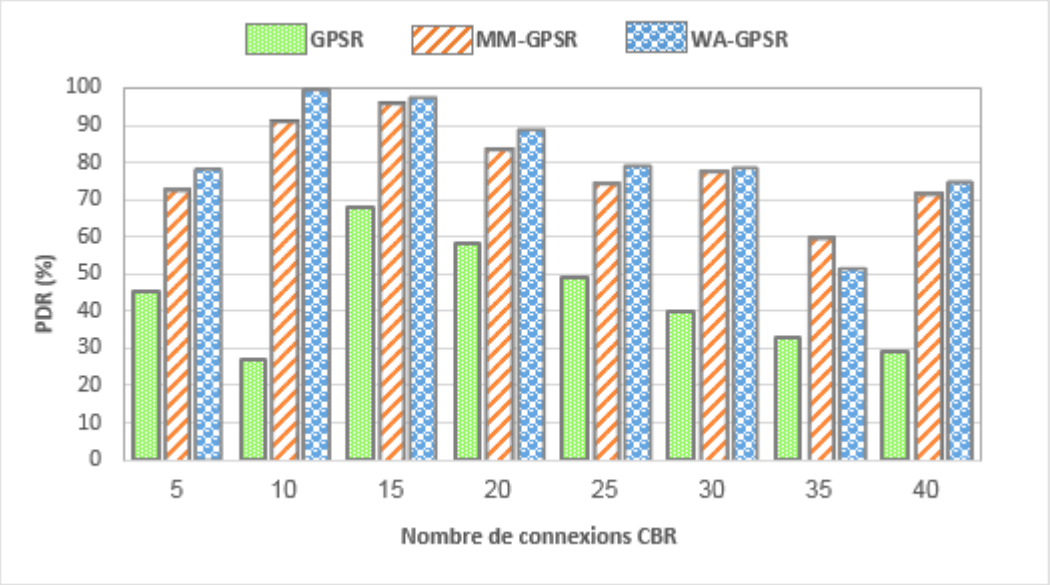


Figure 4.4 : Taux de paquets délivrés en fonction de nombre de connexions CBR

Comparé à MM-GPSR et GPSR, le protocole WA-GPSR a un PDR plus élevé dans l'ensemble des résultats et vise à éviter l'interruption de la communication. Cela est dû au fait que le protocole WA-GPSR sélectionne le nœud voisin le plus proche, qui est plus stable et dont le lien de communication est plus fiable. Et ceci grâce à l'utilisation du nombre de voisins, de la mobilité des véhicules et de la durée de vie du lien lors de la sélection du nœud de saut suivant. En revanche, le protocole GPSR est le moins efficace car il sélectionne parfois le nœud de saut suivant plus susceptible de se trouver hors de la portée de communication.

La figure 4.5 montre la comparaison du PDR entre les protocoles WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR en fonction de nombre de véhicules. Le WA-GPSR est plus performant que le protocole GPSR et MM-GPSR en raison de la disponibilité d'un plus grand nombre de sources-destinations dans un scénario urbain ; les protocoles de routage géographique sont plus efficaces pour trouver le nœud de transfert du prochain saut. Pour un nombre élevé de 70 véhicules, les protocoles WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR obtiennent un PDR élevé en raison de la courte distance entre les nœuds lorsque le nombre de véhicules augmente, ce qui entraîne une augmentation significative du PDR. Dans l'ensemble, WA-GPSR a un PDR plus élevé que MM-GPSR et GPSR parce que notre variante proposée prend en compte la stabilité des nœuds voisins, la durée de vie du lien et les mesures de densité afin de sélectionner le chemin optimal vers la destination.

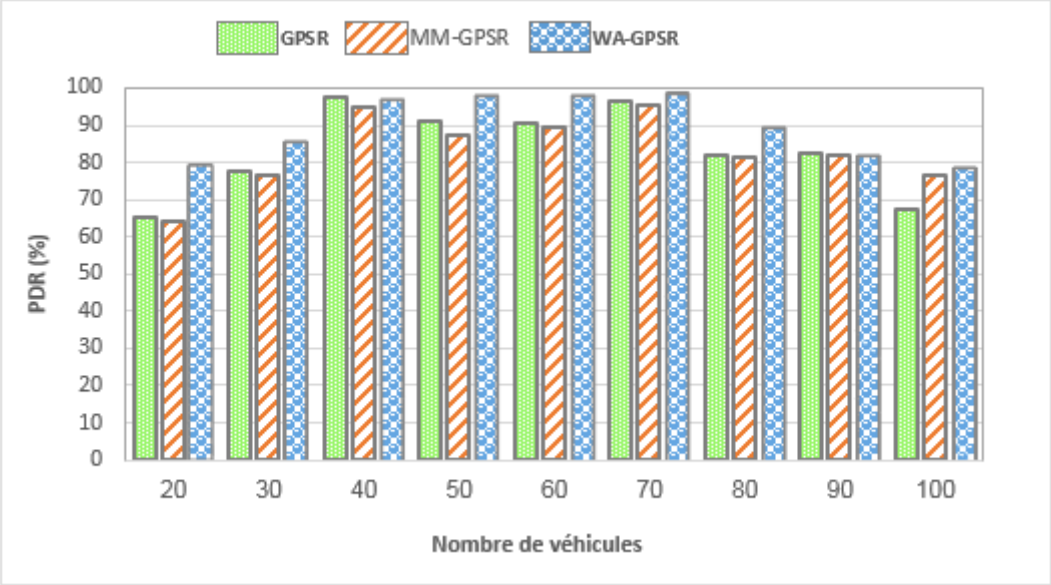


Figure 4.5 : Taux de paquet délivrés en fonction de nombre de véhicules

- **Délai de bout en bout**

La figure 4.6 montre la comparaison du délai de bout en bout entre WA-GPSR, GPSR et MM-GPSR en fonction de nombre de connexions CBR. Lorsque le nombre de connexions augmente, le délai de bout en bout augmente pour WA-GPSR, GPSR et MM-GPSR. Lors de la transmission de paquets, la relation de voisinage dans un environnement urbain n'est pas fiable et l'instabilité conduit à avoir plus de redondance de chemin et donc un retard plus long. Dans l'ensemble, le protocole WA-GPSR présente clairement un délai de bout en bout plus faible par rapport au GPSR et au MM-GPSR en raison de la sélection de chemins de routage optimal et d'un nœud de saut suivant plus stable, ce qui entraîne la robustesse du lien de communication et, par conséquent, un délai de bout en bout plus faible. Cependant, comme le montre la figure 4.6, nous avons observé que MM-GPSR a un délai de bout en bout plus petit à 15 et 35 connexions par rapport aux deux autres protocoles, il atteint respectivement, 12 ms et 14 ms pour 15 et 35 connexions. Cela s'explique par le fait que MM-GPSR réduit la redondance du chemin en utilisant l'angle minimal dans le transfert par le mode périmètre. D'après les résultats de la simulation, le protocole proposé WA-GPSR présente un délai de bout en bout inférieur à celui des deux autres protocoles. La prise en compte de la densité des véhicules et du temps de communication accumulée après la durée de vie de la liaison, permet au paquet de trouver le meilleur chemin vers la destination, ce qui se traduit par un retard de bout en bout plus faible qui a été reçu par la destination.

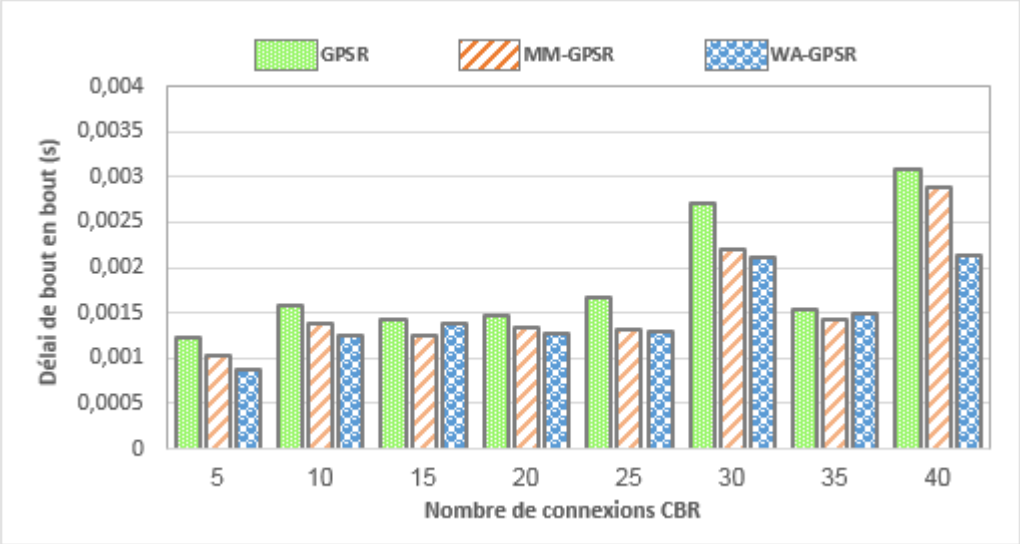


Figure 4.6 : Délai de bout en bout en fonction de nombre de connexions CBR

La figure 4.7 montre le délai de bout en bout des protocoles WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR en variant les nombres de véhicules. Le délai de bout en bout des trois protocoles de routage augmente lorsque le nombre de véhicules augmente. Lorsque le réseau est faiblement connecté, le délai des trois protocoles simulés est réduit. En général, le délai de bout en bout de WA-GPSR est plus court que MM-GPSR et GPSR, parce que notre algorithme choisit un nœud de saut suivant plus stable qui réduit le risque de sélectionner les nœuds hors de la portée de communication, générant un délai de bout en bout plus bas.

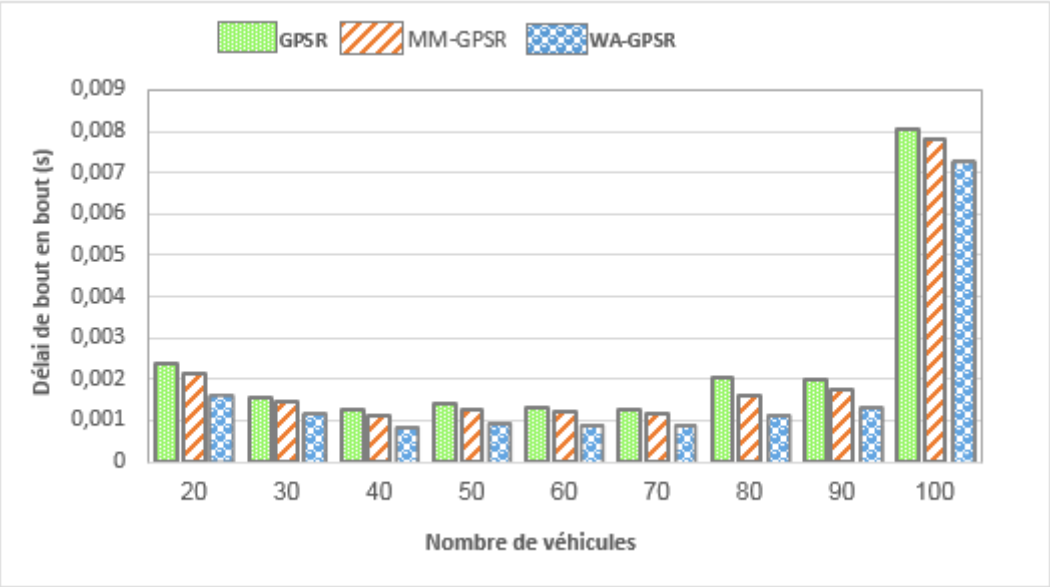


Figure 4.7 : Délai de bout en bout en fonction de nombre de véhicules

- **Coût de routage**

La figure 4.8 montre le coût de routage en fonction de nombre de connexions. Le coût de routage diminue avec l'augmentation du nombre de connexions CBR dans le réseau. Pour un certain nombre de connexions CBR, le nombre de paquets de contrôle est plus faible dans WA-GPSR que dans les autres protocoles de routage simulés, ce qui entraîne une diminution du coût de routage. Néanmoins, le coût de routage de WA-GPSR à 15, 30 et 35 connexions est plus élevé que celui du protocole MM-GPSR, il atteint respectivement, 2,9%, 7,4% et 3,3%. En raison des champs supplémentaires que nous avons ajoutés dans les paquets HELLO, conduisant les nœuds à mettre à jour périodiquement la table de routage de leurs voisins à un saut avec plus de paramètres (tableau 4.1). Cependant, dans un faible trafic de données d'environ 5 à 10 connexions, le coût de routage de GPSR est plus élevé que les deux autres protocoles de routage étudiés. En effet, l'utilisation de la règle de la main droite dans le protocole de routage GPSR peut conduire dans certaines situations à un mauvais choix du saut suivant, ce qui entraîne une redondance du chemin. En général, le coût de routage de WA-GPSR est plus faible que celui de GPSR et MM-GPSR, principalement parce que WA-GPSR choisit un lien raisonnable qui améliore la performance de communication.

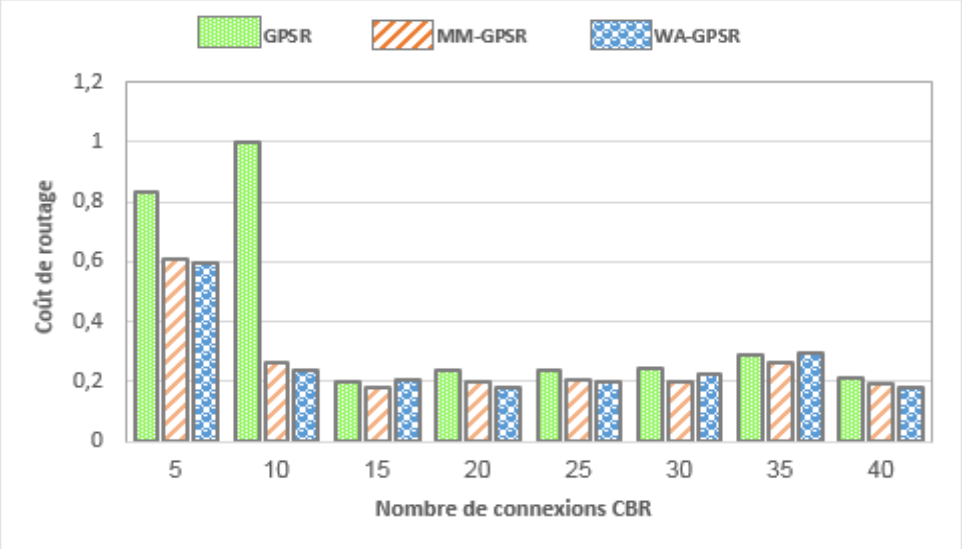


Figure 4.8 : Coût de routage en fonction de nombre de connexions CBR

La figure 4.9 montre le coût de routage de WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR en fonction de nombre de véhicules. On remarque que le coût de routage des protocoles de routage simulés augmente avec l'augmentation du nombre de véhicules. Ceci est dû aux paramètres supplémentaires ajoutés dans les paquets HELLO. Dans l'ensemble, le coût de routage de WA-GPSR est inférieur à celui de MM-GPSR et de GPSR, principalement parce que WA-GPSR établit un chemin de routage robuste, avec une priorité plus élevée accordée à la densité des véhicules et à la métrique de mobilité pour sélectionner le prochain saut.

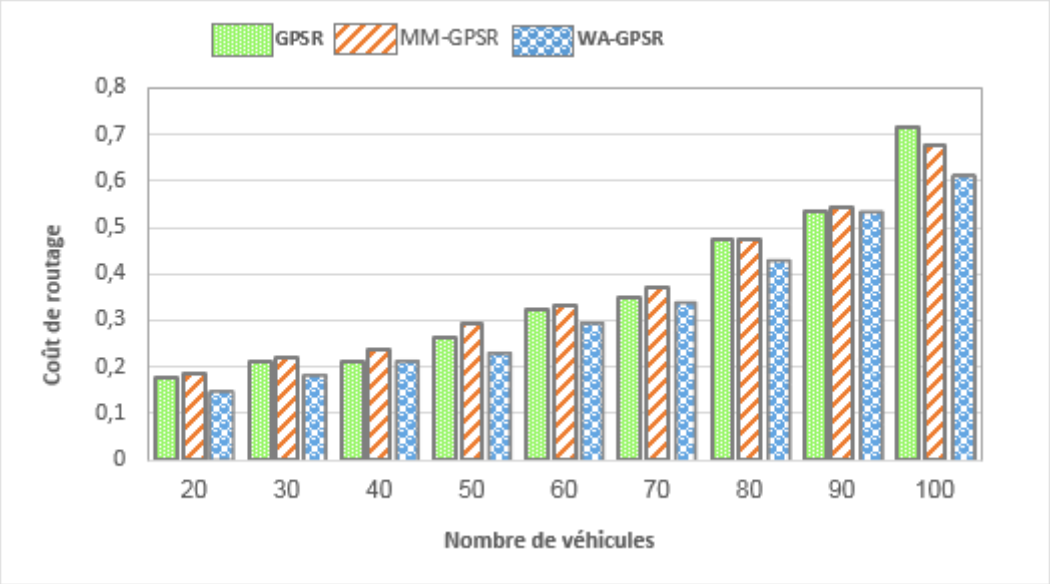


Figure 4.9 : Coût de routage en fonction de nombre de véhicules

- **Efficacité du réseau**

La figure 4.10 illustre l'efficacité pour différents nombres de connexions CBR. L'efficacité est une mesure importante qui montre la bonne mise des paquets de données envoyés efficacement à la destination dans le réseau VANET. Lorsque le nombre de connexions CBR augmente, l'efficacité du réseau pour les protocoles WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR augmente aussi, en particulier lorsque le réseau est fortement connecté. Comme le montre la figure 4.10, le protocole WA-GPSR que nous proposons offre de meilleures performances par rapport aux deux autres protocoles pour tous les cas où le nombre de connexions est varié. La raison possible est l'utilisation convenable de quatre métriques de routage pour sélectionner le meilleur saut suivant dans le mode de transfert greedy. En effet, notre proposition WA-GPSR conduira le paquet à trouver la meilleure route vers la destination et par la suite, il augmentera le taux de paquet délivrés, diminuera le coût de routage et augmentera également l'efficacité du réseau. L'exception est lorsque le réseau est bien connecté à 30 et 35 connexions, le protocole MM-GPSR montre une grande efficacité. Cela peut s'expliquer par le fait que le mode de récupération (périmètre) du protocole MM-GPSR utilise à la fois l'angle minimum et la règle de la main droite que nous avons décrit dans le chapitre 3, ce qui conduit à un meilleur chemin de routage dans cette situation. Ce qui est logique avec les performances de la figure 4.4 et la figure 4.6, où nous pouvons constater que le MM-GPSR a un meilleur taux de paquet délivrés et un délai de bout en bout plus faible à 35 connexions, respectivement.

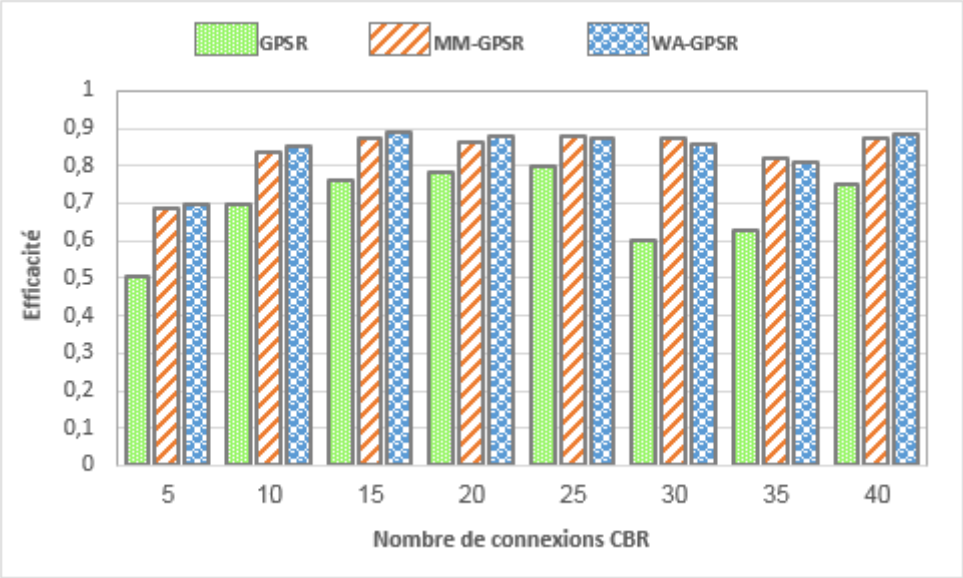


Figure 4.10 : Efficacité du réseau en fonction du nombre de connexions CBR

La figure 4.11 illustre l'efficacité des protocoles WA-GPSR, MM-GPSR et GPSR en fonction de nombre de véhicules. La figure 4.11 montre que l'efficacité des trois protocoles diminue avec l'augmentation du nombre de véhicules. Cela est dû au taux élevé de rupture des liens de communication dans le segment où la densité de véhicules est plus élevée. En général, l'efficacité du réseau pour WA-GPSR est plus grande que celle de MM-GPSR et GPSR, comme le montre la figure 4.7 et la figure 4.9, respectivement, notre protocole WA-GPSR réduit le délai de bout en bout et le nombre de paquet de contrôle routés dans le réseau, et par conséquent, l'efficacité du réseau augmente également.

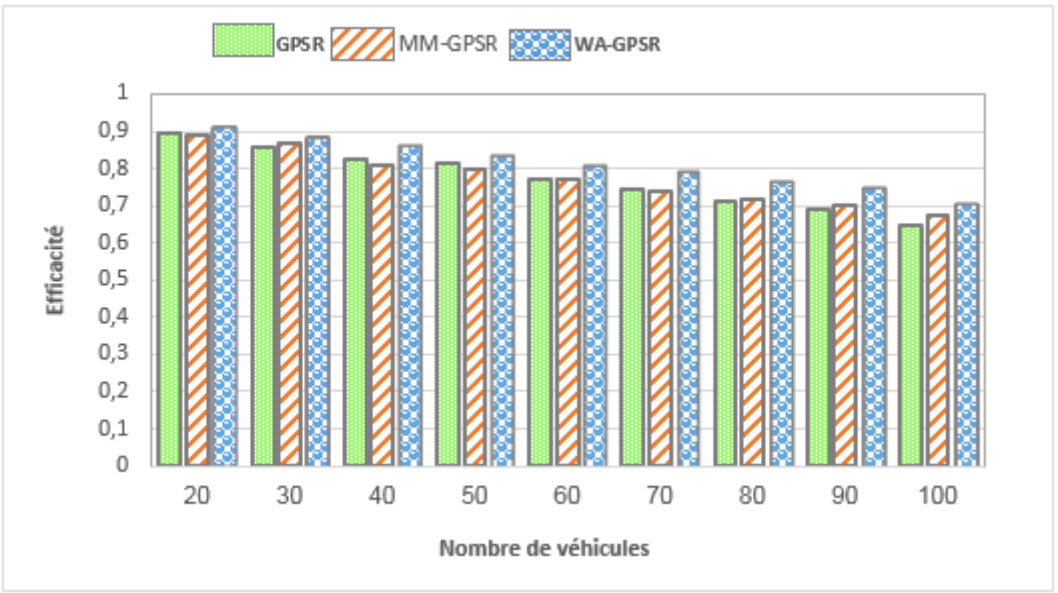


Figure 4.11 : Efficacité du réseau en fonction de nombre de véhicules

Conclusion

La topologie hautement dynamique et le comportement imprévisible des réseaux VANETs rendent la conception du routage très difficile. Dans ce chapitre, nous avons proposé le protocole de routage amélioré WA-GPSR basé sur le protocole GPSR original, en découvrant et en exploitant les informations des voisins pour un chemin de routage plus stable. Notre variante WA-GPSR amélioré optimise et améliore le mode de transfert greedy. Il établit une zone de communication fiable et prend en compte diverses mesures de routage telles que la durée de vie du lien, la mobilité des véhicules, le temps de communication accumulé et la densité des véhicules, afin de s'adapter à la situation d'instabilité du lien et de trouver un meilleur chemin de routage. Une valeur de poids est attribuée à chaque voisin, et le nœud avec une grande valeur de poids est sélectionné comme le prochain saut. Les simulations ont été effectuées dans un scénario urbain. Les expériences montrent que les performances de notre protocole WA-GPSR amélioré dépassent celles des protocoles MM-GPSR et GPSR en termes de taux de paquet délivrés, de délai de bout en bout, de coût de routage et d'efficacité du réseau.

Chapitre 5

Le protocole de routage géographique Q-Learning GPSR (QLG) basé sur l'Intelligence Artificielle

5 Introduction

Les techniques d'intelligence artificielle ont un énorme potentiel pour gérer efficacement le fonctionnement automatisé des équipements intelligents déployés dans les villes intelligentes. Parmi ses principales applications, on trouve la surveillance intelligente du trafic, la gestion intelligente des déchets, les bâtiments intelligents et la surveillance sanitaire des patients. Dans les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANETs) hautement dynamiques, le routage entre les véhicules devient un défi critique pour soutenir les applications véhiculaires, qui vont de la sécurité à la régulation du trafic routier, en passant par la transmission d'éléments d'information et les données des applications de jeux dans le réseau entre les véhicules et les passagers. Compte tenu de ces potentialités, les VANETs représentent un domaine prometteur pour les services associés. Cependant, ils sont encore dans une phase expérimentale et plusieurs problèmes doivent être résolus avant que de telles applications puissent être déployées.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une amélioration du protocole GPSR [44] appelée QLG (Q-Learning based Geographic stateless routing protocol), qui vise à améliorer la Qualité de Service (QoS) de la transmission de données dans les VANETs. Le protocole QLG est basé sur un mécanisme d'intelligence artificielle qui calcule de nouvelles métriques de routage en tenant compte de la mobilité, de la densité, du temps de communication accumulé et de la durée de vie des liens de communication. Le protocole GPSR est considéré comme la solution la plus efficace pour les réseaux à grande échelle. Ses approches prometteuses, à savoir, le mode de transmission greedy et le mode de transmission périmètre sont efficaces dans les VANETs. Cependant, la qualité de la transmission des données entre les véhicules est affectée par les vitesses intenses et la grande mobilité qui influencent grandement l'efficacité des décisions de routage. À cette fin, des algorithmes d'apprentissage par renforcement sont conçus pour améliorer les exigences de la qualité de service. L'algorithme Q-Learning [89] est l'un des algorithmes les plus faciles à implémenter et à adapter aux réseaux VANETs, qui permet une interaction optimisée avec l'environnement. Chaque véhicule du réseau dispose d'un module d'apprentissage par renforcement pour déterminer dynamiquement le chemin optimal vers la destination. L'échange de paquets entre voisins lors de l'envoi et de la réception des messages signifie que l'agent a choisi une action ou une activité et, par conséquent, l'apprentissage de l'état du réseau est effectué et jugé par les meilleures conséquences en termes de fonction de

récompense, qui est contrôlée par une valeur d'estimation. La précision de la position géographique des voisins influence grandement la performance des protocoles dans les VANETs. Par conséquent, le routage par une méthode d'apprentissage par renforcement telle que Q-Learning, qui vise à prendre des décisions de routage sans connaître l'ensemble du réseau et à tenir compte de la position géographique, du temps d'accumulation, de la mobilité, de la durée de vie des liaisons et de la densité des véhicules, afin d'obtenir une décision de routage optimale.

Nous avons effectué de nombreuses recherches dans la littérature et l'idée de ce travail a été abordée pour la première fois avec quelques améliorations. Nous avons amélioré le protocole de routage géographique basé sur l'intelligence artificielle, qui est adapté à un environnement en évolution rapide. L'idée est principalement basée sur l'implémentation de techniques de Q-Learning sur le protocole de routage géographique GPSR. L'évaluation des performances de cinq protocoles de routage géographique : GPSR, MGPSR, WA-GPSR, MM-GPSR et QLG est réalisée en examinant les techniques d'optimisation, les paramètres d'évaluation et l'analyse des performances sous différentes métriques de routage.

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos motivations derrière l'utilisation d'apprentissage par renforcement. Par la suite, nous allons présenter les principaux travaux existants. Ensuite, nous allons détailler le principe d'apprentissage par renforcement et l'algorithme que nous avons proposé. Et finalement, nous allons évaluer notre proposition par une étude comparative, en utilisant les simulateurs NS-2 et VANETMOBISIM.

5.1 Motivation et contribution

L'apprentissage automatique est le domaine de l'intelligence artificielle [90] qui donne aux systèmes la capacité d'apprendre automatiquement et de s'améliorer à partir d'expériences antérieures sans être explicitement programmés. Il vise à développer de nouveaux programmes informatiques capables d'accéder aux données et de les utiliser pour apprendre par eux-mêmes. Les principales applications de l'apprentissage automatique se situent au niveau de l'analyse des données, la gestion des appareils, la gestion du réseau, la sécurité du réseau et les services d'authentification. Du côté de l'utilisateur, des techniques de contrôle intelligentes peuvent être développées, dans lesquelles l'intéraction humaine n'est pas nécessaire, par exemple les voitures sans conducteur, les trains sans conducteur, etc.

Le routage basé sur le Q-learning rencontre des limites d'évolutivité pour les grands réseaux hautement dynamiques en raison de la lenteur de la convergence de l'algorithme d'apprentissage et, par conséquent, les décisions de transfert ne peuvent pas suivre le trafic routier et les changements de topologie du réseau. C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous proposons une amélioration du protocole de routage GPSR consciente du trafic, basée sur l'apprentissage Q-learning (QLG) et qui est conçue pour les réseaux VANETs dans le milieu urbain. Nous visons d'améliorer la connaissance des conditions du trafic routier et de réduire l'impact de la mobilité rapide des véhicules sur les performances du réseau en fournissant un mécanisme efficace d'acheminement des paquets basé sur l'approche d'apprentissage par renforcement dans les VANETs évolutifs. La sélection du prochain véhicule d'acheminement dans les segments de

route est mise en œuvre, selon la méthode d'acheminement greedy du protocole GPSR, basée sur l'apprentissage Q-learning.

5.2 Travaux antérieurs

Le protocole GPSR a été largement étendu pour adapter et améliorer ses performances dans les réseaux VANETs. En effet, le GPSR suscite toujours l'intérêt des chercheurs qui continuent de contribuer avec différentes propositions. Dans la section suivante, nous présentons quelques travaux de recherche utilisant le Q-Learning et l'apprentissage automatique. Les auteurs de [91] décrivent l'apprentissage par renforcement pour le protocole AODV ; le protocole amélioré s'adapte aux applications unicast et vérifie la disponibilité du chemin en temps réel pour un fonctionnement efficace dans un environnement à forte mobilité. L'analyse des performances a montré l'efficacité du protocole pour différents modèles de mobilité dans un environnement VANET à évolution dynamique. Les auteurs de [92] proposent un protocole appelé QGrid qui sélectionne la zone géographique optimale vers la destination, en construisant une table de valeurs basée sur le flux de trafic pour sélectionner le véhicule le plus proche dans la grille. Ainsi, ils ont réalisé une simulation de traces de véhicules pour mesurer la performance des systèmes, ce qui a montré une amélioration du taux de paquets délivrés par le routage amélioré. Une autre étude a été menée dans [89] afin de gérer la topologie dynamique dans les VANETs, les auteurs ont amélioré le protocole PbQR qui utilise le Q-Learning pour sélectionner le prochain saut, en tenant compte de la qualité du véhicule voisin. L'algorithme amélioré maintient la fiabilité et la stabilité des liens de routage. Ce qui a influencé positivement sur les performances. La recherche dans [93] suggère un nouveau concept QMR basé sur l'optimisation multi-objectif et le Q-Learning, qui ajuste les paramètres de l'état du réseau. Ils ont utilisé un mécanisme d'exploration pour explorer les chemins de routage optimaux et l'algorithme de ré-estimation des nouvelles relations de voisinage dans le processus de sélection du prochain saut. Les résultats expérimentaux ont montré un PDR élevé, une faible consommation d'énergie et un faible délai. Les auteurs de [94] proposent un modèle d'apprentissage automatique pour estimer les informations de routage. Ils ont prédit l'emplacement du véhicule de destination et les délais de transmission pour obtenir un routage efficace des paquets. Pour ce faire, ils utilisent les unités de bord de route RSU (Road Side Unit) pour augmenter la précision et améliorer les performances du réseau. Dans [95], les auteurs proposent un nouveau système appelé MARS, qui estime les informations sur le trafic, en utilisant l'apprentissage automatique. En effet, il prédit le mouvement des véhicules et le chemin de routage avec la meilleure capacité de transmission de paquets. Le système peut sélectionner la bonne direction entre deux RSU et, par conséquent, améliorer les performances de routage pour les VANETs.

Les auteurs dans [96] présentent un nouveau protocole de routage QTAR basé sur l'algorithme Q-Learning. QTAR fournit un chemin de routage pour plusieurs segments de route en échangeant des paquets HELLO. Le routage est également destiné aux intersections, où une stratégie dynamique basée sur l'apprentissage des RSU est améliorée. L'algorithme a montré une performance fiable qui est apprise avec une réduction de la perte de paquets, du délai moyen de bout en bout, et un faible trafic en cas de mouvement rapide des véhicules. Les techniques d'apprentissage pour le contrôle des informations des véhicules et la modification de l'algorithme de routage pour ajuster le temps de communication, en minimisant le nombre de

sauts et la consommation d'énergie. Une route optimale est sélectionnée avec un faible coût d'infrastructure et un faible temps de réponse. L'algorithme d'apprentissage Q-learning nommé EAQR dans [97] est basé sur un modèle de maintenance de lien, qui prend le temps comme un paramètre clé garantissant l'efficacité du lien et une fonction heuristique qui accélère la mise à jour de la valeur Q. L'algorithme EAQR a amélioré l'efficacité de l'algorithme de routage en termes de PDR et de délai de bout en bout. Dans [98], QLBR est basé sur Q-Learning, qui vise à estimer la charge du réseau pour gérer le trafic. Ils ont également amélioré une fonction de contrôle pour un apprentissage rapide des valeurs de récompense ajustées dans un environnement dynamique. Les résultats de l'évaluation ont montré que QLBR obtient un meilleur PDR et une meilleure latence que les algorithmes existants. Les auteurs de [99] proposent un protocole ARPRL adaptatif pour modifier le réseau, en exploitant une fonction de valeur Q. L'algorithme prend en compte les informations relatives à la mobilité, à la position et à la direction des véhicules. Ainsi, il évite les boucles de routages causés par les paquets HELLO et la table de valeur Q. Les auteurs de [100] présentent un protocole géographique amélioré QNGPSR, qui réduit l'utilisation de la redirection en mode périmètre du protocole GPSR. Ils prennent des décisions sur les chemins de routage en se basant sur le Q-Learning. Les résultats de simulation montrent une amélioration de QNGPSR dans les scénarios de grande mobilité. Les mêmes auteurs ont amélioré TQNGPSR [101], qui vise à utiliser une stratégie d'équilibrage du trafic par Q-Learning pour les réseaux VANETs. Les auteurs évaluent la qualité de la liaison sans fil par apprentissage par renforcement dans le but de réduire la perte de paquets. Cela conduit à une amélioration du TQNGPSR. Les auteurs de [100], [101] ont considéré dans leurs analyses uniquement la variation du nombre des véhicules avec une variété limitée des métriques de routage. Ainsi, ils n'ont pas mis en œuvre d'autres protocoles géographiques pour une expérimentation et une comparaison d'évaluation des performances. Notre proposition QLG utilise un algorithme d'apprentissage par renforcement pour optimiser le protocole de routage géographique GPSR, qui est examiné avec de nombreuses métriques de routage basées sur la densité, la mobilité, le temps de communication accumulé et la durée de vie des liens. Bien qu'il y ait eu de nombreuses études sur l'application de l'apprentissage par renforcement. Ce dernier est basé sur les résultats des expériences acquises par l'exploration et donc, ce type d'apprentissage peut prendre un temps d'expérimentation supplémentaire afin d'obtenir des résultats significatifs.

Dans ce chapitre, le modèle Q-Learning est utilisé pour optimiser le protocole de routage géographique GPSR. L'algorithme amélioré contrôle et analyse le chemin de routage, en fonction de la durée de vie du lien, du temps d'accumulation, de la mobilité et de la densité des véhicules. En outre, notre amélioration utilise des techniques de Q-Learning pour trouver le véhicule voisin le plus proche pour transmettre les paquets et s'assurer d'avoir emprunté un chemin court pour un routage efficace. Des expérimentations ont été effectuées pour évaluer et comparer le protocole amélioré avec quatre autres protocoles basés sur la localisation, en termes de diverses métriques de routage dans l'environnement urbain des VANETs.

5.3 Modèle d'apprentissage Q-learning pour les VANETs

Les techniques d'intelligence artificielle, et en particulier celles de l'apprentissage automatique ont suscité un intérêt considérable de la part des chercheurs de différents domaines [102]. Parmi ces techniques, l'apprentissage par renforcement est étudié dans les systèmes sans fil car il offre une solution pour optimiser les paramètres du système par l'apprentissage de la zone de voisinage dans un réseau sans fil dynamique et compliqué [103]. En effet, l'apprentissage par renforcement est un domaine de l'apprentissage automatique, dans lequel les agents modifient leurs actions dans un environnement spécifique dont le but de maximiser les résultats. Pour atteindre cet objectif, les agents ajustent constamment leurs stratégies d'action en fonction de la récompense, qui représente le retour d'information de l'environnement. L'apprentissage par renforcement considère généralement la récompense, en estimant des fonctions de valeur d'état ou des fonctions de valeur d'action [104]. L'idée fondamentale du Q-learning est l'apprentissage à partir de l'intéraction avec l'environnement. Dans cette technique, l'agent choisit une action dans un état particulier en fonction de la fonction de renforcement. Cette fonction est constituée d'une récompense et d'une valeur future Q. Grâce au renforcement, les agents peuvent évaluer une action dans l'état actuel et faire une meilleure action à l'état suivant. La figure 5.1 montre l'interaction entre l'agent et l'environnement dans l'apprentissage par renforcement. En effet, les agents ajustent constamment leurs stratégies d'action grâce à une fonction de récompense, qui estime une fonction de valeur Q. Un agent vérifie l'état actuel du système, choisit une action parmi celles disponibles dans cet état, observe le résultat et reçoit un signal de renforcement. Et par la suite, l'agent renvoie un feedback sous forme de récompense qui est contrôlée par la valeur d'estimation Q.

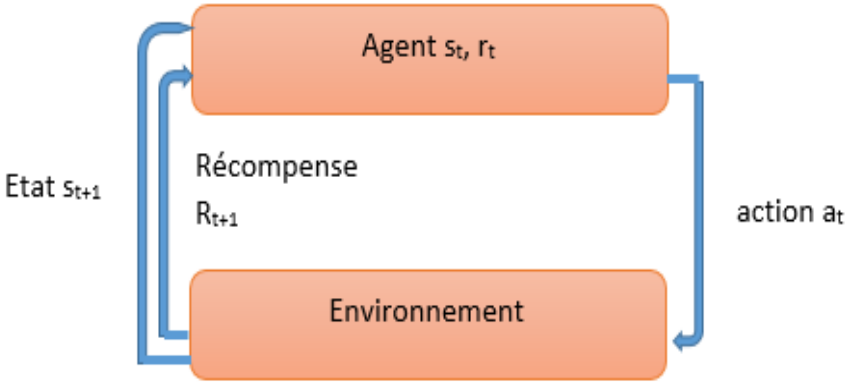


Figure 5.1 : L'intéraction entre l'agent et l'environnement dans le Q-learning

Dans notre routage QLG, si l'on considère un paquet provenant d'une source et dirigé vers une destination, l'ensemble du réseau est considéré comme un environnement, et chaque état de l'agent indique un véhicule qui détient le paquet. Par exemple, lorsqu'un paquet se trouve au nœud i, l'état actuel associé à ce paquet est s_i (state i). Une action $a_{i,j}$ représente la décision du paquet d'être transmis du nœud i au nœud voisin j. Par cette action, l'état de l'agent passe de s_i à s_j et l'agent reçoit une récompense pour cette action, et par conséquent, il met à jour la valeur Q.

5.4 Le protocole QLG (Q-Learning based Geographic stateless routing protocol)

5.4.1 Le mécanisme de fonctionnement du protocole de routage QLG

Dans cette section, nous décrivons plus en détail notre protocole de routage géographique amélioré : QLG (Q-Learning-based Geographic routing protocol), qui est principalement basé sur le protocole GPSR. En effet, l'idée du protocole QLG est d'utiliser le Q-Learning afin d'estimer la qualité des différents chemins de routage et de prendre des décisions de routage fiables sur la base de l'estimation de la valeur Q.

L'apprentissage par renforcement est la forme la plus pure d'apprentissage en intelligence artificielle, qui vise à trouver un chemin optimal sans connaître le modèle de transition de l'environnement. La forme la plus répandue de l'algorithme d'apprentissage par renforcement est le Q-Learning, qui utilise une action-valeur de la table Q, qui interagit constamment avec l'environnement pour apprendre une stratégie de contrôle optimale. Un agent est capable d'intéragir avec un système environnemental donné dans un état $\mathbf{s_t}$, qui réagit à une certaine action effectuée par l'agent et renvoie une fonction de récompense R_{t+1}. En effet, chaque véhicule maintient un tableau de la valeur Q. Lorsque le véhicule sélectionne le véhicule de saut suivant pour la transmission de paquet, il choisit directement le véhicule de saut suivant ayant la valeur Q la plus élevée. La valeur Q est mise à jour par l'échange périodique de paquets HELLO entre les véhicules, ce qui permet à l'algorithme de converger rapidement vers le chemin optimal et d'effectuer des changements topologiques dans les réseaux VANETs. L'équation de base (20) permet de calculer la valeur Q à un état **s** avec une action **a** au temps **t**:

$$Q(s_t,a_t) = (1- \alpha)\, Q(s_t,a_t) + \alpha\, [R_{t+1} + \lambda \max Q\,(s_{t+1},a_t)] \qquad (20)$$

Où $Q(s_t, a_t)$ représente la valeur Q à l'état actuel $\mathbf{s_t}$. Dans chaque état $\mathbf{s_t}$, un agent évalue la valeur d'une action **a**, après avoir effectué cette action, il obtient la valeur de récompense $\mathbf{R_{t+1}}$ et l'état du système change de l'état t à l'état **t+1**. $\boldsymbol{\alpha}$ est le taux d'apprentissage, $\boldsymbol{\lambda}$ est le facteur d'actualisation fixé dans l'intervalle [0,1] et appliqué pour la mise à jour de la fonction de récompense. Après plusieurs simulations sur la sélection de ces facteurs, nous avons fixé la valeur de $\boldsymbol{\alpha}$ et $\boldsymbol{\lambda}$ à 0,8 et 0,9, respectivement. La stratégie greedy du protocole QLG est utilisée pour prendre une action **a**, avec la valeur Q maximale qui sera mise à jour pour la prochaine itération. L'équation (21) mis à jour la valeur de la récompense à chaque itération :

$$R_{t+1} = W_1 \times LLT_{s,i} + W_2 \times T_i + W_3 \times Densité_v + W_4 \times \left(\frac{1}{Mobilité_v}\right) \qquad (21)$$

Avec : w_1, w_2, w_3 et w_4 sont les coefficients de pondération de la fonction de récompense, tel que :

$| w_1 | + | w_2 | + | w_3 | + | w_4 | = 1$

Et les autres métriques de routage sont définie ci-dessous et présentés en détail dans le chapitre 4 :

- **La durée de vie de la liaison :**

$$LLTs, i = R - \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}}{v_s - v_i} \quad (22)$$

- **Le temps de communication accumulé :**

$$T_i\,(t) = T_{i-1} + \Delta t \quad (23)$$

Avec : $\Delta t = t_i - t_{i-1}$

- **La densité des véhicules de la circulation :**

$$\text{Densité}_v = \frac{N_{voisin}}{R} \quad (24)$$

- **La mobilité du véhicule :**

$$\text{Mobilité}_v = |\text{vitesse}_s - \text{vitesse}_v| \quad (25)$$

La figure 5.2 et la figure 5.3 montrent le mécanisme du protocole GPSR et QLG amélioré, respectivement. Dans la figure 5.2, le protocole GPSR utilise la stratégie de transfert greedy, qui est la principale stratégie de routage utilisée pour sélectionner le prochain saut. Cette stratégie est appliquée en choisissant à chaque saut le voisin le plus proche de la destination finale. En effet, les paquets contiennent les coordonnées géographiques de leurs destinations et chaque véhicule connaît les positions géographiques de ses voisins. En effet, lorsqu'un véhicule doit envoyer un paquet à une destination spécifique, il recherche le candidat optimal dans sa portée radio du véhicule le plus proche de la destination (situé dans sa liste de voisins). Cette stratégie est adoptée tout au long du processus de routage, jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination finale. Cependant, l'échec de la stratégie greedy est obtenu lorsque le véhicule émetteur n'a pas de voisin pour transmettre le paquet à la destination. Par conséquent, des sauts supplémentaires seront utilisés pour surmonter la zone vide, ce qui entraînera un retard supplémentaire des données et donc une dégradation des performances. Dans la figure 5.3, lorsque la source (véhicule vert) veut envoyer le paquet HELLO au véhicule de destination, le véhicule émetteur **A** détermine à quel véhicule le paquet va être envoyé ? Notre protocole QLG amélioré utilise la table de voisinage pour estimer le véhicule qui va transmettre le paquet et sélectionne le véhicule voisin qui a la valeur Q maximale comme prochain saut. Ensuite, le protocole QLG transmet le paquet du véhicule **A** au véhicule **B** qui se situe dans la même portée radio et ayant la valeur Q maximale. Ensuite, le véhicule **B** choisit de transmettre le paquet au véhicule **D** car Q (D) > Q (C). Et par la suite, le véhicule **D** choisit le véhicule **E** ayant la valeur Q maximale (Q (E) > Q (F)). Après ce processus, le paquet est transmis au véhicule **H** jusqu'à

ce qu'il atteigne la destination. Chaque véhicule met périodiquement à jour sa table de valeurs Q à chaque réception des messages HELLO.

Le mécanisme de QLG présenté dans la figure 5.4 inclue l'estimation de la localisation du véhicule, la table des voisins contenant les coordonnées géographiques, la mobilité, la durée de vie du lien, le délai, la vitesse, la densité du véhicule et la valeur d'apprentissage Q. En effet, chaque véhicule du réseau possède un module d'apprentissage par renforcement pour déterminer dynamiquement le chemin optimal vers la destination. Le processus Q-Learning compare la fonction de récompense attendue de l'action disponible pour un état donné sans nécessiter un modèle spécifique de l'environnement VANET. Un agent vérifie l'état actuel du système, choisit une action parmi celles disponibles dans cet état, observe le résultat et reçoit un signal de renforcement. En utilisant la récompense de l'information sur l'environnement, qui estime la valeur Q, l'agent ajuste constamment sa stratégie d'action. Ensuite, il envoie un retour d'information sous la forme d'une fonction de récompense qui est contrôlée par la valeur Q estimée.

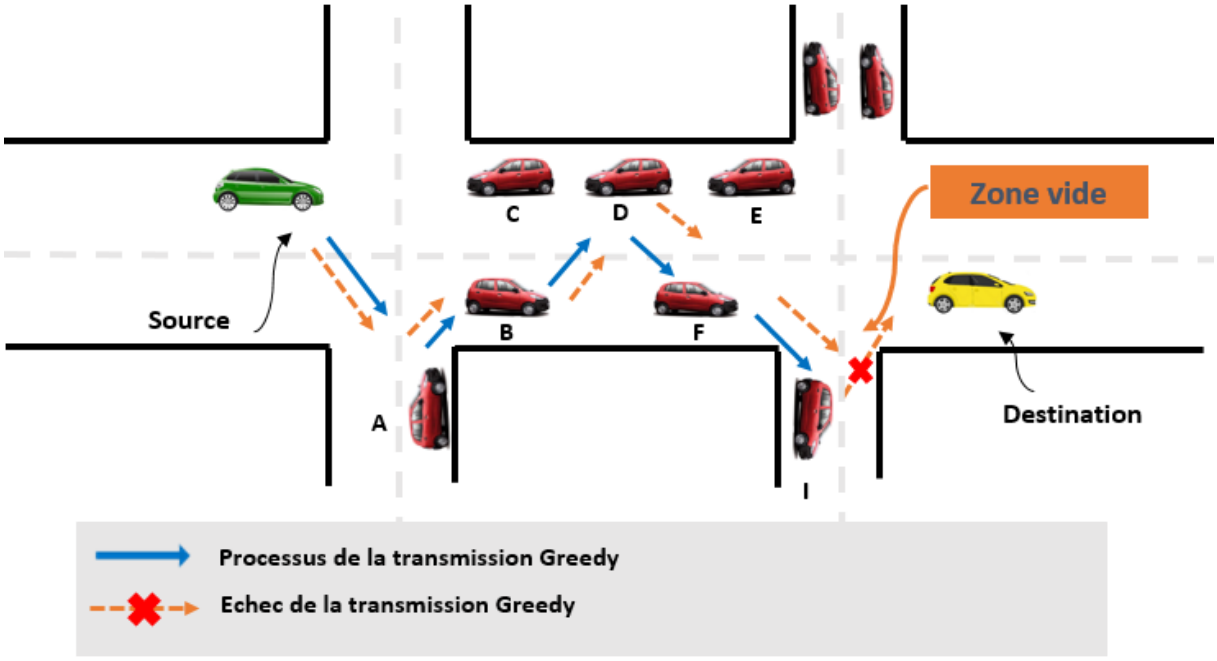


Figure 5.2 : Décision de la transmission du protocole GPSR

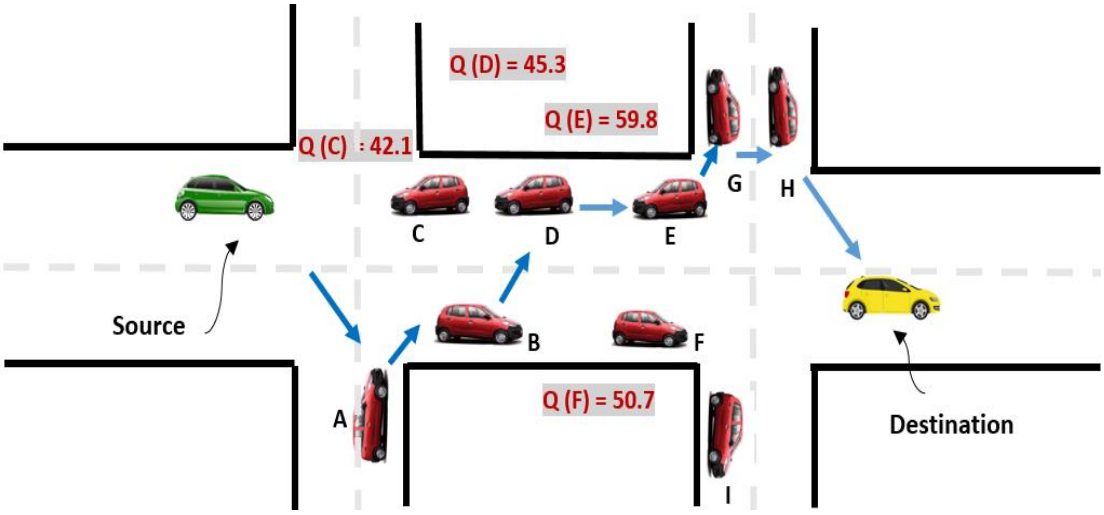


Figure 5.3 : Décision de la transmission du protocole amélioré QLG

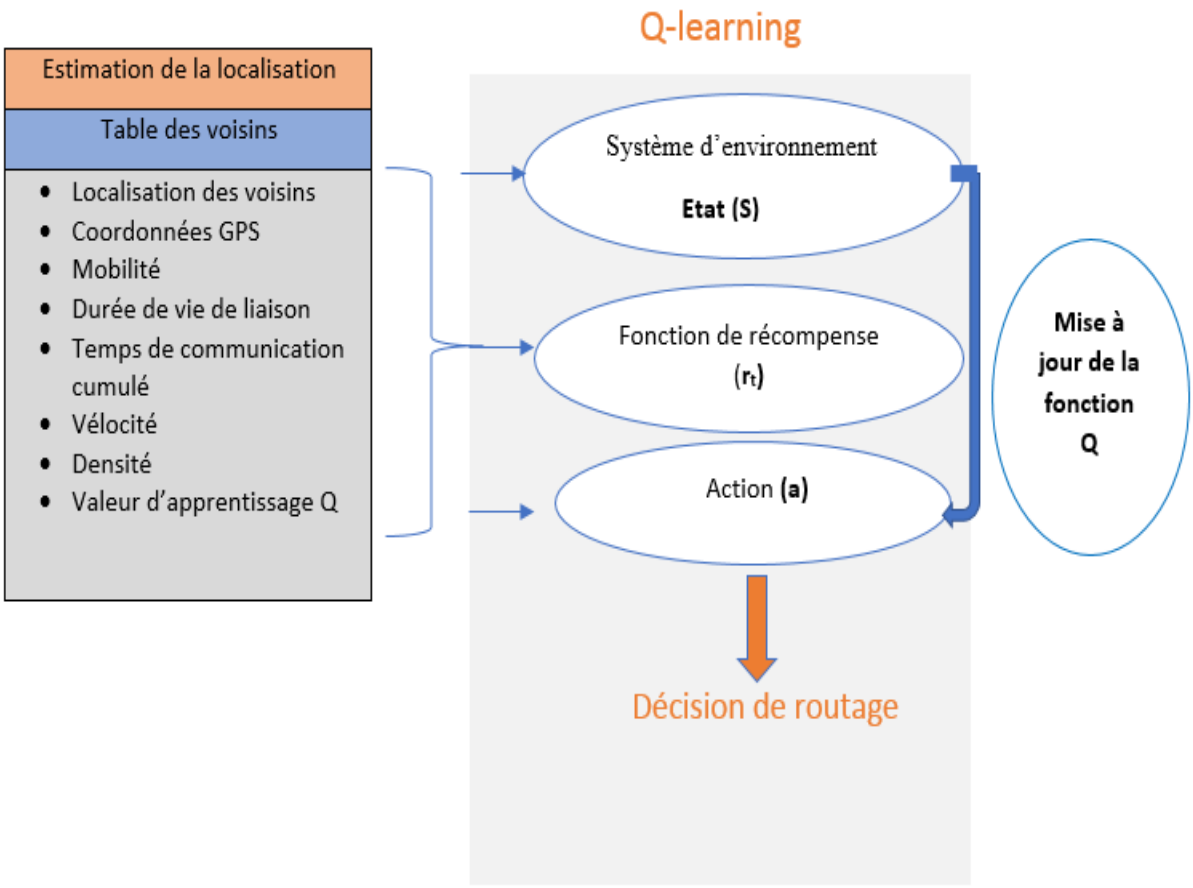


Figure 5.4 : Le mécanisme de fonctionnement du protocole amélioré QLG

5.4.2 Échange d'information entre voisins par le biais des messages HELLO

Comme le montre la figure 5.5, chaque paquet HELLO de QLG contient les champs suivants: l'identifiant unique du véhicule, les coordonnées X et Y du véhicule, l'horodatage, la vélocité, le nombre de voisins, le numéro de séquence, ainsi que la valeur maximale Q_{max}, qui sera la valeur optimale pour atteindre le prochain saut. Chaque véhicule diffuse périodiquement les paquets HELLO pour mettre à jour la valeur Q des véhicules voisins. Lorsqu'un véhicule reçoit le paquet de données, il change l'adresse du prochain saut, met à jour la table Q, et envoie le paquet au prochain saut. En effet, dans QLG, les messages HELLO sont étendus et diffusés pour échanger les informations nécessaires entre les véhicules afin de construire les tables des voisins. Lorsqu'un message HELLO est reçu par chaque voisin, il génère une nouvelle table de routage pour ce voisin. Dans QLG, chaque nœud acquiert des informations sur sa position, sa vitesse, le nombre de ses voisins et la valeur maximale Q. Par la suite, il les incorpore dans le paquet HELLO pour les transmettre à ses voisins à un saut. Le véhicule source, après avoir reçu les messages HELLO, calcule la vitesse moyenne, la durée de vie du lien, la mobilité et le temps de communication dans la fonction de récompense, et ensuite, il stocke la valeur Q avec le reste des informations sur les voisins. Enfin, à la réception des messages HELLO, la table des voisins sera mise à jour dans chaque véhicule et le paquet sera transmis au véhicule voisin qui a la plus grande valeur d'apprentissage Q.

L'algorithme 3 du protocole QLG vise à calculer la valeur Q afin de déterminer le chemin optimal vers la destination en mode greedy. Au début, chaque véhicule reçoit ses informations géographiques par GPS. En outre, lorsque le véhicule transmet le paquet HELLO aux véhicules voisins, il vérifie si la destination se trouve dans la portée de communication du véhicule actuel. Si c'est le cas, le paquet doit être envoyé à la destination directement. Sinon, tant que le paquet n'a pas atteint la destination et la liste des voisins n'est pas vide, la décision de routage sera prise sur la base du Q-Learning en calculant la valeur de Q par l'équation (20). Ensuite, la valeur Q maximale est sélectionnée en mettant à jour à chaque fois le paquet HELLO reçu. Et le nœud ayant la valeur Q maximale sera sélectionné comme prochain saut du protocole QLG. Dans notre étude, nous avons amélioré le protocole QLG dans le mode greedy uniquement. Parce que dans tous les scénarios que nous avons simulés, nous n'avons pas trouvé un passage en mode périmètre, avec les paramètres et l'algorithme Q-learning que nous avons utilisés. Pour cette raison, notre amélioration est basée sur le mode greedy tant que la probabilité de passer en mode périmètre est très faible pour notre proposition QLG. Ceci est dû à la haute densité des scénarios VANETs, et donc le véhicule est généralement entouré de voisins pour transmettre le paquet HELLO.

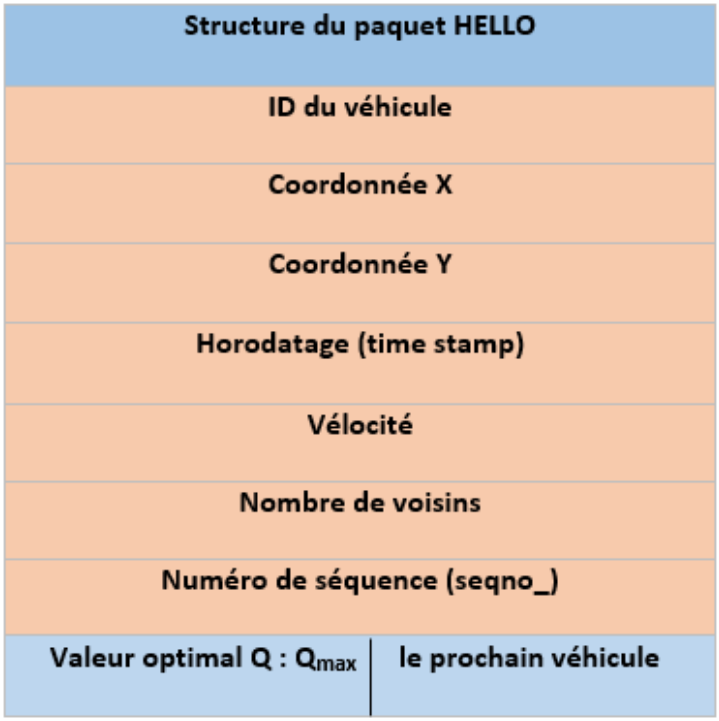


Figure 5.5 : Format des messages HELLO du protocole QLG

Algorithme 3 : Pseudo-code du protocole de routage QLG

Hypothèse : Chaque nœud obtient ses informations géographiques via le GPS

Entrée : Voisinage des nœuds, densité, mobilité, temps de communication accumulé, durée de vie du lien**.**

Sortie : Meilleur nœud voisin en tant que prochain saut

Pour chaque nœud, envoyer un paquet HELLO au nœud voisin

Si le véhicule de destination se trouve dans la zone de transmission du véhicule actuel **Alors**

Envoyer le message à la destination

Fin Si

Fin Pour

Si le mode de transfert Greed**y alors**

Tant que le paquet de données est envoyé, **faire**

Si la liste des nœuds voisins n'est pas vide, **alors**

Prendre une décision de routage basée sur l'apprentissage Q **(Equation 20)**

Si aucune information sur les voisins, **alors**

Initialiser la valeur Q du voisin (valeur Q =0)

Fin Si

Sélectionnez le voisin avec la plus grande valeur Q

Si un voisin est sélectionné pour transmettre un paquet de données, **alors**

Mise à jour de la valeur Q du nœud voisin

Fin Si

Fin Si

Fin Tant que

Sinon

Si le mode de transfert périmètre **alors**

Si le nœud source est meilleur que tous ses voisins **alors**

Sélectionner un nœud voisin en utilisant la règle de la main droite

Fin Si

Mise à jour du paquet puis transmission du paquet au prochain saut

Fin Si

5.5 Résultats des simulations

Les performances de QLG sont comparées avec celles des protocoles géographiques conçus pour les environnements urbains ; GPSR, MM-GPSR, MGPSR, et notre précédent protocole géographique amélioré WA-GPSR [105]. La simulation a été réalisée par NS-2 et le générateur de mobilité VANETMOBISIM. La mesure des performances comprend le taux de paquets délivrés (PDR), le délai de bout en bout, le coût de routage et l'efficacité du réseau. Les paramètres de simulation de notre travail sont présentés dans le tableau 5.1 et le tableau 5.2.

Tableau 5.1 : Paramètres généraux de la simulation

Paramètre	**Valeur**
Temps de simulation	300s
Zone de simulation	1000 m x 1000 m
Nombre de véhicules	20 ,30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100
Nombres de connexions	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40
Portée de transmission	250 m
Vélocité (km/h)	20 à 100
Taille des paquets de données	512 bytes
Feu de circulation	10 s
Protocole MAC	IEEE802.11p
Modèle de propagation radio	Two-Ray-Ground
α , λ	0.8, 0.9

Tableau 5.2 : Paramètres du modèle de mobilité microscopique

Paramètre	**Description**	**Valeur**
I	Longueur des véhicules	5 m
A	Accélération maximale	0.6 m/s²
B	Décélération	0.5 m/s²
A_{th}	Seuil d'accélération	0.2 m/s²
S_0	Distance de brouillage	2 m
T	Distance de sécurité	1.5 s
Séjour minimum	Durée minimale du séjour du véhicule	5 s
Séjour maximum	Durée maximale du séjour du véhicule	30 s

5.5.1 Scénario 1 : résultats de la simulation pour la variation du nombre de connexions

La figure 5.6 montre que la charge de trafic CBR a un impact sur le PDR pour les protocoles de routage géographique simulés. Comme nous pouvons le constater, le meilleur PDR est pour le protocole QLG dans presque tous les cas, puisqu'il garantit un PDR élevé. En effet, QLG atteint un taux de 98% pour un CBR faible de 10 connexions et 75% pour un CBR élevé de 40 connexions. Ceci s'explique par l'utilisation du modèle Q-Learning basé sur la fonction de récompense, qui explore un chemin stable et détermine le prochain véhicule optimal. Sauf pour 15 connexions, le taux est légèrement diminué mais cette dégradation sera compensée par l'amélioration du délai de bout en bout dans la figure 5.6. Le protocole QLG est suivi par le protocole WA-GPSR qui, offre un taux acceptable pour la majorité des nombres de connexions. Les performances des protocoles MGPSR et GPSR sont faibles, en particulier, le protocole GPSR ne gère pas la grande mobilité des véhicules. Nous pouvons constater, à partir des résultats obtenus avec notre algorithme basé sur l'apprentissage par renforcement, que QLG est plus performant que les autres protocoles géographiques pour la majorité des cas. L'apprentissage utilisé dans notre travail incite le nœud à sélectionner le prochain véhicule optimal et met à jour la valeur Q, ce qui accélère la vitesse de convergence de l'apprentissage.

Ces résultats prouvent la robustesse de notre algorithme, qui favorise le routage des paquets et améliore les performances de communication.

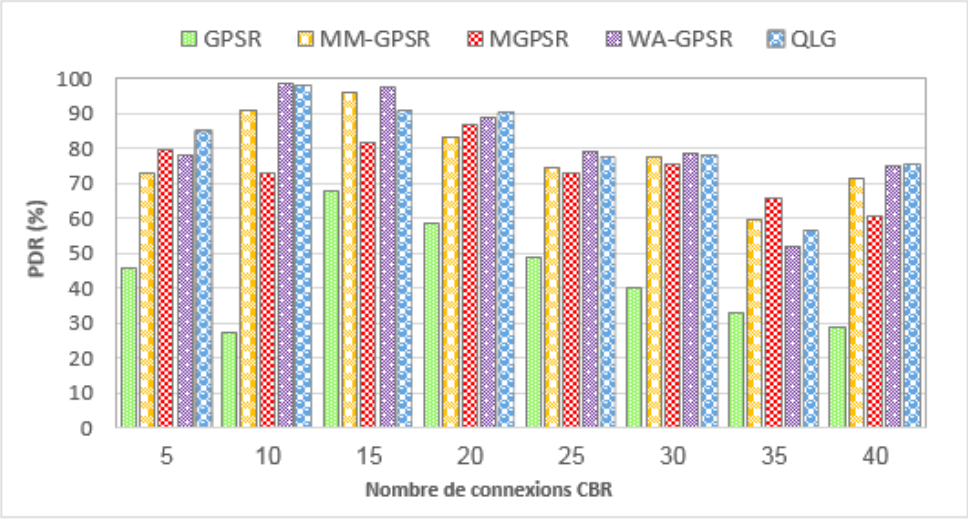


Figure 5.6 : Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de connexions CBR

D'après la figure 5.7, nous pouvons voir que lorsque la charge de trafic de données des connexions CBR augmente, le délai de QLG reste inférieur à celui des autres protocoles simulés. En effet, les autres protocoles évalués ont un délai relativement élevé dans le cas d'une connexion CBR élevée. Puisque les informations dans le paquet envoyé à la destination sont mal interprétées et le paquet rencontre des difficultés à trouver la destination pendant un temps optimal. Nous pouvons voir que le protocole GPSR a le délai le plus élevé par rapport aux autres protocoles. Il atteint 2,8 ms avec 30 connexions et dépasse 3 ms à une charge de 40 connexions. Suivi par le protocole MM-GPSR et MGPSR. QLG a réussi à maintenir un délai minimum, car

notre algorithme guide les véhicules pour utiliser le chemin optimal pour délivrer les paquets en utilisant l'heuristique Q-Learning et la fonction de récompense.

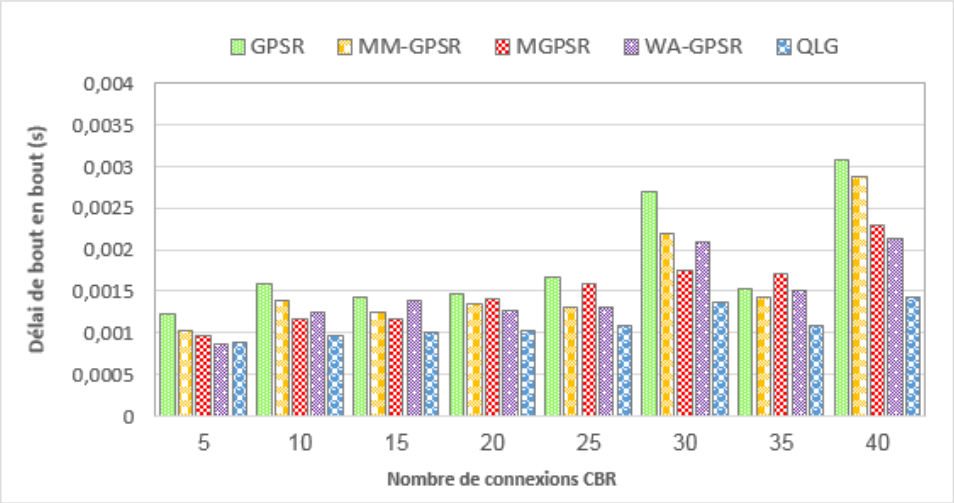


Figure 5.7 : Le délai de bout en bout en fonction du nombre de connexions CBR

Le coût de routage en fonction de la connexion CBR dans le scénario urbain est illustré à la figure 5.8. Dans l'ensemble, les résultats de la simulation confirment que notre protocole QLG amélioré assure de faibles coûts de routage par rapport aux autres protocoles géographiques évalués dans le même scénario. Le taux des messages de contrôle est proportionnel à la charge de trafic CBR. En effet, lorsque la charge de trafic CBR augmente, le coût de routage tend à diminuer pour tous les protocoles de routage. Dans ce scénario, nous remarquons que les cinq protocoles génèrent moins de paquets de routage. Le coût de routage de QLG est faible en comparaison avec GPSR, MM-GPSR, MGPSR, et WA-GPSR. Sauf pour une charge de 15 et 35 connexions, QLG est un peu plus élevé de 2% que le GPSR traditionnel. La principale raison de cette différence mineure est que QLG met à jour la table des valeurs Q par le biais du paquet HELLO, qui ne peut pas refléter rapidement les changements dans la topologie du VANET, ce qui augmente le nombre de paquets de contrôle.

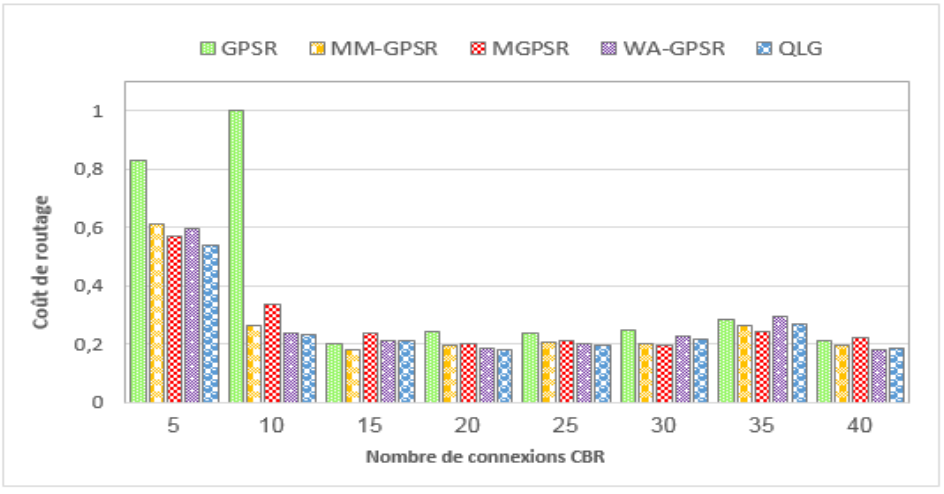


Figure 5.8 : Le coût de routage en fonction du nombre de connexions CBR

La figure 5.9 illustre l'efficacité du réseau en fonction du nombre de connexions dans l'environnement urbain. Comme l'illustre la figure 5.9, l'efficacité du réseau des protocoles semble augmenter avec la charge de trafic CBR. QLG obtient un taux qui dépasse un pourcentage de 75% pour tous les nombres de connexions. Sous une faible charge de trafic, QLG atteint 75% avec 5 connexions, 87% avec 10 connexions, et également 82% pour 15 connexions. De même, MM-GPSR, MGPSR obtient un taux de 86%, 65%, respectivement, pour 5 connexions. De plus, même avec une charge de trafic élevée de 40 connexions, QLG parvient à obtenir un taux de 89% par rapport à GPSR, MGPSR, MM-GPSR, et WA-GPSR, qui obtiennent une efficacité de 75%, 79%, 87%, et 88%, respectivement. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que notre algorithme peut obtenir un chemin plus court et plus stable, en introduisant une fonction heuristique et une fonction d'évaluation basée sur le Q-Learning. Cela introduit un modèle de maintenance des liens qui est moins affecté par la topologie dynamique et garantit donc une grande efficacité dans le réseau.

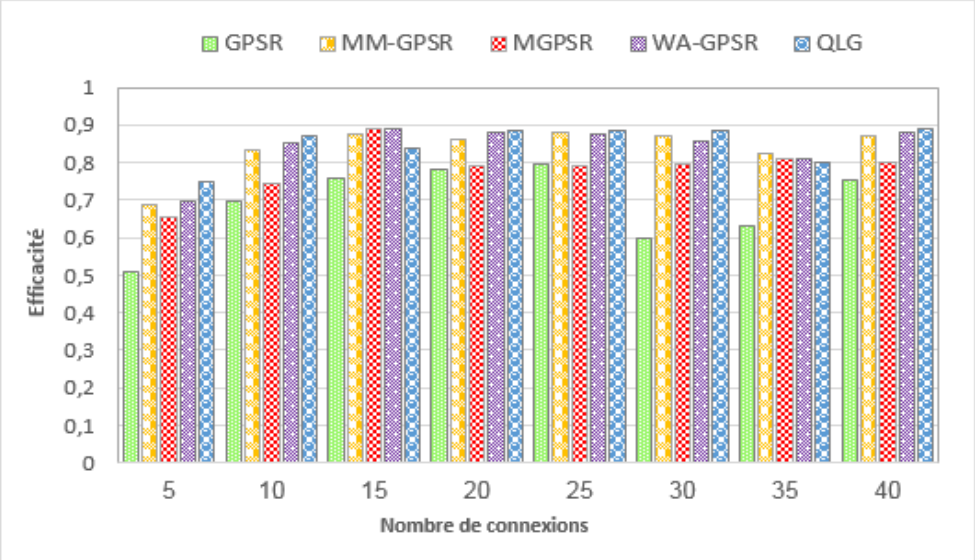


Figure 5.9 : L'efficacité en fonction du nombre de connexions CBR

5.5.2 Scénario 2 : Résultats de simulation pour la variation de la densité des véhicules

Dans cette section, nous allons étudier les performances de QLG par rapport aux autres protocoles géographiques et nous avons fait varier le nombre de véhicules dans le réseau urbain de 20 à 100 véhicules avec un pas de 10. En outre, nous avons choisi le nombre de connexions fixé à 15 et les paramètres α et λ, respectivement, à 0,8 et 0,9.

Nous pouvons observer sur la figure 5.10 que la tendance du PDR des protocoles évalués augmente lorsque le nombre de véhicules est compris entre 40 et 70 et diminue lorsque la densité dépasse 70 véhicules. Ceci est dû, à la complexité de l'environnement urbain des VANETs qui change fréquemment et la connectivité du réseau augmente lorsque la densité de véhicules augmente également. En effet, lorsque la densité des véhicules augmente, le PDR diminue en raison de la perte de paquets lorsqu'une rupture de route se produit. Le PDR du protocole QLG est plus élevé que celui des autres protocoles géographiques, en particulier dans

les scénarios de densité élevée. Cela est dû à l'exploitation des métriques de routage, en particulier les métriques de densité et de mobilité dans la fonction de récompense, qui explorent un chemin stable et détermine facilement le prochain véhicule optimal. En effet, QLG sélectionne le prochain véhicule optimal pour transmettre le paquet et met à jour la valeur Q, ce qui accélère la vitesse de convergence de l'apprentissage. Par conséquent, il favorise la transmission des paquets au véhicule de destination et améliore les performances de communication. Les protocoles GPSR et MGPSR ont un PDR plus faible dans la plupart des cas, compte tenu de la mobilité élevée et de la vitesse intense des VANETs. Les deux protocoles GPSR et MGPSR ne peuvent pas trouver un chemin optimal, car ils utilisent uniquement des informations de position géographique des voisins et de la destination, ce qui rend les informations inexactes et périmées, et l'algorithme tombe donc dans un optimum local.

Comme nous pouvons observer sur la figure 5.11, le protocole MGPSR dépasse 8 ms pour 90 et 100 véhicules en termes de délai de bout en bout. En revanche, notre protocole QLG améliore le délai pour tous les nombres de densités, sauf pour 100 véhicules ; il obtient une faible dégradation de délai. En effet, nous pouvons expliquer cette faible dégradation du délai par la taille de la table de valeurs Q, qui contient le nombre de voisins. Par conséquent, le délai des messages HELLO dépend du nombre de véhicules voisins, ce qui peut affecter les performances en termes de délai de bout en bout. Cependant, il est acceptable par rapport aux autres protocoles de routage. Cela s'explique principalement par le fait que QLG tient compte du temps d'accumulation, de la densité des véhicules, de la durée de vie des liaisons et de la mobilité des véhicules lors de la sélection du saut suivant. De plus, l'algorithme Q-Learning explore un chemin avec une courte latence en raison de la fonction d'évaluation utilisée et, par conséquent, il présente un chemin plus stable.

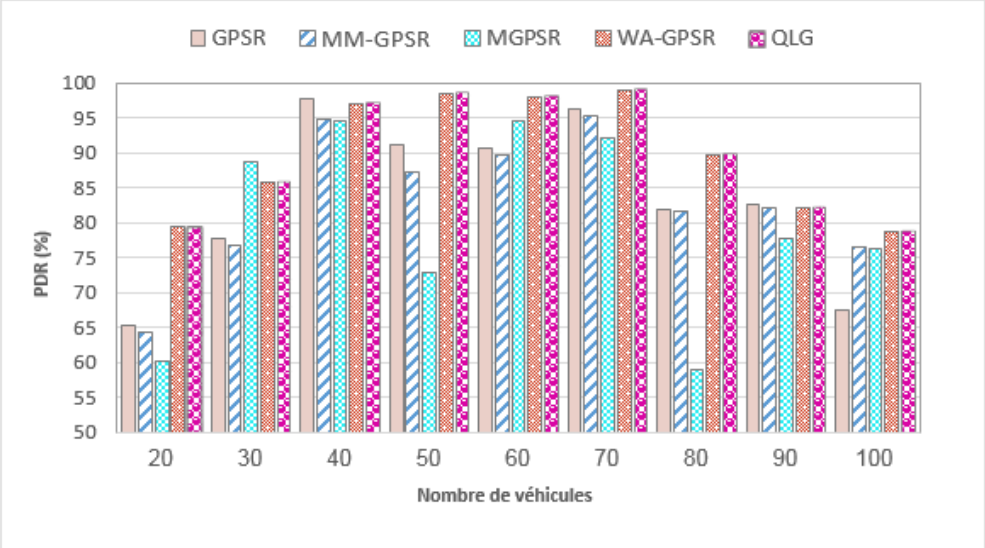


Figure 5.10 : Taux de paquets délivrés en fonction du nombre de densités

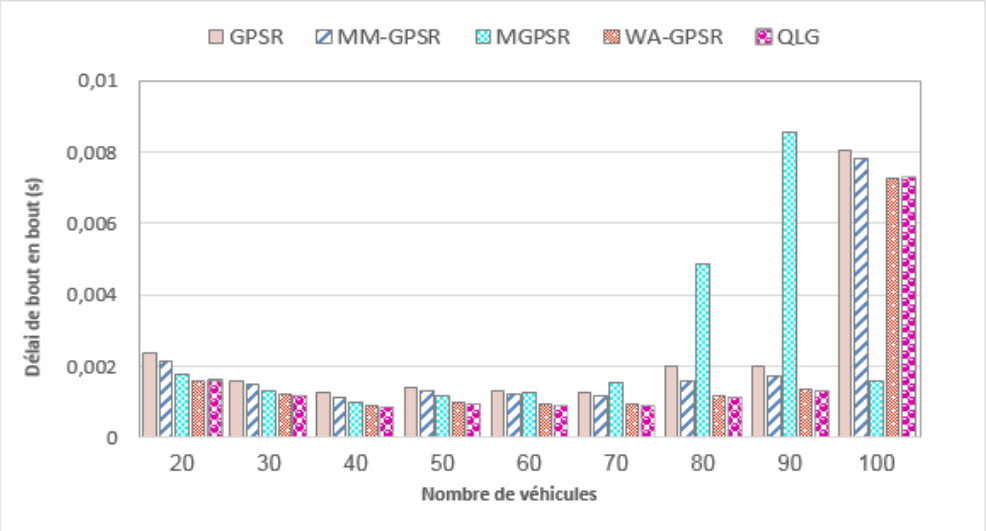


Figure 5.11 : Le délai de bout en bout en fonction du nombre de densités

La figure 5.12 montre le coût de routage de chaque protocole géographique pour différents nombres de densité. Nous pouvons voir que le coût de routage a tendance à augmenter avec l'augmentation de la densité. Ceci est dû à l'envoi périodique des messages HELLO pour les différents protocoles, ce qui provoque une congestion de canal, et donc une augmentation du coût de routage dans le réseau urbain. Les protocoles MM-GPSR et GPSR obtiennent un coût élevé par rapport aux protocoles WA-GPSR et QLG pour la majorité des nombres de densité. Ceci est normal car le protocole MM-GPSR contient des champs supplémentaires dans son paquet HELLO et avec la mise à jour continue, plus de charges de trafic se produisent dans le réseau. En outre, le coût du protocole MM-GPSR est élevé, comparé à celui du GPSR, avec 3 % et 2 % pour 50 et 70 véhicules, respectivement. Dans certains cas de densité, le protocole QLG amélioré nécessite un surcoût supplémentaire dû au calcul de la table d'apprentissage Q. Le coût supplémentaire causé par les messages de contrôle tend à augmenter avec l'augmentation du nombre de véhicules et chaque véhicule doit maintenir une table dont la taille est celle des voisins à un saut, où l'on peut avoir un coût supplémentaire. En général, les résultats de la simulation confirment que notre protocole QLG améliore efficacement les performances en introduisant un petit coût de routage supplémentaire.

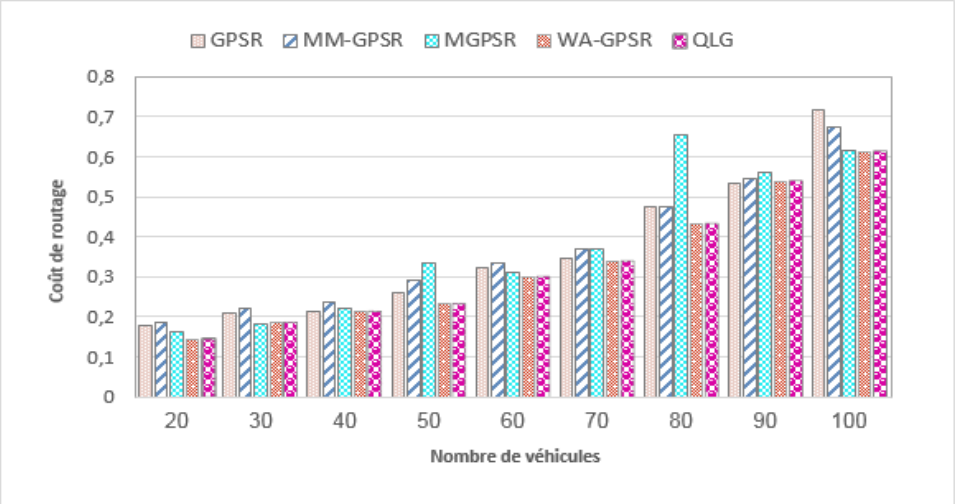


Figure 5.12 : Le coût de routage en fonction du nombre de véhicules

La figure 5.13 montre l'efficacité du réseau des protocoles de routage géographique pour plusieurs densités allant de 20 à 100 véhicules. Nous constatons que le protocole QLG maintient une efficacité de 67 % pour tous les nombres de densité, ce qui explique l'amélioration significative de l'efficacité du réseau avec l'augmentation des nombres de densité. L'efficacité du réseau augmente à faible densité et diminue avec l'augmentation du nombre de véhicules. En outre, l'efficacité du réseau de MM-GPSR et MGPSR augmente, respectivement, avec un taux de 89% et 88% pour 20 véhicules. Ensuite, le taux de ces deux protocoles diminue, respectivement, de 9% et 7% pour 40 véhicules et aussi diminue de 18% et 13% pour 80 véhicules. Nous remarquons pour une faible densité de 20 véhicules que notre protocole QLG augmente l'efficacité du réseau puis, diminue de 6% pour 50 véhicules. De plus, ce phénomène est attendu car le processus de Q-Learning nécessite plusieurs métriques de routage et paramètres de réseau, qui affectent les performances. Néanmoins, les résultats fournis par notre algorithme QLG sont toujours meilleurs que les quatre autres protocoles pour tous les scénarios urbains. En conséquence, une meilleure qualité de lien est fournie et la probabilité d'échec de route est réduite, ce qui conduit à une augmentation du taux d'efficacité du réseau.

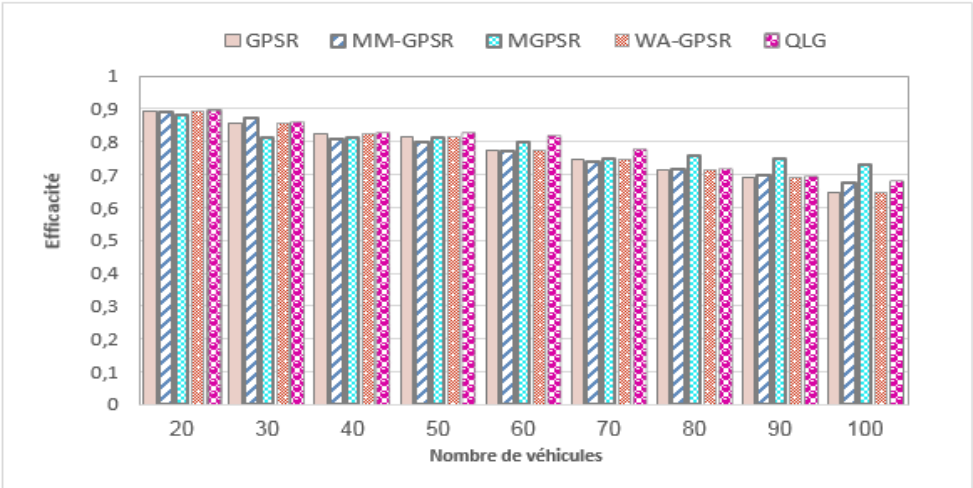


Figure 5.13 : L'efficacité en fonction du nombre de densités

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une variante améliorée du protocole GPSR appelée QLG. Cette variante intègre plusieurs mécanismes de routage basés sur l'apprentissage Q-Learning pour les réseaux ad-hoc véhiculaires (VANETs). Nous avons exploité plusieurs métriques de routage et paramètres supplémentaires pour obtenir un chemin de routage optimal et stable. Les résultats expérimentaux augmentent les performances de routage et la qualité de service. En substance, le protocole QLG augmente le taux de paquets délivrés (PDR), réduit le délai de bout en bout et le coût de routage, ainsi, il augmente l'efficacité du réseau par rapport aux protocoles de routage GPSR, MGPSR, MM-GPSR et notre précédent protocole amélioré WA-GPSR. Notre étude a prouvé que les améliorations proposées peuvent être utilisées pour prévenir une variété de problèmes et de perturbations résultant des réseaux VANETs.

Conclusion et perspectives

L’objectif principal de ce travail de thèse est d’améliorer les performances des protocoles de routage des réseaux VANETs en vue de répondre aux besoins des différentes applications véhiculaires en termes de qualité de services tout en respectant les spécificités des VANETs. Nous avons présenté une recherche exhaustive des différentes catégories des protocoles de routage VANETs, et nous avons étudié un modèle de simulation basé sur deux types de trafic de données. Une grande variété des protocoles de routage sont comparés dans des environnements réalistes sous différentes conditions en termes de qualité de services.

De nombreux protocoles de routage ont été développés dans la littérature pour les VANETs, qui sont classés selon plusieurs catégories pour fournir des chemins optimaux entre les nœuds du réseau. La plupart des protocoles de routage exploitent d'une part, les informations de la topologie du réseau qui définissent les liens de communication entre l'émetteur et le récepteur et, d'autre part, les informations basées sur la position géographique où chaque nœud connaît la position de la destination, la position des voisins et sa propre position. Néanmoins, le problème principal des VANETs est l'exploitation d'environnements hautement dynamiques, où la vitesse élevée des véhicules et la déconnexion des liaisons entraînent des fluctuations importantes dans le réseau.

Malgré les efforts des chercheurs et les différents travaux réalisés pour évaluer la performance des protocoles de routage dans les VANETs. Ce domaine demeure encore attractif et des problèmes attendent la résolution par les chercheurs. De ce fait, nous avons commencé nos travaux de recherche par une étude et une analyse des performances de sept protocoles de routage ; OLSR, AODV, DSR, GPSR, ZRP, AOMDV et MDART dans deux environnements confrontés à de multiples obstacles. En effet, nous avons évalué l’impact de la densité des véhicules et de la charge du trafic sur le comportement de ces protocoles. Les résultats de la simulation ont montré qu'il n'y a pas de protocole de routage favorisé par rapport aux autres dans tous les scénarios et les critères d'évaluation. Cependant, le protocole de routage géographique GPSR se classe parmi les meilleurs protocoles dans un environnement VANET et présente un bon potentiel d'amélioration du routage et de la QoS. Au regard des résultats observés selon lesquels les protocoles de routage géographique sont la meilleure solution pour le routage dans les VANETs, nous avons accordé une attention particulière au protocole GPSR pour améliorer ses performances et sa QoS.

Le protocole GPSR se base sur la position géographique obtenue à l'aide d'un système de positionnement tel que le GPS. Il utilise deux modes de transmission de paquets : greedy et périmètre. Le premier mode greedy consiste à choisir comme prochain saut le véhicule le plus proche de la destination. Toutefois, si le nœud émetteur se trouve à une distance plus courte de la destination que tous ses voisins, le deuxième mode périmètre est appliqué. Ceci consiste à utiliser la règle de la main droite pour acheminer les données autour du périmètre jusqu'à atteindre un nœud proche de la destination. Nous supposons dans notre travail que la source

connaît l'emplacement géographique de la destination. Cependant, la qualité de la transmission des données entre les véhicules est affectée par la grande mobilité et les vitesses intenses, qui influencent grandement l'efficacité des décisions de routage. La précision de la position géographique des voisins influence grandement la performance des protocoles dans les VANETs. Ceci nous a conduits à prendre en compte différentes mesures de routage et à assigner un poids obtenu à partir d'un grand nombre de configurations de paramètres. Nous avons comparé la performance de notre amélioration WA-GPSR avec le protocole MM-GPSR, MGPSR et le protocole original GPSR. Grâce aux simulations réalisées pour analyser l'impact de la densité et de la charge de trafic de données sur le comportement des protocoles proposés dans l'environnement urbain. Nous avons constaté que WA-GPSR a la capacité d'augmenter les performances de la qualité de service. Cela prouve que les techniques suggérées évitent différents problèmes résultants des caractéristiques délicates des VANETs.

Les imprévus qui peuvent se produire ne sont pas pris en considération, ce qui peut influencer négativement la précision que nous estimons avoir. En conséquence, nous avons proposé par la suite d'améliorer le protocole de routage géographique GPSR en se basant sur l'intelligence artificielle, qui est adaptée à un environnement en évolution rapide tel que les VANETs. Nous avons proposé d'utiliser les techniques de l'apprentissage Q-Learning afin de contrôler et d'analyser le chemin de routage en fonction de plusieurs métriques de routage. Nous avons proposé le protocole amélioré QLG. En effet, les techniques de Q-Learning utilisées permettent de trouver le véhicule voisin le plus proche et d'assurer un chemin court afin d'avoir un routage efficace. Pour ce faire, chaque véhicule maintient un tableau de la valeur Q. Lorsque le véhicule veut sélectionner le véhicule de saut suivant pour la transmission de paquets, il choisit directement celui ayant la valeur Q la plus élevée. La valeur Q sera mise à jour par l'échange périodique des paquets HELLO entre les véhicules.

Grâce aux expérimentations effectuées sous NS-2, nous avons montré que l'application du modèle d'apprentissage Q-learning avec le protocole GPSR permet d'améliorer les performances des VANETs en termes de QoS dans un environnement très dynamique.

Plusieurs extensions peuvent faire l'objet de travaux futurs de cette thèse. Parmi les perspectives envisagées, nous citons :

- L'extension du protocole QLG pour des applications multimédia,
- L'application du Q-learning sur d'autres protocoles de routage géographiques,
- La réalisation des expérimentations réelles et des simulations avec d'autres Modèles de mobilité pour tester encore plus le comportement du protocole QLG, et
- Explorer d'autres techniques d'intelligence artificielle pour améliorer d'avantage le protocole QLG.

Bibliographie

[1] Royer, Elizabeth M., and Chai-Keong Toh. "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks." *IEEE personal communications* 6.2 (1999): pp. 46-55.

[2] ISO, TC. "204,“Intelligent transport systems-Communications Access for Land Mobiles (CALM)-Architecture,” ISO 21217." *International Organization for Standardization* (2013).

[3] Campolo, Claudia, Antonella Molinaro, and Riccardo Scopigno. "Vehicular ad hoc Networks." *Standards, Solutions, and Research* (2015).

[4] F. D. da Cunha, A. Boukerche, L. Villas, A. C. Viana, and A. A. F. Loureiro, “Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications,” INRIA Saclay ; INRIA, report, Mar. 2014.

[5] Ben Chaabene, S., Yeferny, T., Ben Yahia, S. (2020). A Roadside Unit Placement Scheme for Vehicular Ad-hoc Networks. In: Barolli, L., Takizawa, M., Xhafa, F., Enokido, T. (eds) Advanced Information Networking and Applications. AINA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 926. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15032-7_52.

[6] Eze, E. C., Zhang, S. J., Liu, E. J., & Eze, J. C. (2016). Advances in vehicular ad-hoc networks (VANETs): Challenges and road-map for future development. International Journal of Automation and Computing, 13(1), 1-18.

[7] R. Ghebleh, “A comparative classification of information dissemination approaches in vehicular ad hoc networks from distinctive viewpoints: A survey,” Comput. Netw., vol. 131, pp. 15–37, 2018.

[8] Liang, W., Li, Z., Zhang, H., Wang, S., & Bie, R. (2015). Vehicular ad hoc networks: architectures, research issues, methodologies, challenges, and trends. International Journal of Distributed Sensor Networks, 11(8), 745303.

[9] J. Jakubiak, Y. Koucheryavy, “State of the art and research challenges for vanets, in: Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE, 2008, pp. 912 -916.”

[10] Toor, Y., Muhlethaler, P., Laouiti, A., & De La Fortelle, A. (2008). Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues. IEEE communications surveys & tutorials, 10(3), 74-88.

[11] Y. Toor, P. Muhlethaler, and A. Laouiti, “‘Vehicle Ad Hoc networks: applications and related technical issues,’ IEEE Commun. Surv. Tutor., vol. 10, no. 3, pp. 74–88, 2008.”

[12] Commun, CAMP Vehicle Safety. "Consortium,“Vehicle Safety Communications Project: Task 3 Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC,” Nat’l." *Highway Traffic Safety Administration, US Dept. of Transportation, Washington, DC* (2005).

[13] Z. Rawashdeh, S. Mahmud, “Intersection collision avoidance system architecture, in: Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE, IEEE, pp. 493-494.”

[14] Karagiannis, G., & Networking, V. (2011). A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions, communications surveys & tutorials. IEEE, 13(4), 584-616.

[15] Al-Sultan, S., Al-Doori, M. M., Al-Bayatti, A. H., & Zedan, H. (2014). A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. Journal of network and computer applications, 37, 380-392.

[16] La*berteaux, Kenneth, and Hannes Hartenstein, eds. VANET: vehicular applications and inter-networking technologies. John Wiley & Sons, 2009.*

[17] Lochert, C., Hartenstein, H., Tian, J., Fussler, H., Hermann, D., & Mauve, M. (2003, June). A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No. 03TH8683) (pp. 156-161). IEEE.

[18] Wolfson, Ouri, Bo Xu, and Hyung Ju Cho. "Multimedia traffic information in vehicular networks." Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. 2009.

[19] Navas, Julio C., and Tomasz Imielinski. "GeoCast—Geographic addressing and routing." *Proceedings of the 3rd annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. 1997.

[20] Abdelgader, Abdeldime MS, and Wu Lenan. "The physical layer of the IEEE 802.11 p WAVE communication standard: The specifications and challenges." *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*. Vol. 2. 2014.

[21] Jiang, Daniel, and Luca Delgrossi. "IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments." *VTC Spring 2008-IEEE vehicular technology conference*. IEEE, 2008.

[22] Li, Yunxin Jeff. "An overview of the DSRC/WAVE technology." *International conference on heterogeneous networking for quality, reliability, security and robustness*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

[23] Belamri, Fatima, Samra Boulfekhar, and Djamil Aissani. "A survey on QoS routing protocols in Vehicular Ad Hoc Network (VANET)." *Telecommunication Systems* 78.1 (2021): 117-153.

[24] Tonguz, Ozan K., Nawaporn Wisitpongphan, and Fan Bai. "DV-CAST: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks." *IEEE Wireless Communications* 17.2 (2010): pp. 47-57.

[25] Chen, Yuh-Shyan, Yun-Wei Lin, and Sing-Ling Lee. "A mobicast routing protocol in vehicular ad-hoc networks." *Mobile Networks and Applications* 15.1 (2010): pp. 20-35.

[26] Saleet, Hanan, and Otman Basir. "Location-based message aggregation in vehicular ad hoc networks." *2007 IEEE Globecom Workshops*. IEEE, 2007.

[27] Venkatesan, T. Prasanna, P. Rajakumar, and A. Pitchaikkannu. "Overview of Proactive Routing protocols in MANET." *2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. IEEE, 2014.

[28] D*UA, Amit, KUMAR, Neeraj, et BAWA, Seema. A systematic review on routing protocols for vehicular ad hoc networks. Vehicular Communications, 2014, vol. 1, no 1, p. 33-52.*

[29]M. Altayeb and I. Mahgoub, “A Survey of Vehicular Ad hoc Networks Routing Protocols,” *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 3, no. 3, pp. 829–846, Jul. 2013.

[30] Das, S. R., E. M. Belding-Royer, and C. E. Perkins. "Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing protocol." *RFC 3561* (2003).

[31] Shrivastava, Prashant Kumar, and L. K. Vishwamitra. "Comparative analysis of proactive and reactive routing protocols in VANET environment." *Measurement: Sensors* 16 (2021).

[32] Rajput, U., Abbas, F., Eun, H., & Oh, H.. A hybrid approach for efficient privacy-preserving authentication in VANET. IEEE Access, 5, 12014-12030 (2017).

[33] Haas, Z. "ZRP: The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks." Internet Draft draft-zone-routing-protocol-01. txt (1998).

[34] Srivastava, Ankita, Arun Prakash, and Rajeev Tripathi. "Location based routing protocols in VANET: Issues and existing solutions." Vehicular Communications 23 (2020).

[35] Liu, J., Wan, J., Wang, Q., Deng, P., Zhou, K., & Qiao, Y.. A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks. Telecommunication Systems, 62(1), 15-30 (2016).

[36] Balasubramani, L. Karthikeyan, and V. Deepalakshmi, “Comparative Study on Non-delay Tolerant Routing Protocols in Vehicular Networks,” Procedia Comput. Sci., vol. 50, pp. 252–257, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.04.052.

[37] Loo, Jonathan, Jaime Lloret Mauri, and Jesús Hamilton Ortiz. "Mobile ad hoc networks: current status and future trends." (2011): pp. 538.

[38] V. Bondre and S. Dorle, “Design and performance evaluation of AOMDV routing protocol for VANET,” in *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)*, Sep. 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/IC4.2015.7375523.

[39] D. B. Johnson and D. A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks,” in *Mobile Computing*, T. Imielinski and H. F. Korth, Eds. Boston, MA: Springer US, 1996, pp. 153–181.

[40] Clausen, Thomas, and Philippe Jacquet, eds. "RFC3626: Optimized link state routing protocol (OLSR)." (2003).

[41] Boushaba, A., Benabbou, A., Benabbou, R., Zahi, A., & Oumsis, M. Optimization on OLSR protocol for reducing topology control packets. In 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems (pp. 539-544). IEEE (2012).

[42] Boushaba, A., Benabbou, A., Benabbou, R., Zahi, A., & Oumsis, M. Multi-point relay selection strategies to reduce topology control traffic for OLSR protocol in MANETs. Journal of Network and Computer Applications, 53, 91-102 (2015).

[43] M. Caleffi and L. Paura, “M-DART: Multi-path Dynamic Address Routing,” Wirel Commun Mob Comput, vol. 11, no. 3, pp. 392–409, Mar. 2011, doi: 10.1002/wcm.986.

[44] B. Karp and H. T. Kung, “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” in *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 2000, pp. 243–254. doi: 10.1145/345910.345953.

[45] D. R. Choffnes and F. E. Bustamante, “An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks,” in *Proceedings of the 2Nd ACM International Workshop*

on Vehicular Ad Hoc Networks, New York, NY, USA, 2005, pp. 69–78. doi: 10.1145/1080754.1080765.

[46] Martinez, F. J., Toh, C. K., Cano, J. C., Calafate, C. T., & Manzoni, P. A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs). Wireless Communications and Mobile Computing, 11(7), 813-828 (2011).

[47] Harri, J., and Marco Fiore. "VanetMobiSim-vehicular ad hoc network mobility extension to the CanuMobiSim framework." *Institut Eurécom Department of Mobile Commu* 6904 (2006): pp.1-19.

[48] Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility. *International journal on advances in systems and measurements*, *5*(3&4), 2012.

[49] LeBrun, J., Chuah, C. N., Ghosal, D., & Zhang, M. Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference (Vol. 4, pp. 2289-2293). IEEE (2005, May)..

[50] Miller, Jeffrey, and Ellis Horowitz. "FreeSim-a free real-time freeway traffic simulator." 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. IEEE, 2007.

[51] F. J. Martinez, J.-C. Cano, C. T. Calafate, and P. Manzoni, "CityMob: A Mobility Model Pattern Generator for VANETs," ICC Workshop - 2008 IEEE Int. Conf. Commun. Workshop, 2008,

[52] Härri, J., Fiore, M., Filali, F., & Bonnet, C. Vehicular mobility simulation with VanetMobiSim. Simulation, 87(4), 275-300 (2011).

[53] Togou, Mohammed Amine, Abdelhakim Hafid, and Lyes Khoukhi. "SCRP: Stable CDS-based routing protocol for urban vehicular ad hoc networks." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17.5 (2016): pp.1298-1307.

[54] Issariyakul, Teerawat, and Ekram Hossain. "Introduction to network simulator 2 (NS2)." Introduction to network simulator NS2. Springer, Boston, MA, 2009. pp. 1-18.

[55] Kuntz, A., Schmidt-Eisenlohr, F., Graute, O., Hartenstein, H., & Zitterbart, M. Introducing probabilistic radio propagation models in omnet++ mobility framework and cross validation check with ns-2. In Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops (pp. 1-7), 2008.

[56] Zeng, Xiang, Rajive Bagrodia, and Mario Gerla. "GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks." *Proceedings. Twelfth Workshop on Parallel and Distri*buted Simulation PADS'98 (Cat. No. 98TB100233). IEEE, 1998.

[57] Barr, R. "JiST-Java in Simulation Time/SWANS-Scalable Wireless Ad hoc Network Simulator.[online] Jist. ece. cornell. edu." (2005).

[58] Al-Roubaiey, A., & Al-Jamimi, H. Online power Tossim simulator for wireless sensor networks. In 2019 11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (pp. 1-5). IEEE, 2019.

[59] Fall, Kevin, and Kannan Varadhan. "The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)." *The VINT project* 47 (2005): 19-231.

[60] Alba, Enrique, Sebastián Luna, and Jamal Toutouh. "Accuracy and efficiency in simulating VANETs." *International Conference on Modelling, Computation and*

Optimization in Information Systems and Management Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

[61] J. Liu, J. Wan, Q. Wang, P. Deng, K. Zhou, and Y. Qiao, "A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks," *Telecommun. Syst.*, vol. 62, no. 1, pp. 15–30, May 2016, doi: 10.1007/s11235-015-9979-7.

[62] Husain and S. C. Sharma, "Simulated Analysis of Location and Distance Based Routing in VANET with IEEE802.11p," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 57, pp. 323–331, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.07.346.

[63] X. Yang, M. Li, Z. Qian, and T. Di, "Improvement of GPSR Protocol in Vehicular Ad Hoc Network," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39515–39524, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2853112.

[64] Y.-B. Ko and N. Vaidya, "Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks," Jan. 2000, vol. 6, pp. 307–321. doi: 10.1023/A:1019106118419.

[65] T. Wang, S. Anwar, H. Sun, and Y. Zhou, "Modified greedy perimeter stateless routing for vehicular ad hoc networking algorithm," *Int*. J. Sens. Netw., vol. 27, no. 3, pp. 163–171, Jan. 2018, doi: 10.1504/IJSNET.2018.093135.

[66] Lochert, C., Mauve, M., Füßler, H., & Hartenstein, H. Geographic routing in city scenarios. ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, 9(1), 69-72, 2005.

[67] Alnabhan, Mohammad. "Advanced GPSR in Mobile Ad-hoc Networks (MANETs)." (2020): pp. 107-131.

[68] S. Smiri, A. Boushaba, R. B. Abbou, and A. Zahi, "Geographic and topology based routing protocols in vehicular ad-hoc networks: Performance evaluation and QoS analysis," in *2018 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, Apr. 2018, pp. 1–8. doi: 10.1109/ISACV.2018.8354070.

[69] Brial, S. M., C. J. Brtnardos, and C. Guerrero. "Position-based routing in vehiclular networks: A survey." *Journal of Network and Computer Applications* (2013):pp. 685-697.

[70] K. C. Lee, J. Haerri, U. Lee, and M. Gerla, "Enhanced Perimeter Routing for Geographic Forwarding Protocols in Urban Vehicular Scenarios," in *2007 IEEE Globecom Works*hops, Washington, DC, USA, Nov. 2007, pp. 1–10. doi: 10.1109/GLOCOMW.2007.4437832.

[71] Lochert, C., Hartenstein, H., Tian, J., Fussler, H., Hermann, D., & Mauve, M. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No. 03TH8683) (pp. 156-161). IEEE, 2003.

[72] Kakarla, Jagadeesh, S. Siva Sathya, and B. Govinda Laxmi. "A Survey on Routing Protocols and its Issues in VANET." (2011).

[73] J. Gong, C.-Z. Xu, and J. Holle, "Predictive Directional Greedy Routing in Vehicular Ad hoc Networks," in *27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'07)*, Toronto, ON, Canada, 2007, pp. 2–2. doi: 10.1109/ICDCSW.2007.65.

[74] X. Cai, Y. He, C. Zhao, L. Zhu, and C. Li, "LSGO: Link State aware Geographic Opportunistic routing protocol for VANETs," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2014, no. 1, p. 96, Jun. 2014, doi: 10.1186/1687-1499-2014-96.

[75] Y. Jin, H. Miao, Q. Ge, and C. Zhou, “Expected Transmission Energy Route Metric for Wireless Mesh Senor Networks,” *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, May 30, 2011.

[76] Jerbi, M., Meraihi, R., Senouci, S. M., & Ghamri-Doudane, Y. GyTAR: improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular ad hoc networks in city environments. In Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks (pp. 88-89), 2006.

[77] Al-Rabayah, Mohammad, and Robert Malaney. "A new hybrid location-based ad hoc routing protocol." 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GL*OBECOM 2010*. IEEE, 2010.

[78] Cha, Si-Ho, Keun-Wang Lee, and Hyun-Seob Cho. "Grid-based predictive geographical routing for inter-vehicle communication in urban areas." *International Journal of Distributed* Sensor Networks 8.3 (2012).

[79] Tripp-Barba, C., Urquiza-Aguiar, L., Igartua, M. A., Rebollo-Monedero, D., De la Cruz Llopis, L. J., Mezher, A. M., & Aguilar-Calderón, J. A. A multimetric, map-aware routing protocol for VANETs in urban areas. Sensors, 14(2), 2199-2224 (2014)..

[80] Houssaini, Z. S., Zaimi, I., Oumsis, M., & Ouatik, S. E. A. GPSR+ Predict: An enhancement for GPSR to make smart routing decision by anticipating movement of vehicles in VANETs. Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J, 2(3), 137-146 (2017).

[81] S. Dahmane and P. Lorenz, “Weighted Probabilistic Next-Hop Forwarder Decision-Making in VANET Environments,” in *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Washington, DC, USA, Dec. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/GLOCOM.2016.7842381.

[82] S. A. Rao, M. Pai, M. Boussedjra, and J. Mouzna, “GPSR-L: Greedy perimeter stateless routing with lifetime for VANETS,” in *2008 8th International Conference on ITS Telecommunications*, Phuket, Thailand, Oct. 2008, pp. 299–304. doi: 10.1109/ITST.2008.4740275.

[83] N. V. Dharani Kumari and B. S. Shylaja, “AMGRP: AHP-based Multimetric Geographical Routing Protocol for Urban environment of VANETs,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 72–81, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jksuci.2017.01.001.

[84] Naumov, Valery, Rainer Baumann, and Thomas Gross. "An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces." *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. 2006.

[85] N. V. Dharani Kumari and B. S. Shylaja, “AMGRP: AHP-based Multimetric Geographical Routing Protocol for Urban environment of VANETs,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 31, no. 1, pp. 72–81, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jksuci.2017.01.001.

[86] Wang, Xi, and Feifei Li. "Wireless Sensor Networks Suitable for Large-Scale Heterogeneous Networking." *International Journal of Online & Biomedical Engineering* 15.1 (2019).

[87] Arianmehr, Shahrbanou, and Mohammad Ali Jabraeil Jamali. "HybTGR: a hybrid routing protocol based on topological and geographical information in vehicular ad hoc networks." *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 11.4 (2020): 1683-1695.

[88] Härri, J., Filali, F., Bonnet, C., & Fiore, M. VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs. In Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks (pp. 96-97), 2006.

[89] Y. Sun, Y. Lin, and Y. Tang, "A reinforcement learning-based routing protocol in VANETs," in *International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems*, 2017, pp. 2493–2500.

[90] D. Bloembergen, K. Tuyls, D. Hennes, and M. Kaisers, "Evolutionary Dynamics of Multi-Agent Learning: A Survey," *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 53, pp. 659–697, Aug. 2015, doi: 10.1613/jair.4818.

[91] C. Wu, K. Kumekawa, and T. Kato, "Distributed reinforcement learning approach for vehicular ad hoc networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 93, no. 6, pp. 1431–1442, 2010.

[92] F. Li, X. Song, H. Chen, X. Li, and Y. Wang, "Hierarchical routing for vehicular ad hoc networks via reinforcement learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1852–1865, 2018.

[93] Liu, J., Wang, Q., He, C., Jaffrès-Runser, K., Xu, Y., Li, Z., & Xu, Y. QMR: Q-learning based multi-objective optimization routing protocol for flying ad hoc networks. Computer Communications, 150, 304-316, 2020.

[94] Saravanan, M., and P. Ganeshkumar. "Routing using reinforcement learning in vehicular ad hoc networks." *Computational Intelligence* 36.2 (2020): 682-697.

[95] W. K. Lai, M.-T. Lin, and Y.-H. Yang, "A machine learning system for routing decision-making in urban vehicular ad hoc networks," *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 11, no. 3, p. 374391, 2015.

[96] J. Wu, M. Fang, H. Li, and X. Li, "RSU-assisted traffic-aware routing based on reinforcement learning for urban VANETs," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5733–5748, 2020.

[97] X. Bi, D. Gao, and M. Yang, "A reinforcement learning-based routing protocol for clustered EV-VANET," in *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 2020, pp. 1769–1773.

[98] B.-S. Roh, M.-H. Han, J.-H. Ham, and K.-I. Kim, "Q-LBR: Q-Learning Based Load Balancing Routing for UAV-Assisted VANET," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5685, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20195685.

[99] Wu, Jinqiao, Min Fang, and Xiao Li. "Reinforcement learning based mobility adaptive routing for vehicular ad-hoc networks." *Wireless Personal Communications* 101.4 (2018): 2143-2171.

[100] N. Lyu, G. Song, B. Yang, and Y. Cheng, "QNGPSR: A Q-Network Enhanced Geographic Ad-Hoc Routing Protocol Based on GPSR," in *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Aug. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/VTCFall.2018.8690651.

[101] Y. Chen, N. Lyu, G. Song, B. Yang, and X. Jiang, "A traffic-aware Q-network enhanced routing protocol based on GPSR for unmanned aerial vehicle ad-hoc networks," *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 21, no. 9, pp. 1308–1320, Sep. 2020, doi: 10.1631/FITEE.1900401.

[102] A. Mchergui, T. Moulahi, and S. Zeadally, “Survey on Artificial Intelligence (AI) techniques for Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs),” *Veh. Commun.*, vol. 34, p. 100403, avril 2022, doi: 10.1016/j.vehcom.2021.100403.

[103] “Link-Quality and Traffic-Load Aware Routing for UAV Ad Hoc Networks | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore.” https://ieeexplore.ieee.org/document/8537819.

[104] Sutton, Richard S., and Andrew G. Barto. "Reinforcement learning: An introduction second edition." *Adaptive computation and machine learning: The MIT Press, Cambridge, MA and London* (2018).

[105] S. Smiri, A. B. Abbou, A. Boushaba, A. Zahi, and R. B. Abbou, “WA-GPSR: Weight-Aware GPSR-Based Routing Protocol for VANET,” *Int. J. Interact. Mob. Technol. IJIM*, vol. 15, no. 17, pp. 69–83, Sep. 2021, doi: 10.3991/ijim.v15i17.24083.

Liste des Publications

Articles de revues internationales

1. S. Smiri, A. Boushaba, R. B. Abbou, and A. Zahi ,“Performance Analysis of Routing Protocols with Roadside Unit Infrastructure in a Vehicular Ad Hoc Network,” International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC), vol. 12, no. 4, p. 19, Jul. 2020.
2. S. Smiri, A. Ben Abbou, A. Boushaba, A. Zahi, R. Ben Abbou. WA-GPSR: Weight-Aware GPSR-Based Routing Protocol for VANET. International Journal of Interactive Mobile Technologies, 2021, vol. 15, no 17.
3. S. Smiri, A. Boushaba, A. Ben Abbou, A. Zahi and R. Ben Abbou. QLG: Q-learning based Geographic routing protocol for Urban VANETs.(En cours de révision)

Conférences internationales

1. S. Smiri, A. Boushaba, R. Ben Abbou, and A. Zahi, ”Geographic and topology based routing protocols in vehicular ad-hoc networks: Performance evaluation and QoS analysis”, in 2018. International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Apr. 2018, pp. 1–8.
2. S. Smiri, A. Boushaba, A. Ben Abbou , A. Zahi and R. Ben Abbou ”Implementation and QoS Evaluation of Geographical Location-Based Routing Protocols in Vehicular Ad-Hoc Networks”. In WITS 2020: Proceedings of the 6th International Conference on Wireless Technologies, Embedded, and Intelligent Systems (Vol. 745). Springer Nature, 2021.
3. S. Smiri, A. Boushaba, A. Ben Abbou , A. Zahi and R. Ben Abbou. “QoS Evaluation of Location-Based Routing Protocols in Urban Vehicular Ad-hoc Networks”. In: WITS 2020. In book: Smart Systems and Wireless Technologies Abstract Review. p . 27-29.

Conférences nationales

1. “Geographic routing protocols in VANETs: Study, Performance Evaluation and Improvements”, The 3th, LSIA Doctoral Day, 2-3 March 2017.
2. “Performance Evaluation and Improvements of Geographic routing protocols in VANETs”, The 4th LSIA Doctoral Day, 25 April 2019.
3. “Étude, Évaluation et Amélioration des protocoles de routage géographiques dans les réseaux VANETs“, The 5th LSIA Doctoral Day, May 27, 2022.