



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCCEN

THÈSE LMD

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT D'INFORMATIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT

Spécialité : *Réseaux et Systèmes Distribués*

Par :

Mr NEBBOU Tawfiq

Sur le thème

Les protocoles de routage géographique et les services de localisation dans les réseaux VANETS

Soutenue publiquement le 07 Juillet 2019 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr FEHAM Mohammed	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr LEHSAINI Mohamed	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr FOUCHAL Hacène	Professeur	Université de Reims, France	Co-Directeur de thèse
Mr BOUKLI HACENE Sofiane	MCA	Université de Sidi Belabbes	Examineur
Mr SMAIL Omar	MCA	Université de Mascara	Examineur
Mr BENMAMMAR Badr	MCA	Université de Tlemcen	Examineur

*Laboratoire Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC)
BP 230, 13000 Tlemcen - Algérie*

Remerciements

Louanges à Dieu pour m'avoir donné la force, la patience et le courage pour réaliser cette thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Mr LEHSAINI Mohamed pour son esprit scientifique, sa pédagogie et sa disponibilité, pour m'avoir accordé son temps et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier vivement mon co-directeur de thèse Mr FOUCHAL Hacène pour sa collaboration si précieuse et pour les heures de travail qu'il m'a accordé. Ses remarques pertinentes et ses conseils précieux ont largement contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Je suis très honoré par la présence de Mr FEHAM Mohammed, qui a accepté de présider le jury de cette thèse. Je suis également très honoré par la présence de Mr BENMAMMAR Badr, Mr BOUKLI HACENE Sofiance, et Mr SMAIL Omar qui'ont fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

Qu'ils trouvent ici mes plus vifs remerciements pour l'effort qu'ils ont fourni à lire ce manuscrit et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je souhaite également remercier les membres du laboratoire STIC au sein duquel ce travail a été réalisé et les membres de l'équipe de Mr FOUCHAL de l'univeristé Champagne-Ardenne (REIMS). Á commencer par Mr LEHSAINI pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire STIC et son soutien durant le déroulement de cette thèse. Á Mr FOUCHAL pour son aide, ses précieux conseils et son accueil au sein de son équipe à REIMS. Á Mr AYaida Marwane pour sa fructueuse collaboration pour mener cette thèse à une bonne fin. Enfin, à tous mes collègues enseignants et doctorants à qui je souhaite d'épanouissement dans leur travail.

Je souhaite aussi témoigner ma gratitude et mes vifs remerciements envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Bien sûr, je ne peux terminer sans remercier mes proches de tout coeur et notamment mes parents et ma famille pour leurs encouragements et leur patience.

Résumé

Les protocoles de routage géographique ont montré qu'ils sont plus adaptés aux réseaux très dynamiques et mobiles tels que les réseaux VANETs. Dans ce type de réseaux, la nécessité d'un service de localisation est devenue extrêmement importante pour que les protocoles géographiques puissent trouver la position d'un nœud cible en très peu de temps. Dans cette thèse, nous avons étudié les différentes solutions de services de localisation et de protocoles de routage géographique pour les VANETs.

La première partie de cette thèse consiste à améliorer, concevoir et développer de nouveaux protocoles de routage géographique pour le routage unicast dans les VANETs. Dans un premier temps, nous avons conçu un protocole de routage appelé GyPTAR pour les VANETs dans les environnements urbains. Ce protocole est basé sur la mesure avec précision des densités des routes de manière distribuée. Deuxièmement, nous avons proposé un protocole de routage appelé PBRP qui consiste en trois stratégies intégrées : diffusion des informations sur le trafic routier, algorithme de transmission partielle et stratégie de récupération en aval.

La deuxième partie propose des services de localisation pour le routage unicast dans les VANETs. Le premier service de localisation proposé est capable de trouver le chemin avec une connectivité supérieure dans un environnement urbain. Ce protocole est également capable de trouver le meilleur chemin ayant la plus grande une connectivité entre la source et la destination. Le deuxième service de localisation proposé consiste en un service de localisation coopératif qui est capable de trouver le chemin dont la densité est maximale pour garantir la connectivité des véhicules entre eux.

Les résultats des simulations ont montré les avantages de nos solutions en termes de surcoût de routage, de taux de livraison des paquets (PDR) et de délai de bout en bout.

Mots-clés: MANETs, VANETs, Protocoles de routage géographique, Services de localisation, Mobilité, Connectivité d'une route.

Abstract

Geographic routing protocols have shown that they are more suitable for very dynamic and mobile networks like VANET networks. Moreover, in this type of networks, the need of a location service has become extremely important for geographic protocols to find the position of a target node in a very short time. In this thesis, we studied the different solutions of location services and geographic routing protocols for VANETs.

The first part of this thesis is to improve, design and develop new geographic routing protocols for unicast routing in VANETs. First, we designed a new routing protocol called GyPTAR for VANETs in urban environments. This protocol is based on accurately measuring road densities in a distributed manner. Secondly, we proposed a routing protocol called PBRP, which consists of three integrated strategies: dissemination of traffic information, partial transmission algorithm and backward recovery strategy.

The second part of this thesis proposes location-based services for unicast routing in VANETs. The first proposed location-based service is able to find the path with high connectivity in an urban environment. This protocol is also able to find the best path with high connectivity between source and destination. The second proposed location-based service consists of a cooperative location-based service, able to find the path with maximum density to ensure the connectivity of vehicles between them.

The results of the simulations showed the benefits of our solutions in terms of overhead, packet delivery rate (PDR) and end-to-end delay.

Keywords: MANETs, VANETs, Geographical Routing Protocols, Location-based Services, Mobility, Road Connectivity.

مخلص

أظهرت بروتوكولات التوجيه الجغرافي أنها أكثر ملاءمة للشبكات الديناميكية والمعروفة بكثرة عناصرها مثل شبكات VANETs. بالإضافة إلى ذلك، في هذا النوع من الشبكات، أصبحت الحاجة إلى خدمة تحديد موقع مهمة للغاية بالنسبة للبروتوكولات الجغرافية للعثور على موضع المركبة المستهدفة في وقت قصير جداً. في هذه الرسالة، درسنا الحلول المختلفة لخدمات تحديد الموقع وبروتوكولات التوجيه الجغرافي لشبكات VANETs.

الجزء الأول من هذه الرسالة يهدف إلى تحسين وتصميم وتطوير بروتوكولات توجيه جديدة مركزة على تحديد الموقع لتوجيه البث الأحادي في شبكات VANETs. كخطوة أولى، قمنا بتصميم بروتوكول توجيه جديد يسمى "GyPTAR" لشبكات VANETs. في البيئة الحضرية، يعتمد هذا البروتوكول على قياس الكثافة المرورية على مستوى الطرق بدقة وبطريقة موزعة. ثانياً، اقترحنا بروتوكول توجيه يسمى "PBRP" يتكون من ثلاث استراتيجيات متكاملة: نشر معلومات عن حركة المرور وخوارزمية الإرسال الجزئي واستراتيجية الاسترداد.

في الجزء الثاني من هذه الأطروحة تطرقنا إلى إشكالية خدمات تحديد الموقع لتوجيه البث الأحادي في شبكات VANETs حيث اقترحنا حلين في هذا الإطار، الحل الأول يتمثل في اقتراح خدمة تحديد الموقع قادرة على العثور على الطريق ذو اتصال فائق بين المركبات في بيئة حضرية، هذا البروتوكول قادر أيضاً على العثور على أفضل مسار ذو اتصال فائق بين المصدر والوجهة. بينما المقترح الثاني يتمثل في خدمة تحديد الموقع يكون فيه تظافر عدة أطراف من أجل تحديد موقع المركبة المستهدفة حيث تستطيع خدمة تحديد الموقع المقترحة العثور على طريق من مركبة مصدر إلى مركبة مقصودة وهذا المسار هو الذي يمر بأكثر الطرق ذات كثافة عالية لضمان اتصال مستمر للمركبات فيما بينها.

أظهرت نتائج عمليات المحاكاة فوائد حلولنا من حيث التكلفة الإضافية للتوجيه ومعدل تسليم الحزمة (PDR) والوقت اللازم من طرف إلى طرف. **الكلمات المفتاحية:** MANETs, VANETs, بروتوكولات التوجيه الجغرافي, خدمات تحديد الموقع, التنقل, ربط الطريق.

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Introduction Générale	1
1 Généralités sur les réseaux ad hoc véhiculaires	7
1.1 Introduction	7
1.2 Réseaux ad hoc véhiculaires	8
1.2.1 Définition	8
1.2.2 Architecture des réseaux VANETS	8
1.2.3 Types de communication dans les VANETS	9
1.2.4 Caractéristiques d'un réseau véhiculaire	9
1.2.5 Les services offerts par les réseaux VANETS	11
1.2.6 Types de messages dans les réseaux VANETS	12
1.3 Principaux défis des VANETS	14
1.4 Protocoles et normes dédiés aux VANETS	15
1.4.1 Communications dédiées à courte portée (DSRC)	15
1.4.2 Accès sans fil en environnements véhiculaires (WAVE)	16
1.4.3 ETSI-ITS G5	17
1.5 Projets VANETS	18
1.5.1 Projets VANETS en Europe	19
1.5.2 Projets VANETS aux Etats-Unis	21
1.5.3 Projets VANETS au Japon	21
1.6 Conclusion	22
I Les Protocoles de routage géographique dans les VANETS	23
2 Etat de l'art sur les protocoles de routage géographique dans les VANETS	25
2.1 Introduction	25
2.2 Taxonomie des protocoles de routage pour les VANETS	25
2.2.1 Protocoles de routage basés sur la topologie	26
a) Protocoles de routage proactifs	26
b) Protocoles de routage réactifs	27
c) Protocoles de routage hybrides	27
2.2.2 Protocoles de routage basés sur les clusters	28

2.2.3	Protocoles de routage basés sur diffusion multicast	28
a)	Protocoles de routage basés sur des arbres	28
b)	Protocoles de routage basés sur les maillages	28
2.2.4	Protocoles de routage basés sur des géocasts	28
2.2.5	Protocoles de routage basés sur la diffusion	29
2.2.6	Protocoles de routage géographique	29
2.2.7	Protocoles de routage géographiques basés sur le nœud	29
2.2.8	Protocoles de routage basés sur le trafic véhiculaire	33
2.3	Récapitulatif sur les protocoles de routage	38
2.4	Conclusion	38
3	Protocole de routage basé sur une mesure distribuée de la densité des routes	41
3.1	Introduction	41
3.2	Contexte	42
3.3	Travaux Connexes	42
3.4	Contribution : Le protocole GyPTAR	44
3.4.1	Diffusion périodique d'informations sur le trafic	44
3.4.2	Connectivité d'une cellule et mécanisme de transmission des paquets CDP	46
3.5	Simulations	48
3.5.1	Environnement de travail	48
3.5.2	Résultats de la simulation	48
3.6	Conclusion	50
4	Protocole de routage partiel avec recouvrement pour les VANETs	53
4.1	Introduction	53
4.2	Contexte	53
4.3	Travaux Connexes	54
4.4	Contribution	57
4.4.1	Dissemination de l'informations du trafic routier	58
a)	Mécanisme de division des routes	59
b)	Paquet d'information du trafic routier (RTIP)	62
c)	Connectivité : entre deux véhicules, Cellule et Route	63
d)	Maintien et partage des informations du trafic routier	67
4.4.2	Algorithme de routage partiel	67
a)	Algorithme du chemin partiel	68
b)	Algorithme de routage partiel	71
c)	Algorithme de routage en arrière (recouvrement)	72
4.5	Simulations	75
4.5.1	Environnement de travail	76
4.5.2	Résultats de la simulation	76
a)	Taux de livraison par paquets (PDR)	76
b)	Délai de bout en bout	77
c)	Overhead du routage	78
4.6	Conclusion	79

II	Les Services de localisation dans les réseaux VANETs	81
5	Etat de l'art sur les services de localisation dans les VANETs	83
5.1	Introduction	83
5.2	Principes de base des services de localisation	83
5.3	LIS et la protection de la vie privée	85
5.4	Critères de classification des LIS	86
5.4.1	Structure des serveurs de localisation	86
5.4.2	Structure du réseau	86
5.4.3	Modèles d'échange de messages	87
5.5	Services de localisation pour les VCNs ad hoc	88
5.5.1	Service de localisation basé sur la densité (DMBLS)	88
5.5.2	Service de localisation MBLS	90
5.5.3	Service de localisation RSLs	91
5.5.4	Service de localisation VLS	92
5.5.5	Service de localisation RLSMP	93
5.5.6	Service de localisation MRLSMP	94
5.5.7	Service de localisation MG-LSM	96
5.5.8	Service de localisation ILS	96
5.6	Services localisation pour les VCNs basés sur l'infrastructure	97
5.6.1	Service de localisation HLSRG	97
5.6.2	Système de gestion de localisation MMDD	98
5.6.3	LIS hiérarchisé de fourniture de contenu (CDN)	99
5.7	Conclusion	100
6	Un service de localisation dans un environnement urbain pour les VANETs	103
6.1	Introduction	103
6.2	Contexte	103
6.3	Travaux Connexes	105
6.4	Contribution	107
6.4.1	Description du système de localisation	108
6.4.2	Collecte des informations des véhicules	108
6.4.3	Mise à jour de la table d'informations	109
6.4.4	Métrie de connectivité	109
6.4.5	Mécanisme de sélection des routes basé sur la métrie ML	113
6.5	Simulations	114
6.5.1	Environnement du travail	115
6.5.2	Résultats de simulation	115
6.6	Conclusion	120
7	Un service de localisation coopératif pour les VANETs	121
7.1	Introduction	121
7.2	Contexte	121
7.3	Travaux Connexes	123
7.4	Le Service de localisation proposé	124
7.4.1	Présentation du système de localisation proposé	125

TABLE DES MATIÈRES

7.4.2	L'algorithme proposé	125
7.5	Evaluation des performances	127
7.5.1	Environnement de travail	127
7.5.2	Résultats de la simulation	127
7.6	Conclusion	129
	Conclusion Générale	131
	Bibliographie	133
	Annexe	147

Liste des figures

1.1	Types de communication dans les VANETs [1]	10
1.2	Pile protocolaire de la technologie WAVE [2]	16
1.3	Pile protocolaire de la norme ETSI ITS-G5 [3]	17
2.1	Taxonomie des protocoles de routage pour les VANETs	26
3.1	Exemple d'une route	45
3.2	Transmission des paquets CDP de $Cell_i$ à $Cell_j$	47
3.3	Taux de livraison de paquets vs. Taille du réseau (GyPTAR)	49
3.4	Délai de bout-en-bout vs. Taille du réseau (GyPTAR)	50
3.5	Overhead du routage vs. Taille du réseau (GyPTAR)	51
4.1	Dissemination d'informations sur le trafic routier (DRTI)	58
4.2	Vision Locale vs. Vision Avancée	59
4.3	Taille de la cellule : case 1	60
4.4	Taille de la cellule : case 2	61
4.5	Format du paquet RTIP	63
4.6	Mécanisme de transfert des paquets RTIP	67
4.7	Chemin partiel vs. Le plus court chemin	71
4.8	Routage partiel (1)	72
4.9	Routage partiel (2)	73
4.10	Organigramme de l'algorithme de routage de chemin partiel	73
4.11	Exemple de transfert de chemin partiel	74
4.12	Organigramme de l'algorithme de transfert arrière	75
4.13	Taux de Livraison de Paquets (PBRP)	77
4.14	Délai de bout-en-bout (PBRP)	78
4.15	Overhead de routage (PBRP)	78
5.1	LIS pour les VCNs [4]	84
5.2	Taxonomie des services de localisation	87
5.3	Les requêtes et les mises à jour de localisation dans DMBLS [5]	89
5.4	Mise à jour et distribution des points de passage dans MBLs [6]	90
5.5	Clusters et cellules dans RLSMP [7]	94
5.6	Récupération des informations de localisation dans MRLSMP [8]	95
5.7	Architecture du LMS (MMDD) [9]	98
5.8	Architecture du CDN [10]	100
6.1	Réseau de communication du système de localisation	108
6.2	Format des informations de la table	108

6.3	Liens entre véhicules	110
6.4	Situations pour calculer LC_{road}	112
6.5	Organigramme de l'algorithme proposé	114
6.6	Ratio de livraison des paquets en fonction du nombre de nœuds	116
6.7	Délai de bout en bout en fonction du nombre de nœuds	116
6.8	Overhead de routage en fonction du nombre de nœuds	116
6.9	Ratio de livraison des paquets en fonction de l'intervalle d'envoi	117
6.10	Délai de bout en bout en fonction de l'intervalle d'envoi	117
6.11	Overhead de routage en fonction de l'intervalle d'envoi	118
6.12	Ratio de livraison de paquets en fonction de la vitesse	119
6.13	Délai de bout en bout en fonction de la vitesse	119
6.14	Overhead de routage en fonction de la vitesse	119
7.1	Taux de livraison de paquets en fonction du nombre de noeuds	128
7.2	Délai de bout-en-bout en fonction du nombre de noeuds	128
7.3	Overhead du routage en fonction du nombre de noeuds	129

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les MANETs et les VANETs	11
2.1	Récapitulatif sur les principaux protocoles de routage pour les VANETs . .	39
3.1	Paramètres de simulation (GyPTAR)	49
4.1	Paramètres de simulation (PBRP)	76
6.1	Paramètres de simulation	115
7.1	Paramètres de simulation	127

Glossaire

- A-STAR** Anchor-based Street and Traffic Aware Routing. 43, 55
- ADMR** Adaptive Demand Driven Multicast Routing. 28
- AGR** Abiding Geocast. 29
- AMAR** A Motion Sensitive Adaptive Routing. 31
- AODV** Ad hoc On Demand Distance Vector. 27
- AQRV** Adaptive Quality of service (QoS) based Routing for VANETs. 56
- ASV** Advanced Safety Vehicle. 18, 21
- AU** Application Unit. 8
- B-MFR** Border node-based Most Forward withing Radius. 56
- C2C-CC** Car-to-Car Communication Consortium. 18, 19
- CARLINK** Wireless Traffic Service Platform for Linking Cars Project. 19
- CBDRP** Cluster Based Directional Routing Protocol. 28
- CBR** Cluster Based Routing. 28
- CDP** Cell Density Packet. 46, 56, 114
- CVIS** Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems. 19
- D-ODMRP** Destination-driven On-Demand Multicast Routing Protocol. 28
- DCF** Distributed Coordination Function. 17
- DGR** Directional Greedy Routing. 55
- DIR** A diagonal intersection-based routing. 31
- DIRICOM** Intelligent Design of Wireless Communication Networks. 19

- DMBLS** Density aware Map-Based Location Service. 88
- DRTI** Dissemination of Road Traffic Information. 58
- DSDV** Destination-Sequenced Distance Vector routing. 27
- DSR** Dynamic Source Routing. 27
- DSRC** Dedicated Short-Range Communication. 12
- DV-CAST** Distributed Vehicular broadcast protocol for VANETs. 29
- EDCA** Enhanced Distributed Channel Access. 18
- EGyTAR** Enhanced GyTAR. 34, 56
- ETX** Expected Transmission Count. 32, 56
- EVDLA** An enhanced VDLA. 36
- EVITA** E-safety Vehicle Intrusion proTected Applications. 20
- FSR** Fisheye State Routing. 27
- GDF** Geographical Data File. 90
- GeoDTN + Nav** Geographic and Delay Tolerant Network with Navigation Assistance. 106, 124
- GLS** Grid Location Service. 54, 124
- GPCR** Greedy perimeter coordinator routing. 30
- GPGR** A Grid-based Predictive Geographical Routing. 31, 56
- GPS** Global Positioning System. 25
- GPSR** Greedy Perimeter Stateless Routing. 29, 123
- GSR** Geographic Source Routing. 30, 55, 123
- GSRP** Global State Routing Protocol. 27
- GST** Global System for Telematics. 20
- GyPTAR** improved Greedy Periodic Traffic Aware Routing protocol for urban VANETs. 41, 44, 131
- GyTAR** A Geographical greedy Traffic-Aware Routing. 33, 56, 124
- HARP** Hybrid Ad hoc Routing Protocol. 27
- HLAR** Hybrid Location-based Ad hoc Routing. 57

- HLS** Hierarchical Location Service. 54, 124
- HLSRG** Hierarchical Location Service with Road-adapted Grids. 97
- iCAR** An intersection-based Connectivity Aware Routing. 35
- iCARI** An intersection-based Connectivity Aware Routing. 38
- ILS** Intersection Location Service. 96
- ITS** Intelligent Transport System. 7
- IVG** Inter-Vehicular Geocast. 29
- IVI** Intelligent Vehicle Initiative. 21
- JARI** Japon Automobile Research Institute. 21
- LAR** Location-Aided Routing. 105, 123
- LC** Location Cell. 88, 103
- LIS** Location Information Services. 83
- LMS** Location Management Systems. 83
- LOR** Localized Opportunistic Routing. 57
- LORA-CBF** Location Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding. 28
- LSGO** A Link State aware Geographic Opportunistic. 32, 56
- LSHR** A Link State aware Hierarchical Road. 36
- MANETs** Mobile Ad hoc NETWORKs. 8
- MAODV** Multicast operation of the Ad hoc On-Demand Distance Vector. 28
- MBLS** Map-Based Location Service for VANETs. 88, 90
- MG-LSM** Mobile Group-based Location Service Management. 96
- MMDD** Mobility Management for efficient Data Delivery. 98
- MMMR** A Multi-Metric Map-aware Routing. 31
- MOLSR** Multicast extension for the Optimized Link State Routing protocol. 28
- MRLSMP** Modified Region-based Location-Service-Management Protocol. 94
- non-DTN** non-Delay-Tolerant Networking. 72, 106
- NoW** Network On Wheels. 19

- OBU** On Bord Unit. 8
- ODMRP** On-Demand Multicast Routing Protocol. 28
- OLSR** Optimized Link State Routing Protocol. 27
- OSTD** Opportunistic routing based on Symmetrical Traffic Distribution. 107
- PBRP** Partial Backwards Routing Protocol for VANETs. 4, 53, 131
- PDGR** Predictive Directional Greedy Routing. 55
- PDR** Packet Delivery Ratio. 103
- PDVR** A Position-based Directional Vehicular Routing. 30
- PLC** Progressive Link Connectivity. 64
- PreVent** PReVENTive and Active Safety Applications. 19
- Pro-AODV** Proactive AODV. 27
- RBN** RTIP Broadcaster Node. 62
- RIN** RTIP Initiator Node. 58
- RLS** Reactive Location Service. 54, 124
- RLSMP** Region-based Location-Service-Management Protocol. 93
- RSLS** Responsible Sections Location Service. 91
- RSU** RoadSide Unit. 7, 8
- RTIP** Road Traffic Information Packet. 58, 62
- RTIT** Road Traffic Information Table. 68
- SEISCINTOS** Providing adaptive ubiquitous services in vehicular contexts. 20
- SFLS** Semi-Flooding Location Service. 54
- SIM-TD** Safe Intelligent Mobility-Test field Germany. 21
- TFOR** A Traffic Flow-Oriented Routing. 37
- TIBCRPH** Global System for Telematics. 28
- TORA** Temporally Ordered Routing Algorithm. 27
- UMB** Urban Multihop Broadcast. 29
- V2I** véhicule à infrastructure. 9

- V2V** véhicule à véhicule. 9
- VADD** Vehicle-Assisted-Data Delivery. 106
- VANET** Vehicular Ad hoc NETwork. 8
- VCNs** Vehicular Communication Networks. 83
- VDLA** A Vehicle Density and network Load Aware. 34
- VII** Vehicle Infrastructure Integration. 18, 21
- VLS** Vehicle Location Service. 92
- VPGR** Vertex-Based Predictive Greedy Routing. 55
- VSC** Vehicle Safety Communication. 18
- WAVE** Wireless Access in Vehicular Environments. 8
- WRP** Wireless Routing Protocol. 27
- ZRP** Zone Routing Protocol. 27

Introduction Générale

Contexte

Les réseaux ad hoc véhiculaires (VANETs) sont utilisés depuis plus d'une décennie dans de nombreux projets de recherche et dans de nombreux projets de déploiement des systèmes de transport intelligents (abrégié ITS¹ en anglais) dans lesquels les applications VANETs doivent améliorer la sécurité du trafic routier et être utilisées pour la collecte de données en temps réel dans les systèmes de contrôle du trafic et d'entretien des routes grâce à l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Dans ce contexte, la mise en place d'une infrastructure de transport fiable permettant de fournir des informations sur les embouteillages, les accidents, les conditions routières dangereuses, les conditions météorologiques et l'emplacement des installations (stations-service et restaurants, par exemple) contribue d'une manière efficace dans la réduction des encombrements et de la pollution, des temps de parcours plus courts, la gestion et le contrôle améliorés du réseau routier et une efficacité accrue des systèmes de transport en commun. En outre, les véhicules peuvent également être utilisés pour collecter, analyser et partager les informations d'une zone d'intérêt dans des applications telles que la surveillance civile, la planification du trafic et d'autres applications urbaines. Ces applications sont des exemples typiques de ce que nous appelons un système de transport intelligent, dont l'objectif est d'améliorer la sécurité, l'efficacité, la sensibilisation à la ville et la jouissance des systèmes de transport. Par ailleurs, le principal avantage des ITS est qu'ils évitent le recours à une infrastructure coûteuse, car la technologie sans fil est devenue omniprésente et bon marché. En effet, grâce aux équipements installés à l'intérieur des véhicules ou au bord de la route, les communications entre véhicules permettent aux conducteurs d'être avertis suffisamment tôt des dangers. En plus d'améliorer la sécurité routière, les réseaux VANETs offrent également de nouveaux services aux utilisateurs, tels que les informations sur le trafic routier et les services Internet, rendant ainsi le voyage plus confortable.

Les réseaux VANETs représentent une classe particulière des réseaux ad hoc mobiles (MANETs) dans lesquels les nœuds mobiles sont des véhicules équipés de capacité sans fil et de traitement peuvent créer un réseau spontané lors de leurs déplacements sur des routes. Ils présentent des caractéristiques spécifiques par rapport aux MANETs,

1. ITS : Intelligent Transportation Systems

telles qu'une mobilité élevée des véhicules et une topologie de réseau en évolution rapide par rapport aux MANETs. Par conséquent, le routage de données dans les VANETs est devenu un vrai défi puisque les protocoles de routage ad hoc traditionnels ont prouvé leur défaillance pour le transfert de données dans les réseaux de forte mobilité à l'instar des VANETs comme le montre les travaux présentés dans [11–13]. Par ailleurs, les exigences imposées par les VANETs diffèrent légèrement de celles des réseaux ad hoc mobiles [14, 15]. D'une part, la capacité de stockage et la consommation d'énergie ne sont pas une contrainte dans les VANETs parce que dans les nouveaux véhicules, la charge de la batterie et l'espace de stockage sont plus élevés et chaque véhicule peut obtenir sa propre position géographique vu que les véhicules d'aujourd'hui sont dotés d'un système de positionnement (GPS). D'autre part, les VANETs sont très dynamiques en raison de la grande mobilité des véhicules qui ne se déplacent pas de manière aléatoire mais suivent un schéma de mobilité particulier basé sur des modèles de mobilité par rapport à ceux des réseaux ad hoc traditionnels.

Dans les VANETs, les véhicules se déplacent de manière autonome le long des routes et échangent des informations entre eux et/ou avec des infrastructures routières situées dans leur portée radio. Ils permettent d'une part une communication directe de véhicule à véhicule (V2V) et d'autre part une communication de véhicule à infrastructure (V2I). La communication V2V fonctionne selon une architecture décentralisée et constitue un cas particulier de réseaux ad hoc mobiles. Elle est basée sur la simple communication entre véhicules sans accès à aucune infrastructure fixe. En effet, un véhicule peut communiquer directement avec un autre véhicule s'il se trouve dans sa portée radio ou via une communication sans fil à sauts multiples utilisant des nœuds voisins comme relais [16]. Les communications V2V sont très efficaces pour le transfert des informations liées à la sécurité routière, mais elles ne permettent pas d'assurer une connectivité permanente entre véhicules en raison de la grande mobilité de ces derniers. En outre, une communication V2I, dans laquelle les véhicules envoient et reçoivent des données depuis/vers des infrastructures routières fixes, peut fournir des informations en temps réel sur les conditions de circulation, la météo et les services de base d'Internet en communiquant avec les réseaux fédérateurs. Les communications V2I optimisent l'utilisation des ressources partagées et exploitent les services fournis via les points d'accès RSU (unités au bord de la route) déployés le long des routes. Toutefois, ce mode de communication est inadéquat pour les applications liées à la sécurité routière car les réseaux à infrastructure ne sont pas efficaces en termes de délai de livraison. Pour pallier aux limitations de chacune des deux modes de communications, une architecture mixte dans laquelle on trouve les deux modes de communications (V2V et V2I) de communications a été proposée dans la littérature. Dans ce cas de figure, un véhicule peut communiquer avec l'infrastructure se trouvant au bord de la route directement ou via plusieurs multi-sauts, en fonction de la distance qui le sépare du véhicule ou l'infrastructure destinataire.

Les réseaux VANETs sont constitués de véhicules (voitures, bus, etc.) équipés de systèmes de positionnement tels que GPS (Global Positioning System), de dispositifs de communication sans fil comme les interfaces réseau IEEE 802.11p/WAVE et de cartes numériques. La technologie IEEE 802.11p et la technologie WAVE forment la norme DSRC (communication dédiée à courte portée) pour les communications dans les réseaux

VANETs. La norme WAVE décrit l'ensemble des normes IEEE 1609.x (.1 / .2 / .3 / .4) déployées au niveau de la couche MAC et de la couche réseau du modèle OSI quant au niveau de la couche physique, la norme IEEE 802.11p est utilisée. La norme DSRC est considérée comme la norme la plus appropriée pour les communications sans fil dans les réseaux ad hoc véhiculaires. Son premier objectif est de fournir des transferts de données entre véhicule et une faible latence de communication dans les petites zones de communication. Par conséquent, en utilisant la norme DSRC, il est possible d'établir des communications de véhicule à véhicule (V2V) et des communications de véhicule à infrastructure (V2I). DSRC pourra prendre en charge des véhicules ayant une vitesse supérieure à 200 km/h, elle permet une communication directe entre véhicules ou entre véhicule et infrastructure dans une gamme de transmission comprise entre 300 et 1000 mètres et fournit une bande passante théorique allant de 6 à 27 Mbps.

Problématiques et contributions

Les réseaux VANETs posent de nombreux défis en matière de technologies de communication, de protocoles de routage et de sécurité, ce qui accroît le besoin de recherche dans ce domaine en particulier au niveau du routage de données dans un environnement fortement mobile. Les recherches dans cet axe se basent sur l'analyse des algorithmes de routage dans une topologie de réseau extrêmement large avec une mobilité élevée des véhicules. Par ailleurs, la mobilité des véhicules peut causer des déconnexions fréquentes dans les VANETs. Ce problème de réseau déconnecté pose de sérieux problèmes pour concevoir des protocoles de routage fiables et efficaces. Bien qu'il soit très difficile de trouver une connexion de bout en bout fiable pour un réseau faiblement connecté, la grande mobilité des réseaux véhiculaires offre aux véhicules mobiles la possibilité de se connecter de manière intermittente pendant leur déplacement.

Dans les réseaux VANETs, les protocoles de routage se divisent en deux grandes catégories : le routage basé sur la topologie et le routage géographique. Le routage basé sur la topologie [17–19] utilise les informations sur les liens existants dans le réseau pour effectuer le transfert de paquets. Or vu que les informations de liaison changent régulièrement, le routage basé sur la topologie souffre de ruptures des liens. Par conséquent, ce type de protocoles de routage ne convient donc pas aux réseaux VANETs caractérisés par la grande mobilité des nœuds mobiles et le changement fréquent de la topologie. Le routage géographique [20–25] utilise les informations de localisation des voisins pour effectuer le transfert de paquets. Dans ce type de protocoles de routage, il est inutile que les nœuds gèrent une carte de topologie, et échangent des informations sur l'état des liens ou des routes établies, comme dans un protocole de routage mobile ad hoc classique. Par conséquent, le routage géographique peut mieux s'adapter à la taille du réseau et aux changements fréquents de topologie. A cet effet, les protocoles de routage géographiques ont beaucoup attiré l'attention pour les VANETs vu qu'il n'est pas nécessaire de maintenir à jour les tables de routage et il n'est pas nécessaire de disposer d'une vue globale de la topologie du réseau et de ses changements. Ces protocoles nécessitent des informations sur la position des nœuds, ce qui est possible et moins coûteux puisque la plupart des véhicules sont équipés d'un dispositif GPS pour trouver leurs propres positions. Cette approche permet de prendre des décisions de routage en fonction de la position du nœud

destinataire et la position des voisins se trouvant à un saut. Cependant, le défi du routage géographique consiste à connaître l'emplacement géographique actuel du nœud destinataire, donc le besoin d'un service de localisation est devenu extrêmement important pour pouvoir trouver la position d'un nœud cible dans un temps très court afin d'acheminer les données vers ceci. Dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié deux problématiques. La première consiste à proposer un service de localisation qui nous permet de déterminer dans un temps très court et avec une grande précision la position géographique du nœud cible, et la deuxième permet de proposer un nouveau protocole de routage géographique garantissant la livraison de données au nœud cible avec succès et d'améliorer d'autres protocoles de routage géographiques existants.

Organisation de la thèse

Pour ce faire, cette thèse est organisée en deux parties. La première partie concerne les services de localisation dans les réseaux VANETs et la seconde partie porte sur les protocoles de routage géographique dans les VANETs.

Cette thèse est composée en sept chapitres :

- Le premier chapitre de ce manuscrit présente les contraintes et les caractéristiques liées aux réseaux ad hoc véhiculaires (VANETs), leurs domaines d'applications, leurs catégories de communication et leurs défis.
- Le deuxième chapitre est un état de l'art sur les protocoles de routage géographique avec une classification selon leur mode de fonctionnement. Cette étude nous a permis de tirer profit de leurs atouts et de proposer de nouvelles solutions de routage pour ce type de réseaux.
- Le troisième chapitre présente notre première contribution qui est un protocole de routage partiel en arrière pour les VANETs "Partial Backwards Routing Protocol for VANETs (PBRP)". Ce protocole est composé de trois stratégies intégrées : la diffusion d'informations sur le trafic routier, l'algorithme de transmission partielle et la stratégie de recouvrement arrière. Ces trois stratégies fonctionnent ensemble pour défier la nature dynamique des réseaux VANETs et fournir des informations permanentes et avancées sur le trafic routier.
- Le quatrième chapitre expose notre deuxième contribution qui est un protocole de routage basé sur une mesure distribuée de la densité des routes. Ce protocole est basé sur la mesure avec précision des densités des routes. Cette mesure de densité est faite d'une manière distribuée où chaque chemin calculé est une liste de routes (entre deux ancres successives). Le chemin ayant la densité la plus élevée entre la source et la destination est considéré comme le meilleur chemin parmi les différents chemins qui relient ces deux nœuds.
- Le cinquième chapitre est une étude bibliographique sur les services de localisation décrits dans la littérature suivie d'une synthèse des différentes solutions pour améliorer leurs performances.

- Le sixième chapitre expose notre première contribution qui porte sur la proposition d'un service de localisation dans un environnement urbain pour connaître avec plus de précision l'emplacement de la cible. Cette partie sera suivie de la description des résultats de performances de l'approche proposée.
- Le septième chapitre est une deuxième contribution qui propose un service de localisation coopératif pour les VANETs. Ce service est capable de trouver une route d'un véhicule source à un véhicule destinataire et cette route est celle qui passe par le chemin le plus dense pour garantir la connectivité des véhicules entre eux.

Finalement, une conclusion générale clôture ce manuscrit et rappelle les principales contributions tout au long de ce travail de thèse. Elle présente également les perspectives sous-jacentes aux différentes problématiques abordées dans cette thèse. Les travaux contenus dans ce document ont été publiés dans plusieurs conférences et journaux dont la liste est disponible dans la bibliographie personnelle.

En annexe, nous présentons les différents algorithmes mis en oeuvre pour développer des solutions de routage géographique pour les VANETs.

Généralités sur les réseaux ad hoc véhiculaires

1.1 Introduction

Les réseaux véhiculaires ad hoc (VANETs) sont des réseaux de communication qui impliquent un échange de données entre véhicules ainsi que entre véhicules et équipements placés au bord des routes "RoadSide Unit (RSU)" en temps réel. À l'origine, les VANETs étaient considérés comme une application des réseaux mobiles ad hoc (MANETs). Par la suite, le concept a évolué et représente un domaine d'étude en soi-même, en raison des différences entre les caractéristiques des deux réseaux.

Les VANETs fournissent de nouveaux services basés sur la communication sans fil afin d'obtenir plus d'informations sur l'environnement dans les applications de véhicules. Cette technologie, ainsi que l'utilisation de l'information et de la communication dans les systèmes de transport et de navigation ferroviaires, maritimes et aériens, composent les systèmes de transport intelligents "Intelligent Transport System (ITS)". Les principales applications des réseaux VANETs correspondent aux applications liées à la sécurité routière. Ils peuvent fournir une assistance comme la navigation ou la prévention des collisions, des informations sur les véhicules voisins tels que la position, la direction et la vitesse, et peuvent être utilisés pour informer sur les alertes et les avertissements tels que les accidents ou les obstacles sur les routes. Les principales caractéristiques des VANETs sont :

- Ils sont composés principalement par les véhicules qui sont considérés comme des nœuds mobiles. Il peut également exister des éléments au bord de route pouvant servir comme support aux réseaux tels que les RSUs. Selon la nature mobile des véhicules, les réseaux VANETs sont donc très mobiles et en évolution.
- Le nombre de nœuds dans les réseaux VANETs est variable. Les nœuds peuvent entrer ou sortir du réseau, ce qui provoque un scénario très dynamique. Donc les réseaux VANETs doivent s'adapter à ces modifications du nombre de nœuds et de la topologie du réseau.
- Les réseaux VANETs doivent fonctionner dans des conditions de grande vitesse et de mobilité, la vitesse relative entre les véhicules peut également être supérieure et peut affecter les performances du réseau.

- Les nœuds dans les VANETs ont une alimentation en énergie infinie, cela signifie que les appareils chargés de la communication et du traitement des données peuvent être alimentés par le véhicule, de sorte que la consommation d'énergie ne soit pas considérée comme un problème majeur.
- L'une des principales caractéristiques de ces réseaux est qu'ils doivent être très sécurisés pour l'utilisateur. Par conséquent, la sécurité est considérée comme un aspect particulier des réseaux VANETs.
- Les VANETs accordent également une attention particulière à la fiabilité de la communication. Une faible latence ainsi qu'une faible perte de paquets se sont les grands axes de recherche dans les réseaux VANETs.

Ce chapitre est consacré à la présentation des réseaux ad hoc véhiculaires. Nous mettons l'accent sur les principales caractéristiques des réseaux VANETs avec description de la norme IEEE 802.11p et son mécanisme d'accès au canal.

1.2 Réseaux ad hoc véhiculaires

1.2.1 Définition

Un réseau ad hoc véhiculaire appelé généralement "Vehicular Ad hoc NETWORK (VANET)", est une nouvelle technologie émergente des réseaux ad hoc mobiles "Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs)" pour fournir des communications au sein d'un groupe de véhicules à portée les uns des autres et entre les véhicules et les équipements placés au bord des routes. Un réseau VANET fait référence à un réseau créé de manière ad hoc entre différents véhicules en mouvement et autres dispositifs de connexion qui entrent en contact sur un support sans fil et échangent des informations utiles les uns avec les autres. Les véhicules et d'autres périphériques se comportent comme des nœuds du réseau. Les informations que possèdent les nœuds sont transférées à tous les autres nœuds. De même, tous les nœuds après le transfert de leur ensemble de données reçoivent les données transmises par d'autres nœuds. Après avoir accumulé toutes ces données, les nœuds génèrent des informations utiles à partir des données reçues et les transmettent de nouveau à d'autres périphériques [26]. Ainsi, les réseaux VANETs sont considérés comme le cœur des systèmes de transport intelligent.

1.2.2 Architecture des réseaux VANETS

La communication entre les véhicules, ou entre un véhicule et un équipement, est réalisée via un support sans fil appelé "Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)" [2]. Cette technologie de communication fournit un large éventail d'informations aux conducteurs et aux voyageurs et permet aux applications de sécurité d'améliorer la sécurité routière et d'offrir une conduite confortable. Les principaux composants du système sont l'"Application Unit (AU)", l'"On Board Unit (OBU)" et l'unité de bord de route "RSU". En général, une RSU héberge une application fournissant des services et l'OBU est un périphérique homologue utilisant les services fournis. L'application peut résider dans la RSU ou dans l'OBU ; le périphérique qui héberge l'application est appelé fournisseur et le

périphérique utilisant l'application est décrit en tant qu'utilisateur. Chaque véhicule est équipé d'un OBU et d'un ensemble de capteurs pour collecter et traiter les informations, puis les envoyer sous forme de message aux autres véhicules ou aux RSUs via le support sans fil. Il transporte également une ou plusieurs AU qui utilisent les applications fournies par le fournisseur en utilisant les capacités de connexion de l'OBU. La RSU peut également se connecter à Internet ou à un autre serveur, ce qui permet aux AUs de plusieurs véhicules de se connecter à Internet [1, 27].

1.2.3 Types de communication dans les VANETs

Dans un réseau VANET, les véhicules communiquent directement entre eux ou avec des infrastructures routières via une radio à courte portée ou toute autre technologie sans fil disponible, telle que WiMax, 3G et LTE. Les progrès dans les communications mobiles et la tendance actuelle dans les réseaux ad hoc permettent l'utilisation de nombreuses architectures pour les réseaux de véhicules dans les environnements urbains, ruraux et routiers afin de prendre en charge des applications existantes. L'objectif d'une architecture VANET est de permettre la communication entre les véhicules à proximité et entre les véhicules et les équipements fixes placés au bord des routes, ce qui donne lieu à trois scénarios possibles, comme le montre la Figure 1.1.

a) **L'architecture véhicule à véhicule (V2V)**

Cette architecture de communication est basée sur une communication inter-véhicules sans utiliser une infrastructure. En effet, un véhicule peut 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 noeuds voisins qui les séparent comme des relais. Les communications V2V peuvent être efficaces pour le transfert des informations de sécurité routière, mais elles ne garantissent pas une connectivité permanente entre les véhicules, ce qui les rend moins efficaces pour les applications nécessitant le transfert de grande quantité de données.

b) **L'architecture véhicule à infrastructure (V2I)**

Cette architecture de communication utilise des points d'accès déployés aux bords des routes tels que les RSUs pour fournir des services comme l'accès à Internet, les communications de voiture-à-garage de réparation pour le diagnostic distant, et autres.

c) **L'architecture hybride combine les solutions V2V et V2I**

Cette architecture combine les solutions V2V et V2I et dans ce cas, un véhicule peut communiquer avec l'infrastructure routière ou bien avec les véhicules en un ou plusieurs sauts, en fonction de son emplacement par rapport à l'infrastructure.

1.2.4 Caractéristiques d'un réseau véhiculaire

Le développement d'applications ou de services pour les réseaux VANETs utilise des techniques propriétaires ou modifiées des réseaux sans fil, qui sont différentes à celles des

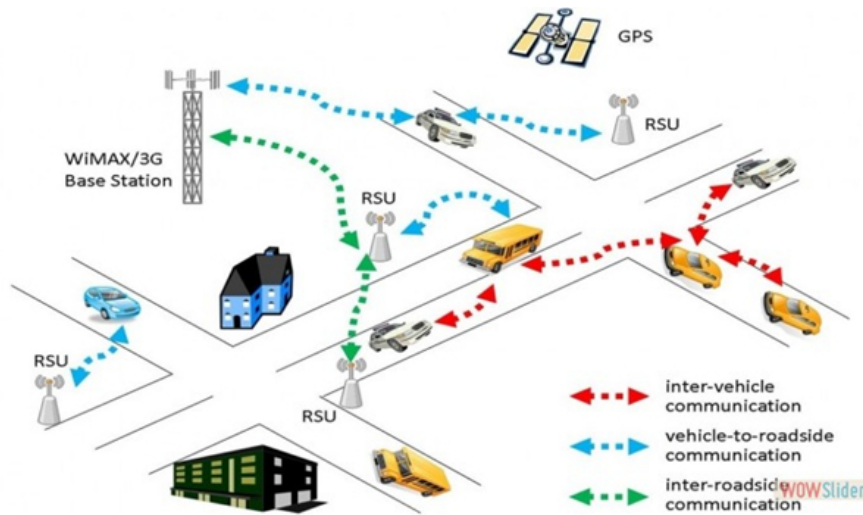


FIGURE 1.1 – Types de communication dans les VANETs [1]

réseaux sans fil traditionnels. Les réseaux VANETs subissent non seulement des changements rapides dans leurs connexions, mais doivent également traiter divers types de densités de réseau.

Les VANETs et les MANETs partagent certaines caractéristiques similaires, telles que la faible bande passante, la transmission à courte portée. Cependant, les VANETs ont des caractéristiques uniques, décrites dans ce qui suit :

- **Auto-organisation** : Cette fonctionnalité a été héritée des réseaux MANETs, dont les réseaux de véhicules constituent une sous-classe; cela permet à un réseau de s'auto-organiser.
- **Le modèle de mobilité** : Les nœuds d'un réseau de véhicules peuvent présenter une large gamme de vitesses de déplacement, présentant une mobilité élevée dans la plupart des situations par rapport à d'autres réseaux sans fil, par exemple des voitures pouvant atteindre des vitesses élevées sur des autoroutes. Par ailleurs, dans les réseaux VANETs, les nœuds ont des limites dans leur trajectoire; ils sont limités aux routes publiques et aux autoroutes. Contrairement aux VANETs, les réseaux traditionnels n'ont pas de limite géographique et peuvent se déplacer n'importe où. En outre, la mobilité dans les VANETs est liée directement au comportement des conducteurs et leurs réactions face à différentes situations (accident, embouteillage, signalisation, ...).
- **Vitesse de transmission** : Les véhicules peuvent atteindre une vitesse élevée et inconstante et peuvent également se déplacer dans des directions opposées, ce qui réduit le temps de contact à quelques secondes pour la transmission des données. En raison de la mobilité des véhicules, les réseaux VANETs souffrent d'un manque de connectivité et doivent gérer différents types de densité de réseau.
- **Topologie** : Bien que l'emplacement des véhicules suive le tracé des rues et des routes, encore une fois, leur mobilité relativement élevée entraîne des changements rapides de la topologie, ce qui peut être difficile à gérer. Dans les réseaux VANETs,

un véhicule peut rejoindre ou quitter un groupe de véhicules en un temps très court, ce qui nous mène à avoir une topologie très dynamique, et imprévisible avec une connectivité peu garantie.

- **Energie** : Dans un réseau sans fil traditionnel (MANET), la puissance des nœuds est limitée. Les appareils portables, tels que les smartphones, les ordinateurs portables ou les capteurs, dépendent entièrement de la durée de vie de leurs batteries. Leur puissance de calcul est limitée car leur architecture matérielle est restreinte. Par contre, dans les réseaux VANETs, les éléments de ces derniers disposent suffisamment d'énergie pour alimenter les différents équipements électroniques. Les véhicules peuvent compter sur une puissance et énergie relativement importante, ce qui leur permet de disposer de ressources de calcul importantes.
- **Fragmentation du réseau** : La fragmentation de tel réseau est due à la portée du rayon de communication et à la mobilité élevée des véhicules.

Alors que les MANETs peuvent connaître des périodes transitoires de perte de connectivité, les VANETs peuvent subir de longues périodes de déconnexion, en particulier dans des conditions de faible circulation (durant la nuit dans un environnement urbain). Le tableau 1.1 présente une comparaison entre les réseaux VANETs et les réseaux MANETs. Comme discuté précédemment dans ce chapitre, les principales différences sont la vitesse de déplacement des véhicules, les temps de transmission très courts et une fragmentation très dynamique et fréquente du réseau.

TABLE 1.1 – Comparaison entre les MANETs et les VANETs

Paramètres	MANETs	VANETs
Coût de production	Pas cher	Cher
Changement de topologie	Lent	Fréquent et très rapide
Mobilité des nœuds	Faible	Haute
Modèle de mobilité	Aléatoire	Régulier
Portée de transmission	Jusqu'à 100m	Jusqu'à 1000m
La durée de vie du nœud	Dépend de la source d'énergie	Dépend de la durée de vie du véhicule
Acquisition de position	à l'aide des capteurs ultrasons	à l'aide de GPS, RADAR

1.2.5 Les services offerts par les réseaux VANETs

Bien que l'objectif initial des VANETs soit de promouvoir des conditions de conduite plus sûres, d'autres préoccupations ont également émergé. Les exemples actuels d'applications VANET sont classés dans deux grandes classes, comme suit :

a) Services liés à la sécurité routière

Ces services concernent les applications ayant un impact direct sur la sécurité des conducteurs et des passagers. Ils visent à accroître la sécurité des conducteurs en diffusant des informations sur les accidents ou toute autre information concernant la sécurité des conducteurs et des passagers. Il peut être un accident, par exemple, qui s'est-il produit sur une route ou une rue donnée proche par rapport à l'emplacement du véhicule, ou des conditions de circulation dangereuses. Ces informations peuvent aider

le conducteur ou activer certains feux de circulation via un système d'alerte d'urgence, par exemple, qui permet d'informer les conducteurs de l'accident.

Les services liés à la sécurité routière se basent sur la détection de l'environnement proche au moyen de capteurs (par exemple : les radars et les caméras) installés au niveau des véhicules ou bien au centre de contrôle proche de ces véhicules, ainsi que la diffusion de messages d'alerte fournissant des informations sur l'état du réseau routier (trafic, travaux, météo), ou rappelant au conducteur les limitations de vitesse, les distances de sécurité ou qu'il s'approche d'une intersection.

b) **Services liés au confort**

Les services de cette classe sont axés sur le confort des passagers, l'efficacité du trafic et l'optimisation des itinéraires. Les exemples incluent les systèmes d'information sur le trafic destinés à faciliter le contrôle du trafic et les applications qui favorisent les interactions entre les passagers du véhicule grâce à des logiciels de divertissement et de communication, tels que le téléchargement de chansons, de discussions et de messages vocaux.

La communication dans les applications de sécurité repose sur des communications dédiées à courte portée "Dedicated Short-Range Communication (DSRC)". La norme DSRC est conçue pour les communications sans fil des véhicules et fonctionne dans le spectre 5.850-5.925 GHz en raison du fait qu'IEEE fait référence à "Federal Communications Commission aux Etats-Unis" et à "European Telecommunications Standards Institute". Cette norme IEEE permet d'avoir des canaux de communication sans fil à un sens ou à double sens sur un périmètre de 1000 m avec un débit allant jusqu'à 27 Mbps. Elle fonctionne sur une bande de fréquences autorisée, par contre, ces bandes ne sont pas compatibles d'un pays à un autre [28]. En outre, en utilisant cette norme, les véhicules peuvent communiquer entre eux ainsi qu'avec les infrastructures routières. DSRC est divisée en deux types de communication : V2V et V2I. La communication V2V est utilisée lorsque les véhicules doivent échanger des données entre eux pour que les applications de sécurité fonctionnent correctement, tandis que la communication V2I est utilisée lorsque des unités situées aux bords de routes font partie de l'application de sécurité.

Dans les applications de sécurité, certaines d'entre elles sont tenues d'envoyer des messages périodiquement (toutes les 100 ms, par exemple), tandis que d'autres applications de sécurité envoient des messages lorsqu'un événement se produit. Toutes les applications de sécurité disposent d'une plage de communications comprise entre 100 et 1 000m et d'une fréquence minimale entre 1 et 50 Hz.

1.2.6 Types de messages dans les réseaux VANETs

Toutes les applications de sécurité sont basées sur la norme de communication DSRC et nécessitent l'échange de messages avec d'autres véhicules. Ces applications obtiennent des données depuis les capteurs ou bien depuis d'autres véhicules en fonction du type de l'application. Chaque application traite les données, puis envoie des messages aux véhicules à proximité ou aux infrastructures. L'envoi des messages dans des applications de sécurité est nécessaire pour l'une des deux raisons suivantes : sensibilisation à l'environnement ou détection d'une situation dangereuse. Les messages envoyés en raison de la

prise de conscience de l'environnement sont appelés messages périodiques, tandis que ceux déclenchés par une situation non sécurisée sont appelés messages pilotés par événement.

a) **Messages périodiques**

Les messages périodiques sont générés pour informer les autres véhicules à proximité sur l'état actuel du véhicule, par exemple, sa vitesse, sa position et sa direction. Ils peuvent également inclure d'autres données. En traitant les données reçues dans des messages périodiques, les autres véhicules pourront éviter les situations dangereuses avant même qu'elles ne se produisent. Étant donné que les informations contenues dans les messages périodiques sont importantes pour tous les véhicules entourant l'expéditeur et doivent être diffusées fréquemment, les messages périodiques peuvent être considérés l'origine du problème de diffusion, ce qui peut entraîner des conflits, des collisions de paquets et une utilisation inefficace du canal sans fil.

b) **Messages événementiels**

Les messages événementiels sont des messages d'urgence envoyés à d'autres véhicules en fonction des situations dangereuses détectées. S'il n'y a pas de situation d'urgence, les messages événementiels ne seront pas diffusés. Ce type de message a une très haute priorité. Les messages événementiels contiennent l'emplacement du véhicule, l'heure et le type d'événement. Dans ce cas, l'expéditeur doit s'assurer que tous les véhicules destinés à bénéficier de ces messages les reçoivent correctement et rapidement.

Des listes exhaustives d'applications potentielles ont été évaluées par les divers projets. Généralement, les applications sont classées comme suit : sécurité, efficacité de transport et confort des passagers. Des exemples de chaque catégorie sont donnés comme suit :

- Alerte de collision avant : en particulier pour éviter les collisions par l'arrière,
- Avertissement de vitesse optimale des feux de circulation : pour aider le conducteur à arriver pendant une phase verte,
- Diagnostic à distance, c'est-à-dire rendre l'état du véhicule accessible pour un diagnostic à distance.

Pour évaluer les chances de succès, les applications ont été analysées pour déterminer si leurs exigences pouvaient être satisfaites et si (et dans quelle mesure) elles auraient un impact bénéfique. Du côté des exigences, le taux de pénétration requis (c'est-à-dire le pourcentage de véhicules équipés de la technologie VANET par rapport à la population de véhicules) est un facteur important pour permettre un fonctionnement acceptable de l'application. Les exigences techniques définissent la taille des paquets, la fréquence requise ou la précision des informations de mises à jour, les plages de communication, les contraintes de latence, les niveaux de sécurité et l'infrastructure requise. Du côté de la valeur ajoutée, les applications sont évaluées en fonction du niveau auquel elles augmentent la sécurité ou l'efficacité du transport ou satisfont aux exigences d'information souhaitables. Les évaluations quantitatives de la valeur ajoutée sont délicates car des facteurs humains entrent en jeu : par exemple, des prévisions précises de la circulation routière s'est révélée être une tâche extrêmement difficile, car ces prévisions doivent prendre en compte la boucle de rétroaction.

Pour les applications liées à la sécurité, les "communications sur la sécurité des véhicules" (VSC : Vehicle Safety Communications) ont identifié huit applications potentielles [29] :

- Alerte de trafic,
- Alerte de vitesse en courbe,
- Feu d'arrêt électronique,
- Détection avant accident,
- Alerte de collision avant coopérative,
- Assistance au virage à gauche,
- Avertissement de sortie de voie,
- Assistant de suppression de panneau de signalisation.

Les quatre premières de ces applications nécessitent une communication entre véhicules, tandis que les quatre autres nécessitent une communication avec une infrastructure située au bord de la route. Les exigences techniques dérivées montrent l'importance de la communication par diffusion lors d'un saut (c'est-à-dire qu'un véhicule transmet simplement un beacon et que tout véhicule qui peut le recevoir directement est considéré comme un voisin direct), qui se présente sous deux formes : d'un message événementiel ou périodique. Les messages orientés événement sont envoyés lorsqu'une situation dangereuse est détectée. Les messages périodiques informent de manière proactive les véhicules voisins de leur statut, par exemple, la position géographique des véhicules. Le VSC suggère que les émissions périodiques à un saut, par exemple avec un avertissement de collision en cascade, nécessitent une fréquence de 10 messages par seconde, avec une latence maximale de 100 ms et une portée minimale de 150 mètres. Entre-temps, des études montrent que dans les scénarios de trafic dense de véhicules, ces messages périodiques peuvent surcharger le canal radio disponible. Ainsi, des mécanismes adaptatifs de commande de débit et de puissance d'émission sont nécessaires.

1.3 Principaux défis des VANETS

L'un des principaux défis des réseaux VANETs est qu'aucun coordinateur de la communication ne peut être assumé. Bien que certaines applications impliquent probablement une infrastructure (par exemple, un avertissement de violation des signaux de trafic, la perception de péage), plusieurs applications devront fonctionner de manière fiable en utilisant des communications décentralisées. Parce qu'aucun protocole central de coordination ou de négociation ne peut être supposé, et étant donné que de nombreuses applications diffuseront des informations d'intérêt aux voitures de voisinage, la nécessité d'un seul canal de contrôle partagé peut être déduite (même lorsque plusieurs canaux sont disponibles en utilisant un ou plusieurs émetteurs-récepteurs, au moins un canal de contrôle partagé est requis). Ce paradigme à un canal, associé à l'exigence d'un contrôle distribué, pose certains des principaux défis de la conception des VANETs. Le problème le plus connu concerne

les terminaux cachés. Il est clair que le contrôle d'accès au support (MAC) est un élément clé de la conception des VANETs. Bien que des approches basées sur l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) et par accès multiple par répartition spatiale (SDMA) aient été proposées, on se concentre principalement sur l'utilisation de la couche MAC basée sur l'accès multiple par détection de porteuse (CSMA) IEEE 802.11 pour les VANETs.

La bande passante des canaux de fréquence attribués ou prévus pour les applications VANETs va de 10 à 20 MHz. Avec une densité de trafic élevée, ces canaux pourraient facilement être encombrés. L'utilisation de plusieurs canaux entraîne des problèmes de synchronisation multicanaux, en particulier dans le cas d'un émetteur-récepteur unique par véhicule et des problèmes de brouillage dans le même canal. En outre, la topologie dynamique de réseau basée sur la mobilité des véhicules et l'impact environnemental sur la propagation radio constitue un autre défi. Ce dernier doit tenir compte du fait que les faibles hauteurs des antennes et l'atténuation/réflexion de toutes les objets métalliques en mouvement du véhicule sont à l'origine de conditions défavorables pour les canaux radio.

Dans le cas général, les VANETs doivent fonctionner correctement dans un large éventail de conditions, y compris une circulation automobile dense et peu dense. Il existe un fort besoin de puissance de transmission adaptative et de commande de débit pour atteindre un degré raisonnable de communication fiable et une latence réduite. En outre, il est difficile d'équilibrer les besoins en matière de sécurité et de confidentialité d'une part, les destinataires veulent s'assurer qu'ils peuvent faire confiance à la source d'informations et d'autre part, la disponibilité d'une telle confiance pourrait être en contradiction avec les exigences de confidentialité d'un expéditeur.

1.4 Protocoles et normes dédiés aux VANETs

1.4.1 Communications dédiées à courte portée (DSRC)

Les communications dédiées à courte portée (DSRC) est un ensemble de normes et de protocoles utilisés dans les communications de véhicule à véhicule (V2V) et de véhicule à infrastructure (V2I) dans les systèmes de transport intelligents. Ils permettent une communication sans fil à moyenne portée avec une transmission de données élevée. Les fréquences DSRC sont attribuées sur 75 MHz du spectre dans la bande 5,9 GHz, les principales caractéristiques de la DSRC sont : une faible latence, des interférences limitées et un signal plus puissant. Cela se traduit par un meilleur comportement par rapport aux réseaux WLAN classiques.

En outre, les systèmes DSRC comprennent des unités situées aux bords des routes (RSUs) et des unités embarquées (OBU). Ils sont utilisés dans la majorité des pays de l'Union Européenne, ainsi qu'aux États-Unis. Mais la plupart de ces systèmes ne sont pas compatibles pour le moment. Il existe donc un besoin de normalisation pour assurer la compatibilité entre tous les systèmes. Dans cette optique, il existe une approche principale pour les États-Unis et une autre pour l'Union européenne. Ces approches concernent l'accès sans fil dans les environnements de véhicules (WAVE) et l'Institut européen des normes de télécommunication. Les systèmes de transport intelligent fonctionnent dans la bande des 5 GHz (ETSI ITS G5) [3].

1.4.2 Accès sans fil en environnements véhiculaires (WAVE)

WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) représente la dernière normalisation des protocoles pour les applications véhiculaires réalisée par un groupe de travail d'IEEE. L'architecture de WAVE est conforme aux spécifications des normes IEEE 802.11p et IEEE 1609 [30]. WAVE prétend modifier les normes en vigueur et en appliquer de nouvelles afin de s'adapter aux caractéristiques spécifiques des VANETs. Les principaux attributs que WAVE prétend couvrir sont le renforcement des capacités en canaux et en communication, la réduction du temps de latence et du temps de connexion, ainsi la fiabilité et la sécurité du réseau. La Figure 1.2 illustre la pile protocolaire de la norme WAVE.

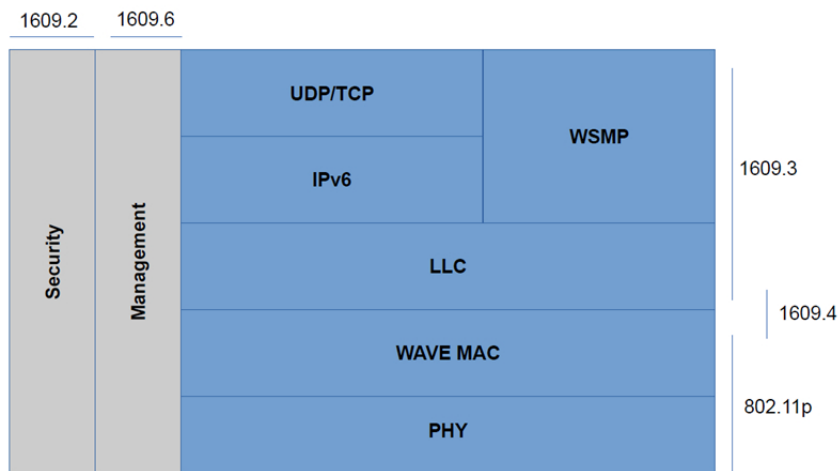


FIGURE 1.2 – Pile protocolaire de la technologie WAVE [2]

IEEE 802.11p [31] fournit les couches MAC et PHY pour la technologie WAVE. Elle est basé sur la norme d'origine IEEE 802.11, en particulier sur IEEE 802.11a, mais avec quelques modifications afin de s'adapter aux réseaux véhiculaires qui se caractérisent par l'obligation de fonctionner dans des environnements très dynamiques et mobiles.

La norme IEEE 802.11p permet des vitesses de transmission allant de 3 à 27 Mb/s sur une largeur de bande de 10 MHz, cela fonctionne avec la moitié de la bande passante de IEEE 802.11a. Elle offre également une portée allant jusqu'à 1000 mètres et peut fonctionner à des vitesses relatives des véhicules allant jusqu'à 30m/s, bien plus élevées que les vitesses prises en charge par d'autres normes telle que WiFi. Cette nouvelle norme a donné de meilleurs résultats que l'original IEEE 802.11, principalement par simulations et analyses théoriques [32, 33].

La norme IEEE 1609.x [1, 28, 34, 35] est composée d'un groupe de termes définissant l'architecture, le modèle de communication, la gestion du réseau, la sécurité ainsi que l'accès physique aux communications. Plus précisément, la norme IEEE 1609.2 [34] est axée sur la sécurité. La norme IEEE 1609.3 [28] fournit les services de réseau et de transport, équivalant à la couche réseau et à la couche de transport du modèle OSI.

La coordination et l'acheminement des canaux sont gérés par la norme IEEE 1609.4 [35] ainsi que par certaines opérations de la sous-couche MAC. Enfin, des normes de couche

supérieure telles que IEEE 1609.5 ou IEEE 1609.6 portent sur les exigences de gestion de réseau et les services de gestion à distance.

1.4.3 ETSI-ITS G5

ETSI ITS-G5 [3,36] (European Telecommunication Standard Institute-Intelligent Transportation System) correspond à l'ensemble des protocoles et paramètres ainsi qu'à la technologie d'accès à utiliser dans la bande de fréquences de 5,9 GHz pour les systèmes de transport intelligents européens [37, 38]. Il est similaire au précédent standard WAVE. Il utilise également les adresses PHY et MAC basées sur IEEE 802.11p et accorde une grande importance à la fiabilité et à la sécurité du réseau, ainsi qu'à l'amélioration de la puissance de la communication et à la réduction du temps de latence. Néanmoins, il existe certaines différences en ce qui concerne le canal CCH (Control Channel). Alors que la technologie WAVE utilise des dispositifs radio uniques qui syntonisent périodiquement des canaux connus pour ne pas rater des messages importants, l'ETSI-ITS G5 s'appuie sur un système multi-radio plus puissant qui doit toujours garder une radio à l'écoute du canal CCH [3].

Une caractéristique supplémentaire de la norme ETSI ITS-G5 est l'incorporation d'un protocole de routage et de diffusion à utiliser dans le réseau ad hoc en fonction des informations géographiques, appelé protocole GeoNetworking. C'est un protocole de la couche réseau qui permet la communication entre les nœuds ITS individuels ainsi que la distribution des messages dans une zone géographique [39]. La Figure 1.3 montre la pile protocolaire de la norme ETSI ITS-G5.

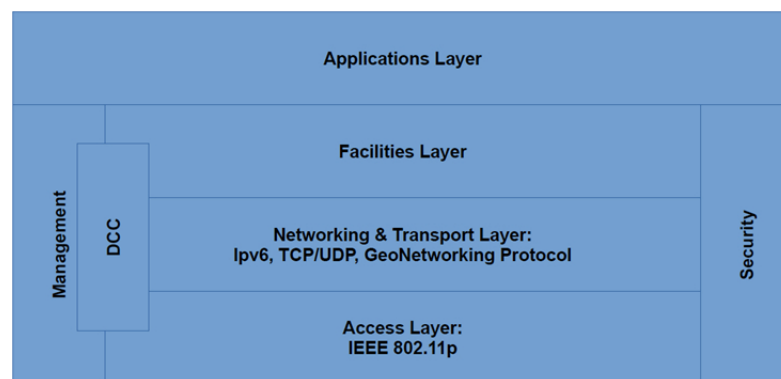


FIGURE 1.3 – Pile protocolaire de la norme ETSI ITS-G5 [3]

Dans les réseaux VANETs, les couches PHY/MAC sont actuellement basées sur la norme IEEE 802.11 avec fonction de coordination distribuée "Distributed Coordination Function (DCF)". Bien entendu, un tel système ne garantit pas une assistance de qualité de service. L'ASTM (l'American Society for Testing and Materials) a modifié la norme 802.11a afin de mieux la correspondre à l'environnement des véhicules et sur la base de cet effort, IEEE est entrain de normaliser le standard 802.11p correspondant. La norme IEEE 802.11p repose sur une couche PHY OFDM (multiplexage par répartition en fréquence orthogonale), mais utilise des canaux à 10 MHz au lieu des canaux à 20 MHz pour la norme IEEE 802.11a. En conséquence, les débits de données varient de 3 à 27 Mb/s pour

chaque canal, des débits plus faibles étant souvent préférés pour obtenir une communication robuste. Les normes IEEE 802.11a et 802.11p fonctionnent dans la bande 5,8-5,9 GHz.

Étant donné que le type de communication de base dans un réseau VANET est basé sur des diffusions à un saut, la couche MAC IEEE 802.11 se résume à un simple schéma CSMA. Cependant, de nombreux paramètres peuvent influencer sur la probabilité de réception de paquets. Une liste partielle qui résume ces paramètres, comprend la densité de trafic des véhicules, les conditions des canaux radio, le débit de données, la puissance de transmission, la taille des fenêtres de conflit et la hiérarchisation des paquets.

Pour la hiérarchisation, les idées d'accès améliorées au canal distribué "Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)", décrites précédemment dans IEEE 802.11e et faisant désormais partie du 802.11-2007, peuvent être utilisées et des valeurs de configuration sont proposées dans IEEE 1609.4. Quatre catégories d'accès avec des files d'attente indépendantes pour l'accès aux canaux sont fournies en ajustant l'espace inter-trame d'arbitrage et la taille de la fenêtre de conflit. Une étude complète en simulation des effets des paramètres sur la probabilité de réception est présentée dans [40]. Cette étude a montré que pour un canal plus saturé, il est préférable d'utiliser un débit de 3 Mb/s plutôt que des débits plus élevés. En outre, il est possible de démontrer que l'accès au canal avec priorité basé sur IEEE 802.11e entraîne de meilleurs temps d'accès au canal et une probabilité plus élevée de réception pour les paquets qui reçoivent une priorité plus élevée. Toutefois, les résultats ont montré que le standard IEEE 802.11p prêt à l'emploi ne suffit pas à fournir un niveau de qualité de service approprié pour prendre en charge les applications liées à la sécurité du trafic.

1.5 Projets VANETs

La mise en œuvre des applications VANETs dans un système temps réel est une tâche très difficile. De nombreuses implémentations ont été déployées ces dernières années et leur mise en œuvre dans un système temps réel nécessite une simulation complète en mesurant les performances du système. Plusieurs gouvernements ont lancé de nombreux nouveaux projets pour développer les systèmes ITS. Les États-Unis, le Japon et les pays européens utilisent les systèmes ITS en mettant en œuvre les applications VANETs dans les zones urbaines. Les premiers développements concernent principalement l'infrastructure des protocoles (WAVE, IEEE 802.11p et DSRC). Cependant, ces derniers acquièrent maintenant les nouveaux concepts de système de messagerie et d'architecture des applications. De nombreux constructeurs automobiles tels que BMW, Audi, Ford, General Motors, Daimler, Nissan, etc. utilisent les systèmes ITS pour la sécurité des passagers. "Vehicle Safety Communication (VSC)" est un exemple de projet aux États-Unis, "Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC)" est un projet dans les pays européens et le projet "Advanced Safety Vehicle (ASV)" et le projet "Vehicle Infrastructure Integration (VII)" au Japon.

Plusieurs projets VANETs sont examinés et mentionnés dans [41] et présentés comme suit :

1.5.1 Projets VANETs en Europe

- **Le projet "C2C-CC"** : Ce projet a débuté en 2001 et utilise le WLAN IEEE 802.11 sur 100m. Il est principalement conçu pour la communication V2V, créé par les constructeurs européens de véhicules. Le projet C2C-CC se consacre à l'objectif d'accroître encore la sécurité et l'efficacité du trafic routier grâce à une coopération entre les systèmes ITS et les communications inter-véhicules. Il soutient la création d'une norme européenne pour les futurs véhicules communicants couvrant toutes les marques. le projet C2C-CC travaille en étroite coopération avec les organisations européennes et internationales de normalisation, en particulier l'ETSI TC ITS.
- **Le projet Fleetnet [42]** : Ce projet utilise les informations GPS pour les communications V2V et V2I. Il est principalement déployé dans les zones urbaines et simulé par le démonstrateur Fleetnet.
- **"Network On Wheels (NoW)"** : C'est un projet principalement déployé en Allemagne et financé par Daimler, BMW et Volkswagen. Ceci est principalement développé pour assurer la sécurité. Il prend en charge la communication C2C-CC. Les principaux objectifs de ce projet est de résoudre les questions techniques clés sur les protocoles de communication et la sécurité des données pour les communications V2V et de soumettre les résultats aux activités de normalisation du consortium C2C-CC, qui représente une initiative des principaux constructeurs automobiles européens.
- **"PreVENTive and Active Safety Applications (PreVent)"** : Le projet PreVENT développe, teste et évalue les applications liées à la sécurité, en utilisant des capteurs et des dispositifs de communication avancés intégrés dans les systèmes embarqués pour l'assistance du conducteur.
- **"Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS)"** : Ce projet a pour objectif de concevoir, développer et tester les nouvelles technologies nécessaires pour permettre aux véhicules de communiquer entre eux et avec les infrastructures routières à proximité.
- **CarTalk [43,44]** : C'est un projet utilisé pour les systèmes d'assistance avancée au conducteur (ADAS : Advanced Driver Assistance System), de contrôle de croisière avancé et de prévention des collisions.
- **"Wireless Traffic Service Platform for Linking Cars Project (CARLINK)" [45]** : Ce projet vise à développer une plateforme de service de trafic sans fil intelligente entre voitures supportée par des émetteurs-récepteurs sans fil situés le long de la route. Les principales applications sous-jacentes à ce projet sont les prévisions météorologiques, la gestion du trafic urbain et la diffusion d'informations.
- **"Intelligent Design of Wireless Communication Networks (DIRICOM)"** : C'est un projet espagnol financé par financé par le ministère régional espagnol de l'innovation, des sciences et des affaires. L'objectif de ce projet est de résoudre les problèmes de conception de réseaux sans fil à l'aide de techniques intelligentes, principalement des méta-heuristiques.

- **"Providing adaptive ubiquitous services in vehicular contexts (SEISCIN-TOS)"** : C'est un projet principalement axé sur la communication intelligente dans MANETs, VANETs et WSNs (Wireless Sensor Networks). Les travaux proposés dans le cadre de ce projet visent à créer un cadre qui répond aux besoins des communications entre véhicules et que l'infrastructure fournit des services dédiés aux utilisateurs finaux dans des environnements de véhicules omniprésents.
- **WiSafeCar** : Ce projet est synonyme de réseau de sécurité du trafic sans fil entre les voitures. C'est un projet principalement conçu pour la gestion du trafic et la sécurité routière.
- **MARTA** : Ce projet est synonyme de mobilité et d'automatisation via des réseaux de transport avancés. C'est un projet espagnol visant à assurer la sécurité et l'efficacité des ITS.
- **ComeSafety** : Il assure la sécurité des communications V2V et V2I en soutenant le forum de la sécurité.
- **Coopers** : Ce projet est synonyme de systèmes coopératifs pour la sécurité routière intelligente. Il assure la sécurité du trafic entre les véhicules et l'infrastructure en concevant des applications télématiques.
- **eSafetySupport** : C'est un projet visant à fournir des systèmes de sécurité et à soutenir l'objectif de la commission européenne pour réduire le nombre de morts sur les routes entre 2001 et 2010.
- **"E-safety Vehicle Intrusion proTected Applications (EVITA)"** : Ce projet signifie "applications protégées pour les infrastructures de véhicules sécurisés". Il fournit une communication sécurisée.
- **"Global System for Telematics (GST)"** : Son principal objectif est de déployer des services télématiques aux utilisateurs finaux.
- **GeoNet** : Il est synonyme d'adressage géographique et de routage pour les communications véhiculaires. Le projet GeoNet étend le travail du projet C2C-CC en améliorant ses spécifications et son interface avec IPv6.
- **iTETRIS** : Il s'agit d'une plateforme intégrée de trafic sans fil et de solutions de gestion du trafic routier en temps réel. Cela fonctionne sur les émissions, le temps de trajet, la gestion du trafic, etc.
- **Pre-DRIVE C2X** : Ce projet est principalement axé sur les systèmes d'aide à la conduite et la communication en matière de sécurité.
- **SAFESPOT** : C'est un projet principalement axé sur la communication de sécurité entre les véhicules.
- **SEVECOM** : Il est synonyme de communication sécurisée entre véhicules. C'est un projet de l'union européenne qui sécurise le système.

- **"Safe Intelligent Mobility-Test field Germany (SIM-TD)"** : Il assure la communication entre de types V2V et V2I pour la sécurité du trafic.
- **"Intelligent Transport Systems [46]"** : C'est un projet développé en Grèce avec le soutien de l'union européenne. Il s'agit du développement d'un système intelligent et centré sur les données pour le transport multimodal autour d'un réseau de capteurs fournissant des données en temps réel sur l'état des véhicules, des biens et des infrastructures.

1.5.2 Projets VANETs aux États-Unis

- **WAVE (2004) [1]** : Il signifie accès sans fil dans les environnements véhiculaires. Il étend de nombreux projets aux États-Unis tels que IVI, VSC, VII, etc.
- **"Intelligent Vehicle Initiative (IVI)" (1998-2004) [47]** : Il a pour objectif d'assurer la sécurité routière.
- **VSC (Vehicle Safety Communication) (2006)** : Il permet la sécurité des communications entre véhicules. Il fonctionne en coordination avec l'administration de la sécurité routière.
- **VSC-2** : Ce projet comprend les protocoles, la messagerie, les systèmes et les interfaces pour les communications entre véhicules.
- **"VII" (2004–2009) [44]** : Il permet des communications de type V2I. Les premiers essais ont été faits à Detroit aux États-Unis. Il collabore avec Ford, General Motors, BMW, Honda, Toyota, Volkswagen, Daimler-Chrysler et Nissan pour une meilleure communication.

1.5.3 Projets VANETs au Japon

- **ASV (1996) [44]** : Il a été étendu à ASV-3 en 2001 et à ASV-4 en 2005 en fournissant un système anti-collision automatique et un système de navigation. Il est soutenu par Honda, Mitsubishi, Suzuki et Toyota.
- **DEMO 2000 Cooperative Driving [48]** : Ce projet a été lancé en 2000 pour fournir un système coopératif d'assistance à la conduite. Il utilise une bande de 5,8 GHz et les protocoles CSMA pour la communication.
- **"Japan Automobile Research Institute (JARI)" [48]** : Ce projet mène de nombreux essais de projets et évalue les projets des États-Unis et de l'union européenne. Il se concentre principalement sur la sécurité routière.
- **Energy ITS [49]** : Le projet, démarré en 2008, vise l'économie d'énergie et la prévention du réchauffement de la planète grâce aux technologies ITS. Un groupe de trois camions entièrement automatisés roule à 80 km/h avec un écart de 10 m sur un camion d'essai et le long d'une voie rapide avant d'être utilisé par le public. Le contrôle latéral est basé sur la détection de marqueur de voie par vision artificielle, et le contrôle longitudinal sur la mesure de l'écart par radar et lidar à 76 GHz, en

plus des communications inter-véhicules du DSRC à 5,8 GHz. Le radar et le lidar servent également pour détecter les obstacles. La particularité de ces technologies est leur grande fiabilité, visant leur introduction dans les véhicules dans l'avenir. La mesure de la consommation de carburant sur une piste d'essai et le long d'une voie rapide montre que le carburant peut être économisé d'environ 14%.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux ad hoc véhiculaires, leurs caractéristiques, leurs fonctionnements, et leurs domaines d'applications. Puis, nous avons mis l'accent sur les technologies de communication dans les VANETs en particulier la norme 802.11p pour illustrer les contraintes sous-jacentes à ces technologies de communication.

Dans les chapitre suivants, nous présenterons un état de l'art sur le routage géographique dans les VANETs et sur les services de localisation pour tirer profit des avantages des meilleures contributions dans ces deux thématiques et surpasser les limitations des autres.

Première partie

Les Protocoles de routage géographique dans les VANETs

Etat de l'art sur les protocoles de routage géographique dans les VANETs

2.1 Introduction

Le succès de déploiement des VANETs dépend de plusieurs critères, l'un d'eux est l'établissement de liens d'une manière optimale entre la source et la destination permettant d'offrir un délai le plus court possible et un taux élevé de réception de paquets avec succès tout en utilisant moins de ressources réseau. Les caractéristiques particulières des VANETs, telles que les changements fréquents de leurs topologies et la grande mobilité des véhicules, ont causé des liens de communication instables entre les véhicules, présentant ainsi un défi clé dans le routage de l'information, bien que les RSUs puissent être utilisées pour résoudre ces problèmes et faciliter la communication entre véhicules, le déploiement de ces unités entraîne un coût très élevé.

Dans ce chapitre, on se concentre uniquement sur les protocoles de routage géographique, qui utilisent l'information de la position géographique dans le processus de routage, où la source emploie la position géographique de la destination au lieu de son adresse réseau pour lui envoyer un paquet de données. Dans ces protocoles, tous les nœuds dépendent du système de position géographique "Global Positioning System (GPS)" pour détecter leur emplacement géographique et également partagent cette information avec leurs voisins se trouvant à leur portée de communication par le biais des messages périodiques (les beacons). Par ailleurs, dans le routage basé sur la position géographique, le nœud source inclut les informations sur la position de la destination dans l'en-tête du paquet, et il n'a pas besoin de découvrir ou de maintenir les routes ni d'identifier la topologie du réseau pour envoyer un paquet de données. Par conséquent, ces protocoles sont plus stables et plus appropriés pour les réseaux VANETs.

2.2 Taxonomie des protocoles de routage pour les VANETs

Dans cette section, nous présentons une classification des protocoles de routage conçus pour les VANETs selon plusieurs métriques. Puis, nous détaillons le fonctionnement des

protocoles les plus répondus.



FIGURE 2.1 – Taxonomie des protocoles de routage pour les VANETs

2.2.1 Protocoles de routage basés sur la topologie

Ces protocoles sont classés comme suit :

a) Protocoles de routage proactifs

Dans cette catégorie, chaque noeud du réseau stocke l'information de la route dans une table de routage dans laquelle figure les nœuds du saut suivant pour atteindre tous les autres nœuds, et cette table est maintenue indépendamment de la nécessité d'une telle route. Pour que les noeuds soient à jour avec les changements de la topologie du réseau, la table de routage associée à chacun d'eux doit être mise à jour fréquemment et diffusée périodiquement aux voisins. La sélection des routes dans cette catégorie est généralement

basée sur les algorithmes du plus court chemin via deux approches de routage : état des liens et vecteur de distance.

Dans les protocoles de routage proactifs, les nœuds ont des routes prédéterminées à l'avance vers tous les autres nœuds. Par ailleurs, l'utilisation de ces protocoles pour les nœuds très mobiles tels que ceux des réseaux VANETs n'est pas appropriée car une grande quantité de la bande passante sera consommée lors du partage d'informations de vecteur de distance avec les nœuds voisins. En outre, étant donné que les nœuds des réseaux VANETs sont hautement dynamiques, le routage proactif devient inefficace en raison du maintien des tables de routage ayant une grande dimension et du besoin de bande passante élevée.

Les protocoles de routage proactifs les plus connus incluent "Destination-Sequenced Distance Vector routing (DSDV)" [50], "Wireless Routing Protocol (WRP)" [51], "Global State Routing Protocol (GSRP)" [52], "Fisheye State Routing (FSR)" [53] et "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)" [54].

b) Protocoles de routage réactifs

Dans cette catégorie, les chemins de routage ne sont établis que lorsque cela est nécessaire. Par conséquent, ces protocoles ont également été étiquetés en tant que protocoles de routage à la demande. L'opération de découverte de la route est lancée pour découvrir les chemins vers la destination, et cette opération se termine après avoir exploré tous les chemins possibles. Les routes sont maintenues seulement à la demande pour réduire les surcoûts de routage (l'overhead). Les protocoles de cette catégorie s'appliquent principalement aux réseaux ad hoc mobiles de grande taille avec forte mobilité et changements fréquents de topologie. En outre, ces protocoles ont également démontré une plus grande robustesse lors du passage à l'échelle que les protocoles de routage proactifs. Cependant, dans ces protocoles, le nœud source transmet les paquets de données suite à des retards prolongés à cause de la phase de découverte de routes. Parmi ces protocoles, nous citons les plus connus à l'instar de : "Dynamic Source Routing (DSR)" [55], "Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)" [56], "Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV)" [57], "Proactive AODV (Pro-AODV)" [58].

c) Protocoles de routage hybrides

Cette catégorie combine entre les caractéristiques des protocoles de routage réactifs et les protocoles de routage proactifs. Les protocoles hybrides sont basés sur des zones, divisent les nœuds en zones pour garantir l'entretien et la découverte des routes fiables. Les principaux avantages de ces protocoles ce qu'ils permettent de découvrir efficacement les routes, d'éviter les retards de livraison des paquets de données et de réduire les coûts de communication (l'overhead). Cependant, ces protocoles ne sont pas adaptés aux réseaux qui présentent un comportement très dynamique et une topologie souvent variable tels que les VANETs. La conception de ces protocoles prend en charge les réseaux fragmentés avec des nœuds stables. Les protocoles de routage hybrides les plus populaires sont "Zone Routing Protocol (ZRP)" [59] et "Hybrid Ad hoc Routing Protocol (HARP)" [60].

2.2.2 Protocoles de routage basés sur les clusters

Les protocoles de routage basés sur les clusters peuvent être utilisés dans les topologies de réseau avec des clusters. Chaque cluster délègue un chef de cluster pour gérer les communications intra-cluster et inter-cluster. La communication intra-cluster a lieu entre les nœuds du même cluster. Cependant, les nœuds membres de différents clusters peuvent toujours communiquer les uns avec les autres via les chefs de cluster. Dans les protocoles basés sur les clusters, le problème majeur réside dans la configuration des clusters et la sélection de chef de cluster. La configuration des clusters dans les VANETs est un processus très difficile car les nœuds sont très mobiles. Les protocoles de routage basés sur les clusters les bien connus incluent "Location Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding (LORA-CBF)" [61], "Cluster Based Routing (CBR)" [62], "Cluster Based Directional Routing Protocol (CBDRP)" [63] et "Global System for Telematics (TIBCRPH)" [64].

2.2.3 Protocoles de routage basés sur diffusion multicast

Les protocoles de multicast proposés dans la littérature sont conçus pour répondre aux exigences des réseaux filaires stables. Cependant, les caractéristiques des VANETs diffèrent entièrement de celles des réseaux filaires, rendant ainsi les protocoles de diffusion multicast existants non valides pour les réseaux VANETs. Les protocoles de routage multicast peuvent être classés comme suit :

a) Protocoles de routage basés sur des arbres

Un arbre de routage multicast partagé est construit et maintenu dans un groupe de multicast utilisant un protocole de routage multicast basé sur une arborescence pour transmettre les données de la source à ses destinations. Dans les réseaux VANETs, ces arbres doivent être rétablis de temps à autre à cause de la grande mobilité des nœuds des réseaux VANETs. Cependant, certains protocoles arborescents ont été modifiés pour les réseaux mobiles. Parmi ces protocoles nous citons "Multicast operation of the Ad hoc On-Demand Distance Vector (MAODV)" [65], "Adaptive Demand Driven Multicast Routing (ADMR)" [66] et "Multicast extension for the Optimized Link State Routing protocol (MOLSR)" [67].

b) Protocoles de routage basés sur les maillages

Un protocole de routage multicast à base de mailles est utilisé dans les scénarios où les destinataires sont regroupés. Quelques protocoles de routage multicasts à base de maillage incluent "On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)" [68] et "Destination-driven On-Demand Multicast Routing Protocol (D-ODMRP)" [69].

2.2.4 Protocoles de routage basés sur des géocasts

Les protocoles de routage à base de géocast sont développés en intégrant le routage multicast avec les fonctionnalités de routage géographique. Ces protocoles permettent d'acheminer les paquets à tous les véhicules qui se trouvent dans une zone géographique particulière. Ils permettent aussi de garantir au nœud source d'envoyer les paquets vers

d'autres nœuds d'une zone géographique fixe. Les nœuds qui se trouvent en dehors de cette zone géographique ne reçoivent aucune notification. Les protocoles de routage géocast les mieux connus sont "Inter-Vehicular Geocast (IVG)" [70], "Abiding Geocast (AGR)" [71] et Mobicast [72].

2.2.5 Protocoles de routage basés sur la diffusion

Les protocoles de routage basés sur la diffusion sont utilisés dans les VANETs pour partager et annoncer des informations concernant l'état des routes, les conditions météorologiques et les urgences. Ces protocoles suivent le principe d'inondation dans lequel un paquet reçu pour la première fois par un nœud est retransmis à d'autres nœuds. Les protocoles de routage basés sur la diffusion conviennent pour les réseaux clairsemés lorsque le nombre de paquets de diffusion est augmenté, parmi ces protocoles nous citons : "Urban Multihop Broadcast (UMB)" [73] et "Distributed Vehicular broadcast protocol for VANETs (DV-CAST)" [74].

2.2.6 Protocoles de routage géographique

Les protocoles de routage géographique utilisent les informations de position dans leur procédure de routage, où la source utilise la position géographique à la place de l'adresse réseau pour envoyer les paquets. Dans ces protocoles, tous les nœuds disposent du GPS pour détecter leur emplacement et le paquet peut être envoyé à la destination selon un schéma de routage multi-saut. Par rapport aux autres protocoles, les protocoles de routage géographique fournissent un support d'évolutivité et produisent un temps de communication minimal. Par conséquent, ces protocoles sont plus stables et appropriés pour les VANETs.

Dans la stratégie de routage adoptée dans ces protocoles, chaque nœud sélectionne un nœud voisin en tant que saut-suivant selon une stratégie prédéfinie. Chaque nœud gère une table de voisinage contenant des informations sur tous les voisins, en plus, les nœuds échangent des paquets "Hello" entre eux pour mettre à jour leurs tables de voisinage. Bien que les protocoles de routage basés sur la position géographique sont très appropriés et efficaces pour les réseaux VANETs, plusieurs limitations doivent être abordées. Par exemple, le mouvement rapide des nœuds dans les réseaux VANETs peut entraîner une défaillance de la route entre les nœuds relais consécutifs. Les ruptures de routes nécessitent un processus de rétablissement de routes, ce qui augmente le taux de perte de paquets, le délai de bout en bout et l'overhead.

2.2.7 Protocoles de routage géographiques basés sur le nœud

Dans cette section, nous présentons les protocoles de routage géographique les plus répondus qui sont basés sur le nœud :

1. Le protocole "Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)"

Dans [20], Karp et al. ont proposé un protocole de routage géographique basé sur une approche glotonne, appelé GPSR. Ce protocole permet de fournir des résultats favorables dans les scénarios avec des nœuds uniformément répartis tels que les

véhicules dans les autoroutes. Dans GPSR, le processus de routage implique deux modes : le mode glouton (Greedy Forwarding) et le mode périmètre (Perimeter Forwarding).

Dans ce protocole, le nœud "saut suivant" est sélectionné en fonction de la position de la destination. Le nœud le plus proche de la destination est sélectionné comme nœud "saut suivant". Cependant, GPSR ne convient pas aux conditions des scénarios dans l'environnement urbain. Premièrement, lorsque certains obstacles sont présents, la communication directe entre les nœuds devient impossible et GPSR devient inapplicable. Deuxièmement, GPSR est basculé vers le mode périmètre en cas d'échec du transfert ou lorsque aucun nœud voisin n'est plus proche de la destination autre que le nœud lui-même. Le routage dans le mode périmètre identifie une route étendue vers la destination, mais ce mode augmente le nombre de sauts, la perte de paquets et le délai de bout en bout.

2. Le protocole "Geographic Source Routing (GSR)"

C'est un protocole de routage géographique proposé dans [75], conçu pour les environnements urbains. Le protocole GSR calcule la route la plus courte de la source à la destination en utilisant la carte géographique. GSR est considéré comme le premier protocole qui combine entre la topologie géographique et l'information géographique. Premièrement, GSR représente la topologie par un graphe et utilise l'algorithme de Dijkstra pour trouver le plus court chemin de la source à la destination. Ce chemin est composé d'une suite d'intersections à suivre pour atteindre la destination finale. Cependant, GSR ne fournit pas de résultats favorables dans les réseaux avec un petit nombre de nœuds. De plus, GSR utilise un mécanisme fixe dans le calcul de chemin et ne prend pas en compte le changement dynamique de la topologie, rendant ainsi ce protocole inadapté aux réseaux fortement dynamique tels que les VANETs.

3. Le protocole "Greedy perimeter coordinator routing (GPCR)"

Dans [21], Lochert et al. ont proposé le protocole GPCR. Ce protocole ne nécessite pas de cartes numériques. Dans GPCR, un nœud de coordination est un nœud qui est situé plus près de la l'intersection et dispose de toutes les informations nécessaires pour prendre des décisions de routage. GPCR utilise une approche gloutonne restreinte pour transférer les paquets c'est-à-dire en se concentrant sur une progression maximale. En outre dans GPCR, les nœuds coordinateurs sont préférés par rapport aux nœuds non coordinateurs dans le processus de routage de l'information. Un mode de recouvrement est appliqué lorsque le maximum local est atteint où les paquets sont retournés à la dernière intersection visitée afin de trouver un autre moyen pour revenir au mode glouton. Cependant, étant donné que ce protocole ne prend pas en compte le nombre de nœuds sur un segment (une route entre deux intersections), il produit ainsi un taux de perte élevé et un délai important.

4. Le protocole "A Position-based Directional Vehicular Routing (PDVR)"

Le protocole PDVR a été proposé dans [76]. Dans ce protocole, les paquets sont routés vers la destination en sélectionnant une route stable et efficace basé sur deux règles. Premièrement, la direction de déplacement du nœud voisin choisi doit être similaire à celle du nœud de transmission. Deuxièmement, un nœud choisi doit être physiquement situé dans la direction d'une destination. Cependant, certains

obstacles dans les scénarios urbains peuvent empêcher PDVR de fonctionner efficacement.

5. Le protocole "A Motion Sensitive Adaptive Routing (AMAR)"

Dans [77], les auteurs ont proposé un protocole qui utilise une méthode de transfert gloutonne pour sélectionner le nœud "saut suivant". En plus, il fournit des informations supplémentaires sur le déplacement des véhicules afin d'aider à sélectionner le nœud "saut suivant" approprié. Le protocole AMAR garantit également une livraison de données réussie en résolvant le problème de nœud en conflit rencontré dans le protocole B-MFR (border-node-based most forward). En outre, Le protocole AMAR utilise les informations sur la vitesse et la direction du véhicule pour calculer le score pondéré du nœud de frontière et par suite celui qui a le score pondéré le plus élevé est choisi comme meilleur candidat. Par ailleurs, l'utilisation du protocole AMAR pour sélectionner le nœud frontière peut également améliorer la transmission des données. Bien que ce protocole vise à résoudre le problème de nœud en conflit dans le protocole B-MFR, le fait d'avoir deux nœuds aux frontières avec le même score pondéré peut créer des problèmes pour le processus de sélection de nœud "saut-suivant".

6. Le protocole "A diagonal intersection-based routing (DIR)"

Ce protocole a été proposé dans [78]. Il utilise une séquence d'intersections diagonales entre la source et la destination, où le nœud source transfère géographiquement les paquets de données de la première diagonale à la dernière diagonale jusqu'à atteindre le véhicule de destination. Des sous-chemins distincts sont déterminés entre des paires d'intersections diagonales voisines. Le protocole DIR utilise également la fonctionnalité de réglage automatique, qui permet de sélectionner le sous-chemin dont le délai de transmission est minimal pour la progression des paquets de données. Par conséquent, le chemin de routage est régulé régulièrement par le sous-chemin sélectionné afin de réduire le délai des paquets de données. Cependant, bien que le protocole DIR réalise un court délai pour le transfert des paquets, ce protocole doit faire face à une complexité temporelle élevée lors de la prise en compte de plusieurs intersections diagonales.

7. Le protocole "A Grid-based Predictive Geographical Routing (GPGR)"

Dans [79], les auteurs ont proposé un protocole appelé GPGR. Ce protocole utilise une carte de routes pour obtenir des informations sur la topologie routière. Dans le protocole GPGR, les paquets de données sont acheminés en fonction des segments (des routes) et de la topologie. GPGR utilise également les informations de mobilité, y compris la topologie, la position, la direction et la vitesse pour améliorer le processus de routage dans les communications inter-véhicule (IVC). Il utilise le GPS pour obtenir des informations sur la localisation des véhicules. Les résultats de la réplication montrent que GPGR a une faible probabilité d'atteindre le maximum local, et il peut éviter les pannes des liaisons.

8. Le protocole "A Multi-Metric Map-aware Routing (MMMR)"

Le protocole MMMR [80] utilise quatre métriques, à savoir la densité des véhicules, la trajectoire, la distance à destination et la bande passante disponible pour la sélection des nœuds de transmission suivants et l'amélioration du mécanisme de

transmission des paquets.

Ce protocole a la possibilité de connaître la présence d'obstacles tels que les bâtiments grâce à la carte dont il dispose et il prend en compte cette information pour sélectionner le prochain saut lors de la transmission de paquets. Par ailleurs, pour résoudre le problème d'encombrement des données, le protocole MMMR calcule la bande passante accessible en estimant le pourcentage de temps d'inactivité sur un support sans fil partagé i.e la bande passante accessible du lien est estimée à l'aide d'un estimateur de bande passante en fonction du temps d'inactivité estimé de l'émetteur et du récepteur. Cette valeur calculée de la bande passante disponible sur un lien est ajoutée dans les paquets "Hello". En outre, chaque nœud compte les voisins pour mesurer la densité de ses nœuds locaux. Ensuite, les voisins échangent des paquets "Hello" contenant des informations sur la densité, la direction et la vitesse du véhicule concerné. Les voisins qui ont reçu des puissances dépassant un certain seuil et qui sont placés dans la plage de transmission sont sélectionnés en tant que voisins stables pour améliorer la précision de la table de voisinage. En outre, des paquets "Hello" périodiques sont utilisés pour calculer la puissance de chaque voisin. Pour effectuer la transmission des paquets dans le protocole MMMR, le nœud courant doit sélectionner le meilleur nœud voisin comme prochain saut pour le transfert de paquets où un score est attribué à chaque voisin en fonction de quatre paramètres d'évaluation, et le nœud ayant le score le plus élevé est sélectionné en tant que transmetteur suivant. Par ailleurs, chaque voisin pris en compte dans la procédure d'évaluation doit remplir plusieurs conditions, par exemple être plus proche de la destination que le nœud relayeur actuel, se situer dans la plage de transmission du nœud actuel et dans la ligne de mire du relayeur actuel. Cependant, malgré sa fiabilité et son taux de livraison élevé, le protocole MMMR présente certaines limites, telles que l'augmentation du délai de bout en bout et le nombre de sauts pour les réseaux fragmentés.

9. Le protocole "A Link State aware Geographic Opportunistic (LSGO)"

Dans [81], les auteurs ont proposé un protocole appelé LSGO pour augmenter le taux de livraison des paquets et améliorer la fiabilité de la transmission des données. Dans LSGO, des paquets "Hello" périodiques sont utilisés pour calculer le nombre de transmissions prévues pour chaque voisin. Les paquets "Hello" reçus sont enregistrés par chaque nœud, puis le nombre total de paquets reçus est divisé par le nombre attendu de paquets reçus au cours d'une période donnée. De cette manière, la qualité du lien représentée par la métrique "Expected Transmission Count (ETX)" peut être calculée. Les voisins situés à proximité de la destination et capables d'envoyer des données au saut suivant avec un débit de transmission souhaité sont inclus dans l'ensemble des voisins candidats. Alternativement, la probabilité de transmission des données avec succès de la source au saut suivant est calculée. Les numéros de priorité et les identifiants des nœuds candidats sont ensuite enregistrés dans l'en-tête du paquet par le nœud actuel. Le protocole LSGO utilise l'algorithme d'ordonnement prioritaire basé sur un timer dans lequel la valeur ETX de lien (qui joint le nœud actuel et le nœud candidat) et la distance de destination sont utilisées comme métriques de priorité. Le nœud prioritaire envoie le paquet directement à

sa destination et les nœuds de faible priorité doivent définir un temporisateur. Si le nœud de priorité élevée n'effectue pas la transmission et que le temporisateur expire, le nœud de priorité faible peut envoyer le paquet. En outre, des liaisons de sauvegarde supplémentaires sont utilisées avec d'autres voisins via un routage opportuniste pour améliorer la fiabilité du protocole de routage LSGO. Cependant, LSGO génère une surcharge de routage supplémentaire (overhead) car ce protocole dépend de la multidiffusion (multicast) vers un ensemble de voisins. En plus, LSGO génère également une surcharge de routage et un débit de réseau élevés dans les réseaux à faible densité.

2.2.8 Protocoles de routage basés sur le trafic véhiculaire

Les protocoles de routage géographique sont considérés comme les protocoles les plus efficaces pour la transmission de données dans les VANETs. Par ailleurs, les protocoles de routage basés sur les nœuds ne tiennent pas en compte les caractéristiques particulières des réseaux véhiculaires dans lesquels les nœuds mobiles (véhicules) sont limités par des segments et la durée de vie de la communication est affectée par le nombre de véhicules. Néanmoins, certaines de ces caractéristiques peuvent améliorer les performances du protocole de routage. Les routes avec une excellente connectivité peuvent être sélectionnées si l'état du segment est pris en compte ainsi que la position des véhicules. Les segments à faible densité ne sont pas pris en compte lors du transfert de paquets. Par ailleurs, l'état du réseau et la charge de trafic de données par segment doivent être pris en compte lors de la prise de décisions de routage afin d'éviter de sélectionner des routes congestionnées pour le transfert de paquets de données. A cet effet, l'acheminement via un segment doit prendre en considération les informations sur le trafic et l'état du réseau, y compris la densité, la qualité des liaisons entre véhicules, la distribution des véhicules et la charge de communication réseau par segment.

Les protocoles de routage basés sur les segments surpassent les protocoles de routage basés sur les nœuds étant donné que les premiers tiennent compte de la position des véhicules et ne prennent pas en compte les conditions de trafic lors de la livraison de paquets.

1. **Le protocole "A Geographical greedy Traffic-Aware Routing (GyTAR)"**
Dans [82], Jerbi et al. ont proposé un protocole de routage géographique appelé GyTAR. Ce protocole choisit dynamiquement les intersections intermédiaires par lesquelles les paquets peuvent transiter pour atteindre leur destination. Le nombre de véhicules et la distance curvemétrique (la distance suivant la courbe) par rapport à la destination sont pris en compte par le processus de sélection de la prochaine intersection. Le segment ayant le plus grand nombre de véhicules et la distance la plus courte vers la destination dispose le score le plus élevé. En plus, chaque segment est formé par des cellules physiques et chaque cellule partage le même rayon relatif à la gamme de transmission. Le véhicule le plus près du centre de la cellule est désigné en tant que chef de groupe. Ce chef de groupe a pour rôle de mesurer le nombre de véhicules dans sa cellule. Ces mesures sont encapsulées dans un paquet nommé CP (Cell Paket). Le chef de groupe qui se trouve à la sortie du segment génère un paquet CP qui est transmis en amont au premier chef de cellule du segment

ciblé en utilisant une approche gloutonne améliorée. Les informations des beacons, y compris la position, la direction et la vitesse, sont stockées dans une table de voisinage et peuvent être utilisées pour prédire la position de chaque voisin. Par suite, le noeud "saut-suivant" est ensuite sélectionné en désignant le voisin ayant la position prédite la plus proche. Avant d'atteindre la fin du segment, le paquet CP traverse tous les chefs des cellules. La densité de la cellule correspondante est ajoutée au paquet CP dès qu'un chef de groupe est atteint, qui a son tour transmet ensuite les informations de densité à la cellule suivante. Le paquet CP est analysé à la fin de chaque segment pour calculer la densité moyenne de véhicules de chaque cellule. Un score est attribué au segment en cours d'évaluation en fonction de sa densité et de sa distance par rapport à la destination.

2. Le protocole "Enhanced GyTAR (EGyTAR)"

Bilal et al. [83] ont proposé une amélioration du protocole GyTAR, appelée EGYTAR. Le protocole EGYTAR implique la direction des véhicules pour calculer la densité des véhicules dans un segment. Ce protocole calcule la densité des véhicules qui se déplacent dans la direction de la destination pour estimer avec précision la qualité de la transmission de paquets sur les segments. Par conséquent, EGYTAR utilise la même stratégie gloutonne que celle utilisée dans GyTAR pour transférer les paquets entre les intersections. EGYTAR utilise également la stratégie de report en avant. Sans aucun doute, le grand nombre de véhicules qui se déplacent vers la destination peut générer un taux de livraison de paquets élevé, et une faible densité de véhicules qui se déplacent dans la direction opposée est généralement préférée dans le cas où le réseau est moins dense. Cependant, GyTAR et EGYTAR ont plusieurs limitations. Par exemple, dans la situation où le paquet CP soit supprimé (échec de transmission), EGYTAR n'a pas un mécanisme qui garantit une nouvelle génération du paquet CP pour calculer l'état du segment et donc l'état du segment ne sera pas disponible à la prochaine intersection. De plus, ces protocoles ont une vision locale et ne prennent pas en considération l'état des prochains segments, ainsi que la stabilité de la liaison de communication n'est pas prise en compte dans ces deux protocoles.

3. Le protocole "A Vehicle Density and network Load Aware (VDLA)"

Le protocole VDLA [79] utilise un mécanisme de collecte de la densité et de la charge du trafic en temps réel. Ce protocole transfère les paquets entre les intersections en utilisant la stratégie de transfert gloutonne dans sa version classique. Cependant, les décisions d'acheminement peuvent être prises avant d'atteindre une intersection. Si les segments en cours et suivants sont placés dans la même direction, les paquets sont transmis en mode glouton. Cependant, si les directions sont différentes, alors le paquet est transmis au noeud d'intersection, permettant ainsi des transmissions vers différentes directions. Les intersections intermédiaires sont sélectionnées dynamiquement en fonction de trois paramètres de routage : la distance à la destination, la densité en temps réel et les mesures de la charge du trafic. Un noeud (intersection) attribue des scores à tous les segments adjacents lors de leur évaluation. Par la suite, les paquets "Hello" sont diffusés par l'intersection qui inclut les poids des segments adjacents. Le mécanisme CP mesure les métriques de routage VDLA. Lorsqu'un véhicule atteint une intersection, le processus de mesure est lancé en transmettant

un paquet CP à chaque segment adjacent. VDLA considère le nombre de paquets dans la file d'attente de la mémoire tampon d'un nœud pour évaluer la charge d'un nœud et mesurer la charge du trafic. Les voisins du véhicule initiateur et les champs de leurs files d'attente sont ensuite ajoutés dans le paquet CP. De plus, le nombre de voisins de l'initiateur est utilisé pour initialiser le champ du nombre minimal de voisins (MNN : minimum neighbor number), qui évalue la répartition des véhicules le long du segment. Lorsque le paquet CP transféré est reçu par un nœud, les voisins situés à son côté droit sont ajoutés à la liste de voisins du paquet CP. La longueur de la file d'attente de la mémoire tampon est étendue de la même manière. Le nombre de voisins est alors comparé au champ MNN. Si MNN dépasse le nombre de voisins, le nombre des voisins du relayer actuel sont ajoutés à ce champ et le paquet mis à jour est transmis à la destination. En outre, une fois que le paquet CP est traité à la prochaine intersection, un autre paquet CP est transmis en retour à la première intersection en utilisant la stratégie susmentionnée. Le nombre de véhicules et la charge du trafic mesurée pour tous les véhicules adjacents sont reçus par le véhicule initiateur. Les données calculées sont utilisées pour évaluer le segment, puis des scores sont attribués aux segments adjacents. Toutefois, si le véhicule reçoit le paquet CP avant d'atteindre l'intersection, un temporisateur se démarre pendant une seconde et un nouveau paquet CP sera généré. Par conséquent, l'overhead de communication lié aux paquets CP est considérablement réduit quand la densité du trafic véhiculaire est élevé. Toutefois, étant donné l'absence de stratégie de recouvrement et l'impossibilité de prendre en compte la stabilité de la liaison de communication, les données peuvent être transmises via des segments avec un niveau élevé de communication intermittente.

4. Le protocole "An intersection-based Connectivity Aware Routing (iCAR)"

Dans [84], les auteurs ont proposé un protocole appelé iCAR qui prend en compte le nombre de véhicules en temps réel et les délais de livraison des paquets pour chaque segment. Ce protocole a des applications potentielles dans l'accès Internet multi-sauts en milieu urbain. Lorsqu'un véhicule atteint une intersection, iCAR évalue les segments adjacents en fonction de leurs paramètres de routage et de leur déplacement vers la destination. Ensuite, le segment dont la densité la plus élevée, le délai minimum et la distance la plus proche de la destination sera sélectionnée.

Bien que l'iCAR puisse réduire l'overhead des communications dans des conditions de forte densité, le coût de cet overhead reste toujours considérable. Ce protocole transmet un paquet CP le long du segment et la rapidité de la connectivité du segment est calculée lors de la livraison du paquet CP à la prochaine intersection. La densité de réseau est calculée entre les relayeurs actuels et suivants lors de transfert du paquet CP. Outre le nombre de nœuds parcourus et le temps de génération des paquets CP, les résultats du calcul sont ajoutés au nombre de véhicules actuellement stocké dans le paquet CP.

Avant d'envoyer le paquet au nœud "saut-suivant", le nœud transitaire calcule la période de validité et met à jour le champ de durée de vie si une courte période de validité est obtenue. La période de validité est utilisée pour valider les données

dans un certain segment et pour prédire le temps de déconnexion. En outre, le score mis à jour est généré par le véhicule le plus proche du centre du segment lors de la réception du paquet CP. Les paquets de contrôle sont utilisés pour annoncer le score mis à jour ainsi que son heure de validité. Le score est ensuite retransmis à l'emplacement où le paquet CP est créé. Une déconnexion se produit lorsque le paquet CP n'est pas reçu et que le score du segment est mis à zéro.

Dans iCAR, les paquets sont transférés entre les intersections à l'aide de la stratégie de transfert gloutonne améliorée. Parmi les limites du protocole iCAR, ce dernier utilise la période de vérification en tant que métrique de routage et non pas pour évaluer la stabilité d'un lien de communication, mais pour garantir que les résultats de l'évaluation du segment ne sont pas expirés. En plus, lors du calcul de la période de vérification, iCAR ne prend pas en compte l'accessibilité des liens de substitution résultant du déplacement des véhicules et pouvant être utilisée pour remplacer les liens défaillants. Dans ce cas, iCAR calcule uniquement une courte période de vérification qui ne permet pas de s'ajuster avec précision aux modifications de l'état du segment, ce qui augmente le coût de communication (overhead) et génère des paquets CP redondants.

5. Le protocole "An enhanced VDLA (EVDLA)"

Dans [85], les auteurs ont proposé une version améliorée du protocole VDLA [79] dans le but d'optimiser la précision des tables de voisinage associées aux noeuds et cela a été fait par l'amélioration des performances de la stratégie de transmission géographique gloutonne. Le protocole EVDLA utilise les paquets "Hello" classiques avec un intervalle de diffusion statique pour décrire deux scénarios. Premièrement, lorsque les voisins quittent la plage de transmission, leurs entrées ne sont pas supprimées. Deuxièmement, même après être devenus voisins, certains véhicules ne sont pas répertoriés dans la table des voisins car leur prochain paquet "Hello" n'a pas encore été envoyé. Les noeuds qui causent ces deux changements sont appelés noeuds marginaux car ils se situent près de la limite de la plage de transmission. Étant donné que le noeud le plus éloigné est sélectionné comme noeud "saut-suivant" par la stratégie gloutonne classique de transfert, toute inexactitude dans les données de ces noeuds peut empêcher une transmission réussie des paquets. Par conséquent, la durée de vie de chaque voisin est calculée et stockée dans la table des voisins par le protocole VDLA. De plus, le véhicule intermédiaire calcule le temps de communication des deux véhicules qui se dirigent l'un vers l'autre. Ces informations sont ensuite envoyées et l'attente de l'arrivée du paquet "Hello" n'est plus nécessaire. Cependant, étant donné l'influence de la variabilité de la vitesse et du comportement des conducteurs, la prédiction de la durée de vie a une dépendance discutable. Le protocole EVDLA augmente également l'overhead de routage et partage les mêmes limitations que le protocole VDLA.

6. Le protocole "A Link State aware Hierarchical Road (LSHR)"

Dans [86], les auteurs ont proposé un protocole de routage géographique basé sur l'état des liens proposé et qui utilise les coordonnées 3D pour positionner les véhicules afin d'améliorer le débit de livraison des paquets et de réduire le nombre de sauts et le temps de transmission. Les métriques de routage sont mesurées pour éva-

luer les segments adjacents de l'intersection. Le segment ayant le poids le plus bas est sélectionné pour le transfert des paquets. En outre, le protocole LSHR adopte le même mécanisme de mesure que le protocole iCAR [84]. Cependant, dans ce protocole, les paquets CP sont transmis en utilisant une stratégie gloutonne. Plus précisément, une liste triée est générée au niveau d'une intersection lors de la réception d'un paquet de données. Les délais de communication et la distance progressive vers la destination sont inclus dans cette liste triée. La liste est générée en enregistrant l'heure d'envoi dans le paquet CP lors de sa transmission vers les intersections adjacentes. Le délai de communication du segment est calculé par le dernier nœud auquel le paquet CP arrive. Le délai et l'identifiant du segment correspondant sont diffusés aux voisins. Le délai de communication des segments adjacents est stocké dans la liste triée et diffusé aux nœuds qui se trouvent près de l'intersection. Chaque segment reçoit un score basé sur la distance et le délai de communication.

Par ailleurs, le protocole LSHR calcule également la distance virtuelle des nœuds qui sont positionnés plus près de la destination. Cette distance virtuelle fait référence à la distance la plus longue en deux sauts, c'est-à-dire la distance entre le nœud actuel et son nœud voisin, plus la distance entre le nœud voisin et son voisin qui est positionné le plus proche de la destination. Le voisin ayant la distance virtuelle la plus longue est sélectionné en tant que nœud "saut-suivant". La sélection du meilleur segment ne doit pas uniquement dépendre du délai de transmission du segment, car la densité du trafic et la stabilité de la communication ne sont pas indiquées par le délai de transmission, qui représente uniquement l'état de la charge réseau du segment en cours d'évaluation.

7. Le protocole "A Traffic Flow-Oriented Routing (TFOR)"

Abbasi et al. [87] ont proposé un protocole appelé TFOR pour améliorer la sécurité et l'organisation du trafic tout en facilitant la conduite via un système de transport intelligent. Le protocole TFOR comprend deux mécanismes : le mécanisme de sélection d'intersection et le mécanisme de routage entre les intersections. Dans le mécanisme de sélection d'intersection, TFOR choisit dynamiquement les intersections en tenant compte du flux de la densité du trafic directionnel et non directionnel. Le véhicule émetteur dans une intersection utilise une carte numérique pour identifier l'emplacement de l'intersection voisine. La position de la destination est localisée à l'aide d'un service de localisation, ensuite, le véhicule émetteur détermine la distance curvemétrique entre chaque intersection voisine et le véhicule de destination. Un score est attribué à chaque intersection voisine et l'intersection qui a le score le plus élevé est sélectionnée comme intersection suivante. L'intersection choisie doit être située le plus près possible du véhicule de destination et doit y avoir un débit de trafic élevé. Dans le mécanisme de routage entre les intersections, TFOR utilise une stratégie gloutonne pour obtenir des informations sur les voisins et pour transférer les paquets entre deux intersections. Tous les paquets de données sont marqués avec la position de la prochaine intersection. La position, la vitesse et la direction de chaque véhicule sont enregistrées dans la table des voisins dont les entrées sont mises à jour périodiquement. Les tables de voisinage sont consultées pour leurs positions prédites lorsque le véhicule source ou intermédiaire transmettent des

paquets de données. Cette stratégie améliore le processus de routage en réduisant le délai et le nombre de sauts de bout en bout. Néanmoins, les limites du protocole TFOR sont les mêmes que celles des protocoles GyTAR et EGyTAR.

8. **Le protocole "An intersection-based Connectivity Aware Routing (iCARII)"** Dans [88], les auteurs ont proposé un protocole de routage appelé iCARII pour améliorer les performances de routage dans les VANETs en permettant de sélectionner des routes avec une connectivité garantie et des délais de livraison réduits. Le protocole iCARII peut être décrit par ses quatre composants : l'évaluation du segment routier, le calcul de la durée de vie du chemin, la sélection de l'intersection suivante et la sélection du saut suivant. Dans l'évaluation du segment, le protocole détecte de manière dynamique les différentes parties du réseau pour obtenir des informations en temps réel sur le réseau. Au cours de cette phase, le protocole diffuse des paquets de contrôle légers (CPs) pour vérifier les segments et les intersections. Le protocole permet à un véhicule de connaître la durée de vie d'un chemin et de la communiquer aux voisins à un saut de ce véhicule. Après avoir calculé la durée de vie d'un chemin, le protocole sélectionne l'intersection suivante et détermine l'existence d'un chemin menant à la destination. Si le paquet atteint un segment déconnecté en raison d'un retard imprévu, le nœud candidat actuel envoie une nouvelle demande de chemin aux centres de localisation pour sélectionner un nouveau chemin. Le protocole sélectionne finalement le prochain saut en utilisant une stratégie gloutonne. Cependant, les limitations dans iCARII sont les mêmes que celles dans iCAR.

2.3 Récapitulatif sur les protocoles de routage

Dans cette section, nous présentons un récapitulatif sur les principaux protocoles de routage conçus pour les VANETs. Ce récapitulatif résume les atouts de ces protocoles selon certaines métriques de performances comme montre le tableau 2.1.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les protocoles de routage conçus pour les réseaux VANETs. Cet état de l'art est articulé autour d'une classification de ces protocoles de routage selon certaines métriques. En outre, il nous a permis de tirer profit des atouts des protocoles qui ont prouvé une certaine performance dans les environnements urbains en termes de taux de livraison de paquets, de délai de bout en bout et d'overhead de routage.

Le chapitre suivant est une première contribution qui concerne le routage géographique basé sur une mesure distribuée et avec précision de la densité du trafic dans les réseaux VANETs.

Protocoles	LIS	Stratégie de transmission	Mode de recouvrement	Architecture	Carte numérique	Scénario	Trafic véhiculaire
GPSR [20]	Oui	Gloutonne	Peremter	V2V	Non	Ouvert	Non
GSR [75]	Oui	Gloutonne, Dijkstra, Intersection-based	Go back	V2V	oui	Urbain	Non
GPCR [21]	Oui	Gloutonne améliorée	Go back	V2V	Non	Urbain	Non
PDVR [76]	Oui	Gloutonne	Right hand rule	V2V	Non	Ouvert	Non
AMAR [77]	Oui	Gloutonne, Vitesse, Direction	-	V2V	Non	Ouvert	Non
DIR [78]	Oui	Gloutonne, Intersection-based	-	V2V	Non	Urbain	Non
GPGR [79]	Oui	Gloutonne, Vitesse, Direction	-	V2V	Oui	Urbain	Non
MMMR [80]	Oui	Gloutonne, Densité, Bande passante	-	V2V	Oui	Urbain	Non
LSGO [81]	Oui	Gloutonne, ETX	Carry-and-Forward	V2V	Oui	Urbain	Non
VDLA [79]	Oui	Gloutonne, Densité	-	V2V	Oui	Urbain	Oui
iCAR [84]	Oui	Gloutonne	Carry-and-Forward	V2V	Non	Ouvert	Oui
EVDLA [85]	Oui	Gloutonne	-	V2V	Oui	Urbain	Oui
LSHR [86]	Oui	Gloutonne	Carry-and-Forward	V2V	Oui	Urbain	Oui
TFOR [87]	Oui	Gloutonne, Etat de lien	Carry-and-Forward	V2V	Oui	Urbain	Oui
iCARI [88]	Oui	Gloutonne	Carry-and-Forward	V2V	Non	Urbain	Oui

TABLE 2.1 – Récapitulatif sur les principaux protocoles de routage pour les VANETs

Protocole de routage basé sur une mesure distribuée de la densité des routes

3.1 Introduction

Les réseaux VANETs constituent une catégorie spécifique de réseaux ad-hoc mobiles constitués de véhicules communiquant entre eux sur des routes en milieu urbain et rural. Les protocoles de routage unicast bien connus mis en œuvre pour les réseaux MANETs ne sont pas adaptés aux réseaux VANETs en raison de leur grande mobilité. De ce fait, le routage dans les VANETs est considéré comme une tâche ardue en raison de la topologie hautement dynamique des réseaux. Dans ce contexte, afin d'éviter une défaillance fréquente des liaisons de communication et de réduire les coûts de communication entre les nœuds mobiles, nous avons mis en œuvre un nouveau protocole de routage appelé "improved Greedy Periodic Traffic Aware Routing protocol for urban VANETs (GyPTAR)". Ce protocole est basé sur la mesure avec précision des densités des routes. Cette mesure de densité des routes est faite d'une manière distribuée où chaque chemin calculé est une liste de routes (entre deux ancres successives). L'objectif est de construire un chemin ayant la densité la plus élevée composé de la densité de chaque route qui lui fait partie.

Dans ce chapitre, nous présentons un algorithme distribué qui mesure la densité sur une route en échangeant des paquets CDP (paquets de données de contrôle) entre un groupe de véhicules sur une route. Chaque groupe est représenté par un chef de groupe chargé de mesurer périodiquement la densité et de l'envoyer au chef du groupe suivant. Le dernier chef de groupe aura la densité réelle à chaque période.

Le protocole proposé a été développé sur le simulateur OMNET ++. Nous avons effectué des simulations intensives avec différents scénarios pour évaluer son passage à l'échelle et sa robustesse face aux changements fréquents de la topologie. L'évaluation a montré que notre contribution fournit de meilleures performances, comparée à d'autres protocoles de routage existants, tels que EGyTAR [83].

3.2 Contexte

La communication entre véhicules (V2V) est très importante pour la sécurité des passagers car elle permet l'échange de données sensibles (telles que les collisions, les embouteillages, les routes glissantes, etc.). L'objectif des communications V2V est que éventuellement, chaque véhicule puisse communiquer avec d'autres via une communication dédiée à courte portée (DSRC) pour l'échange dynamique des messages. Ces échanges de messages peuvent alerter les conducteurs et les prévenir de nombreux accidents. La dissémination des informations devrait être assurée par un protocole de routage efficace avec moins d'overhead de communication en raison de défaillances fréquentes des liaisons de communication. Par ailleurs, le routage amélioré dans les VANETs doit être pris en compte avec les différentes caractéristiques distinctes des MANETs [44].

Dans les systèmes de transport intelligents coopératifs (C-ITS¹), les protocoles de routage sont principalement basés sur la diffusion, dans le sens où les messages sont généralement envoyés aux nœuds situés dans une zone donnée. Ensuite, la plupart des mécanismes de transmission sont rassemblés dans la famille de protocoles de géo-diffusion (geo-broadcasting). Mais les protocoles de géo-réseautage (geo-networking) doivent transmettre les messages en utilisant le principe de la monodiffusion (unicast) afin d'atteindre la zone appropriée. Le routage dans les VANETS se heurte à un grand challenge en raison des caractéristiques de ce type de réseaux, tels que la présence d'obstacles en milieu urbain. De plus, dans ce type d'environnements, les événements ne sont pas répartis de manière égale sur les routes. Ces contraintes rendent le calcul d'un chemin robuste entre un nœud source et un nœud de destination en tant qu'un défi intéressant à le soulever. Une alternative pour atteindre cet objectif consiste à exploiter les informations sur le trafic telles que la densité de la route : nombre de véhicules sur la route à un instant "t". Ce chapitre vise à concevoir un nouveau protocole de routage basé sur une mesure de la densité des routes avec précision et d'une manière distribuée.

Le protocole proposé a été développé en utilisant le simulateur OMNET++ et ses performances ont été comparées à celles fournies par le protocole GyTAR. Le chemin généré par le protocole proposé est composé d'une séquence d'ancres obtenue à l'aide de la carte numérique de la ville en appliquant l'algorithme du plus court chemin de Bellman sur un graphe représentant le réseau routier dans une ville.

Dans ce chapitre, nous présentons les travaux connexes à cette problématique et nous détaillons notre solution proposée. Puis, nous exposons les résultats des simulations obtenus dans plusieurs scénarios et nous les comparons à d'autres protocoles décrits dans la littérature.

3.3 Travaux Connexes

De nombreux mécanismes de routage ont été conçus pour les VANETs et qui présentent un examen intéressant des protocoles de routage pour les VANETS.

1. C-ITS : Cooperative- Intelligent Transport Systems

Dans [89], les auteurs ont proposé une évaluation des réseaux de communications véhiculaires à travers des scénarios de partage de données entre véhicules. Ils ont fait une étude sur trois paramètres. Ils ont adapté un modèle de mobilité spécifique importé dans un simulateur. Ils ont travaillé sur un réseau de grille représentant la région de Manhattan et ont observé certains paramètres de performances tels que le délai, le taux de perte de paquets. L'objectif le plus important de l'étude est de montrer que la communication entre véhicules est réalisable et réaliste dans certaines conditions.

Dans [90], les auteurs ont étudié le débit dans les réseaux VANETs ayant un trafic unidirectionnel pour différentes conditions de trafic et plages de transmission d'équipements sans fil. Tous les véhicules étudiés sont connectés de manière aléatoire. Le travail présente les résultats des études de simulation réalisées en utilisant le simulateur NS-2. Les auteurs ont mesuré des indicateurs de performances en cas de congestion. Une comparaison des résultats obtenus avec les résultats de connectivité attendus a été effectuée et a montré que le débit de la simulation est inférieur en raison des pertes de paquets causées par les collisions.

Dans [91], les auteurs ont présenté une étude détaillée sur l'évaluation des performances des réseaux IEEE 802.11p par rapport aux réseaux véhiculaires LTE. Ils ont analysé des indicateurs de performance tels que le délai de bout en bout pour les deux réseaux dans différents scénarios (haute densité, environnements urbains, etc.). De nombreux problèmes importants ont été mesurés comme la disponibilité et la fiabilité du réseau. Les auteurs ont prouvé par des simulations que la solution LTE répondait à la plupart des exigences des applications en termes de fiabilité, de passage à l'échelle et de mobilité, mais que la technologie IEEE 802.11p fournit des performances acceptables pour les topologies de réseau fragmentées avec prise en charge limitée de la mobilité. Le travail présenté dans [92] constitue une solution efficace pour acheminer les messages dans les réseaux VANETs en impliquant l'en-tête du véhicule.

Le travail présenté dans [12] est dédié au routage dans les réseaux VANETs en milieu urbain et le travail présenté dans [93] est une étude sur la prédiction de mouvement des véhicules. Cette étude a donné naissance à un nouveau algorithme de routage pour les VANETs selon cette approche. Dans [75], les auteurs ont donné un aperçu sur les stratégies utilisées pour le routage dans les VANETs. [44] passe en revue beaucoup plus de stratégies actuelles concernant les réseaux VANETs. Un ensemble de travaux ont été basés sur une classe spécifique de topologies : la topologie basée sur l'ancre. Effectivement, dans ce type de topologie, les auteurs considèrent qu'un environnement urbain contient de nombreux ancres et le but est de proposer un protocole de routage empruntant des chemins composés de liens entre deux points d'ancrage successifs.

Le protocole "Anchor-based Street and Traffic Aware Routing (A-STAR)" [12] est un protocole dont la topologie est basée sur les ancres. Dans ce protocole, la métrique utilisée pour sélectionner une route à la place d'une autre est représentée par la densité des bus. Ensuite, les auteurs ont considéré que lorsque les bus sont nombreux sur une route, cette route assure une connectivité élevée. Par ailleurs, dans les grandes villes récentes, les bus ont des voies réservées où aucun autre véhicule ne peut se déplacer. En conséquence, il n'est pas garanti que la densité soit la plus élevée. Le protocole GyTAR [94]

est considéré comme étant le protocole le plus approprié dans un environnement urbain. Dans GyTAR, l'expéditeur sélectionne dynamiquement une intersection en fonction de la connectivité des routes à travers laquelle un paquet doit être transmis pour atteindre le nœud de destination. D'un point d'ancrage à l'autre, les auteurs considèrent un mécanisme glouton utilisant la vitesse et l'en-tête des voisins comme métriques. Les chemins trouvés réduisent le nombre de sauts. Cependant, GyTAR souffre de situations spécifiques où la densité est faible. Dans ce cas de figure, les performances du protocole GyTAR se dégradent grandement.

3.4 Contribution : Le protocole GyPTAR

Comme nous le savons, le protocole EGyTAR utilise le concept de formation de groupes décrit dans [83] pour estimer la densité du trafic routier. Le but est de pouvoir prendre une meilleure décision dans le cas où le véhicule de transfert tente de sélectionner l'intersection de destination par laquelle un paquet doit transiter pour atteindre sa destination finale. Cependant, le processus de formation de groupes utilisé par le protocole EGyTAR n'est pas en mesure de fournir une information de densité du trafic d'une manière continue. La raison principale de ça est qu'une formation de groupes fournit des informations sur la densité du trafic d'une route donnée uniquement lorsqu'un véhicule quitte la route, sinon, il n'y a pas d'information sur l'intersection candidate ; et dans ce cas, le routage est réalisé sans tenir compte des facteurs suivants : informations sur le trafic. Notre schéma de routage proposé appelé "GyPTAR" résout ce problème en utilisant un nouvel algorithme de formation de groupes distribué qui fournit périodiquement des informations sur la densité de trafic.

GyPTAR est un nouveau protocole de routage géographique basé sur les intersections (intersection-based), similaire au protocole EGyTAR. GyPTAR adopte l'approche de routage basée sur l'ancrage, qui consiste à sélectionner dynamiquement les intersections une à une afin d'être utilisées pour atteindre la destination finale. Dans GyPTAR, la sélection des intersections candidates est basée sur les informations diffusées périodiquement par un algorithme réparti de diffusion d'informations sur le trafic qui était décrit dans [82]. Les étapes pour choisir les meilleures intersections candidates se déroulent de la même manière que dans le protocole EGyTAR.

3.4.1 Diffusion périodique d'informations sur le trafic

Dans le protocole de routage proposé "GyPTAR", la route est divisée en cellules physiques comme dans le protocole EGyTAR. Chaque cellule définit un groupe de manière à ce que chaque véhicule n'appartienne qu'à un seul groupe et que le véhicule le plus proche au centre de la cellule soit sélectionné en tant que chef de groupe (GL) pour une durée donnée. Nous utilisons une variante des informations de groupe d'EGyTAR. La Figure 3.1 montre la structure physique des informations de groupe utilisées dans notre schéma de routage où le centre des cellules est présenté avec un petit cercle rouge et les premières et dernières cellules, avec un cercle jaune.

Les "GLs" de la première et de la dernière cellule initient le paquet CDP qui contient les informations de la cellule, telles que l'identifiant, la position et la densité de la cellule. En fait, dans notre protocole de routage GyPTAR, le GL de la première cellule (dernière cellule) initialise périodiquement le paquet CDP, qui sera envoyé à la dernière cellule (première cellule), comme illustré dans l'algorithme 1. En outre, le paquet CDP doit passer par tous les GLs situés entre la première cellule et la dernière cellule.

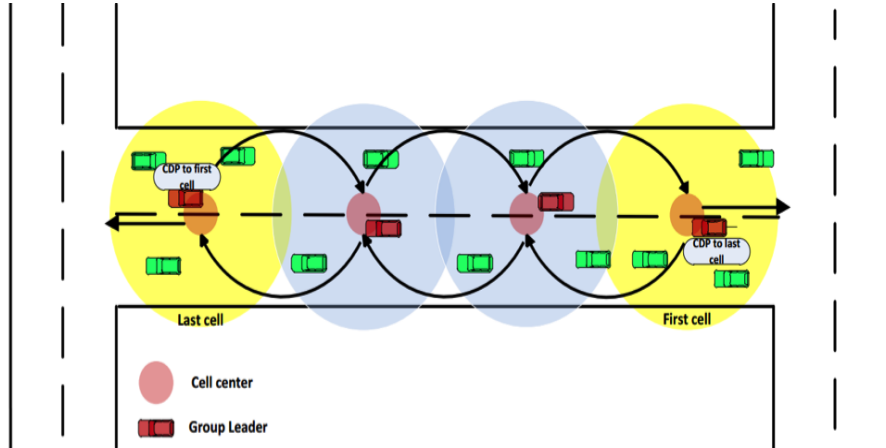


FIGURE 3.1 – Exemple d'une route

En outre, le GL est chargé de mettre à jour les paquets CDP et de collecter des informations sur tous les véhicules de son groupe. Une fois le paquet CDP reçu, si le GL destinataire ne se trouve pas dans la première ou la dernière cellule, il met à jour le paquet CDP. De plus, une fois le processus de mise à jour est terminé, le GL transmet le paquet CDP mis à jour au GL de la cellule suivante.

Algorithm 1 Intialisation périodique du paquet CDP

```

1: if  $V \in Cell_{last}$  or  $V \in Cell_{first}$  then
2:   if ( $V$  receives initiat_timer_message from its GL) then
3:      $timer = 0$ ;
4:      $Start_{timer}(V)$ ;
5:   end if
6:   if ( $V$  is GL and  $timer > 1$  seconds) then
7:     Initiate CDPpacket;
8:     Update CDPpacket;
9:     if ( $V \in Cell_{first}$ ) then
10:      Forward CDP packet to the GL of the next cell in the direction of last cell;
11:    else
12:      Forward CDP packet to the GL of the next cell in the direction of first cell;
13:    end if
14:     $timer = 0$ ;
15:     $Start_{timer}(V)$ ;
16:    Broadcast initiat_timer_message to all group members;
17:   end if
18: end if

```

Algorithm 2 Pseudo code du processus de transfert des paquets CDP

```
1: Upon receiving CDP packet :
2:  $next\_hop = null$ ;
3: if ( $V$  is  $GL$ ) then
4:   Update  $CDPpacket$ ;
5:   if ( $V \in Cell_{first}$ ) then
6:      $next\_hop =$  nearest neighbor to the first junction and moving toward this junction;
7:   else
8:      $next\_hop =$  nearest neighbor to the last junction and moving toward this junction;
9:   end if
10: else
11:   if ( $V$  is not around  $J_{first}$  and not around  $J_{last}$ ) then
12:     if ( $V \in Cell_{first} \wedge CDP_{dest} = Cell_{first}$ ) then
13:        $next\_hop =$  nearest neighbor to the first junction and moving toward this junction;
14:     else if ( $V \in Cell_{last} \wedge CDP_{dest} = Cell_{last}$ ) then
15:        $next\_hop =$  nearest neighbor to the last junction and moving toward this junction;
16:     else
17:        $next\_hop =$  nearest neighbor to the next  $GL$ ;
18:     end if
19:   else if ( $V$  around  $Junction_{first}$ ) then
20:     Broadcast  $CDP$  around  $Junction_{first}$ ;
21:   else
22:     Broadcast  $CDP$  around  $Junction_{last}$ ;
23:   end if
24: end if
25: if ( $next\_hop \neq null$ ) then
26:   Forward  $CDP$  to the  $next\_hop$ ;
27: else
28:   Store  $CDP$  packet and carry it;
29: end if
```

3.4.2 Connectivité d'une cellule et mécanisme de transmission des paquets CDP

Si nous supposons que le GL d'une cellule donnée doit transmettre le paquet "Cell Density Packet (CDP)" au GL de la cellule suivante, la connectivité locale de la cellule donnée est calculée à l'aide de notre évaluation de bord (LC) comme montre la Figure 3.2. Dans ce cas, le bord est une partie de la route qui est limitée par les cellules. Ensuite, le GL met à jour le paquet CDP en incluant l'identifiant de la cellule, la position de la cellule, l'identifiant de la route, la densité totale, la connectivité de la cellule et la position du dernier nœud dans la cellule. Ce dernier est inclus afin de calculer la connectivité entre le dernier nœud de la cellule donnée et le premier nœud de la cellule suivante.

En d'autres termes, nous visons à calculer la connectivité de l'ensemble de la route de manière distribuée de sorte que chaque GL calcule la connectivité de sa cellule, mette à jour le paquet CDP et le transmette au GL de la cellule suivante en utilisant l'algorithme de transmission des paquets CDP décrit par l'algorithme 2.

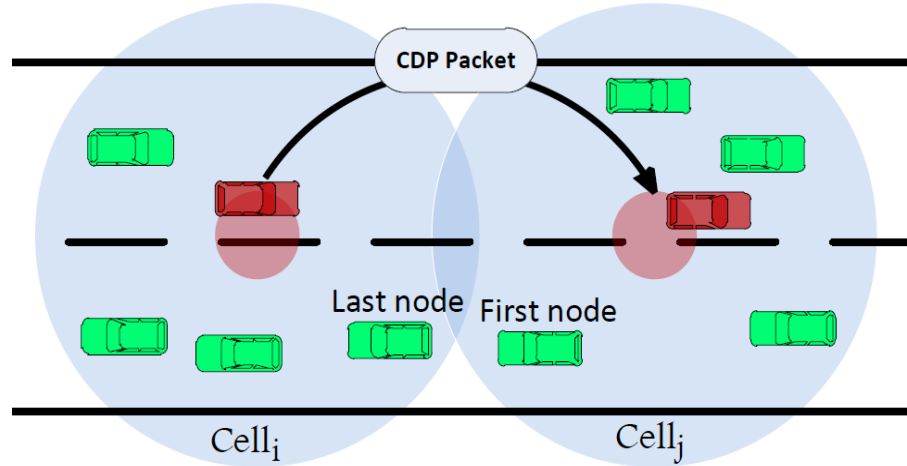


FIGURE 3.2 – Transmission des paquets CDP de $Cell_i$ à $Cell_j$

$$LC_{Cell_i} = \sum_{k=1}^{N-1} (R_{tr} - dist(vehicle_{ik}, vehicle_{ik+1})) \quad (3.1)$$

$$LC_{Cell_j} = (R_{tr} - dist(vehicle_{iN}, vehicle_{j1})) + \sum_{k=1}^{M-1} (R_{tr} - dist(vehicle_{jk}, vehicle_{jk+1})) \quad (3.2)$$

Où N représente le nombre de nœuds dans $Cell_i$, M représente le nombre de nœuds dans $Cell_j$, R_{tr} est la portée de transmission, $vehicle_{iN}$ est le dernier nœud de $Cell_i$ et $vehicle_{j1}$ représente le premier nœud de $Cell_j$.

Lorsque le GL se situe dans la première ou la dernière cellule, il calcule la connectivité de la route selon l'équation 3.3. La connectivité calculée est diffusée à tous les véhicules autour de la dernière intersection.

$$LC_{Edge} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Cell}} (LC_{Cell_i})}{Total_{density}} \quad (3.3)$$

Où N_{Cell} représente le nombre de cellules sur une route donnée, $Total_{density}$ est la somme de toutes les densités des cellules. De plus, la valeur LC_{Cell_i} est obtenue à partir de CDP_{packet} .

L'algorithme 1 illustre l'initiation périodique des paquets CDP où seuls les véhicules de la première ou de la dernière cellule sont concernés par ce processus d'initiation [95].

Si un véhicule membre de la première ou de la dernière cellule reçoit un message d'initialisation du temporisateur, il initialise son temporisateur (le temporisateur est utilisé pour effectuer le déclenchement périodique des paquets CDP). D'où, une fois que le temporisateur expire ($temporisateur > 1 \text{ seconde}$), le GL de la première cellule respectivement de la dernière cellule initie le paquet CDP et le met à jour en incluant les informations (ID, position, direction) de tous les véhicules du groupe défini par la cellule actuelle et la connectivité de la cellule selon les équations 3.1 et 3.2. Par la suite, il transfère le paquet CDP selon l'algorithme 2, initialise son temporisateur et diffuse le message d'initialisation du temporisateur à tous les membres du groupe pour qu'il prenne connaissance de l'heure d'initiation.

L'algorithme 2 est destiné à transmettre les paquets CDP entre les GLs. Les GLs de la première cellule et de la dernière cellule sont les seuls responsables de l'initiation et de la transmission des paquets CDP. Ainsi, lorsqu'un véhicule ayant le statut GL et appartenant à la première cellule ou à la dernière cellule reçoit un paquet CDP, il le met à jour et le transmet au voisin le plus proche de la première intersection (dernière intersection) jusqu'à ce qu'il atteigne la cellule de destination. Cependant, si le véhicule n'est pas un GL et qu'il ne se trouve autour d'aucune intersection, il transfère le paquet CDP au voisin le plus proche du GL de la cellule suivante vers l'intersection de destination. Dans le cas où le véhicule se trouve à proximité de l'intersection de destination, il calcule la connectivité de la route selon l'équation 3.3 et diffuse le paquet CDP autour de cette intersection. De plus, nous utilisons les approches "Report et Transfert" (Carry and Forward) lorsque le paquet CDP atteint un minimum local.

3.5 Simulations

Dans cette section, nous évaluons les performances de la première version du protocole GyTAR et de sa version adaptée (GyPTAR) en utilisant la connectivité du lien (LC) proposée. Nous avons analysé le taux de livraison des paquets, le délai de bout en bout et l'overhead de routage.

3.5.1 Environnement de travail

Les deux protocoles ont été implémentés en utilisant le simulateur OMNET++ et nous avons fait plusieurs simulations sur des scénarios différents pour évaluer leurs performances. Les paramètres utilisés dans la simulation sont résumés dans le tableau 6.1. Les simulations ont été exécutées 10 fois pour chaque scénario et une moyenne de chaque métrique a été calculée sur la base des résultats de simulation obtenus.

3.5.2 Résultats de la simulation

Nous présentons dans cette section les résultats des critères évalués et nous illustrons l'impact de l'utilisation de la métrique LC .

a) Taux de livraison de paquets (PDR)

La Figure 4.13 montre le taux de livraison de paquets lorsque le nombre de nœuds

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation (GyPTAR)

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	100 Secondes
MAC protocol	802.11p
Zone de simulation	1500x1500 m ²
Portée de transmission	250 mètres
Modèle de mobilité	Manhattan Mobility
Capacité du canal	2 Mbps
Nombre de routes	24
Modèle de trafic	UDPBasicApp
Intervalle d'envoi des paquets	10 paquets/sec
Nombre de véhicules	50-400
Heure de début	5 Secondes
Vitesse des véhicules	60 km/h
Taille du paquet	128 octets

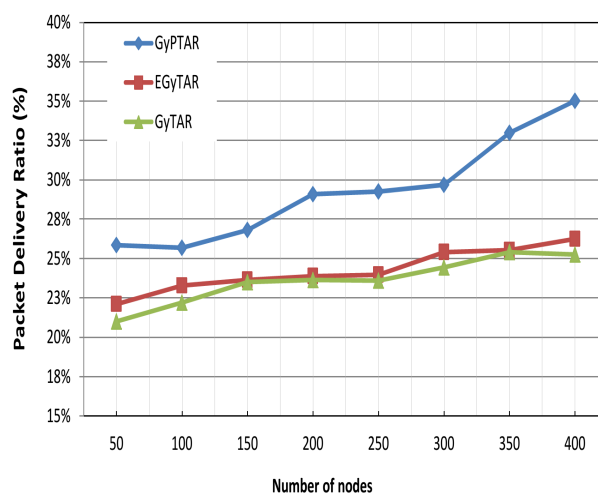


FIGURE 3.3 – Taux de livraison de paquets vs. Taille du réseau (GyPTAR)

varie. Il est observé que notre protocole de routage GyPTAR atteint en permanence un taux de livraison de paquets plus élevé. La raison principale est que le protocole GyPTAR utilise la densité du trafic basée sur des informations permanentes pour évaluer les intersections candidates. Cependant, GyTAR et EGyTAR présentent un taux de livraison de paquets inférieur à celui de GyPTAR. Cela peut expliquer le mécanisme de sélection des intersections utilisé dans les protocoles GyTAR et EGyTAR, qui n'évalue pas efficacement la connectivité des routes.

b) Délai de bout en bout

La Figure 4.14 montre le délai moyen de bout en bout. Nous constatons que notre protocole de routage GyPTAR a un délai plus court surtout lorsque la densité du réseau est plus faible, cela prouve que la métrique "LC" fournit une meilleure décision pour sélectionner les routes avec une connectivité plus élevée qui permettent un délai

de bout en bout plus faible.

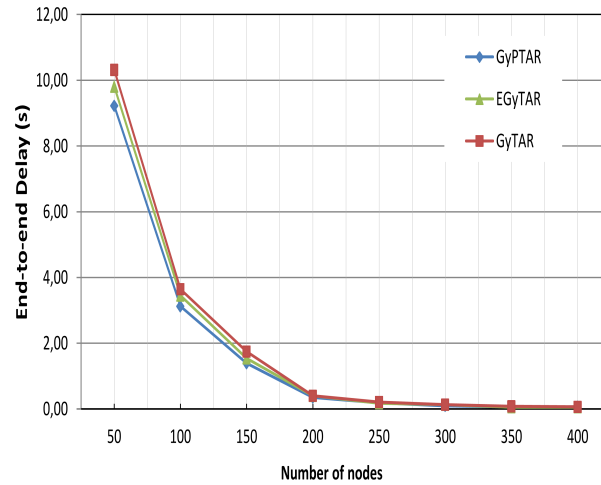


FIGURE 3.4 – Délai de bout-en-bout vs. Taille du réseau (GyPTAR)

c) Overhead du routage

la Figure 4.15 illustre l'overhead moyen du routage. Notre protocole de routage proposé, GyPTAR, génère plus de paquets CDP que les protocoles GyTAR et EGyTAR lorsque le nombre de véhicules est inférieur à 150 véhicules. En effet, dans le protocole GyPTAR, le déclenchement des paquets CDP est périodique, alors que dans GyTAR et EGyTAR l'overhead est proportionnel au nombre et à la vitesse des véhicules circulant dans le réseau, du fait que, dans GyTAR et EGyTAR, quand le nombre de véhicules qui quittent les routes, est petit alors le nombre des paquets CDP sera réduit (moins d'initiation des paquets CDP). De plus, les paquets CDP sont indispensables au processus de routage dans le cas d'un réseau moins dense. Par ailleurs, l'overhead dans GyTAR et EGyTAR est substantiel lorsque le nombre de véhicules dépasse 150, essentiellement, les paquets CDP générés par GyTAR (et EGyTAR) n'apportent pas un avantage significatif pour le processus de routage, c'est principalement parce que l'initiation des paquets CDP ne se fait pas d'une manière régulière. Au contraire, notre protocole de routage proposé, GyPTAR, présente un overhead cohérent lorsque la densité du réseau augmente, ce qui est dû à notre algorithme d'initiation périodique des paquets CDP proposé.

3.6 Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle métrique pour mesurer la densité d'une route utilisée dans un chemin qui sera traversé par des messages lors du routage dans les réseaux VANETs. Cette métrique traite sur chaque route la densité qui est calculée périodiquement de manière distribuée d'une ancre à la suivante. Ensuite, une densité en temps réel est donnée et sera utilisée pour déterminer le plus court chemin entre deux nœuds nécessitant un échange de données.

Nous avons implémenté le protocole de routage proposé (appelé GyPTAR) en utilisant le simulateur OMNET++ et nous avons effectué plusieurs simulations afin d'illustrer les

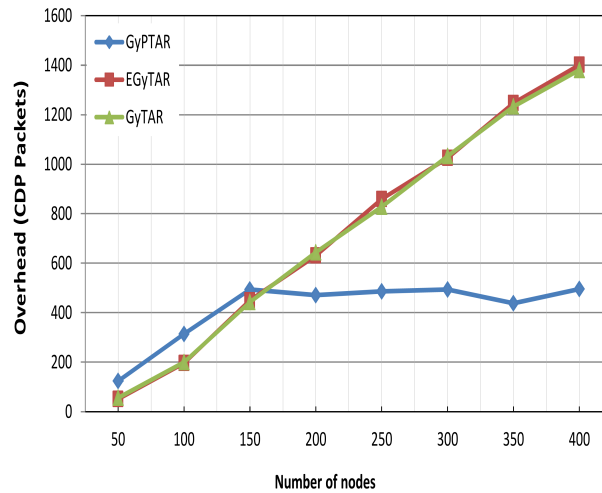


FIGURE 3.5 – Overhead du routage vs. Taille du réseau (GyPTAR)

performances de notre contribution. Les résultats obtenus nous ont permis de constater que notre protocole se comporte mieux que le protocole d'origine (GyTAR) en termes de taux de livraison de paquets, de délai de bout en bout et d'overhead.

Pour les travaux futurs, nous avons l'intention d'étendre nos simulations avec des réseaux plus grands afin de gérer le passage à l'échelle de notre approche et d'entreprendre également des expériences sur des voitures réelles dans le cadre des projets de déploiement de C-ITS.

Dans le chapitre suivant, nous proposons un autre protocole qui prend en compte l'existence d'obstacles lors du routage de données et implique une vision globale au lieu d'une vision locale lors de la détermination d'un chemin entre un véhicule source et véhicule de destination.

Protocole de routage partiel avec recouvrement pour les VANETs

4.1 Introduction

La conception et la mise en œuvre de protocoles de routage efficaces pour les réseaux très dynamiques tels que les réseaux VANETs, constituent une tâche ardue, en raison des caractéristiques spécifiques de ces réseaux, telles que les mouvements rapides des nœuds, les déconnexions fréquentes des liaisons et le grand nombre de nœuds que les composent. Des mécanismes de routage efficaces doivent adopter les caractéristiques des réseaux VANETs pour obtenir des performances de routage élevées. Une alternative consiste à utiliser les informations du trafic dans le processus de routage.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage pour les réseaux VANETs appelé protocole de routage partiel avec recouvrement "PBRP", composé de trois stratégies intégrées : la diffusion d'informations sur le trafic routier, l'algorithme de transmission partielle et la stratégie de recouvrement. Ces trois stratégies fonctionnent ensemble pour défier la nature dynamique des VANETs et fournir des informations permanentes et avancées sur le trafic routier. Ceci permet d'aider largement le protocole de routage à résister aux changements dynamiques de la topologie des réseaux VANETs et à contourner la vision locale qui est l'inconvénient majeur des protocoles GyTAR et EGY-TAR.

Le protocole proposé a été développé sur le simulateur OMNET ++, évalué et comparé à certains autres protocoles. Les résultats obtenus ont montré que notre contribution apportait des améliorations significatives en termes de ratio de livraison de paquets, de délai de bout en bout et d'overhead de routage par rapport à d'autres protocoles.

4.2 Contexte

Un réseau ad hoc de véhicules (VANET) est un réseau ad hoc sans fil extrêmement mobile conçu pour atteindre de nombreux objectifs liés à la sécurité de la conduite et à la gestion du trafic routier. Un réseau VANET est un réseau auto-organisé composé de

l'interconnexion de véhicules où les véhicules peuvent communiquer entre eux directement via des communications de type V2V (véhicule à véhicule) ou avec une infrastructure, notamment une RSU via des communications de type V2I, ou des communications mixtes V2V et V2I.

Les réseaux VANETs ont leurs propres caractéristiques qui ne sont pas communes aux autres classes de réseaux ad hoc sans fil, même si leur classe est plus proche de celle des réseaux ad hoc mobiles (MANETs). La grande mobilité des véhicules implique de fréquents changements de topologie, ce qui rend difficile l'utilisation des protocoles de routage basés sur la topologie pour les VANETs.

De nombreuses recherches ont été proposées pour résoudre les problèmes de routage dans les réseaux VANETs, tels que les protocoles de routage géographique [96–98]. Dans ce type de protocoles de routage, lorsqu'un nœud intermédiaire doit transmettre des paquets de données à un nœud de destination, le nœud source transmet les données directement à la destination quand la destination est située dans sa zone de communication (c'est-à-dire que la destination est un nœud voisin). Dans les autres cas, le nœud source demande la position du nœud destinataire par le biais de services de localisation tels que "Grid Location Service (GLS)" [99, 100], "Hierarchical Location Service (HLS)" [101, 102], "Reactive Location Service (RLS)" [103] et "Semi-Flooding Location Service (SFLS)" [104]. Une fois que la position du nœud de destination est disponible, le nœud source place les informations de localisation relatives à la destination dans l'en-tête du paquet et sélectionne un nœud voisin comme prochain saut en utilisant sa propre stratégie de transfert (par exemple, le plus proche voisin de la destination). Lorsque le voisin (prochain saut) reçoit correctement les paquets de données, il devient le nouveau nœud de transfert et doit répéter le même processus jusqu'à atteindre la destination. Il est à noter que le nœud de transfert répète le même processus du nœud source, à l'exception du processus de demande de position de la destination car la position de la destination est déjà dans l'en-tête du paquet. Dans le cas où aucun voisin approprié ne pourrait être trouvé (problème de l'optimum local), le nœud de transfert peut basculer en mode de recouvrement ou de suppression des données s'il n'existe aucune stratégie de recouvrement prise en charge par le protocole de routage. Dans le cas du mode de recouvrement, il y a deux stratégies bien connues qui sont décrites dans dans GPSR [20] : stockage différé et transfert (SCF : Store Carry and Forward) et transfert de périmètre (Perimeter Forwarding).

Dans ce qui suit, nous décrivons les travaux connexes à cette problématique, nous détaillons notre contribution et nous présentons les résultats obtenus. Par ailleurs, nous avons proposé les idées principales de ce travail dans [105].

4.3 Travaux Connexes

Le protocole de routage bien connu pour les VANETs appelé GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) est proposé dans [20]. Dans ce protocole, la transmission de paquets est effectuée selon deux stratégies de routage : le transfert glouton (Greedy Forwarding) et le transfert de périmètre (Perimeter Forwarding). La stratégie du transfert glouton consiste à sélectionner comme nœud suivant le nœud le plus proche de la destination. Dans le cas

où la distance entre le nœud de transfert et la destination est plus petite que la distance de ses voisins à la destination, GPSR passe à la stratégie de transfert de périmètre basée sur la règle de la main droite. Par ailleurs, GPSR a montré son efficacité sur les autoroutes que dans les environnements urbains (villes), en raison de la présence d'obstacles, qui peuvent augmenter le nombre de défaillances des liaisons et entraîner des échecs de transmission.

Un autre protocole de routage géographique appelé "Directional Greedy Routing (DGR)" [106] a pu surpasser l'inconvénient précédent de GPSR. DGR utilise les informations sur les directions des véhicules pour améliorer la communication entre véhicules. Il combine deux stratégies de transfert :

1. Première position de transmission qui consiste à transmettre les paquets au nœud le plus proche vers la destination.
2. Le premier sens de transmission est basé sur un simple transfert géographique glouton dans lequel il essaie de trouver le nœud voisin le plus proche se dirigeant vers la destination comme prochain saut.

Le routage prédictif directionnel glouton "Predictive Directional Greedy Routing (PDGR)" [106] est une version étendue du protocole DGR qui utilise des beacons provenant de ses voisins situés à deux sauts pour prédire les voisins futurs, réduire le nombre de défaillances des liens et améliorer le mécanisme de sélection du saut suivant.

Le routage de source géographique "GSR" [75] est une autre alternative des protocoles de routage géographique qui tire parti de l'environnement urbain (les villes) en utilisant des informations sur les rues dans le processus de routage. Dans le protocole GSR, la position géographique du nœud de destination est conservée via le service de localisation réactif (RLS) [103]. De plus, GSR utilise l'algorithme de Dijkstra appliqué à un graphe contenant les informations géographiques et la topologie urbaine pour calculer le chemin le plus court. Ce chemin est composé d'une séquence d'intersections de la source à la destination. Chaque paquet doit suivre la liste triée des intersections composant le chemin pour atteindre la destination. Cependant, la principale faiblesse de GSR réside dans le fait qu'il utilise une information statique pour calculer le chemin le plus court. Ce mécanisme ne convient pas aux réseaux dynamiques tels que les réseaux VANETs, et par conséquent il entraîne une dégradation des performances de routage.

Le protocole "A-STAR" [12] utilise les informations relatives au trafic routier dans le processus de routage. Il attribue une valeur de connectivité aux routes en fonction de leurs capacités et du nombre de lignes de bus. Dans ce protocole, Le véhicule source calcule le chemin le plus court vers la destination en appliquant l'algorithme de Dijkstra sur un graphe pondéré par les valeurs de connectivité des routes.

Le protocole "Vertex-Based Predictive Greedy Routing (VPGR)" [107] est un protocole de routage prédictif glouton à base de sommet. VPGR utilise les communications hybrides V2V et V2I conjointement. Il a la capacité de prédire une séquence de sommets du nœud source vers une infrastructure fixe dans la zone d'emplacement de la destination finale, puis utilise la technique de transfert du protocole PDGR pour acheminer les paquets entre les sommets. VPGR implique une métrique simple appelée RT (temps restant)

pour sélectionner le chemin le plus court. Cette métrique vise à sélectionner un sommet parmi les véhicules dont le temps restant est important. Ce mécanisme n'ajoute pas de nouvelles informations pour le processus de routage car il existe des véhicules se trouvant au carrefour des chemins. De plus, le chemin le plus court n'est pas optimal car il ne prend pas en compte les informations du trafic entre les sommets.

Le protocole "GyTAR" [108] est un protocole de routage géographique conçu pour les réseaux VANETs dans les environnements urbains. L'idée principale de ce protocole se base sur le mécanisme de sélection dynamique des intersections en fonction de la densité de la route (nombre de véhicules sur la route) et la distance courbée-métrique (couverve-métrique) à la destination. GyTAR utilise des paquets nommés "CDP" pour fournir les informations sur les intersections candidates par lesquelles les paquets doivent passer pour atteindre la destinations. Toutefois, le déclenchement des paquets CDP n'est pas régulier dans le temps car il est initié seulement quand un véhicule est sur le point de quitter la route. Le protocole "EGyTAR" [83] est une version améliorée du protocole GyTAR. Dans EGyTAR, le mécanisme de sélection dynamique des intersections est basé sur le nombre de véhicules se dirigeant vers les intersections candidates (densité directionnelle).

Le protocole "Adaptive Quality of service (QoS) based Routing for VANETs (AQRV)" [109] est un protocole de routage basé sur la qualité de service adaptative dédié aux réseaux VANETs. AQRV adopte un algorithme de colonie de fourmis (ANT) pour résoudre un problème d'optimisation contraint aux facteurs de sélection de route tels que la probabilité de connectivité, le taux de livraison des paquets et le délai de bout en bout. En outre, pour obtenir la meilleure qualité de service, les concepteurs de ce protocole proposent une version optimisée de cet algorithme (ACO : Ant Colony Optimization) pour atteindre cet objectif.

Dans le protocole de routage "Border node-based Most Forward withing Radius (B-MFR)" [110], les auteurs définissent des types d'arborescence de nœuds en fonction de l'emplacement des nœuds voisins par rapport à la plage de transmission, dans laquelle les nœuds voisins situés dans la plage de transmission sont appelés "nœuds internes", les nœuds situés à la limite de la plage de transmission sont appelés "nœuds frontières" et ceux situés à l'extérieur sont désignés sous le nom de "nœuds externes". L'idée principale de ce protocole est de transférer le paquet à travers les nœuds frontières afin de minimiser le nombre de sauts entre la source et la destination.

Le protocole de routage "GPGR" proposé dans [111] est un protocole qui combine les informations sur la topologie routière et les informations sur la mobilité des véhicules afin d'améliorer les communications entre véhicules et réduire les problèmes de routage local maximum. GPGR peut éviter les pannes de liens en sélectionnant un noeud "saut-suivant" approprié en fonction des informations de topologie et de mobilité des véhicules.

Dans [81], les auteurs ont proposé un protocole de routage appelé le protocole "LSGO". Dans ce protocole, chaque noeud calcule la qualité du lien "ETX" à l'aide des paquets périodiques "Hello". LSGO utilise la valeur ETX et la distance séparant la source de la destination comme métriques de priorité. De plus, le nœud de priorité supérieure peut

transférer directement le paquet vers sa destination, par contraire, le nœud de priorité basse doit attendre un temporisateur prédéfini. Si ce temporisateur expire et le nœud prioritaire ne transmet pas le paquet, alors ce nœud de faible priorité peut envoyer le paquet. Pour cette raison, le protocole LSGO utilise des communications de type multi-cast pour effectuer la transmission. Cependant, ce mécanisme augmente l'overhead et par conséquent il encombre le débit du réseau.

Le protocole "Localized Opportunistic Routing (LOR)" [112] est un protocole opportuniste dans lequel la topologie est partitionnée en un ensemble de nœuds fermés (CNS : Close-Node-Sets) imbriqués basés sur des informations locales à l'aide de l'algorithme de sélection de transmission minimale distribuée (MTS-B : Minimum Transmission Selection). En conséquence, le réseau sera transformé de réseau de nœuds en réseau de CNS, autrement dit, chaque CNS agit en tant que nœud unique. Puis, pour le routage des données, le protocole LOR adopte le protocole AODV [113] pour trouver le chemin des CNSs qui contient des séquences de CNS.

Un autre protocole de routage intelligent pour les réseaux VANETs a été proposé dans [114]. Ce dernier est capable d'interagir avec l'environnement pour connaître les paramètres de transmission en tenant compte de diverses mesures telles que le débit et la longueur de la route. Ce protocole est basé sur deux algorithmes : algorithme d'estimation de débit et algorithme de sélection de route. L'algorithme d'estimation de débit adopte l'algorithme Q-Learning pour estimer le taux de réception en utilisant des messages "Hello" comme indicateur de la qualité de la liaison. En outre, l'algorithme de sélection de route utilise les algorithmes Q-Learning et la logique floue pour trouver la meilleure route en terme de délai de bout en bout.

Le protocole "Hybrid Location-based Ad hoc Routing (HLAR)" proposé dans [115], permet de combiner des protocoles de routage réactifs et des protocoles de routage basés sur la position. L'idée principale du protocole HLAR est d'utiliser le protocole de routage réactif comme alternative au routage des données lorsque les informations de localisation se dégradent. En outre, le protocole HLAR combine un algorithme de transfert glouton et AODV-ETX qui est une version modifiée du protocole AODV dans laquelle ETX [116] est utilisée en tant que métrique au lieu du nombre minimal de sauts.

4.4 Contribution

Notre objectif est de proposer un nouveau protocole de routage robuste et efficace pour les réseaux non tolérants au retard conçu pour les VANETs afin d'améliorer les performances de routage en milieu urbain. Le protocole proposé est composé de trois parties essentielles : 1) la diffusion des informations sur le trafic routier (Dissemination of Road Traffic Information), 2) l'algorithme de routage partiel (Partial Routing algorithm), et 3) la stratégie de recouvrement en arrière (Backwards Recovery strategy).

4.4.1 Dissemination de l'informations du trafic routier

L'objectif de la dissemination de l'information du trafic routier "Dissemination of Road Traffic Information (DRTI)" est de faire face à la nature dynamique des réseaux VANETs. L'idée principale de DRTI est de conserver les informations sur le trafic routier de chaque route et de les partager avec les routes suivantes, comme indiqué dans la Figure 4.1.

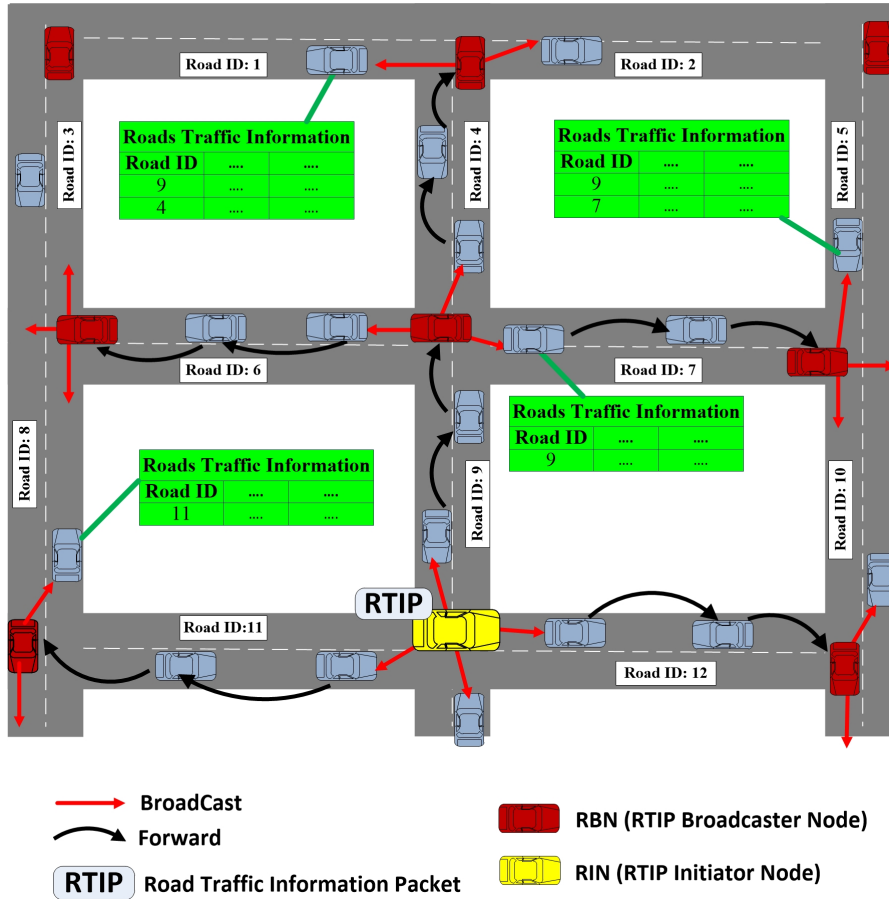


FIGURE 4.1 – Dissemination d'informations sur le trafic routier (DRTI)

Le véhicule le plus proche d'une intersection (routes croisées) est sélectionné en tant que nœud initiateur des paquets RTIP "Road Traffic Information Packet (RTIP)" appelé RIN "RTIP Initiator Node (RIN)" (véhicule jaune). Les nœuds RIN sont chargés d'initier périodiquement le paquet d'informations sur le trafic routier (RTIP) selon l'algorithme 3 et de le transmettre dans les directions de toutes les intersections voisines. La première propriété intéressante de notre mécanisme de diffusion est que le paquet RTIP peut contenir un certain nombre d'informations sur les routes en fonction de la durée de vie du RTIP. Par ailleurs, il est principalement proposé de contourner la vision locale, ce qui est le cas de nombreux protocoles de routage tels que GyTAR [108] et EGyTAR [83]. La Figure 4.2 montre un exemple de vision locale et de vision avancée.

De plus, DRTI fournit de nouvelles informations sur les routes, telles que le délai de passage des paquets, la densité des routes (nombre de véhicules par route) et la connectivité d'une route. Pour atteindre cet objectif, nous décrivons dans les sous-sections suivantes le schéma de division des routes, le paquet d'informations sur le trafic routier (RTIP), le

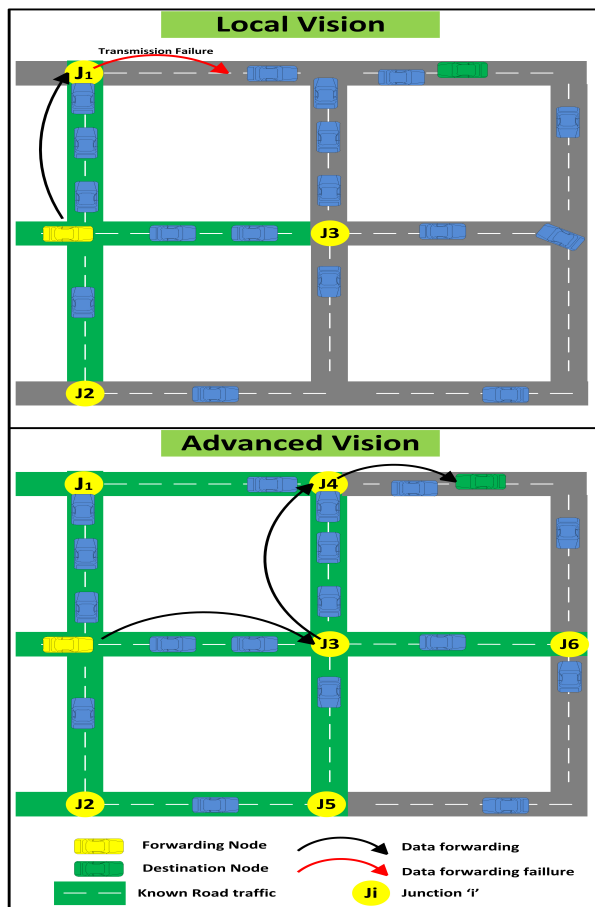


FIGURE 4.2 – Vision Locale vs. Vision Avancée

calcul de la connectivité d'une route et enfin l'algorithme de diffusion des paquets RTIP.

a) Mécanisme de division des routes

Dans notre protocole de routage proposé, chaque route est divisée en un nombre fixe de cellules physiques de manière à ce que la zone d'une route donnée soit entièrement couverte par un certain nombre de cellules physiques de même taille en fonction de la plage de transmission (R_{tr}), la largeur et la longueur de la route. Afin de garantir ces propriétés, commençons par un exemple de deux cellules consécutives comme celles illustrées par la Figure 4.3.

Les cercles bleus représentent les cellules qui se croisent au point "c", les points "a" et "e" indiquent les centres des cellules, "f" et "g" désignent l'intersection des cellules avec le bord de la route, comme décrit dans la Figure. Les points 'b' et 'd' sont les projections des points 'f' et 'g' respectivement sur le segment [ae]. La zone jaune représente la zone restante de la confluence des cellules avec la route, $[ae] = 2R_{tr}$ et $[ce] = [ie] = R_{tr}$.

Il convient de noter que les cellules physiques permettent de définir un groupe de véhicules. De plus, chaque groupe doit gérer les informations sur les véhicules qui le composent, et doit être impliqué dans le processus de diffusion des informations sur le trafic routier.

Algorithm 3 : Periodic Road Traffic Information Initiation

```

1: Begin
   -  $V$  : Vehicle
   -  $rti_p$  : Road traffic information packet
   -  $cell\_n$  : Neighbor cell
   -  $current_j$  : The current junction of  $V$ 
   -  $first_j$  : The first junction of  $cell\_n$ 
   -  $last_j$  : The last junction of  $cell\_n$ 
   -  $SH$  : The static header of  $rti_p$ 
   -  $DH$  : The dynamic header of  $rti_p$ 
   -  $RIN$  : Road Traffic Information Initiator Node
2: if ( $V$  around cross roads) then
3:   if ( $V$  receive  $RIN\_initiation\_msg$ ) then
4:      $timer = 0$ ;
5:      $Start_{timer}(V)$ ;
6:   end if
7:   if ( $V$  is  $RIN \wedge timer > 1sec$ ) then
8:      $rti_p = new RTIPacket()$ ;
9:      $rti_p.SH.time\_stamp = currentTime()$ ;
10:     $rti_p.DH.time\_stamp = currentTime()$ ;
11:     $rti_p.SH.source\_junction = current_j$ ;
12:    for (all neighboring cells " $cell\_n$ ") do
13:       $rti_p.DH.from\_junction = cell\_n.first_j$ ;
14:       $rti_p.DH.to\_junction = cell\_n.last_j$ ;
15:      Forward  $rti_p$  to  $GL$  of  $cell\_n$ ;
16:    end for
17:    Broadcast  $RIN\_initiation\_msg$  around  $current_j$ ;
18:  end if
19: end if
20: End

```

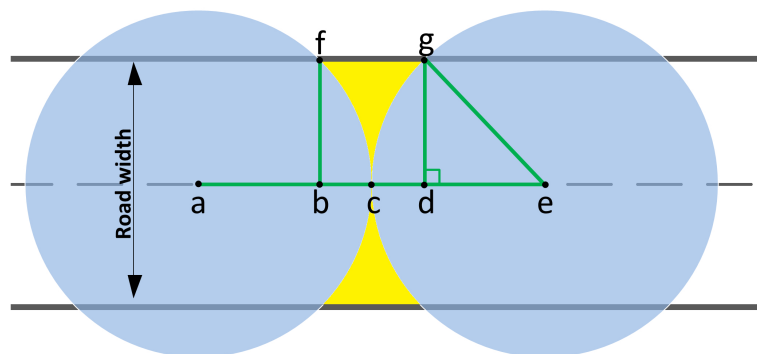


FIGURE 4.3 – Taille de la cellule : case 1

Le problème posé ici est lorsque les véhicules situés dans la zone jaune ne peuvent pas être impliqués dans la diffusion du processus d'information sur le trafic routier, c'est parce

qu'ils ne font partie d'aucun groupe. Nous proposons donc de déterminer la distance entre les cellules afin d'éviter la zone aveugle (zone jaune) comme indiqué dans la Figure 4.4. Cette nouvelle distance de cellule est calculée en déplaçant la cellule droite vers la cellule gauche d'une distance qui est égale la longueur du segment $[bd]$ comme suit :

$$new_cell_distance = [ae] - [bd] \quad (4.1)$$

En se basant sur la Figure 4.3, nous avons :

$$[bd] = 2[cd] = 2([ce] - [de]) \quad (4.2)$$

$$[de] = \sqrt{[ge]^2 - [gd]^2} = \sqrt{R_{tr}^2 - (Rw/2)^2} \quad (4.3)$$

Où Rw représente la largeur de la route.

Selon l'équation 4.3 :

$$4.2 \Rightarrow [bd] = 2R_{tr} - 2\sqrt{R_{tr}^2 - (Rw/2)^2} \quad (4.4)$$

Selon l'équation 4.4 :

$$(1) \Rightarrow new_cell_distance = 2\sqrt{R_{tr}^2 - (Rw/2)^2} \quad (4.5)$$

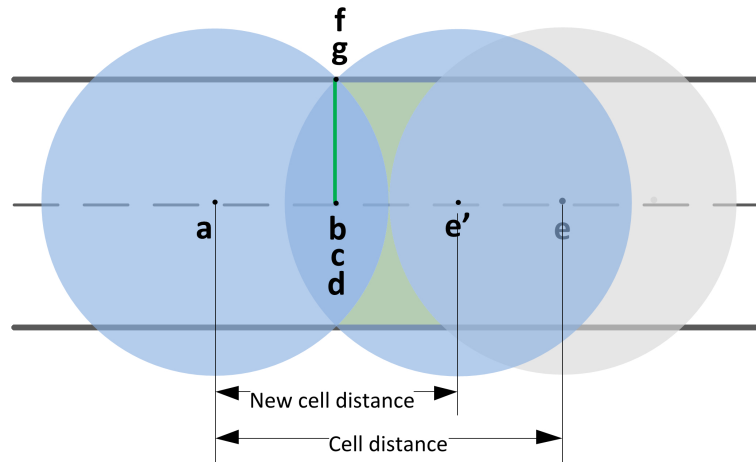


FIGURE 4.4 – Taille de la cellule : case 2

Ainsi, selon l'équation 4.5, l'espacement maximum inter-cellule afin d'éviter la zone aveugle est définie comme suit :

$$Max_cell_spacing = 2\sqrt{R_{tr}^2 - \frac{Rw^2}{4}} \quad (4.6)$$

Ensuite, le nombre de cellules pour une route donnée est calculé comme suit :

$$Number_of_cell = ceiling\left(\frac{roadlength}{Max_cell_spacing}\right) \quad (4.7)$$

Où $roadlength$ représente la longueur de la route, la fonction $ceiling(x)$ donne un entier supérieur ou égal à x exprimé par l'équation 4.8.

$$ceiling(x) = \begin{cases} x & \text{if } x \in \mathbf{N} \\ INT(x) + 1 & \text{if } x \in \mathbf{R} \end{cases} \quad (4.8)$$

Enfin, la taille de la cellule est donnée par :

$$Cell_{size} = \frac{roadlength}{Number_of_cell} \quad (4.9)$$

b) Paquet d'information du trafic routier (RTIP)

Le paquet "RTIP" est conçu pour stocker et transférer les informations sur le trafic routier. La Figure 4.5 présente le format du paquet RTIP, qui est composé de trois parties :

1. **Static Header** : Initialisé une seule fois par le nœud initiateur RTIP (RIN), il se compose de deux champs :
 - (a) *Time-stamp* : représente le moment d'initiation du RTIP,
 - (b) *Source Junction ID* : comprend l'identifiant de l'intersection courante du nœud RIN.

De plus, ces champs précédents servent d'identifiant le RTIP.

2. **Dynamic Header** : utilisé par le nœud RIN et le nœud de transfert des RTIP "RTIP Broadcaster Node (RBN)", contrairement à l'en-tête statique. L'en-tête dynamique peut être mis à jour par chaque processus de diffusion. Ce dernier contient les informations relatives de la prochaine route qui sera traitée et il est composé de :
 - (a) *From Junction ID* : représente l'ID de l'intersection courante du nœud de transfert (RIN ou RBN),
 - (b) *To Junction ID* : désigne l'identifiant de l'intersection de destination,
 - (c) *Time-stamp* : désigne le temps de début du processus de diffusion.
3. **Roads Information** : La partie la plus importante consiste en l'entrée d'informations sur les routes où chaque entrée étant créée par un nœud RBN ou par le RIN du RTIP initial. De plus, toutes les entrées contiennent les champs suivants :
 - (a) *Road ID* : l'identifiant de la route courante,
 - (b) *Road Connectivity* : indique la valeur de la connectivité d'une route. Cette valeur doit être mise à jour par tous les chefs de groupe (GLs) situés sur la route courante,

- (c) *Road Density* : désigne la densité de la route (le nombre de véhicules),
- (d) *Delay* : désigne le temps pris pour parcourir la route courante,
- (e) *Time-stamp* : représente le temps de création de l'entrée de la table d'informations sur le trafic routier.

Road Traffic Information Packet					
Static Header	Time-stamp		Source Junction ID		
	Dynamic Header	From Junction ID	To Junction ID	Time-stamp	
Road Information Table		Road ID	Road Connectivity	Road Density	Delay

FIGURE 4.5 – Format du paquet RTIP

c) Connectivité : entre deux véhicules, Cellule et Route

Dans cette section, nous définissons la connectivité de liaison (LC) entre deux véhicules qui se suivent, d'une cellule qui fait partie à une route et de la route toute entière.

Premièrement, la connectivité LC entre deux véhicules consécutifs est représentée par la distance de communication restante entre ces deux véhicules. Par conséquent, deux véhicules sont connectés tant que la valeur de la distance de communication restante est supérieure à zéro, sinon ; les véhicules ne sont pas connectés ($LC = 0$). La connectivité LC de deux véhicules peut être exprimée comme suit :

$$LC_{nodes}(v_i, v_j) = \begin{cases} R_{tr} - dist(v_i, v_j), & \text{if } dist(v_i, v_j) \leq R_{tr} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.10)$$

Où v_i et v_j décrivent respectivement les identifiants des véhicules i et j , $dist$ représente la distance et R_{tr} est une abréviation de la gamme de transmission.

Par ailleurs, la cellule physique définit un groupe de véhicules et dans ce contexte, la connectivité LC de la cellule est liée au LC des membres de son groupe (véhicules). Nous proposons donc que la connectivité LC d'une cellule soit la moyenne des connectivités LC_{nodes} de tous les véhicules consécutifs au sein de la cellule. LC_{cell} est défini comme :

$$LC_{cell} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} LC_{nodes}(v_i, v_{i+1})}{N-1} \quad (4.11)$$

Où N représente le nombre de véhicules dans la cellule (densité des cellules).

D'une manière analogue à la connectivité des cellules, la connectivité d'une route est calculée en fonction des connectivités inter-cellules. D'où la connectivité d'une route peut être exprimée comme suit :

$$LC_{road} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cell}} (N_i * LC_{cell_i}) + \sum_{i=1}^{N_{cell}-1} LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})}{\sum_{i=1}^{N_{cell}} N_i} \quad (4.12)$$

$$LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1}) = LC_{nodes}(last_v(cell_i), first_v(cell_{i+1})) \quad (4.13)$$

Où $LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})$ est la connectivité de liaison entre le dernier véhicule de $cell_i$ et le premier véhicule de $cell_{i+1}$ de la cellule suivante.

De plus, afin de calculer la connectivité d'une route en utilisant l'équation 4.12, nous devons avoir les valeurs de connectivité et de densité de toutes les cellules situées sur la route.

Par ailleurs, en vue de minimiser la taille des paquets lors de ces calculs, nous calculons la connectivité d'une route de manière progressive en utilisant seulement deux champs : la connectivité et la densité de la cellule précédente. D'où, la connectivité d'une route sera calculée progressivement de cellule en cellule comme suit :

$$PLC_{i(i>1)} = \frac{D_{i-1}PLC_{(i-1)} + N_i LC_{cell_i} + LC_{inter}(cell_{i-1}, cell_i)}{D_i} \quad (4.14)$$

Où :

$$\begin{cases} PLC_1 = LC_{cell_1} \\ D_{i(i>1)} = D_{i-1} + N_i = \sum_{j=1}^i N_j \\ D_1 = N_1 \end{cases}$$

PLC_i indique la connectivité progressive du lien "Progressive Link Connectivity (PLC)" de la cellule i , PLC_{i-1} représente la connectivité des cellules précédentes, D_i indique la densité des cellules précédentes (la somme des densités de toutes les cellules précédentes de la cellule i ajoutée à la densité de la cellule courante).

D'où, la connectivité d'une route peut également être exprimée comme suit :

$$LC_{road} = PLC_{N_{cell}} \quad (4.15)$$

Nous pouvons démontrer l'équation 4.15 par une induction mathématique comme suit :

- **Cas de base** : Montrons que l'équation 4.15 est vraie pour $N_{cellule} = 1$.

$$\begin{aligned}
-PLC_1 &= LC_{cell_1} \quad \text{d'après la définition (voir l'équation 4.14);} \\
-LC_{road} &= \frac{\sum_{i=1}^1 (N_i * LC_{cell_i}) + \sum_{i=1}^0 LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})}{\sum_{i=1}^1 N_i} \\
&= \frac{N_1 * LC_{cell_1}}{N_1} = LC_{cell_1}
\end{aligned}$$

Nous constatons que pour $N_{cell} = 1$, l'équation 4.15 est vraie.

- **Étape inductive** : Montrons par récurrence que si l'équation 4.15 est vraie pour $N_{cellule} = n (n > 1)$, alors aussi vraie pour $N_{cellule} = n + 1$.
En utilisant l'équation 4.14 pour $N_{cell} = n + 1$:

$$\begin{aligned}
PLC_{n+1} &= \frac{D_n PLC_n + N_n LC_{cell_n}}{D_{n+1}} \\
&\quad + \frac{LC_{inter}(cell_n, cell_{n+1})}{D_{n+1}} \quad (a)
\end{aligned}$$

Par hypothèse, $LC_{route} = PLC_{N_{cellule}}$ est vraie pour $N_{cellule} = n$, nous avons :

$$\begin{aligned}
PLC_n &= LC_{road} \\
&= \frac{\sum_{i=1}^n (N_i * LC_{cell_i}) + \sum_{i=1}^{n-1} LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})}{\sum_{i=1}^n N_i}
\end{aligned}$$

En multipliant par D_n , nous obtenons alors :

$$\begin{aligned}
D_n PLC_n &= D_n \frac{\sum_{i=1}^n (N_i * LC_{cell_i})}{\sum_{i=1}^n N_i} \\
&\quad + D_n \frac{\sum_{i=1}^{n-1} LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (b)
\end{aligned}$$

Nous avons $D_n = \sum_{i=1}^n N_i$ et en utilisant l'équation 4.14, et par substitution D_n dans (b) nous obtenons :

$$D_n PLC_n = \sum_{i=1}^n (N_i LC_{cell_i}) + \sum_{i=1}^{n-1} LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1}) \quad (c)$$

par substitution $D_n PLC_n$ dans la partie droite de (a) nous avons :

$$PLC_{n+1} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i LC_{cell_i}) + \sum_{i=1}^{n-1} LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})}{D_{n+1}} + \frac{N_n LC_{cell_n} + LC_{inter}(cell_n, cell_{n+1})}{D_{n+1}} \quad (d)$$

En conséquence :

$$\sum_{i=1}^n N_i LC_{cell_i} + N_n LC_{cell_n} = \sum_{i=1}^{n+1} N_i LC_{cell_i} \quad (e)$$

$$\sum_{i=1}^n LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1}) = \sum_{i=1}^{n-1} LC_{inter}(i, i+1) + LC_{inter}(cell_n, cell_{n+1}) \quad (f)$$

par substitution (e) et (f) dans la partie droite de (d), nous aurons :

$$PLC_{n+1} = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} N_i LC_{cell_i} + \sum_{i=1}^n LCI(i, i+1)}{D_{n+1}} \quad (g)$$

Nous avons $D_{n+1} = \sum_{i=1}^{n+1} N_i$,

par substitution D_{n+1} , (g) devient :

$$\begin{aligned} PLC_{n+1} &= \frac{\sum_{i=1}^{n+1} N_i LC_{cell_i} + \sum_{i=1}^n LC_{inter}(cell_i, cell_{i+1})}{\sum_{i=1}^{n+1} N_i} \\ &= LC_{road_{(n+1)}} \end{aligned}$$

Le calcul ci-dessus prouve que l'équation 4.15 est vraie pour $N_{cellule} = n + 1$,

En conclusion, nous remarquons que le cas de base et l'étape inductive ont été réalisés par des preuves d'induction, ce qui permet de conclure que l'équation 4.15 est vraie.

d) Maintien et partage des informations du trafic routier

En raison de la nature hautement dynamique des réseaux VANETs, la topologie change fréquemment. Par conséquent, afin de permettre à la décision de routage de rester robuste dans de tels réseaux dynamiques, il est très important de maintenir une information fraîche et permanente sur le trafic routier. Pour cette raison, nous proposons une information de groupe distribuée capable de fournir des informations permanentes sur le trafic routier incluses dans les paquets RTIP. En outre, pour garantir cette propriété, chaque route est divisée en un ensemble de cellules physiques contenant chacune un groupe de véhicules (voir la section a)). Dans chaque cellule, le véhicule le plus proche au centre de la cellule est élu comme chef de groupe. Ce véhicule est nommé GL du groupe. Nous proposons également que chaque paquet RTIP passe par tous les GLs appartenant à la route, comme indiqué dans la Figure 4.6. De plus, les GLs ont pour rôle de mettre à jour les paquets RTIP en incluant les informations de leurs groupes (densité, connectivité, ...) à des fréquences fixes selon l'algorithme 4. De plus, comme les véhicules se déplacent dans les deux sens, le mécanisme de transmission d'informations sur le trafic routier implique les véhicules dans les deux sens selon l'algorithme 5.

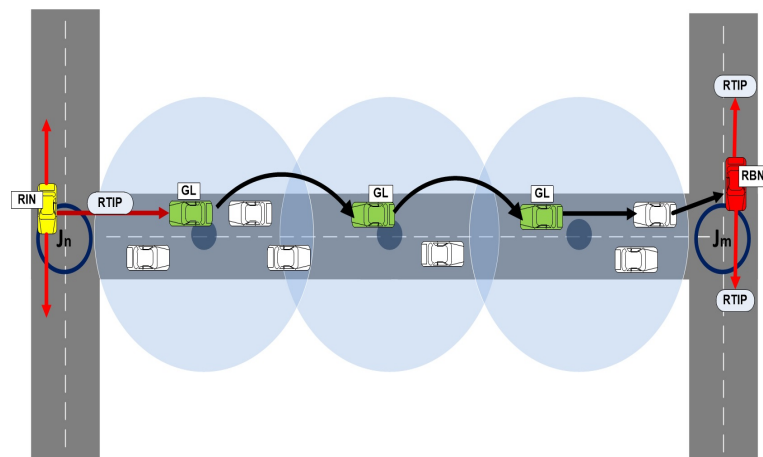


FIGURE 4.6 – Mécanisme de transfert des paquets RTIP

4.4.2 Algorithme de routage partiel

Le protocole de routage partiel proposé adopte une approche de routage basée sur les ancres en utilisant les informations du trafic routier, grâce au DRTI. Étant donné que le paquet RTIP peut contenir un certain nombre d'entrées d'information sur les routes en fonction de la durée de vie du RTIP. Par conséquent, le nœud de transfert disposera

Algorithm 4 : Update Road Traffic Information Packet

```
1: Begin
   -  $V$  : Vehicle
   -  $current\_cell$  : The current cell of  $V$ 
   -  $current\_road$  : The current road of  $V$ 
   -  $N$  : The number of vehicles in  $current\_cell$ 
2: if ( $V$  is GL) then
3:   if ( $current\_cell$  is First cell) then
4:      $ligne_{rti} = newLigneRTI()$ ;
5:      $ligne_{rti}.road\_id = current\_road.id$ ;
6:      $ligne_{rti}.time\_stamp = currentTime$ ;
7:      $ligne_{rti}.road\_density = N$ ;
8:      $LC_{current\_cell} = LC_{cell}(0, 0, current\_cell)$ ;
9:      $ligne_{rti}.road\_connectivity = LC_{current\_cell}$ ;
10:     $rti_p.addRTILigne(ligne_{rti})$ ;
11:   else
12:      $ligne_{rti} = rti_p.getRTILigne(current\_road)$ ;
13:      $N = N + ligne_{rti}.road\_density$ ;
14:      $last_{LC} = ligne_{rti}.road\_connectivity$ ;
15:      $LC_{current\_cell} = LC_{cell}(N, last_{LC}, current\_cell)$ ;
16:      $ligne_{rti}.road\_connectivity = LC_{current\_cell}$ ;
17:   end if
18: end if
19: End
```

d'informations sur le trafic d'une zone limitée de routes. En d'autres termes, il aura des informations sur le trafic, telles que la connectivité, la densité et le délai pour traverser un ensemble de routes stockées dans sa table d'informations sur le trafic "Road Traffic Information Table (RTIT)" et la mise à jour de cette table est décrite par l'algorithme 6.

Le protocole proposé est composé de deux modules selon l'algorithme 7 : l'algorithme de chemin partiel et l'algorithme de routage partiel.

a) Algorithme du chemin partiel

En se basant sur les informations du trafic, le nœud de transfert calcule un chemin partiel vers la destination conformément à l'algorithme 11 cité en annexe.

Tout d'abord, le nœud de transfert génère un graphe $G = (V, E)$ pour représenter le réseau, dans lequel V et E représentent respectivement un ensemble de sommets (intersections dans le réseau) et un ensemble d'arêtes (routes du réseau joignant les intersections). De plus, chaque route est pondérée par la fonction "Score" décrite comme suit :

$$Score(road_i) = \tag{4.16}$$

Algorithm 5 : Road Traffic Information Forwarding Algorithm

```

1: Begin
   -  $V$  : Vehicle
   -  $RTI_{lf}$  : Road Traffic Information lifetime
   -  $GL$  : Group Leader
2:  $V$  receive  $rti_p$  :
3: if  $((currentTime - rti_p.SH.time\_stamp) > RTI_{lf})$  then
4:   delete  $rti_p$ ;
5:   Return;
6: end if
7: if ( $rti_p$  is broadcast) then
8:   Update RTI table following algorithm.5;
9:   Return;
10: end if
11:  $to_j = rti_p.DH.to\_junction$ ;
12:  $from_j = rti_p.DH.to\_junction$ ;
13: if ( $V$  is  $GL$  of  $current\_cell$ ) then
14:   Update  $rti_p$  following algorithm.6;
15:   if ( $current\_cell$  is last cell) then
16:     if ( $V$  is around  $to_j$ ) then
17:       Forward  $rti_p$  to  $RBN$ ;
18:     else
19:       Forward  $rti_p$  to closest neighbor to  $RBN$ ;
20:     end if
21:   else
22:     Forward  $rti_p$  to  $GL$  of next cell;
23:   end if
24: else
25:   Forward  $rti_p$  to  $GL$  of  $current\_cell$ ;
26: end if
27: if ( $V$  is  $RBN$  of  $to_j$ ) then
28:    $road\_id = getRoadID(from_j, to_j)$ ;
29:    $delay = currentTime - rti_p.DH.time\_stamp$ ;
30:    $rti_p.roadTable[road\_id].delay = delay$ ;
31:   Broadcast  $rti_p$  around  $to_j$ ;
32:   for (all neighboring cells " $cell\_n$ ") do
33:      $rti_p.DH.from\_junction = cell\_n.first_j$ ;
34:      $rti_p.DH.to\_junction = cell\_n.last_j$ ;
35:     Forward  $rti_p$  to  $GL$  of  $cell\_n$ ;
36:   end for
37: end if
38: End

```

$$\begin{cases} \alpha(1 - \frac{LC_{road_i}}{R_{tr}}) + \beta(\frac{delay(road_i)}{RTIP_lifetime}), & \text{if } road_i \in RTI_{table} \\ 1 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Algorithm 6 : Update Road Traffic Information Table

```
1: Begin
   -  $V$  : Vehicle
   -  $RTI_{lf}$  : Road Traffic Information lifetime
   -  $RTI_{table}$  : Road Traffic Information Table
2: for (i=1 to  $RTI_{table}.length$ ) do
3:   /* purge  $RTI_{table}$  */
4:   if ( ( $current_{Time} - RTI_{table}[i].time\_stamp$ ) >  $RTI_{lf}$ ) then
5:     delete  $RTI_{table}[i]$ ;
6:   end if
7: end for
8: for (i=1 to  $rtp.roadTable.length$ ) do
9:    $ligne_{rti} = rtp.roadTable[i]$ ;
10:   $found = false$ ;
11:  for (i=j to  $RTI_{table}.length$ ) do
12:    if ( $RTI_{table}[j].road\_id = ligne_{rti}.road\_id$ ) then
13:       $found = true$ ;
14:      if ( $RTI_{table}[j].time\_stamp > ligne_{rti}.time\_stamp$ ) then
15:         $RTI_{table}[j] = ligne_{rti}$ ;
16:      end if
17:    end if
18:  end for
19:  if (not  $found$ ) then
20:     $RTI_{table}[RTI_{table}.length + 1] = ligne_{rti}$ ;
21:  end if
22: end for
23: End
```

Où α et β désignent le poids et ($\alpha + \beta = 1$).

Dans l'équation 4.16, nous avons tendance à calculer le score d'une route donnée de telle sorte que le score sur la route soit plus petit tant qu'il a une connectivité supérieure et un délai inférieur. Dans le cas où la route donnée n'appartient pas à RTIT, le score est égal à 1 (informations sur le trafic routier inconnues).

Deuxièmement, nous calculons le plus court chemin de la position source à la destination en appliquant un algorithme du plus court chemin tel que celui de Dijkstra sur un sous-graphe du réseau où nous considérons uniquement les arêtes non visitées (nous supprimons toutes les arêtes visitées par ce paquet de données actuel) pour éviter le problème de boucle de routage.

Enfin, le chemin partiel est un sous-chemin du chemin le plus court calculé, dans lequel nous ne conservons que les arêtes avec des informations de trafic connues. En d'autres termes, nous supprimons du chemin le plus court toutes les arêtes avec des informations de trafic inconnues (arêtes avec score = 1). La Figure 4.7 montre un exemple de chemin partiel.

Algorithm 7 : Algorithme de routage proposé

```

1: Begin
  -  $S$  : The Source forwarding vehicle
  -  $data\_packet$  : The data packet
  -  $RH$  : The routing header of  $data\_packet$ 
  -  $partial\_path$  : The partial path of  $RH$ 
  -  $recovery\_path$  : The recovery path of  $RH$ 
  -  $visited\_roads$  : The visited roads of  $RH$ 
  -  $dst\_pos$  : The geographic position of destination
2:  $S$  want to forward  $data\_packet$  :
3:  $dst\_pos$  = compute the destination position using LocationService ;
4:  $RH.setDestinationPosition(dst\_pos)$  ;
5:  $RH.partial\_path.clear()$  ;
6:  $RH.recovery\_path.clear()$  ;
7:  $RH.visited\_roads.clear()$  ;
8:  $RH.routing\_mode = PRP\_Mode$  ;
9:  $data\_packet.setRoutingHeader(RH)$  ;
10:  $RH.partial\_path$  = compute partial path following algorithm 11 cité en annexe ;
11: forward  $data\_packet$  using PartialRoutingAlgorithm 10 cité en annexe ;
12: End

```

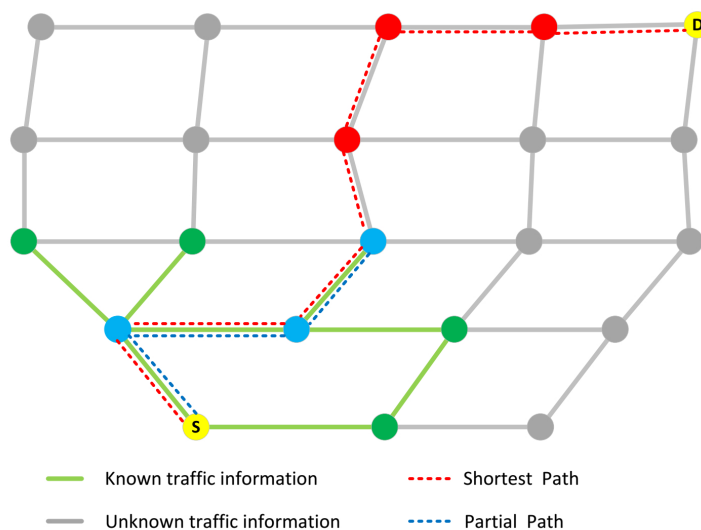


FIGURE 4.7 – Chemin partiel vs. Le plus court chemin

b) Algorithme de routage partiel

Dans le protocole de routage proposé, l'en-tête du paquet est composé de trois champs essentiels : pile du chemin partiel, pile du chemin de recouvrement et pile des routes visitées. Le routage avec chemin partiel est très simple, comme décrit dans l'algorithme 10 décrit en annexe. En suivant le scénario décrit dans les Figures 4.8 et 4.9, où le nœud source "S" veut envoyer des données au nœud de destination "D". Tout d'abord, le nœud source calcule le chemin partiel et l'insère dans la pile du chemin partiel. Ensuite, en appliquant une approche de transfert gloutonne, les paquets sont transférés en suivant

toutes les intersections de la pile du chemin partiel de manière triée. Lorsque le paquet de données atteint une intersection intermédiaire, nous le retirons de la pile du chemin d'accès partiel et nous l'ajoutons dans la pile du chemin de recouvrement. De plus, nous mettons à jour la pile des routes visitées pour chaque croisement. En outre, lorsque le paquet de données atteint la dernière intersection du chemin partiel (la pile du chemin partiel devient vide) (voir le noeud 4 dans la Figure 4.8), le noeud de transfert actuel calcule un nouveau chemin partiel et répète le même processus jusqu'à ce que la destination finale soit atteinte. Dans les autres cas où nous rencontrons un problème du maximum local (la transmission du chemin partiel échoue) (voir le noeud 5 dans la Figure 4.8), nous passons à l'algorithme de transfert arrière (décrit dans la section c)). La Figure 4.9 montre un exemple de mode de recouvrement en amont (voir le noeud 5 dans la Figure 4.9), lorsque le paquet atteint un problème du maximum local, le noeud de transfert actuel utilise la pile de recouvrement pour revenir à l'intersection précédente, et il refait le même processus jusqu'à ce que nous arrivons à une intersection à partir de laquelle nous pouvons calculer un nouveau chemin à la destination, et ce chemin ne doit contenir aucune route visitée. Si c'est le cas, le routage passe en mode de routage partiel pour transférer le paquet vers la destination finale. Les Figures 4.11a, 4.11b et 4.11c illustrent un exemple de transfert de données à l'aide d'un algorithme de transfert du chemin partiel, et nous résumons le processus fondamental de l'algorithme proposé par l'organigramme représenté dans la Figure 4.10.

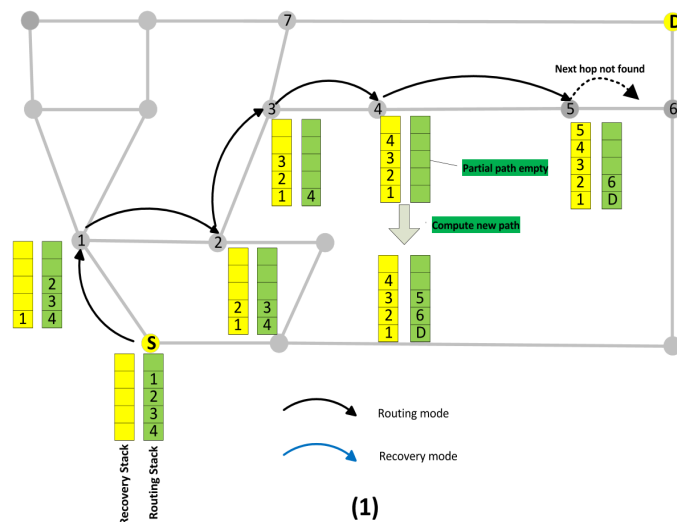


FIGURE 4.8 – Routage partiel (1)

c) Algorithme de routage en arrière (recouvrement)

L'algorithme de transfert en arrière sert comme mode de recouvrement lorsque l'algorithme de transfert de chemin partiel fait face au problème du maximum local. En outre, pour rendre notre protocole de routage plus approprié pour les systèmes "non-Delay-Tolerant Networking (non-DTN)", dans le mode de recouvrement proposé, nous n'utilisons aucun processus retardé, comme les approches "Carry and Forward". Ainsi, lorsque nous rencontrons un problème maximum local, le noeud de transfert ajoute la route actuelle à la pile de routes visitées et renvoie le paquet de données à l'intersection

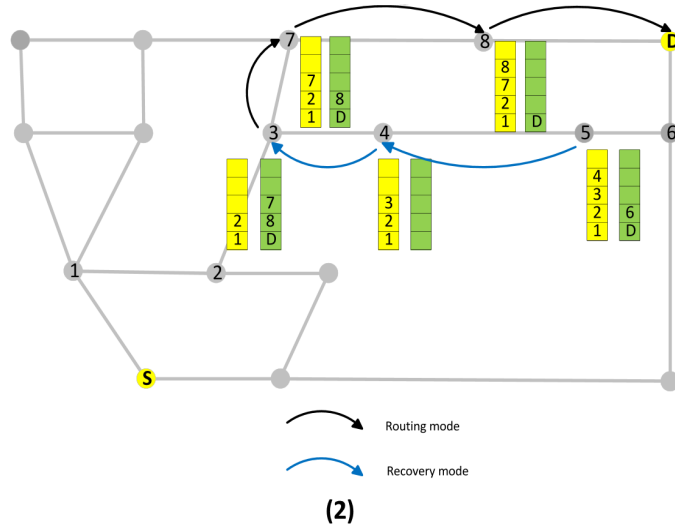


FIGURE 4.9 – Routage partiel (2)

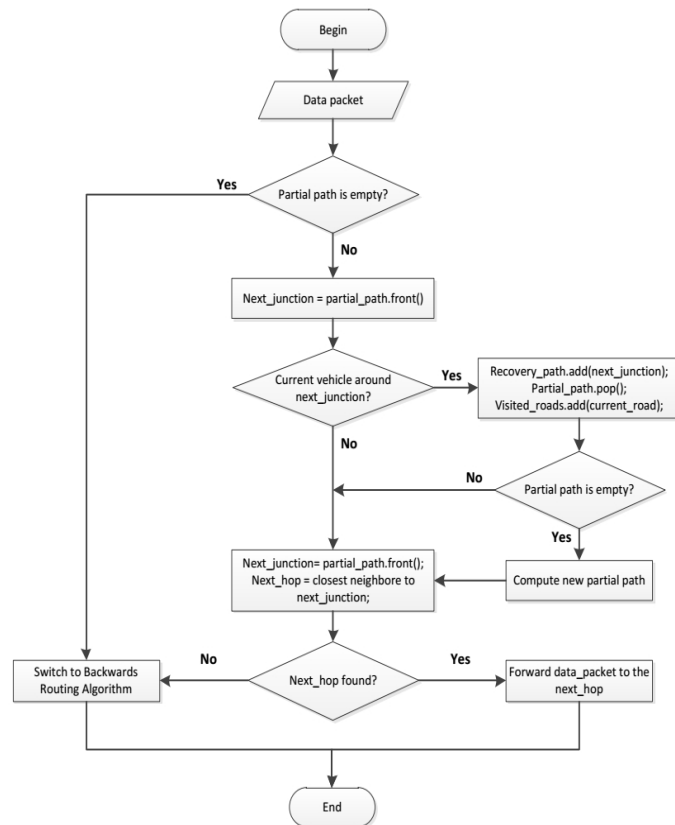


FIGURE 4.10 – Organigramme de l’algorithme de routage de chemin partiel

précédente à l’aide de la pile du chemin de recouvrement. Lorsque le paquet de données atteint l’intersection précédente, le nœud actuel calcule un nouveau chemin partiel. L’algorithme de chemin partiel ne prend pas en compte les routes visitées dans le calcul du chemin, et la route précédente (où s’est produit le problème du maximum local) n’appartenant pas au nouveau chemin partiel. Si le nouveau chemin partiel est vide, le nœud de

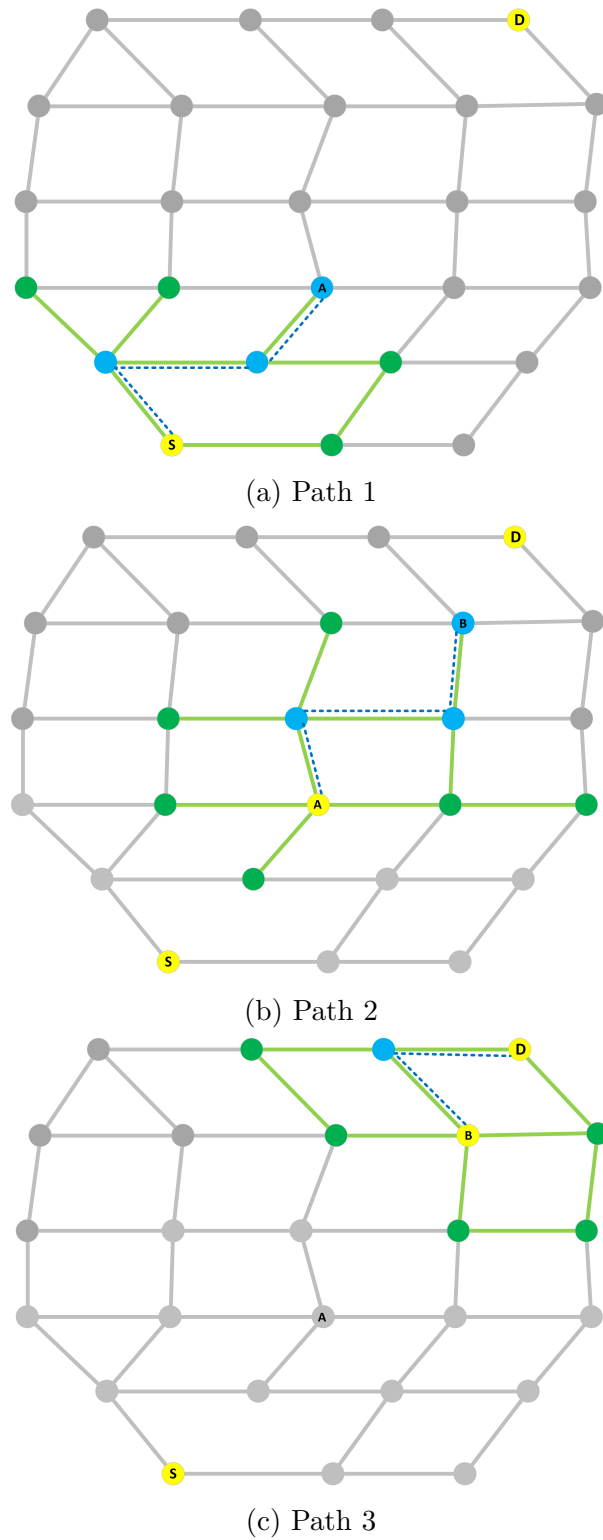


FIGURE 4.11 – Exemple de transfert de chemin partiel

transfert supprime l'intersection actuelle de la pile du chemin de recouvrement et transmet le paquet à l'intersection précédente (pile du chemin de recouvrement). Ce processus est répété jusqu'à ce que nous trouvons un chemin partiel non vide, ou dans d'autres cas, si

l'intersection précédente n'a pas été trouvée (la pile du chemin de recouvrement est vide), nous supprimons le paquet de données au lieu de reporter son transfert pour que notre protocole soit adapté aux réseaux non-DTN. Nous résumons le processus fondamental de l'algorithme de retour par l'organigramme décrit par la Figure 4.12 et nous donnons plus de détails dans l'algorithme 12.

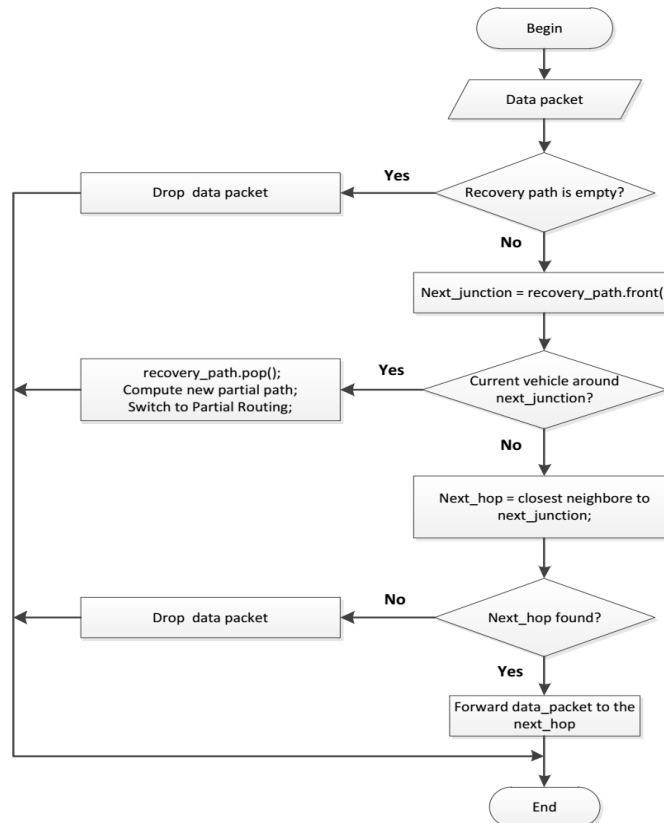


FIGURE 4.12 – Organigramme de l'algorithme de transfert arrière

4.5 Simulations

Dans cette section, nous évaluons les performances de notre solution de routage proposé (PBRP) et nous les comparons par rapport aux protocoles GyTAR et EGyTAR en termes de taux de livraison des paquets (PDR : Packet Delivery Ratio), de l'overhead et de délai de bout en bout (End-to-End Delay). La métrique PDR mesure le rapport entre le nombre total de paquets reçus et le nombre total de paquets générés à partir de la source. Le délai de bout en bout représente la durée du parcours d'un paquet de la source à la destination, et l'overhead représente la somme des tailles des paquets de contrôle. Nous considérons la taille des paquets CDP pour les protocoles GyTAR et EGyTAR et, pour notre protocole, l'overhead est représenté par la somme des tailles des paquets RTIP.

Dans les simulations réalisées, nous utilisons le modèle de mobilité basé sur la grille de Manhattan (Manhattan Grid mobility model), qui décrit le mouvement des véhicules dans une zone de grilles de 1 500 m x 1 500 m composée de 16 routes rectilignes. Ces protocoles ont été implémentés en utilisant le simulateur OMNET++.

4.5.1 Environnement de travail

Les performances de routage de GyTAR, EGyTAR et du protocole PBRP proposé sont évaluées à l'aide du simulateur OMNET-5.0 et du framework INET-3.4.0. Nous effectuons les simulations en fonction des paramètres qui sont résumés dans le tableau 4.1, et nous exécutons chaque scénario 10 fois, de sorte que les résultats soient moyennés. En outre, pour illustrer dans un environnement réel, nous incluons certains obstacles définis par leurs formes, leurs emplacements et le matériau qui les compose dans une zone de grille de 1500x1500m, décrits dans un fichier XML. De plus, chaque véhicule dispose d'un fichier de carte numérique pour se familiariser avec l'environnement de simulation. Nous utilisons également le modèle de mobilité "Manhattan Grid" pour décrire le mouvement des véhicules dans l'environnement de simulation, le modèle d'obstacles "Dielectric" et le protocole 802.11p [117] pour la couche MAC. Les paramètres de simulation restants sont résumés dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation (PBRP)

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	100 Sec
Intervalle des beacons	0.5 Sec
Durée de vie de RTIP	0.8 Sec
Protocole MAC	802.11p
Zone de simulation	1500x1500 m ²
Portée de transmission	250 meters
Modèle de mobilité	Manhattan Mobility
Vitesse moyenne des véhicules	50 Km/h
Capacité du canal	6 Mbps
Nombre des intersections	16
Nombre des routes	24
Modèle du trafic	UDPBasicApp
Intervalle d'envoi des paquets	0.2 sec
Taille du paquet	128 bytes
Nombre des véhicules	50-400
Modèle d'affaiblissement de propagation radio	Dielectric

4.5.2 Résultats de la simulation

Dans cette section, nous présentons et comparons les résultats de simulation obtenus par chaque protocole.

a) Taux de livraison par paquets (PDR)

La Figure 4.13 montre le taux de livraison des paquets en fonction du nombre de véhicules. Comme le montre cette figure, le taux de livraison des paquets dans tous les protocoles augmente en fonction de la densité du réseau. En effet, lorsque le nombre de

noeuds augmente, le noeud de transfert aura plus de chance pour trouver le noeud "saut-sautant". De plus, nous observons clairement que le protocole proposé permet d'obtenir un taux de livraison des paquets supérieur comparé à ceux des protocoles GyTAR/EGyTAR. Cela est principalement dû au fait que notre protocole utilise une vision avancée et des informations permanentes sur le trafic routier grâce à DRTI, ce qui permet à notre protocole d'éviter les zones vides dans lesquelles le réseau est déconnecté. De plus, contrairement au chemin complet, le chemin partiel a des effets positifs sur le routage des données. Il est également dynamique, flexible et pratique pour les réseaux dynamiques tels que les réseaux VANETs, car il peut être modifié pendant le processus de transfert lorsque le réseau change en exploitant les informations fraîches sur le trafic routier. D'autre part, le mode de recouvrement arrière proposé augmente également le taux de réception des paquets, il permet de donner une autre chance pour transférer un paquet de données lorsque le processus de transfert fait face au problème du maximum local. A cet effet, il renvoie le paquet de données au noeud transmetteur qui tente de le retransmettre via un autre chemin. Cependant, les protocoles GyTAR et EGyTAR fournissent un taux de livraison de paquets inférieur pour la simple raison que le mécanisme de sélection d'intersections utilisé dans ces deux protocoles a une vision locale sur le trafic dans le réseau et prend en compte les informations du trafic uniquement pour les routes candidates et non pour les routes suivantes. Cela conduit, dans certains cas, à transférer le paquet de données afin d'éviter les zones vides. De plus, l'initiation des paquets CDP dans les deux protocoles GyTAR/EGyTAR dépend du déplacement des véhicules. Ce dernier mécanisme n'est pas régulier dans le temps, ce qui signifie que GyTAR/EGyTAR ne peuvent pas exploiter les informations sur le trafic en permanence.

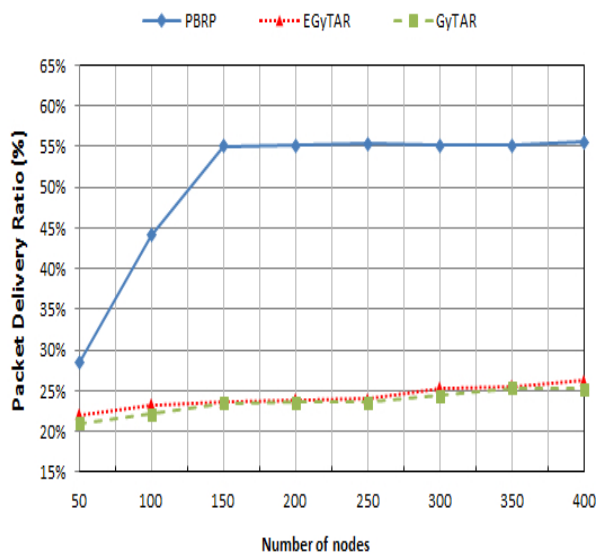


FIGURE 4.13 – Taux de Livraison de Paquets (PBRP)

b) Délai de bout en bout

La Figure 4.14 illustre le délai moyen de bout en bout. De manière générale, notre protocole permet un délai inférieur à ceux de GyTAR et EGyTAR. En effet, lorsque le

problème du maximum local se produit, GyTAR/EGyTAR utilisent la stratégie "Reporter et Envoyer" (Carry and Forward) qui consiste à conserver le paquet et à l'envoyer, ce qui augmente le délai. Au contraire, dans le mode de recouvrement proposé (voir l'algorithme de transfert en arrière), nous n'utilisons aucun processus retardé, comme décrit dans c), ce qui réduirait le délai de transfert.

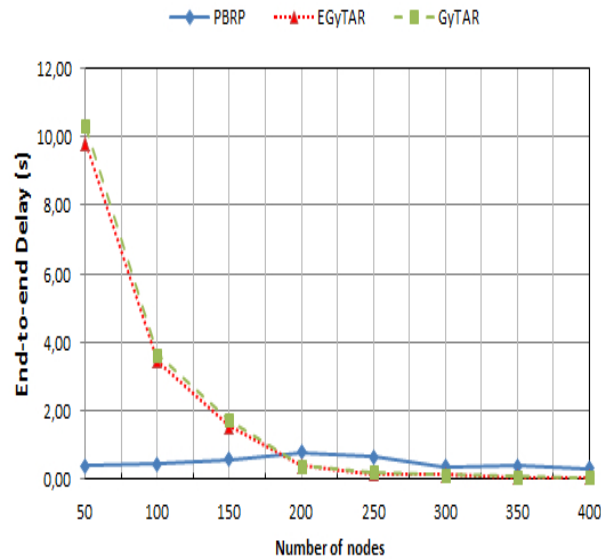


FIGURE 4.14 – Délai de bout-en-bout (PBRP)

c) Overhead du routage

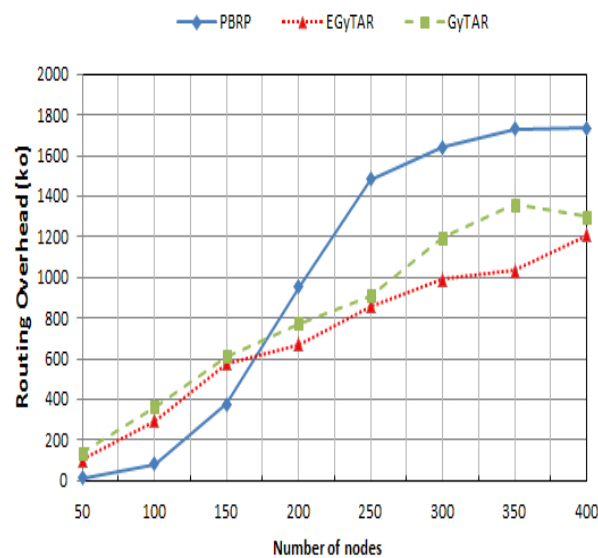


FIGURE 4.15 – Overhead de routage (PBRP)

La Figure 4.15 illustre l'overhead du routage mesurée en termes de taille totale des messages de contrôle (nous considérons la taille des paquets CDP pour GyTAR/EGyTAR et la taille des paquets RTIP pour PBRP). Comme le montre la Figure 4.15, l'overhead de tous les protocoles augmente quand la densité du réseau augmente. En effet, plus le nombre de nœuds augmente, plus le nombre de paquets de contrôle augmente. Nous observons également que, lorsque le nombre de véhicules est inférieur à 170, notre protocole a un overhead inférieur à ceux de GyTAR/EGyTAR. Cela s'explique par le fait que la densité plus faible des véhicules crée davantage d'espaces vides. Par ailleurs, étant donné que le lancement des paquets CDP dans GyTAR/EGyTAR dépend de la mobilité des véhicules, donc le nombre de paquets CDP généré augmente avec le nombre de véhicules qui quittent les routes. Au contraire, notre protocole utilise une diffusion régulière des informations sur le trafic. Toutefois, lorsque la densité du réseau dépasse 170 nœuds, l'overhead du routage de PBRP présente des valeurs plus élevées en raison des effets des paquets RTIP qui tendent à parcourir plusieurs routes en fournissant des informations sur le trafic en vu d'aider le processus de routage à transmettre davantage des paquets.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau protocole de routage géographique basé sur une diffusion distribuée des informations sur le trafic routier. Ce protocole fournit de nouvelles informations permanentes et avancées sur le trafic automobile incluses dans les paquets RTIP. Nous avons également proposé un protocole de routage partiel qui exploite les informations de trafic fournies par DRTI pour transférer les paquets de données via des chemins partiellement connectés.

Nous avons mis en œuvre et évalué le protocole proposé via des simulations en utilisant le simulateur OMNET ++. Les résultats obtenus montrent que notre contribution exploite les informations du trafic de manière efficace et offre des performances significatives en termes de taux de livraison des paquets, de délai de bout en bout et d'overhead par rapport aux protocoles GyTAR/EGyTAR, en raison de l'utilisation d'une information permanente sur le trafic routier grâce au DRTI et au mode de recouvrement.

Au cours des travaux futurs, nous avons tendance à optimiser la durée de vie du RTIP et l'algorithme d'initiation du RTIP en utilisant l'historique des les statistiques du trafic.

Deuxième partie

Les Services de localisation dans les réseaux VANETs

Etat de l'art sur les services de localisation dans les VANETs

5.1 Introduction

Par rapport aux autres réseaux mobiles ad-hoc, les réseaux VANETs présentent des défis majeurs : mobilité et vitesse élevées des véhicules, qui entraînent un changement rapide de la topologie du réseau et des emplacements rapides des véhicules. Par conséquent, les informations de localisation des véhicules sont nécessaires pour plusieurs services, telles que les services ITS et les services à valeur ajoutée, ainsi que pour les services de communication de base dans les "Vehicular Communication Networks (VCNs)". Les VCNs servent à fournir une plateforme de communication pour les services des ITS, ainsi que pour les services à valeur ajoutée de différents systèmes routiers. Les services d'informations de localisation "Location Information Services (LIS)" ou les systèmes de gestion de localisation "Location Management Systems (LMS)" sont utilisés pour fournir ces informations, de manière proactive ou réactive. Les services LIS devraient fournir des informations sur la position des véhicules, telles que leur position actuelle, leur vitesse, leur direction, et signaler ces informations à d'autres véhicules ou entités de réseau ayant besoin de ces informations.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu sur les services de localisation existants dans la littérature.

5.2 Principes de base des services de localisation

Les LIS fournissent des informations de localisation sur les véhicules, telles que la position actuelle, la vitesse, la direction, et transmettent ces informations aux entités du réseau ou aux autres véhicules équipés d'OBU¹, qui ont besoin de ces informations. Dans les systèmes de positionnement traditionnels, les informations de localisation ont généralement été prises par un dispositif et avec l'aide d'un système par satellite (c'est-à-dire un récepteur GPS), de sorte que chaque véhicule n'a que ses propres informations. Grâce aux

1. OBU : On Board Unit

LIS, ces informations peuvent être distribuées et partagées entre d'autres véhicules. Par ailleurs, la localisation des véhicules est une tâche importante dans ce monde de services de données. Elle nous permet de définir de nouveaux services tels que les applications de suivi. En outre, elle permet de rendre de nombreux services de messagerie et de services Internet plus pertinents pour les véhicules.

Dans la littérature, plusieurs LIS en VCNs ont récemment été développés, nous les classons en deux catégories : (i) LIS pour les VCNs ad hoc et (ii) LIS pour les VCNs basés sur l'infrastructure comme montre la Figure 5.1. Les LIS sont utilisés dans les réseaux sans fil ad hoc et hybrides. Dans ce que suit, nous expliquons ci-dessous leurs cas d'utilisation dans ces deux types de réseaux :

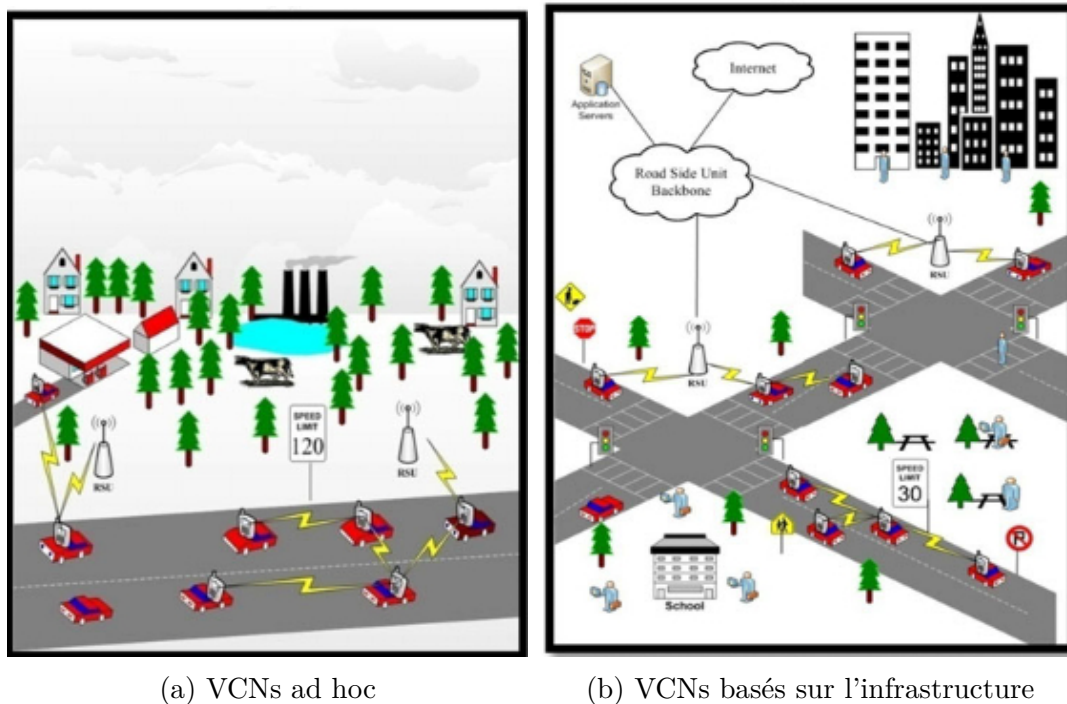


FIGURE 5.1 – LIS pour les VCNs [4]

a) **LIS pour les VCNs ad hoc**

Dans les VANETs, considérons les scénarios dans lesquels deux véhicules en mouvement équipés d'OBU échangent des informations, telles que le partage de fichiers, les messages instantanés, les jeux, etc. Les véhicules équipés par des dispositifs de communication sans fil et des cartes GPS numériques, établissent de manière dynamique des réseaux ad hoc sans aide d'une infrastructure. Les paquets de données peuvent être relayés vers des destinations situées au-delà de la portée de transmission radio par le biais d'une communication à plusieurs sauts.

Par ailleurs, en raison de leur évolutivité et de leur faible coût de communications (overhead), les protocoles de routage basés sur la position géographique sont utilisés pour transférer les paquets dans les VANETs. Ils nécessitent tous un LIS, qui les aide à convertir les identifiants de destination (adresse ou nom) en positions correspondantes [5, 118, 119].

b) LIS pour les VCNs basés sur l'infrastructure

Les LIS jouent également un rôle important dans les réseaux virtuels basés sur l'infrastructure. Il existe certaines applications et certains cas d'utilisation pour les LIS où il existe des infrastructures telles que des RSU qui communiquent avec les véhicules. Les LIS améliorent certaines applications telles que le transfert en fonction de la mobilité [120] ou le mécanisme de transfert (processus requis pour transférer la connectivité réseau d'un véhicule ou d'un RSU à un autre) [121, 122].

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le LIS devrait fournir des informations sur la position des véhicules. À cette fin, le LIS doit collecter, stocker, analyser et distribuer ces informations de localisation aux véhicules ou aux entités du réseau qui ont besoin de ces informations. Certains systèmes de positionnement, tels que le GPS, sont utilisés pour collecter les informations de position des véhicules. Lorsqu'un véhicule entre dans la zone de couverture de certaines RSUs, il envoie sa position à l'une des RSUs. Par conséquent, cette RSU envoie ces informations aux serveurs de localisation pour conserver et stocker les informations de localisation des véhicules. Nous disposons maintenant d'une grande base de données contenant des informations sur la position des véhicules et un horodatage (timestamp) pour chacune des informations générées. Nous avons donc l'occasion de les analyser et de prédire la position du véhicule suivant pour certaines applications telles que le suivi des véhicules, l'amélioration de la latence du transfert et le transfert en fonction de la mobilité.

5.3 LIS et la protection de la vie privée

La protection de la vie privée des véhicules [123–125] est un problème important. Un défi se pose lorsque nous essayons de protéger la vie privée des véhicules tout en construisant un système permettant une utilisation flexible des informations de localisation. Ensuite, le système LIS doit être en mesure de fournir des moyens pour protéger la confidentialité de la localisation du véhicule concerné. Malheureusement, observer des emplacements personnels avec un système potentiellement non fiable constitue une menace pour la vie privée des individus surveillés, car un hostile pourrait abuser des informations de localisation recueillies par le système et en déduire des informations personnelles susceptibles. Nous avons deux types de clients qui accèdent aux informations de localisation. Le premier type est représenté par les RSUs qui utilisent ces informations pour une raison quelconque, telle qu'un processus de transfert ou une transmission en fonction de la mobilité, et le second type concerne les véhicules souhaitant accéder à ces informations. Par exemple, le conducteur d'un véhicule peut décider de connaître le nombre de véhicules dans le prochain bord de la route pour mesurer la densité du trafic.

Dans les VANETs, se baser sur le LIS, certains véhicules spécifiques agissent en tant que serveur de localisation, conservent les informations de localisation des véhicules correspondants et répondent aux requêtes de localisation. Par conséquent, il est probable que certains types de véhicules qui agissent en tant que serveurs de localisation dans des réseaux ad hoc utilisent ces informations à des fins malveillantes. Mais dans les VCNs basés sur l'infrastructure, nous pouvons utiliser certains serveurs d'applications pour agir

en tant que serveurs de localisation et appliquer les approches de confidentialité précédemment mentionnées pour protéger des véhicules malveillants. De plus, la fiabilité des LIS est encore garantie lorsque l'infrastructure est appliquée aux réseaux de véhicules et que les propriétés de performance des LIS s'améliorent, mais nous devons supporter le coût de la mise en œuvre des infrastructures dans les réseaux routiers.

5.4 Critères de classification des LIS

Dans cette section, nous expliquons les critères utilisés pour classer les LIS dans les VCNs. Notre classification repose sur trois critères principaux : la structure du serveur de localisation, la structure du réseau et les modèles d'échange de messages. Ces critères sont par conséquent divisés en sous-composants qui distinguent les LIS dans les VCNs.

5.4.1 Structure des serveurs de localisation

Le premier critère est la structure des serveurs de localisation qui peuvent être divisés en des serveurs distribués et des serveurs centralisés. Dans le cas distribué, les serveurs de localisation sont répartis dans l'ensemble du réseau et chaque serveur de localisation conserve une partie de toutes les informations sur les véhicules. Il existe deux types de structure de données pour les serveurs de localisation distribués : à base hiérarchique et à base de hachage. Pour une structure de données basée sur une hiérarchie, la zone du réseau est divisée de manière récursive en une hiérarchie de petites grilles (carrés), et pour chaque véhicule, un ou plusieurs serveurs de localisation dans des grilles à chaque niveau de la hiérarchie sont choisis pour gérer et stocker les informations de localisation des véhicules. Mais dans la structure de données à base de hachage, les serveurs de localisation sont choisis via une fonction de hachage, qui associe chaque véhicule à une zone rectangulaire ou circulaire appelée région d'origine, région virtuelle ou agent local. Chaque véhicule envoie ses informations de position aux serveurs de localisation respectifs dans la région d'origine.

Dans les VCNs, des véhicules spécifiques ou une infrastructure distincte peuvent servir comme serveurs de localisation. Dans les protocoles de routage géographique, des véhicules spécifiques agissent en tant que serveurs de localisation, mais dans les VCNs basés sur une infrastructure, il existe une solution permettant d'utiliser des serveurs d'application c'est-à-dire des serveurs de localisation connectés au réseau de base au bord de la route pour conserver les informations de localisation des véhicules. Par ailleurs, un autre type de structure de serveurs de localisation est centralisé, de sorte qu'il existe un serveur de localisation central qui conserve toutes les informations des véhicules dans le système mais qui n'est pas praticable dans les réseaux de véhicules en raison de la grande taille des réseaux routiers.

5.4.2 Structure du réseau

Le deuxième critère est la structure du réseau qui représente les types de communication dans un réseau de véhicules et se divise en trois catégories : infrastructure, ad hoc et hybride. Certains équipements d'infrastructure fixes, tels que les RSUs, permettent aux véhicules de communiquer avec elles, mais dans les réseaux ad hoc, il n'existe aucune

infrastructure préexistante. Dans de tels réseaux, chaque véhicule fonctionne non seulement en tant qu'hôte, mais également en tant que routeur et les véhicules participent au routage en transférant des paquets de données pour d'autres véhicules. La combinaison d'une infrastructure et d'une structure ad hoc constitue une structure hybride.

Le principal inconvénient des structures ad hoc pour les LISs est leur évolutivité limitée dans des réseaux de véhicules très denses avec un grand nombre de demandes de service. Les LIS ad hoc sont entièrement distribuées et ne reposent sur aucune infrastructure.

Bien que la propagation des messages de demande et de réponse soit contrôlée dans ces structures, le nombre de messages échangés dans ces structures devient très élevé dans les réseaux larges et denses avec un grand nombre de demandes de service. L'augmentation du nombre de messages échangés conduit à une utilisation inefficace de la bande passante, ce qui pourrait affecter le taux de réception avec succès et le temps de réponse de ces structures. Nous pensons qu'un système LIS reposant sur une infrastructure conçue efficacement peut améliorer les performances d'un service dans des réseaux de véhicules à grande échelle.

5.4.3 Modèles d'échange de messages

Le troisième critère représente le modèle d'échange de messages dans les LIS, qui est divisé en trois catégories : basée sur la diffusion, basée sur les événements, et périodique. Dans le concept d'échange de messages basé sur la diffusion, les véhicules surveillent en permanence un processus de diffusion à partir du système LIS et récupèrent les données dont ils ont besoin sans faire de demande explicite. Le concept d'échange de messages basé sur des événements et périodique peut être défini par les facteurs qui causent le déclenchement d'un événement de mise à jour. Dans le cas de mise à jour périodique, un véhicule envoie périodiquement son message de mise à jour de position au serveur de localisation correspondant. Mais dans le concept d'échange basé sur les événements, chaque véhicule envoie un paquet de mise à jour pour certaines raisons, par exemple lorsqu'il tourne à gauche ou à droite ou à chaque fois qu'il parcourt une distance déterminée. Certaines solutions sont étudiées à partir de la littérature et nous les décrirons dans la section suivante.

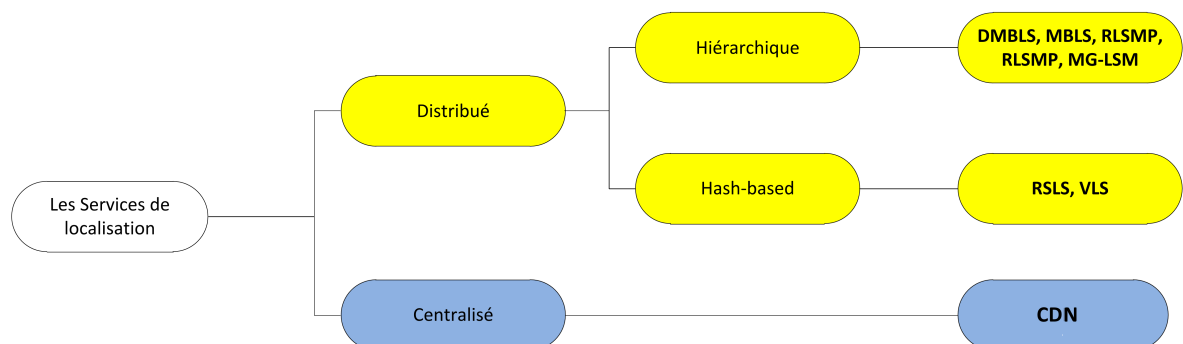


FIGURE 5.2 – Taxonomie des services de localisation

5.5 Services de localisation pour les VCNs ad hoc

Lorsque deux véhicules échangent des informations dans un réseau ad hoc tel que les VANETs, des algorithmes de routage basés sur la position sont utilisés pour le routage des données, et dans ces algorithmes, le véhicule source doit d'abord obtenir la position géographique du véhicule de destination avant le début de la communication. Cette tâche est effectuée par les LIS dans les VANETs, qui aident les véhicules à convertir les identifiants (adresse ou nom) des véhicules de destination en positions correspondantes. En règle générale, les LIS pour les VCNs ad hoc sont chargés de collecter les mises à jour de position des véhicules et de traiter les demandes de position émises par des véhicules qui doivent découvrir d'autres véhicules de destination. Dans cette section, nous présentons huit solutions pour les LIS dans les VANETs.

5.5.1 Service de localisation basé sur la densité (DMBLS)

Le service de localisation "Density aware Map-Based Location Service (DMBLS)" [5] utilise les cartes numériques des routes et les informations de densité du trafic pour déterminer une hiérarchie à trois niveaux des serveurs de localisation. DMBLS est également un LIS distribué sans infrastructure et conçu pour les VANETs en milieu urbain. Il suppose que chaque véhicule connaît sa propre position géographique grâce à l'utilisation du GPS. En outre, il considère que les véhicules sont équipés de cartes numériques pour obtenir plus d'informations sur les routes, la topologie et les routes sur lesquelles ils se déplacent. Dans DMBLS, les serveurs sont des véhicules situés à proximité de certaines intersections à forte densité de trafic. En outre, DMBLS est également déployé de manière similaire à "Map-Based Location Service for VANETs (MBLS)" [6].

La zone géographique représentant une ville donnée est partitionnée en une hiérarchie de régions. La région du niveau le plus élevé (le niveau 3 : L_3), couvre l'ensemble de la région. Elle est ensuite divisée en quatre régions de niveau 2 (L_2), qui sont ensuite divisées en régions de niveau 1 (L_1). En utilisant cette stratégie de partitionnement, le serveur de localisation L_1 stocke les nouvelles coordonnées géographiques des véhicules en fonction de la zone de bas niveau tandis que les serveurs de localisation L_2 et L_3 conservent les informations sur tous les véhicules appartenant respectivement aux zones qu'ils doivent exploiter.

Les systèmes DMBLS définissent un ensemble de cellules de localisation "Location Cell (LC)" centrées sur les points de passage présentant une densité de trafic élevée à différents niveaux de la hiérarchie. Les points de passage sont des sommets où les routes se croisent, indiqués par des coordonnées géographiques avec un ID unique. Chaque véhicule envoie une mise à jour de sa position à chaque fois qu'il franchit un nouveau point de passage et part d'un segment de route à un autre. La Figure 5.3 illustre un exemple de la façon dont un véhicule source trouve la position d'un autre véhicule se trouvant à longue portée via la hiérarchie des serveurs de localisation.

Lorsqu'un véhicule source "S" doit communiquer avec un véhicule "D" se trouvant hors de son rayon de transmission, il lance une requête de localisation pour obtenir sa position. La requête comprend l'identifiant de la source, sa position et l'identifiant de la destina-

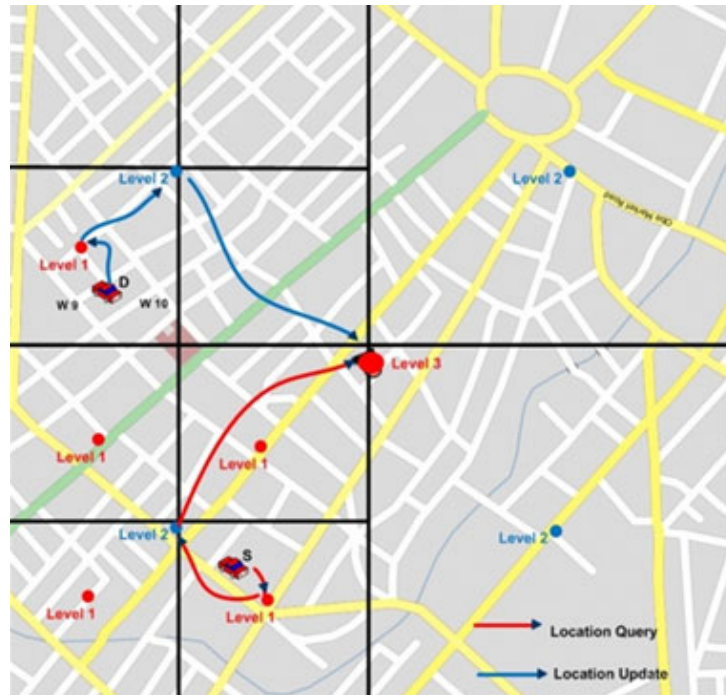


FIGURE 5.3 – Les requêtes et les mises à jour de localisation dans DMBLS [5]

tion recherchée. Tout véhicule disponible dans la cellule qui prend la requête et qui a les informations de localisation dans sa mémoire cache transmet une réponse au véhicule demandeur. Un exemple de ce processus est représenté par la Figure 5.3 où le véhicule "S" veut trouver les informations de localisation du véhicule de destination "D". Le véhicule "S" envoie une requête à son serveur de localisation correspondant dans la zone du niveau 1 qui est placée au point de passage w_1 . Tout véhicule plus proche de ce point de passage, lorsqu'il obtient la requête, il recherche les informations de localisation de "D" dans sa base de données. Cependant, le véhicule "D" étant situé dans une zone de niveau 2 différente, la requête est envoyée au niveau supérieur suivant, puis au niveau le plus élevé. Une fois que le serveur de localisation situé au niveau 3 a reçu la requête, il recherche l'identifiant de "D" et découvre que "D" est placé dans la zone de niveau le plus bas et qu'il se déplace entre les points de passage w_9 et w_{10} . Un paquet de réponse comprenant la position géographique de la destination et sa vitesse est renvoyé au véhicule source. Une fois que le véhicule source "S" a capturé la réponse, il calcule la position actuelle du véhicule "D" et conserve les informations de localisation pendant une période égale au temps approximatif mis par le véhicule de destination pour franchir le prochain point de passage.

DMBLS est une bonne solution pour les communications locales car les requêtes de recherche parcourent peu de sauts pour atteindre un serveur de localisation favorable. Néanmoins si les distances entre les points de passage sont longues, les véhicules n'envoient pas de mise à jour de localisation pendant une longue période, ce qui entraîne une dégradation de la précision de localisation et du taux de réception avec succès des requêtes.

5.5.2 Service de localisation MBLS

Le serveur de localisation "MBLS" [6] utilise les cartes numériques de la topologie géographique pour définir une hiérarchie à trois niveaux de serveurs de localisation. MBLS est également un LIS distribué sans infrastructure et conçu pour les VANETs de sorte que toute la zone géographique soit partitionnée en une hiérarchie de carrés dans lesquels un point de passage est sélectionné dans chaque carré pour être la position du serveur de localisation. Le carré de niveau le plus élevé (niveau 3) couvre l'ensemble de la zone. Il est également divisé en quatre carrés de niveau 2, qui sont ensuite divisés en carrés de niveau 1. MBLS utilise une fonction de hachage prédéfinie pour mapper chaque identifiant du véhicule à un point de passage correspondant à chaque niveau de la hiérarchie. Ensuite, le véhicule le plus proche du point de passage sélectionné agira en tant que serveur de localisation et conservera les informations de localisation.

Les serveurs de localisation d'un véhicule spécifique échangent des informations dans le sens du niveau 1 au niveau 3 pour synchroniser leur base de données. Cet échange est envoyé en unicast. Par ailleurs, la division de la zone en une formation hiérarchique aide à placer le serveur de localisation de manière distribuée. Le service de localisation MBLS implique le système de navigation en utilisant le fichier de données géographiques "Geographical Data File (GDF)" de la base de données des cartes numériques pour obtenir des points de passage afin de choisir le serveur de localisation en mappant l'ID du véhicule avec le point de passage et en envoyant une mise à jour de la position lors du transit. Les véhicules utilisent également le système de navigation pour spécifier le chemin d'accès à la position de la destination. Les mises à jour de localisation transmises aux serveurs de localisation doivent être modérées entre la charge du réseau et la précision des informations.

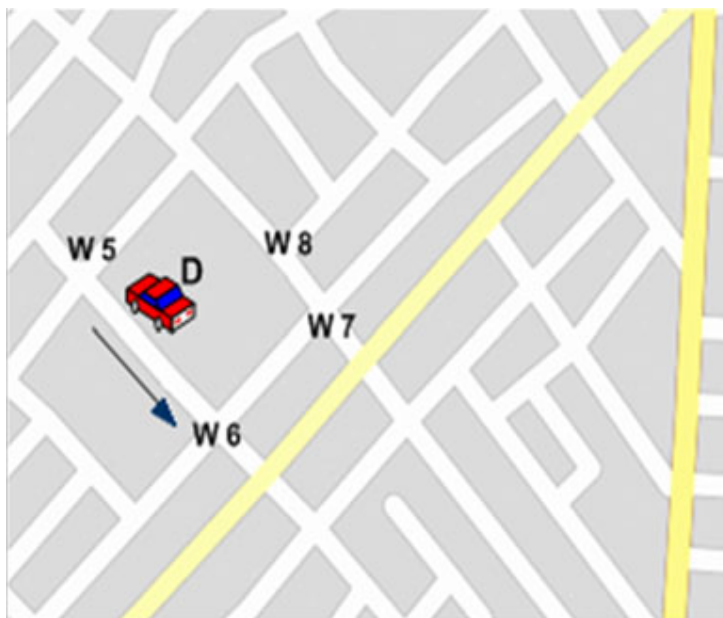


FIGURE 5.4 – Mise à jour et distribution des points de passage dans MBLS [6]

Pour ce faire, MBLS exploite une stratégie utilisant un système de navigation cartographique. MBLS utilise le GDF de la base de données de cartes numériques du système

de navigation pour obtenir le chemin géographique indiqué par une séquence de points de passage à suivre par le véhicule pour atteindre sa destination.

Les mises à jour de positions ne sont transmises que lorsque le véhicule passe par un point de passage, où il se déplace vers un nouveau segment. Par conséquent, les informations de localisation sont représentées par $RECORD(W_i, W_j, S, D, T_s)$, où W_i, W_j sont les identifiants des points de passage entre lesquels le véhicule se déplace, S est la vitesse (m/s) et D est la direction dans laquelle le véhicule est en mouvement et finalement T_s indique le ou les horodatages (timestamp) lors de l'envoi de la mise à jour.

Pour clarifier le processus de mise à jour dans MBLs, la Figure 5.4 montre un véhicule "D" qui se déplace entre les points de passage W_5 et W_6 dans la direction de W_7 à une vitesse égale à 50 m/s. Le véhicule "D" transmet une mise à jour de $RECORD(W_5, W_6, 50, W_7, 60.7)$ à son serveur de localisation au niveau 1 lorsqu'il a dépassé W_5 à l'heure 60,7 secondes. Donc, le véhicule "D" transmettra la prochaine mise à jour uniquement quand il passera au prochain point de passage (c'est-à-dire W_6), où il changera le segment. Après l'obtention d'un message de mise à jour par le serveur de localisation du niveau 1, il transmet ensuite l'enregistrement au prochain serveur de localisation existant dans le carré de niveau 2. Le serveur de localisation de niveau 2 suit le même processus afin que le serveur de localisation présent dans la case de niveau 3 soit mis à jour.

La distribution hiérarchique des serveurs de localisation aide à améliorer le taux de réception avec succès des requêtes, mais la sélection aléatoire des points de passage ne garantit pas la présence de véhicules permettant de conserver les informations de localisation et ne garantit pas la proximité des serveurs de localisation dans la hiérarchie, ce qui augmente les délais de mise à jour.

5.5.3 Service de localisation RSLs

Le serveur de localisation "Responsible Sections Location Service (RSLs)" [119] utilise les cartes numériques des rues pour définir une structure de données distribuée avec un hachage de serveurs de localisation. RSLs est également un LIS sans infrastructure conçu pour les VANETs basé sur des sections responsables (RS : Responsible Section). La section responsable RS est une petite région circulaire qui est un carrefour ou un arrêt de bus dans la ville. Dans de telles zones, les véhicules se dévalent toujours à basse vitesse ou sont arrêtés, la possibilité qu'aucun véhicule se ne trouve dans une RS est quasiment très petite. RSLs choisit les véhicules placés dans une RS pour agir en tant que serveurs de localisation afin de maintenir les positions des véhicules et de répondre aux requêtes de recherche de position.

Avec l'algorithme distribué de sélection RS basé sur le hachage, les RS associées d'un véhicule peuvent être spécifiées par certaines opérations arithmétiques. En outre, RSLs considère que chaque véhicule peut obtenir sa dernière position via le récepteur GPS et disposer d'informations sur les positions et les noms de toutes les RS via des cartes numériques. Un véhicule sert de serveur de localisation uniquement s'il est placé dans une RS. L'action de mise à jour de localisation est effectuée par le véhicule lorsqu'il a dépassé un seuil "d" ou une durée constante "T (20 secondes)" qui s'est écoulée depuis la dernière

mise à jour.

Lorsqu'un véhicule commence à mettre à jour sa position, il produit des paquets contenant sa position actuelle et les transmet aux régions de toutes ses RS associées. Lorsqu'il obtient un paquet de mise à jour de position, le véhicule résidant dans la RS correspondante du véhicule de mise à jour, met à jour l'enregistrement déterminé de sa table de positions. Le véhicule médiateur stocke également la dernière position du véhicule mise à jour pendant une courte période après l'envoi du paquet de mise à jour de position.

Lorsque le véhicule "S" souhaite communiquer avec le véhicule "D", "S" doit déterminer la position de la destination en envoyant une requête aux serveurs de localisation de "D". Tout d'abord, "S" détermine l'ensemble des RS de "D", puis il choisit la section responsable W la plus proche de l'ensemble. Le véhicule "S" transmet la requête de demande de position de "D" aux véhicules se plaçant dans W . Une fois que le serveur de localisation dans W obtient la requête de demande de position, il renvoie la position de "D" à "S". Deux autres types de véhicules peuvent également répondre à la requête : le véhicule "D" lui-même et les véhicules qui connaissent la position de "D". Si le véhicule demandeur ne reçoit pas la réponse des serveurs de localisation pendant la période d'attente, il tente de transférer la requête de localisation à la RS suivante.

Le processus de mise à jour de la localisation dans RSLs selon lequel un véhicule envoie les informations de localisation à toutes ses RS associées, améliore le taux de réception avec succès des requêtes, mais ce mécanisme souffre de la surcharge des paquets de contrôle MBLs car de nombreux paquets de mise à jour sont générés à chaque fois qu'un véhicule met à jour ses serveurs de localisation.

5.5.4 Service de localisation VLS

Dans le système de localisation "Vehicle Location Service (VLS)" [118], le réseau est partitionné en petites régions dans le but des cartes numériques des serveurs de localisation distribués sont construites. VLS est un système LIS sans infrastructure ni hachage conçu pour les VANETs et utilisé dans les environnements métropolitains. Il évite de choisir des serveurs dans des régions vides et utilise des arborescences de transfert et des stratégies de mise à jour adaptatives pour réduire les coûts de mise à jour de position.

Un ensemble de rues urbaines est également sélectionné, où chaque rue étant divisée en un segment de route de petite taille qui forme un groupe et le véhicule le plus proche du centre d'un segment ou le véhicule le plus lent de ce segment est supposé être le chef du groupe qui peut servir comme serveur de localisation pour une durée donnée. En outre, dans VLS, toute la ville est supposée rectangulaire et la zone est divisée en $M \times N$ petites régions, chaque véhicule ayant un serveur de localisation correspondant dans chaque région. Tous les véhicules utilisent le même algorithme pour sélectionner les serveurs de localisation et peuvent obtenir la liste de tous les véhicules de localisation en fonction de leurs ID. Ils montrent qu'avec l'augmentation du nombre de régions, segmentées par $M \times N$, le coût de mise à jour de position augmentera car le nombre de serveurs de localisation requis pour la mise à jour sera réduit, tandis que le délai de demande de position sera réduit car la découverte de position peut être traitée par le serveur de localisation le

plus proche.

La division du réseau en certaines régions et l'instauration d'un serveur de localisation dans chaque région améliorent la fiabilité de ce protocole car tous ces serveurs distribués possèdent des informations de localisation sur un véhicule, mais de l'autre côté, ce mécanisme souffre d'une surcharge de paquets de contrôle redondants se propageant dans le réseau.

5.5.5 Service de localisation RLSMP

Le serveur de localisation "Region-based Location-Service-Management Protocol (RLSMP)" [7] est un LIS hiérarchisé, sans infrastructure, qui tente d'être évolutif en utilisant l'agrégation des messages dans la mise à jour de position et de demande de position, et pouvant être utilisé dans les applications VANETs.

Dans RLSMP, la zone du réseau est divisée en clusters et chaque cluster est constitué de cellules. Chaque cellule dispose d'un véhicule spécifique appelé chef de la cellule (CL), chargé de collecter les informations de position de tous les véhicules de la cellule. Les véhicules placés physiquement dans la cellule centrale d'un groupe sont responsables de la gestion des informations de localisation actuelles de tous les véhicules appartenant à ce groupe. Cette cellule centrale est appelée cellule de service de localisation (LSC). Ainsi, les informations de position sont conservées localement dans un cluster. Le CL rassemble les informations de localisation de tous les véhicules de sa cellule et envoie le message de contrôle recueilli au LSC de son cluster. Chaque CL conserve des informations détaillées sur les véhicules qu'il gère. Ces informations comprennent l'identifiant du véhicule, les coordonnées de l'emplacement du véhicule, l'heure de la dernière mise à jour, ainsi que la vitesse et la direction du mouvement du véhicule. Ensuite, un message de localisation collecté est envoyé au LSC contenant les informations résumées sur les véhicules dans la cellule.

La Figure 5.5 montre une grille de 4 clusters, de sorte que chaque cluster soit constitué de 25 cellules. Les LSC sont spécifiés avec des lignes de grille. La mise à jour est effectuée à chaque fois que le véhicule parcourt une distance D de sa position actuelle où D correspond à la portée de transmission du véhicule. Tous les véhicules situés dans la cellule centrale recevront alors ces messages et peuvent agir en tant que CL. En raison de la propriété de localisation des VANETs, les serveurs de localisation sont déterminés sur la base des modèles locaux de trafic. Par ailleurs, RLSMP utilise une forme en spirale pour les requêtes de localisation lorsque la destination et le véhicule source ne se trouvent pas dans le même cluster. Puis, il explore le voisinage du véhicule source en commençant dans les clusters entourant le cluster local du véhicule source jusqu'à ce qu'il découvre des informations sur la position de la destination.

RLSMP possède une fonctionnalité de localisation, ce qui signifie qu'il est capable de prendre en charge les modèles de trafic local au sein du réseau, en augmentant ainsi le taux de réception avec succès des requêtes pour les requêtes locales. Les CL agrègent et transmettent les messages d'information de localisation en spirale jusqu'à atteindre les LSC correspondants. De plus, les LSC acheminent les paquets de données en fonction de

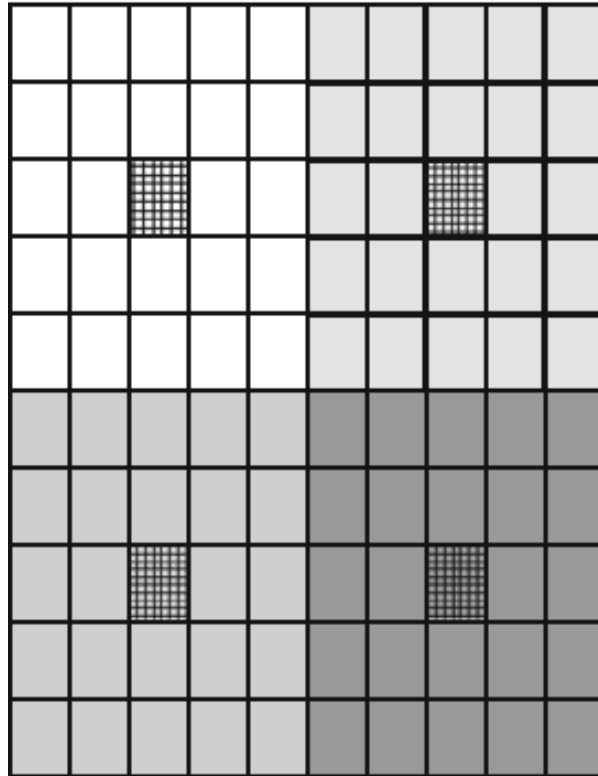


FIGURE 5.5 – Clusters et cellules dans RLSMP [7]

ces messages, mais ces informations de localisation peuvent être potentiellement obsolètes en raison du mécanisme d'agrégation mentionné. Par conséquent, en raison de véhicules de destination inaccessibles, les pertes de paquets augmentent dans le réseau.

5.5.6 Service de localisation MRLSMP

Le service de localisation "Modified Region-based Location-Service-Management Protocol (MRLSMP)" [8] est un LIS distribué hiérarchique qui intègre les communications V2V et V2I et utilise la localisation des véhicules comme critère pour la construction de groupes géographiques. En d'autres termes, chaque véhicule spécifie automatiquement son groupe géographique lorsqu'il voyage en mappant sa position fournie par GPS en coordonnées dans le réseau. La construction des groupes et des cellules est identique à celle de RLSMP (voir Figure 5.5).

MRLSMP utilise les RSUs en tant que serveurs de localisation. La cellule centrale de chaque groupe est la position possible pour une RSU qui est chargée de conserver la position actuelle de tous les véhicules de ce groupe et de répondre aux requêtes concernant les informations sur la position des véhicules. En outre, dans MRLSMP, la mise à jour de la localisation comprend deux termes. Le premier terme concerne les messages transmis par les véhicules au chef de la cellule (CL) chargé de collecter les informations de localisation de tous les véhicules de la cellule afin de mettre à jour leurs positions. Le second terme est lié aux mises à jour envoyées par les CLs à la RSU locale afin de mettre à jour les informations de localisation des véhicules qui se trouvent dans ce groupe. Les mises à jour

de position et les messages d'interrogation sont rassemblés à l'aide d'une arborescence. Ces informations de position agrégées sont envoyées au RSU en tant que racine. MRLSMP définit deux types d'interrogation : Requête locale et Requête globale. La requête locale indique que les véhicules source et cible sont enregistrés dans le même groupe et que cette requête reçoit une réponse de la RSU locale. La requête globale indique que la destination ne se trouve pas dans le cluster local où réside le véhicule source. Dans les requêtes globales, les messages contenant des requêtes ne sont pas envoyés directement. Au lieu de cela, les messages sont différés pour une durée prédéterminée. Cette durée est nécessaire pour regrouper les requêtes qui sont transmises par les véhicules situés dans ce même groupe. Les requêtes collectées sont envoyées via les différentes RSUs, comme indiqué à la Figure 5.6. Les messages de requête collectés sont envoyés en spirale autour de la RSU locale, où cette spirale rencontre toutes les RSUs environnantes jusqu'à ce qu'elle découvre des informations sur les positions des destinations. Les différentes RSUs utiliseront les informations stockées dans leurs propres tableaux pour trouver les identifiants des destinations demandées.

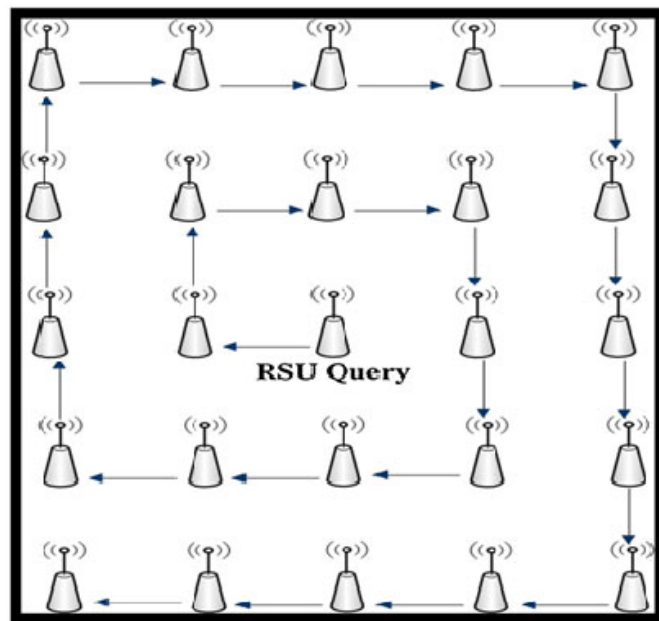


FIGURE 5.6 – Récupération des informations de localisation dans MRLSMP [8]

L'utilisation des RSUs dans MRLSMP comme serveurs de localisation au lieu des véhicules dans RLSMP, permet d'augmenter la fiabilité de ce LIS et d'éliminer l'overhead de transfert LSC de RLSMP, car lorsqu'un véhicule est sur le point de quitter la cellule centrale d'un cluster dans RLSMP, il devra choisir un autre véhicule pour envoyer toutes les informations de localisation de ce cluster au véhicule choisi, mais ce type de surcharge ne se produit pas dans MRLSMP. D'autre part, si un véhicule passe d'une cellule à une autre au milieu d'un intervalle de mise à jour d'une RSU, le service de demande de localisation ne pourra pas donner de réponse appropriée à la requête recherchant ce véhicule.

5.5.7 Service de localisation MG-LSM

"Mobile Group-based Location Service Management (MG-LSM)" [126] est un système LIS hiérarchisé qui permet aux véhicules circulant dans le même sens de s'organiser d'une manière dynamique en un groupe et que le véhicule placé au centre du groupe, devient le chef du groupe (GL). Dans MG-LSM, le réseau est divisé en régions et chaque région est dotée d'un serveur de localisation fixe, appelé la tête de la région (RH : Region Head). Le GL recueille et enregistre les informations de localisation exactes des véhicules de son groupe et met à jour les RH sur les modifications apportées à l'appartenance au groupe à chaque fois qu'elles se produisent. Le RH conserve les informations rapportées par les GL qui sont placées dans sa région et répond aux requêtes de demande de position des véhicules membres de ces GL. Le GL de chaque groupe diffuse périodiquement son status comme GL pour demander aux véhicules non membres de rejoindre son groupe.

Les véhicules peuvent consulter les GLs disponibles dans leur voisinage grâce aux messages de demande d'adhésion envoyés par les GLs. Pour les véhicules membres du groupe correspondant, le message d'annonce du GL est appliqué pour certifier l'existence du GL et tant que les véhicules restent dans le groupe, ils envoient périodiquement un message de mise à jour de localisation au GL. Si un véhicule membre ne reçoit pas l'annonce de son GL actuel un certain nombre de fois, il se rend compte que le groupe n'est plus disponible et tente éventuellement de rejoindre un autre groupe de son voisinage. S'il ne peut pas en trouver un, il commence à construire un nouveau groupe. Par conséquent, l'overhead de gestion des positions dans MG-LSM est réduit de cette manière. D'autre part, comme les changements d'appartenance ont tendance à se produire simultanément aux feux de signalisation des intersections, la charge du réseau augmente dans les intersections, ce qui entraîne par la suite de fortes collisions de paquets dans le réseau.

5.5.8 Service de localisation ILS

Le service de localisation "Intersection Location Service (ILS)" [127] est un LIS distribué avec une structure de données basée sur le hachage, de sorte qu'il dispose de méthodes tolérantes aux pannes pour les VANETs. L'intersection des rues correspond à la position des serveurs de localisation. Le serveur de localisation pour une intersection donnée est l'un des véhicules qui se trouve à proximité de l'intersection et est variable dans le temps lorsque les véhicules se déplacent. Chaque véhicule est haché pour être associé à un serveur de localisation et les véhicules mettront à jour leur propre position sur leur serveur de localisation lorsque leur position passe au-dessus du seuil. Dans ILS, les intersections des rues couvertes par le réseau sont numérotées de 0 à N. Chaque véhicule est dédié à un serveur de localisation unique en hachant son identifiant unique en un identifiant d'intersection. En raison de la nature hautement dynamique des VANETs, il est probable que certaines intersections soient vacantes pendant certaines durées. Lorsque des requêtes de localisation envoyées à des intersections temporairement vacantes entraînent des échecs, l'algorithme Chord [128, 129] est appliqué pour le recouvrement de cet échec. Une fois qu'un serveur de localisation est spécifié pour une requête donnée, la requête émise par un véhicule sera acheminée vers le serveur de localisation cible. Le recouvrement de l'erreur appliquée aux requêtes de demande de position infructueuses améliore le taux de réussite des requêtes dans ILS. D'autre part, la densité des véhicules dans les intersections des rues est relativement élevée et l'implication de serveurs de localisation à

chaque intersection engendre une charge réseau accrue. Par conséquent, plus de collisions de paquets dans ces zones se produisent, en particulier lorsque le nombre d'intersections pour une taille de réseau fixe augmente considérablement.

5.6 Services localisation pour les VCNs basés sur l'infrastructure

Dans cette section, nous présentons trois LISs qui sont utilisés dans les VCNs basés sur l'infrastructure.

5.6.1 Service de localisation HLSRG

"Hierarchical Location Service with Road-adapted Grids (HLSRG)" [130] utilise des cartes numériques des rues pour définir des serveurs de localisation distribués hiérarchiques avec une structure de réseau hybride et diviser le réseau en régions à trois niveaux hiérarchiques. Les informations de localisation sont conservées dans les différentes régions de ces niveaux. HLSRG collecte les paquets localement et divise la zone en une partition de grille adaptée à la route. Dans une partition de région générale, le réseau est divisé en régions de longitude et de latitude. En conséquence, les limites des régions peuvent traverser des obstacles tels que les bâtiments et les arbres. Par conséquent, le taux de réussite de la transmission des paquets peut être réduit.

L'idée de base de la démarche de partitionnement par grille adaptée à la route est de choisir l'artère principale pour diviser la zone du réseau en régions, de sorte que les limites de chaque région soient des routes. Dans chaque région de niveau 1, HLSRG sélectionne l'intersection la plus proche du centre de la région pour qu'elle soit le centre de la région de niveau 1. Les centres des régions sont importants car les véhicules se trouvant aux centres des régions doivent collecter les paquets de mise à jour de la localisation dans leur région et les transférer au niveau supérieur correspondant. HLSRG établit des RSUs pour conserver les informations de localisation du niveau supérieur. Les RSUs peuvent faciliter la transmission des données dans les régions du niveau 2 et 3 et les véhicules se déplaçant dans le centre d'une région de niveau 1 peuvent conserver les paquets de mise à jour de la position transmis à partir d'autres véhicules de ce niveau.

La méthode de partitionnement par grille adaptée à la route peut réduire de nombreux paquets de contrôle (overhead) en empêchant la plupart des véhicules d'envoyer fréquemment des paquets de mise à jour des informations de localisation. De même, les RSUs ont été également configuré en tant que serveurs de localisation pour les niveaux hiérarchiques supérieurs, ce qui rend leur approche plus stable dans une zone étendue. D'autre part, l'utilisation des RSUs dans HLSRG, qui sont connectées entre elles par câble, augmente le coût de déploiement de ce LIS.

5.6.2 Système de gestion de localisation MMDD

Dans [9], les auteurs proposent un système de gestion de la mobilité pour une transmission efficace des données dans les VANETs appelé "Mobility Management for efficient Data Delivery (MMDD)". Il s'agit d'un système LMS² distribué et hybride, doté d'une structure d'échange de messages périodiques, basée sur les événements, qui permet d'améliorer la transmission des données entre les infrastructures et les véhicules dans les systèmes V2I grâce à la communication multi-sauts. La communication entre les véhicules et les infrastructures dans MMDD comprend quatre processus de base : annonce de service, enregistrement, mise à jour de la localisation et livraison des données, comme indiqué sur la Figure 5.7 (b). L'annonce de service permet aux stations de base de diffuser leurs informations dans leur zone de service en diffusant périodiquement des beacons dans leur zone de communication.

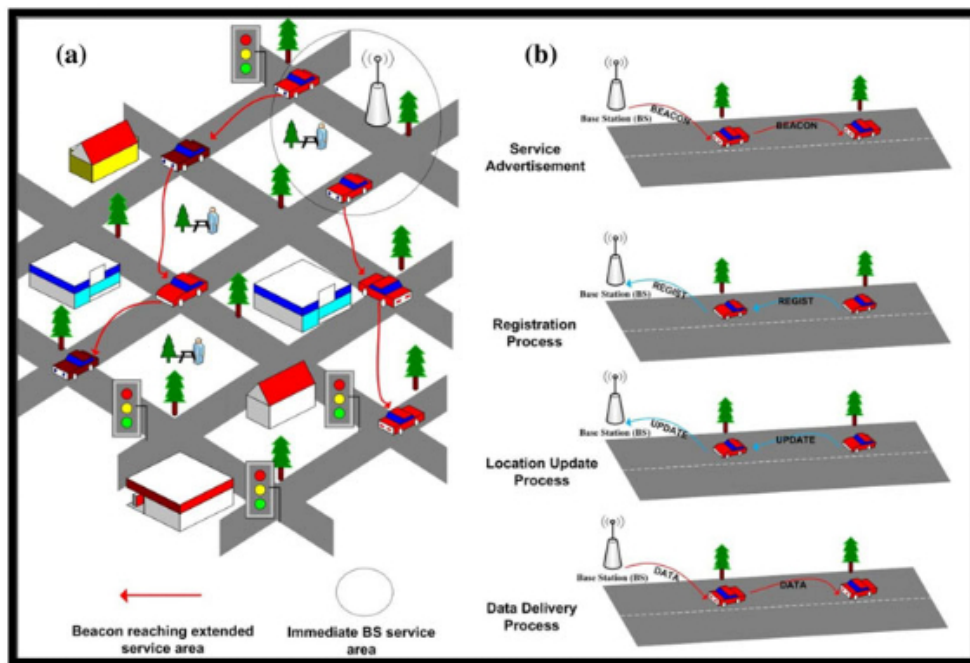


FIGURE 5.7 – Architecture du LMS (MMDD) [9]

Par conséquent, les véhicules peuvent ensemble avoir accès à de nombreuses stations de base et ils spécifient la meilleure station disponible en terme de délai d'accès pour recevoir certains services tels qu'Internet via le processus d'enregistrement. En outre, les véhicules mettent à jour la station de base enregistrée avec leurs informations de position dans le processus de mise à jour de position. De même, dans le système de localisation proposé, les auteurs ont étudié deux systèmes de mise à jour de la localisation des véhicules : basé sur le temps (time-based) et basé sur la distance (distance-based). Les informations de localisation disponibles aux stations de base sont finalement utilisées pour la livraison des paquets de données. En outre, dans ce système proposé, les stations de base sont des passerelles Internet installées à des emplacements fixes le long de la route et peuvent communiquer entre elles via des connexions filaires. Les véhicules circulant sur le réseau

2. LMS : Location Management System

sont équipés de dispositifs sans fil (par exemple, des OBU) pour communiquer entre eux et avec les stations de base. Les véhicules sont également équipés d'un GPS qui les aide à spécifier leurs informations de localisation. la Figure 5.7 (a) illustre l'architecture du système de gestion de la localisation MMDD.

Toutes les communications, telles que les processus d'enregistrement et de mise à jour des véhicules aux infrastructures routières, sont effectuées par le protocole PROMPT [131] qui permet de minimiser le délai de transmission des paquets dans ce LIS proposé. Cependant, utiliser des stations de base connectées entre elles dans le système MMDD augmente le coût de déploiement de ce système de gestion de localisation.

5.6.3 LIS hiérarchisé de fourniture de contenu (CDN)

Dans [10], les auteurs conçoivent un LIS hiérarchisé distribué basé sur l'infrastructure et proposent une architecture hiérarchique du réseau de fourniture de contenu (CDN³) pour fournir des spécifications de dimensionnement de réseau pour la fourniture de contenu ITS. Ils supposent que le contenu ITS peut être classé, en trois catégories : (i) informations sur le trafic telles que les congestions et les niveaux de vitesse ; (ii) messages d'avertissement et de sécurité ; et (iii) informations au bord des routes.

L'architecture proposée utilise les mécanismes d'orientation de service pour répondre aux demandes des réseaux de véhicules. Cette architecture forme également des services basés sur la pertinence de la position du véhicule et permet de conserver les informations à proximité des zones concernées. Dans ce LIS, les auteurs ont défini les algorithmes et la structure des messages utilisés dans l'architecture pour gérer les services de contenu et les transmettre aux véhicules. Ces algorithmes consistent en l'ajout de services de contenu, la mise à jour, la suppression, la découverte et la maintenance sur les différentes infrastructures.

Dans ce travail, les auteurs se sont focalisés sur la conception d'un système qui améliore les besoins suivants : passage à l'échelle, fiabilité, gestion de la mobilité, recherche géolocalisée et géo-casting. Dans leur approche, les véhicules sont en mesure de rechercher tout le contenu disponible correspondant à un domaine d'intérêt. En outre, le système proposé doit pouvoir transmettre le contenu déterminé à tous les véhicules d'une zone spécifique. L'architecture de CDN est illustrée par la Figure 5.6.

La zone géographique du réseau routier est divisée en groupes et en cellules hexagonales distincts. Dans chacune des zones, une RSU avec une capacité de stockage fonctionne (niveau de hiérarchie 0) et met en cache une partie du contenu ITS. Il existe aussi un type particulier de RSUs, appelé passerelle (représente le niveau 1 de la hiérarchie) permettant une intégration avec Internet. Au niveau hiérarchique supérieur, certaines zones géographiques sont regroupées en domaines géographiques. Chaque domaine géographique est exploité par un gestionnaire de domaine (niveau de hiérarchie 2) et est relié à Internet via une ou plusieurs passerelles. Un gestionnaire de domaine conserve les répliques valides du contenu ITS et est configuré pour conserver l'adresse du nœud parent, les adresses des nœuds fils et la zone couverte par ses fils. Les gestionnaires de domaine peuvent être regroupés, de manière récursive, où un gestionnaire de domaine de niveau N exploite un

3. CDN : Content Delivery Network

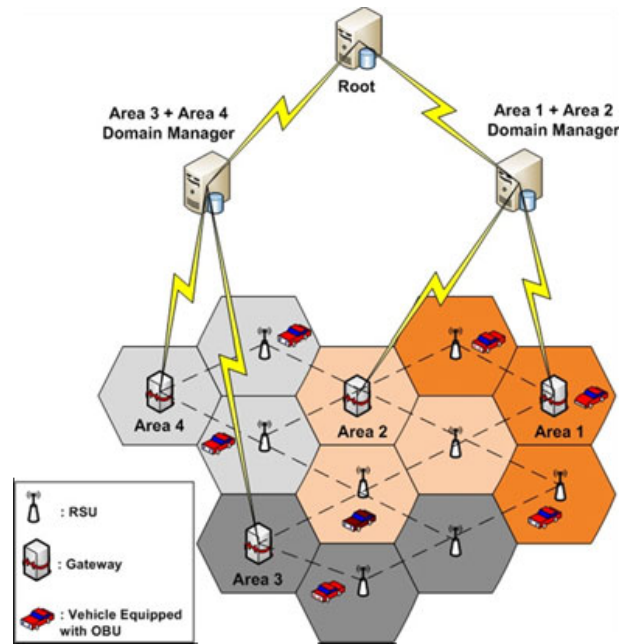


FIGURE 5.8 – Architecture du CDN [10]

certain nombre de gestionnaires de domaine de niveau N-1 de la hiérarchie. Ce regroupement est adopté afin qu'une hiérarchie enracinée soit créée.

L'architecture CDN utilise des hiérarchies de réseau pour obtenir des fonctionnalités de dimensionnement du réseau. Les gestionnaires de domaine rapprochent le contenu des véhicules, réduisant ainsi le temps de livraison du contenu. D'autre part, le déploiement des RSUs et de passerelles câblées connectées à des serveurs d'applications coûte trop cher. De plus, CDN est inefficace pour fournir des services aux véhicules lorsque le réseau de véhicules est presque dense et que l'espacement entre véhicules est inférieur à 20 mètres. Les services ITS dans les réseaux VANETs sont déterminés par le contenu et le temps de service des ITS. Différents contenus ITS se rapportent à différentes fonctions de satisfaction des utilisateurs. Pour obtenir une satisfaction maximale des utilisateurs, les auteurs dans [132] ont développé une méthode de service multimédia hétérogène distribuée qui résout conjointement les problèmes de distribution de contenu et de mise à jour du cache pour les VANETs.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude détaillée sur les différents services de localisation qui sont très utiles aux réseaux caractérisés par une grande mobilité. Ces services de localisation permettent aux nœuds sources de repérer les nœuds destinataires avant l'envoi des données pour garantir une grande probabilité de réception avec succès. Par ailleurs, ces services de localisation sont utilisés conjointement avec des protocoles de routage géographique.

Dans le chapitre suivant, nous présentons nos contributions dans le cadre de cette

problématique où nous avons proposé deux contributions concernant les services de localisation.

Un service de localisation dans un environnement urbain pour les VANETs

6.1 Introduction

Le routage basé sur la position, également appelé routage géographique, est largement reconnu comme une approche de routage efficace pour les réseaux très dynamiques et mobiles comme les réseaux ad hoc de véhiculaires (VANETs). Dans ce type de réseaux, la mobilité à grande vitesse des véhicules entraîne des modifications rapides de la topologie du réseau surtout quand la densité des véhicules est grande, des liaisons de communication à durée limitée, des défaillances de liaisons, etc. Dans ce contexte, le besoin de service de localisation est un problème primordial. En effet, il permettra de trouver la position d'un nœud cible afin de l'atteindre par un message. Certains travaux théoriques ont proposé des services de localisation basés sur le partage d'informations entre les nœuds de différentes manières avec un mécanisme hiérarchique, un mécanisme de distribution ou un processus de centralisation.

Ce chapitre présente un service de localisation déployé sur des RSUs (unités placées au bord des routes) pour le routage en mode unicast dans les VANETs en milieu urbain [133]. L'approche proposée permet de mesurer la connectivité d'une route. Nous proposons ensuite une nouvelle métrique appelée "LC" qui mesure cette connectivité [134]. Nous avons implémenté le service de localisation proposé à l'aide du simulateur OMNET ++, puis nous avons mené de nombreuses simulations avec divers scénarios afin d'évaluer son passage à l'échelle et sa robustesse face aux changements fréquents de la topologie. Les résultats obtenus, nous ont permis de constater que le mécanisme proposé apporte des améliorations significatives en termes de taux de livraison des paquets "Packet Delivery Ratio (PDR)", de délai de bout en bout et d'overhead par rapport à d'autres solutions proposées dans la littérature.

6.2 Contexte

Les réseaux VANETs sont un sous-ensemble des MANETs mais ils se distinguent de ces derniers par leur mobilité limitée i.e les nœuds dans les VANETs ne se déplacent

que sur des routes tandis que dans les MANETs les noeuds pouvaient se déplacer sans aucune restriction. Pour cette raison, les algorithmes de routage pour les VANETs doivent être adaptés. En effet, l'identification d'un chemin optimal est généralement basée sur des métriques telles que le calcul du plus court chemin entre la source et la destination. Dans les MANETs, l'identification optimale du chemin est plus complexe, elle doit prendre en compte les ruptures de chemin, ... etc. De plus, dans les réseaux VANETs, le niveau élevé de mobilité des noeuds et la communication à courte portée entraînent des modifications fréquentes de la topologie du réseau. Par conséquent, les messages ne peuvent alors pas être facilement remis aux noeuds de destination. En outre, la mobilité des noeuds véhiculaires est contrainte par la topologie des routes. Contrairement aux réseaux de capteurs sans fil, les noeuds dans les VANETs ne sont pas limités en termes d'énergie, de puissance de calcul et de localisation, car les périphériques sont transportés par des véhicules. De plus, dans les zones urbaines et avec la grande mobilité des véhicules, une autre caractéristique est considérée : les intersections entre les routes. De ce fait, un protocole de routage efficace ne pouvait ignorer une telle situation.

Dans cette section, d'autres caractéristiques des VANETs sont brièvement décrites. Dans ces réseaux, la communication entre véhicules peut être réalisée sur la base de trois principes différents : véhicule à véhicule (V2V), véhicule à infrastructure (V2I) et architecture hybride combinant les deux. De plus, les VANETs partagent certaines caractéristiques communes avec les MANETs, notamment en termes d'auto-organisation des noeuds. En outre, les réseaux VANETs ont fourni l'environnement requis pour le développement des systèmes de transport intelligents (ITS), dans lesquels les applications VANETs ont été conçues pour améliorer la sécurité routière [135] et peuvent être utilisées pour la collecte de données en temps réel dans les systèmes de contrôle du trafic et d'entretien des routes [44, 136].

Toutes ces raisons rendent les protocoles de routage basés sur la topologie conçus pour les MANETs inadaptés aux réseaux VANETs, car les noeuds dans ce type de réseaux sont très mobiles, ce qui entraîne de changements fréquents de la topologie et, par conséquent, la probabilité de réception des messages sera très faible. De plus, dans les protocoles de routage basés sur la topologie, en mode réactif ou proactif, les liens entre les noeuds sont découverts et maintenus via un échange périodique de messages "Hello". Par conséquent, pour dépasser cette limite, nous devrions minimiser la période d'envoi des messages "Hello", ce qui génère un faible overhead.

Toutefois, dans les protocoles de routage basés sur la position tels que GSR [75], GPSR [20] ou GyTAR [94], les noeuds utilisent la position de leurs voisins et la position du noeud de destination pour déterminer le voisin qui relaye le paquet à la destination. Ces protocoles nécessitent des informations sur la position des noeuds, ce qui est possible et moins coûteux dans les VANETs car la plupart des véhicules sont équipés d'un GPS (système de positionnement global) afin de trouver leur propre position géographique, et un service de localisation est utilisé pour rechercher la localisation géographique de la destination. En outre, les noeuds ne doivent stocker aucune route vers la destination.

Dans ce chapitre, nous présentons un service de localisation pour le routage unicast dans les VANETs. Ce dernier est particulièrement adapté aux environnements urbains où la mobilité à grande vitesse des véhicules peut entraîner des changements rapides dans la densité des véhicules, car il est capable de trouver non seulement la position du véhicule cible, mais également le meilleur chemin avec une connectivité supérieure

entre le véhicule source et le véhicule cible. De plus, le meilleur chemin est composé d'une séquence d'intersections obtenues à l'aide de la carte numérique de la ville et du trafic des véhicules dans le réseau en appliquant l'algorithme du plus court de chemin de Dijkstra sur un sous-réseau contenant les véhicules dont le lien de connectivité est supérieur à un seuil donné. Puis, nous décrivons succinctement les travaux qui ont une relation avec la problématique exposée. Nous détaillons ensuite la solution proposée qui consiste principalement en un service de localisation pouvant être déployé dans une zone urbaine sur des RSUs. Puis, nous évaluons les performances de ce système de localisation proposé à travers des simulations réalisées à l'aide du simulateur OMNET ++. Enfin, nous récapitulons notre démarche et ses atouts dans les environnements urbains.

6.3 Travaux Connexes

Dans la littérature, il existe deux manières pour gérer les services de localisation : une technique basée sur l'inondation qui est un service réactif ou proactif [137] et une technique basée sur la synchronisation qui repose sur une méthode de quorum ou une méthode hiérarchique [138]. L'approche d'inondation proactive est simple à mettre en œuvre, mais génère un overhead important puisque chaque nœud doit envoyer sa position à l'ensemble des nœuds du réseau, tandis que l'approche d'inondation réactive réduit l'overhead mais introduit une latence plus élevée car un nœud doit d'abord envoyer un message pour que la réponse à sa demande de localisation soit envoyée sur le réseau. La technique basée sur la synchronisation vise à scinder le réseau en groupes non disjoints comme dans l'approche du quorum ou hiérarchisée avec disjonction d'une manière analogue que dans le service de localisation de grille (GLS) [99] ou sans disjonction comme dans le service de localisation hiérarchique (HLS) [139] ou son extension dans [140, 141].

La plupart de ces approches sont difficiles à mettre en œuvre dans le déploiement réel des VANETs car elles génèrent soit un overhead important ou une latence plus importante. Dans le cadre de ce travail, nous proposons une approche simple pour fournir un service de localisation en milieu urbain pouvant être facilement implémenté.

Par ailleurs, les protocoles de routage doivent choisir certains critères pour prendre des décisions de routage, par exemple le nombre de sauts, la latence, la puissance de transmission, la bande passante, etc. Les protocoles de routage basés sur la topologie souffrent de phases de découverte et de maintenance qui sont lourdes, d'un manque de passage à l'échelle et d'effets de grande mobilité. Par conséquent, les protocoles de routage géographique conviennent mieux aux réseaux dynamiques à grande échelle. "Location-Aided Routing (LAR)" [142] est le premier protocole de routage utilisant les informations géographiques. Ce protocole utilise les informations géographiques dans la découverte de chemins. Ce dernier initie une requête dans une zone appelée *Zone de requête*. Si la requête échoue, il la lance une autre fois dans une zone *Request Zone* plus grande et la décision est prise sur une table de routage.

L'un des premiers protocoles de routage géographique est GPSR [20] qui est un protocole réactif. Dans ce protocole lors de la transmission d'un paquet à un nœud destinataire, le nœud source le transmet au voisin le plus proche de la destination selon une approche gloutonne (Greedy Forwarding) jusqu'à atteindre la destination. Par conséquent, le protocole GPSR évolue mieux que les protocoles basés sur la topologie, mais il ne prend pas toujours en compte la topologie des routes dans un milieu urbain et l'existence d'obstacles

aux transmissions radio.

GSR [75] est un autre protocole de routage géographique qui combine des informations géographiques et une topologie urbaine. Dans ce protocole, l'expéditeur calcule le plus court chemin en utilisant l'algorithme de Dijkstra vers la destination à partir d'une information de localisation sur la carte. Ensuite, il sélectionne une séquence d'intersections (basée sur l'ancre) par lesquelles le paquet de données doit transiter, permettant ainsi le routage suivant le plus court chemin. Par ailleurs, pour envoyer des messages d'une intersection à une autre, il utilise une approche gloutonne pour le transfert des paquets. Le choix des intersections est fixe et ne tient pas compte des variations spatio-temporelles du trafic. Par conséquent, cela augmente le risque de choisir des routes où la connectivité n'est pas garantie et de perdre des paquets.

Comme GSR, le protocole A-STAR [12] est basé sur un ancrage mais il reflète les caractéristiques des routes. Un taux de connectivité est attribué aux routes en fonction de la capacité et du nombre de bus l'empruntant. Cette métrique est utilisée en plus des métriques traditionnelles (distance, nombre de sauts, latence) lors de la prise de décisions de routage. En conséquence, les routes empruntées par les bus ne sont pas toujours les routes principales où la connectivité est assurée et l'approche gloutonne ne prend pas en compte la vitesse et la direction pour sélectionner le prochain saut. C'est la raison pour laquelle, le protocole GyTAR [82] a été conçu comme un protocole de routage géographique adapté aux environnements urbains et à la gestion des conditions du trafic. Dans GyTAR, un expéditeur sélectionne de manière dynamique une intersection (en fonction de la connectivité des routes) par laquelle un paquet doit être transmis pour atteindre le nœud de destination. Entre les intersections, une approche gloutonne améliorée pour l'acheminement des paquets est utilisée. GyTAR est basé sur les vitesses et les directions des voisins. Il tire parti des caractéristiques des routes urbaines, sélectionne des chemins robustes avec une connectivité élevée et minimise le nombre de sauts pour atteindre une intersection. Cependant, les principaux inconvénients de GyTAR sont : les informations de connectivité peuvent être gérées par les infrastructures (RSUs) et que les performances des réseaux en réserve sont faibles.

Le protocole "Geographic and Delay Tolerant Network with Navigation Assistance (GeoDTN + Nav)" [143] propose une solution au dernier problème. Il bascule entre les modes DTN (réseau à tolérance de retard) et "non-DTN" en fonction de la connectivité des routes. En mode DTN pour un réseau fragmenté, le véhicule utilise l'approche différée et le paquet sera stocké jusqu'à trouver un éventuel expéditeur. Cependant, le principal inconvénient de ce protocole est que les performances sont affectées (latence élevée) dans un réseau peu dense. Cela est dû au fait que le protocole tente constamment de basculer entre le mode DTN et l'absence de mode DTN lors du transfert des paquets.

Dans [144], les auteurs ont proposé un protocole de routage géographique nommé "Vehicle-Assisted-Data Delivery (VADD)" qui permet d'acheminer les données d'un véhicule mobile à un site fixe dans un réseau de véhicules faiblement connecté. Dans VADD, chaque paquet a trois modes possibles, à savoir : "*Intersection*", "*Straightway*" et "*Destination*" où chaque mode est basé sur la position du véhicule qui transporte le paquet. VADD bascule entre ces modes afin de transférer les paquets de données via le meilleur chemin. Le mode "*intersection*" est utilisé pour sélectionner le nœud de transfert suivant en fonction des métriques de direction du trafic et de la distance la plus courte dans le cas où le nœud de transfert est situé à proximité d'une intersection. Pour la transmission

entre les intersections, il passe au mode "*Straightway*" ou au mode "*destination*" si la distance entre le nœud de transfert et la destination est inférieure à un seuil prédéfini. Le schéma de routage de GPSR est utilisé en mode "*direct*" et en mode "*destination*" pour livrer le paquet à la prochaine intersection ou à la destination finale. La principale faiblesse de VADD réside dans le fait qu'il utilise les statistiques sur le trafic (par exemple, la densité du trafic de chaque route), mais ce mécanisme ne peut pas suivre en permanence les changements de topologie dynamiques des VANETs.

Le protocole "Opportunistic routing based on Symmetrical Traffic Distribution (OSTD)" [145] est un protocole de routage basé sur les intersections, proposé pour le routage dans des scénarios urbains. Les auteurs de ce protocole supposent que les véhicules diffusent leur trajectoire sous forme de messages "Hello" et qu'ils sont équipés d'une carte numérique préchargée qui comprime la topologie des routes, les statistiques de la densité du trafic et de la vitesse moyenne des véhicules à différentes heures de la journée. Le protocole OSTD utilise les informations sur le chemin du trafic et la distribution des véhicules pour acheminer le paquet via une route appropriée. Il a deux principaux composants, à savoir "*Phase de sélection d'intersection*" et "*Phase de sélection du saut suivant*". Dans "*Phase de sélection d'intersection*", le nœud de transfert attribue un score aux intersections voisines en fonction de la densité des véhicules, de la distribution des véhicules et de la distance euclidienne jusqu'à la destination afin de sélectionner la prochaine intersection vers laquelle le paquet doit être transmis. La phase "*Phase de sélection du saut suivant*" a pour but de déterminer le saut suivant en tenant compte de la trajectoire de conduite et de la vitesse moyenne des véhicules voisins. À l'instar de VADD, la principale faiblesse du protocole OSTD réside dans l'utilisation des statistiques du trafic. Cette dernière fournit des informations statiques et ne permet pas d'assurer la connectivité des chemins, en particulier dans la nature dynamique des réseaux de véhicules.

Les faiblesses de GyTAR [82], EGyTAR [83], VADD [144] et OSTD [145] qu'ils prennent en considération les informations du trafic concernant uniquement les routes voisines dans le processus de sélection des intersections suivantes. Ce mécanisme a une vision locale et ne peut pas garantir la connectivité sur les routes suivantes de l'intersection sélectionnée. Afin de tenir compte de la faiblesse précédente et du caractère dynamique des réseaux VANETs, nous proposons dans ce travail un nouvel algorithme de routage basé sur un système de localisation réaliste. Ce système de localisation est en mesure de fournir des informations sur le trafic réel des véhicules dans les réseaux et aussi pour calculer le chemin complet qui offre une connectivité élevée. Les premières idées sur ce travail ont été publiées dans [146, 147].

6.4 Contribution

Dans ce travail, nous présentons un service de localisation basé sur la coopération des RSUs fixes [133]. Nous supposons qu'une RSU est située au niveau de chaque intersection et que chaque véhicule dispose d'une carte numérique statique pour obtenir la position de toutes les RSUs. Chaque véhicule a également une connaissance de sa position géographique en utilisant son GPS, sa vitesse et son entête. Cela permet au véhicule de trouver la RSU la plus proche afin de demander un chemin jusqu'à la destination.

6.4.1 Description du système de localisation

Un système de localisation est un ensemble de RSUs distribuées et interconnectées dans le réseau, comme c'est illustré par la Figure 6.1. Chaque RSU joue le rôle de serveur de localisation et conserve une partie des informations sur les véhicules. Ces informations sur les véhicules seront périodiquement partagées avec tous les autres serveurs de localisation. Le rôle d'un serveur de localisation consiste non seulement à gérer les informations relatives aux véhicules, mais également à participer à la recherche du chemin pertinent entre deux nœuds.

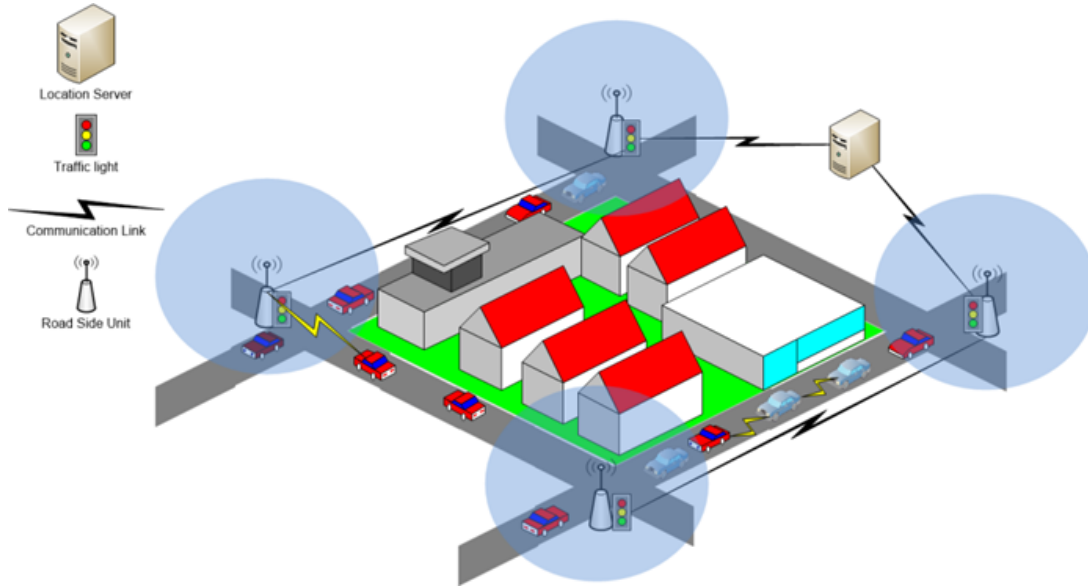


FIGURE 6.1 – Réseau de communication du système de localisation

6.4.2 Collecte des informations des véhicules

Chaque véhicule diffuse périodiquement des messages "beacons". Ce processus de diffusion de messages fournit des informations récentes sur le véhicule, telles que *ID* du véhicule, la position, la vitesse et la direction. Ainsi, lorsque le véhicule se trouve à portée de communication d'une RSU, celui-ci reçoit un beacon et place les informations récentes dans ce beacon (véhicule : ID, position, vitesse et direction) dans sa table d'informations. En fait, à partir d'une carte et d'une position d'un véhicule donné, le serveur de localisation est capable de trouver l'identifiant de la route d'un véhicule donné. Le format des informations de la table est présenté par la Figure 6.2.

Vehicle id	Position	Speed and direction	Road id	Time stamp

FIGURE 6.2 – Format des informations de la table

6.4.3 Mise à jour de la table d'informations

Chaque RSU agit en tant que serveur de localisation et maintient une partie du système global d'informations sur les véhicules. De plus, chaque serveur de localisation partage sa table d'informations avec tous les autres serveurs de localisation en utilisant une communication de RSU à RSU via des liaisons filaires. Une fois que le paquet de la table d'informations est reçu par un serveur de localisation, ce dernier procède comme indiqué dans l'algorithme 8. Dans cet algorithme, la table d'informations reçue met à jour les informations du nœud sur le serveur réel. Si le nœud n'est pas trouvé sur la table du serveur, il sera mis dans le serveur.

Algorithm 8 : Mise à jour de la table d'informations

```

1: Begin
   -  $LS_i$  : Location server  $i$ 
   -  $L_t$  : Local information table
   -  $R_t$  : Received information table
2:  $LS_i$  receive  $R_t$ ;
3: for ( $i = 1$  to  $R_t.length$ ) do
4:    $found = false$ ;
5:   for ( $j = 1$  to  $L_t.length$ ) do
6:     if ( $R_t[i].vehicle\_id = L_t[j].vehicle\_id$ ) then
7:        $found = true$ ;
8:       if ( $R_t[i].time\_stamp > L_t[j].time\_stamp$ ) then
9:          $L_t[j] = R_t[i]$ ;
10:      end if
11:    end if
12:  end for
13:  if ( $not\ found$ ) then
14:     $L_t[L_t.length + 1] = R_t[i]$ ;
15:  end if
16: end for
17: End

```

6.4.4 Métrique de connectivité

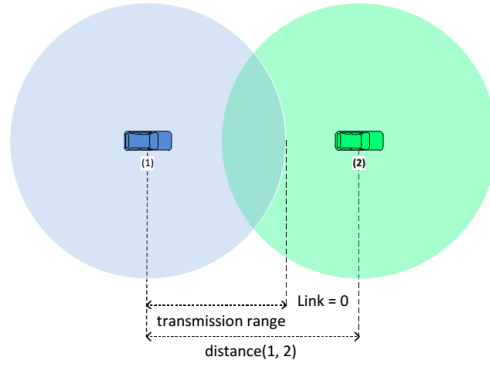
Nous définissons "Link Connectivity (LC)" comme une métrique qui mesure la connectivité d'une route donnée. LC est calculée en fonction des informations de position de tous les véhicules sur une telle route. Afin de définir cette métrique et par souci de simplicité, nous allons commencer par les situations possibles de deux véhicules qui se suivent. Théoriquement, nous avons trois situations possibles, comme indiqué dans la Figure 6.3.

En fonction des situations possibles de deux véhicules consécutifs, comme indiqué dans la Figure 6.3, nous pouvons définir un lien entre deux véhicules comme suit :

$$Link(v_i, v_j) = \begin{cases} R_{tr} - dist(v_i, v_j), & \text{if } dist(v_i, v_j) < R_{tr} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.1)$$



(a) Situation 1 : $distance(1,2) < \text{Portée de transmission}$ (b) Situation 2 : $distance(1,2) = \text{Portée de transmission}$



(c) Situation 3 : $distance(1,2) > \text{Portée de transmission}$

FIGURE 6.3 – Liens entre véhicules

La valeur d'un lien représente la distance de communication restante. Par conséquent, le lien moyen noté ML entre tous les véhicules sur la même route peut être exprimé comme suit :

$$ML_{road} = \frac{Link(RSU_n, v_1) + \sum_{i=1}^{N-1} Link(v_i, v_{i+1}) + Link(v_N, RSU_m)}{(N + 1)} * Link_{state}(road) \quad (6.2)$$

$$Link_{state}(road) = \begin{cases} 0 & \text{if } \exists i \in [0, N] / Link(v_i, v_{i+1}) = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.3)$$

Où $Link_{state}(road)$ renvoie 0 s'il y a deux véhicules consécutifs non connectés (la distance entre eux est supérieure à la portée de transmission) ou renvoie 1 dans les autres cas (tous les véhicules sont connectés). Cette fonction est simplement utilisée pour éviter la possibilité de choisir une route déconnectée dans le processus de routage. N et v_i

représentent respectivement le nombre de véhicules sur une route donnée et le $i^{\text{ème}}$ véhicule sur une telle route. RSU_n et RSU_m représentent les RSUs situées aux extrémités de la route (au niveau des intersections). En outre, la connectivité de liaison (LC : link connectivity) est une fonction liée à une route afin de mesurer la connectivité de liaison d'une route donnée. Formellement LC peut être calculée comme suit :

$$LC : E \rightarrow [0, 1[\quad LC_{road} = \frac{ML_{road}}{R_{tr}} \quad (6.4)$$

Où R_{tr} représente la portée de transmission. Il est évident que $LC \in [0, 1[$. Selon les équations 6.1 et 6.2 ML_{road} peut être exprimé comme suit :

$$ML_{road} = \frac{\sum_{i=0}^N (R_{tr} - dist(v_i, v_{i+1}))}{(N + 1)} \quad (6.5)$$

Où v_0 et v_{N+1} représentent respectivement RSU_n et RSU_m i.e RSU placées aux extrémités de la route (les intersections). L'équation 6.5 peut être exprimée comme suit :

$$6.5 \Rightarrow ML_{road} = \frac{(N + 1)R_{tr} - \sum_{i=0}^N dist(v_i, v_{i+1})}{(N + 1)}$$

$$\sum_{i=0}^N dist(v_i, v_{i+1}) = L \quad (6.6)$$

Où L représente la longueur de la route, et selon les équations 6.5 et 6.6 ML_{road} peut être exprimé comme suit :

$$ML_{road} = \frac{(N + 1)R_{tr} - L}{(N + 1)} = R_{tr} - \frac{L}{(N + 1)} \quad (6.7)$$

Nous distinguons deux situations pour calculer LC_{route} comme indiqué dans la Figure 6.4 :

- Case 1 : $LC_{road} = 0$
Dans ce cas, il y a au moins deux véhicules déconnectés, ou le premier véhicule et la RSU à la première extrémité de la route ne sont pas connectés ou le dernier véhicule n'est pas connecté au RSU placée à l'autre extrémité. Les Figures 6.4 (a) et (b) illustrent ces situations. LC_{road} peut être exprimé comme suit :

$$LC_{road} = 0 \quad \text{if } \exists i \in [0, N] / dist(v_i, v_{i+1}) \geq R_{tr}$$

- Case 2 : $0 < LC_{road} < 1$
Pour prouver ces inégalités, supposons que nous ayons une connectivité entre tous les véhicules consécutifs, comme le montre la Figure 6.4 (c).

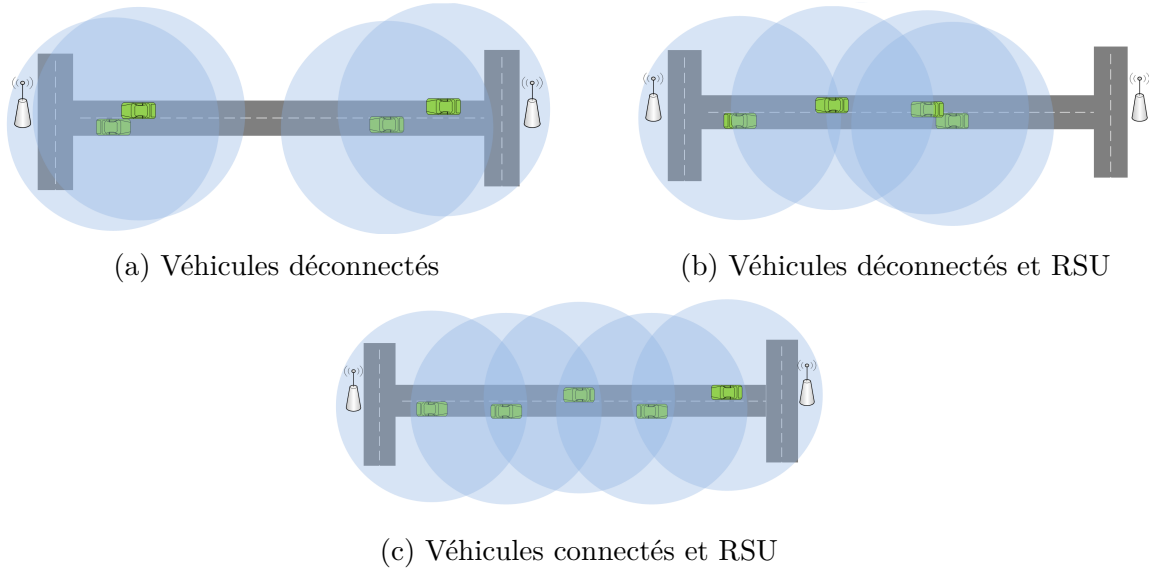


FIGURE 6.4 – Situations pour calculer LC_{road}

a) Montrons que $LC_{road} > 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} dist(v_0, v_1) < R_{tr} \\ + \\ dist(v_1, v_2) < R_{tr} \\ + \\ \dots\dots\dots \\ + \\ dist(v_N, v_{N+1}) < R_{tr} \end{array} \right. \quad (6.8)$$

Où v_0 et v_{N+1} représentent les RSUs placées aux extrémités de la route, comme le montre la Figure 6.4.

Selon l'équation 6.6 :

$$\begin{aligned} 6.8 \Rightarrow L < (N + 1)R_{tr} &\Rightarrow \frac{L}{(N + 1)} < R_{tr} \\ \Rightarrow R_{tr} - \frac{L}{(N + 1)} > 0 &\Rightarrow ML_{road} > 0 \Rightarrow \frac{ML_{road}}{R_{tr}} > 0 \end{aligned}$$

Selon l'équation 6.4 :

$$LC_{road} > 0 \quad (6.9)$$

b) Montrons que $LC_{road} < 1$

$$(N + 1) > 0 \quad \text{and} \quad L > 0 \quad \Rightarrow \frac{L}{N + 1} > 0$$

$$\Rightarrow -\frac{L}{N + 1} < 0 \quad \Rightarrow \quad R_{tr} - \frac{L}{N + 1} < R_{tr} \Rightarrow ML_{road} < R_{tr}$$

Selon l'équation 6.4 :

$$LC_{road} < 1 \tag{6.10}$$

Selon les équations 6.9 and 6.10 :

$$0 < LC_{road} < 1$$

6.4.5 Mécanisme de sélection des routes basé sur la métrique ML

La métrique proposée est utile pour sélectionner un chemin approprié d'une source à une destination. Le serveur de localisation conserve les informations sur les véhicules i.e il contient des informations sur tous les véhicules du réseau. Selon toutes ces informations sur les véhicules, le serveur de localisation peut représenter le réseau sous forme d'un graphe $G = (V, E)$ composé d'un ensemble V de sommets (intersections) et d'un ensemble E d'arêtes (routes). Chaque arête a un poids ML correspondant à la route qu'elle représente.

L'algorithme 13 cité en annexe, donne des détails sur la sélection d'une route du noeud $Node_s$ au noeud $Node_d$. L'algorithme commence par vérifier si un chemin quelconque entre ces deux noeuds a été déjà calculé et enregistré dans la table de routage. Si ce chemin n'est pas disponible, nous ne considérerons que le sous-graphe du système où chaque arête est pondérée par une valeur supérieure à un seuil donné. En d'autres termes, le seuil représente la connectivité de liaison minimale au dessous de laquelle une route ne peut pas être sélectionnée dans le processus de routage. En fait, si le seuil est trop petit, la route n'est pas appropriée de faire partie à un chemin pour le transfert de paquets (sa densité n'est pas suffisante pour garantir un transfert réussi des messages). Lorsqu'un chemin est trouvé, il sera utilisé pour envoyer un message d'une source à une destination en utilisant une approche gloutonne.

La partie principale de l'algorithme 13 est la boucle, qui permet de rechercher le chemin dont la connectivité est la plus élevée. Dans le pire des cas, la boucle prend 20 itérations (en fonction du pas de seuil de connectivité et de la valeur maximale de connectivité). Théoriquement, il est égal à $(1/0.05)$, puisque les véhicules peuvent être équipés de dispositifs de puissance de calcul assez considérable, le temps de calcul de l'algorithme 13 est négligeable. De plus, chaque chemin calculé sera stocké dans la table de routage pour un certain délai donné (Timeout) afin d'éviter le calcul en double.

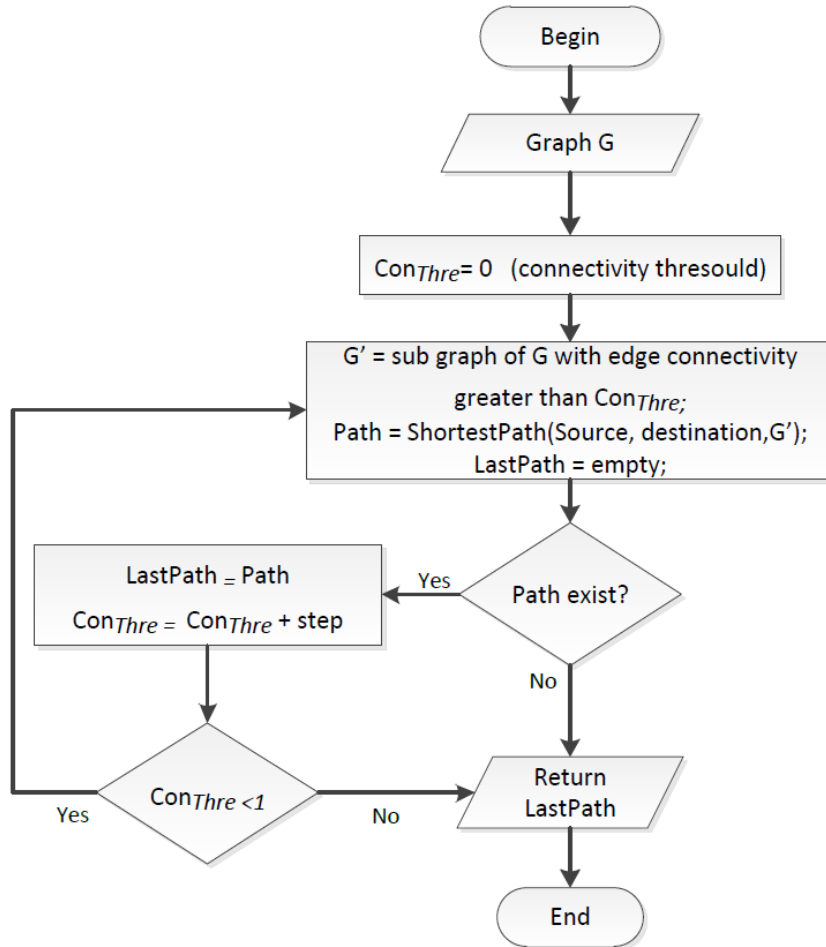


FIGURE 6.5 – Organigramme de l’algorithme proposé

6.5 Simulations

Dans cette section, nous évaluons les performances de notre contribution et nous comparons ses performances au protocole EGYTAR [83] en fonction des paramètres suivants :

- **Ratio de livraison des paquets (PDR)** : le rapport entre le nombre total de paquets reçus par la destination et le nombre total de paquets générés à partir de la source.
- **Délai de bout en bout** : représente la durée nécessaire à un paquet pour qu’il soit transféré de la source à la destination. item **Overhead** : mesuré en termes de taille de tous les paquets de contrôle. Pour la contribution proposée, l’overhead prend en compte les paquets "Route Request" et "Route Replay", tandis que le protocole EGYTAR considère les paquets "CDP". Nous avons remarqué que les messages de contrôle "beacons" ne sont pas pris en compte car ils ont la même taille dans les deux protocoles. Par conséquent, les paquets de la table d’informations introduits par la synchronisation des informations sur les véhicules ne sont pas pris en compte, car la synchronisation entre les RSUs est effectuée à l’aide d’un lien filaire à haut débit (débit théorique = 100 Mbps), cela n’affecte ni le débit du réseau véhiculaire,

ni la congestion. Dans le pire des cas, dans le cas où nous aurions 300 nœuds, 16 RSUs et un intervalle de synchronisation entre RSUs égal à une seconde, l'overhead généré par la synchronisation serait presque égal à 38,40 Kb.

Les performances de chaque protocole sont évaluées dans trois contextes différents afin d'illustrer les effets de la mobilité, de la densité du trafic et de la densité de données sur leurs performances.

6.5.1 Environnement du travail

Nous avons développé notre protocole proposé à l'aide du simulateur Omnet-5.0, en utilisant les modèles de pile protocolaire fournis par la structure INET-3.4.0 et le modèle de mobilité Manhattan Grid générés par les outils Bonnmotion-3.0.1 pour décrire le mouvement des nœuds. Nous effectuons toutes les simulations sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core i5-64 bits et d'une mémoire vive de 4 Gb. Nous exécutons chaque simulation 10 fois et nous calculons la moyenne de chaque métrique sur la base des résultats des performances obtenus par les différentes simulations. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 6.1.

TABLE 6.1 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	100 Seconds
Protocole MAC	802.11p
Zone de simulation	1500x1500 m ²
Portée de transmission	250 meters
Modèle de mobilité	Manhattan Mobility
Capacité du canal	3Mbps
Nombre de routes	24
Modèle du trafic	UDPBasicApp
Nombre des intersections	16
Intervalle d'envoi des paquets	0.1-0.9 sec
Nombre des véhicules	60-300
Heure de début	5 sec
Vitesse des véhicules	30-80 Km/h
Taille du paquet	128 bytes

6.5.2 Résultats de simulation

Dans cette sous-section, nous présentons les résultats des simulations obtenus dans trois contextes différents et nous analysons les performances des deux protocoles.

- **Context 1 : Variation du nombre de nœuds**

Dans ce contexte, nous avons fixé l'intervalle d'envoi de paquets à 0,2 seconde, la vitesse moyenne à 60 km/h, et on a varié le nombre de nœuds de 60 à 300 nœuds.

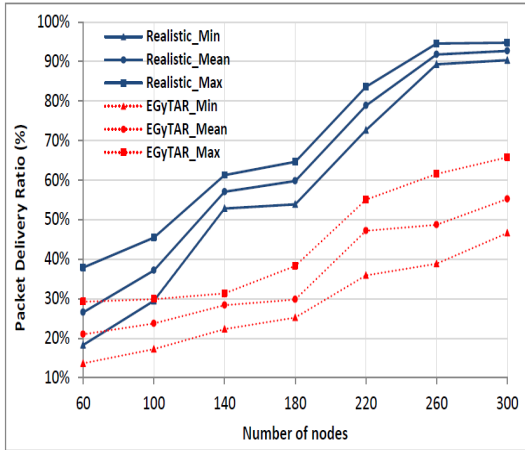


FIGURE 6.6 – Ratio de livraison des paquets en fonction du nombre de nœuds

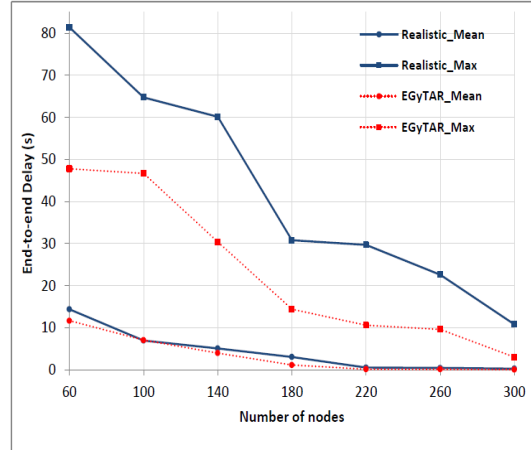


FIGURE 6.7 – Délai de bout en bout en fonction du nombre de nœuds

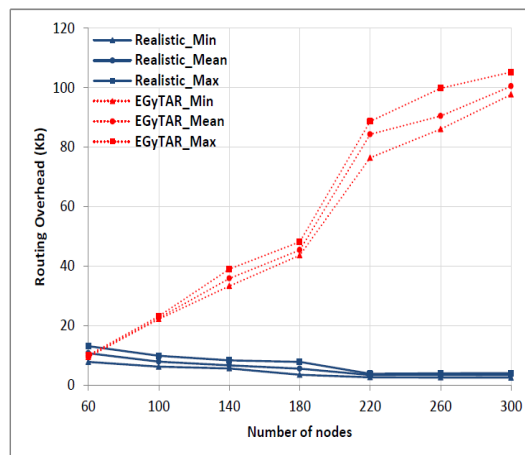


FIGURE 6.8 – Overhead de routage en fonction du nombre de nœuds

a) **Taux de livraison des paquets**

La Figure 6.6 montre le ratio de livraison des paquets en fonction de la densité du trafic. Comme le montre la Figure 6.6, le protocole proposé atteint un ratio de livraison des paquets plus élevé que le protocole EGyTAR [83]. De plus, le ratio de livraison des paquets d'EGyTAR augmente lentement avec la densité du réseau, ce qui signifie que le protocole EGyTAR ne peut pas profiter de tous les avantages de la densité du réseau. Ceci est dû au mécanisme de sélection des intersections dans EGyTAR qui utilise uniquement la densité du trafic entre deux intersections consécutives. Ce mécanisme ne donne pas une vue d'ensemble sur la densité du trafic dans le réseau, ce qui peut conduire à ne pas choisir le meilleur chemin entre la source et la destination. De plus, comme notre schéma de routage utilise toute la densité du trafic du réseau pour calculer le plus court chemin de la source à la destination avec une connectivité supérieure, le paquet peut ainsi suivre le chemin de la source à la destination ayant la connectivité la plus élevée.

b) **Délai de bout en bout**

La Figure 6.7 illustre le délai moyen de bout en bout. En général, il n’y a pas une grande différence entre les deux protocoles. Notre schéma de routage indique un délai légèrement supérieur, cela est peut-être dû au délai induit par la demande de chemin (Route Request) et la réponse de chemin (Route Replay). Cependant, il utilise des chemins de densité supérieure et délivre plus de paquets que le protocole EGYTAR.

c) Overhead du routage

Dans la Figure 6.8, nous rapportons l’overhead du routage mesuré en fonction de la taille de tous les messages de contrôle. La Figure 6.8 montre clairement que notre protocole présente de meilleure performance comparé au protocole EGYTAR. Cela est dû au nombre élevé de messages de contrôle (CDP) dans EGYTAR, comme décrit dans [83]. Le nombre de paquets CDP augmente avec le nombre de nœuds, ce qui entraîne une surcharge de routage contrairement à notre protocole, l’overhead du routage diminue quand le nombre de nœuds augmente. La raison derrière cela est que le nombre de messages de demande de chemin diminue lorsque la densité du trafic augmente. Cela est dû à la qualité du lien entre le nœud source et les RSUs, qui dépend de la densité du trafic.

• Context 2 : Variation de l’intervalle d’envoi des paquets

Dans ce contexte, nous avons évalué le ratio de livraison des paquets, l’overhead du routage et le délai de bout en bout en fonction de l’intervalle d’envoi de paquets dans un réseau contenant 100 nœuds avec une vitesse moyenne (60 km/h) et nous avons varié le temps entre deux transmissions.

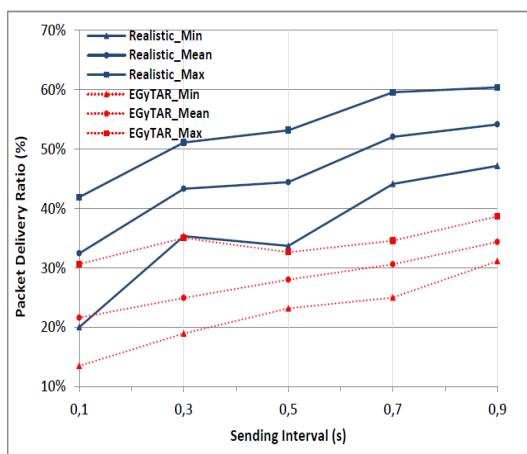


FIGURE 6.9 – Ratio de livraison des paquets en fonction de l’intervalle d’envoi

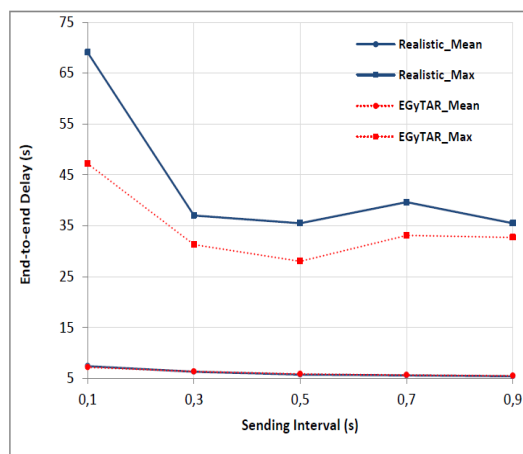


FIGURE 6.10 – Délai de bout en bout en fonction de l’intervalle d’envoi

a) Taux de livraison des paquets

La Figure 6.9 montre que le ratio de livraison des paquets augmente à la fois pour EGYTAR et notre schéma de routage lorsque le débit d’envoi de paquets diminue. Cela est dû au fait que le débit plus élevé des paquets du réseau provoque une congestion qui augmente le nombre de paquets perdus. Le ratio de livraison de paquets de notre protocole est toujours supérieur à celui du protocole EGYTAR.

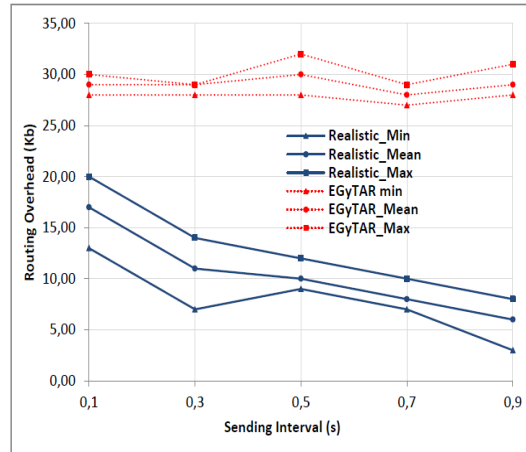


FIGURE 6.11 – Overhead de routage en fonction de l'intervalle d'envoi

La raison derrière ceci est que le protocole EGYtar se focalise uniquement sur la densité du trafic entre deux intersections consécutives.

b) **Délai de bout en bout**

La Figure 6.10 montre le délai de bout en bout en fonction du débit d'envoi de paquets avec une densité de trafic fixe. À mesure que le débit d'envoi des paquets augmente, le délai de bout en bout diminue pour les deux protocoles, car un grand nombre de paquets entraînent une congestion dans le réseau, ce qui entraîne davantage de retard. En terme de délai, nous pouvons constater que notre protocole a un délai légèrement inférieur lorsque le débit d'envoi des paquets est supérieur à 0,3 seconde.

c) **Overhead du routage** La Figure 6.11 montre que l'overhead du routage du protocole EGYtar dépend de la densité du trafic et que celui de notre protocole dépend de la densité des données. La Figure 6.11 montre que l'overhead du routage du protocole EGYtar n'est pas pratiquement variable lorsque le nombre de nœuds est fixé et le débit d'envoi de paquets est varié. En revanche, l'overhead du routage de notre protocole diminue quand le débit d'envoi des paquets augmente. Cette performance rend notre schéma de routage proposé meilleur en terme d'overhead que le protocole EGYtar.

• **Context 3 : Variation des vitesses des véhicules**

Dans le troisième contexte, nous avons fait varier la vitesse moyenne de 30 km/h à 80km/h et nous avons fixé l'intervalle d'envoi de paquets à 0,5 seconde et le nombre de nœuds à 150 nœuds.

a) **Taux de livraison des paquets**

La Figure 6.12 montre le ratio de livraison des paquets en fonction de la vitesse. Comme le montre la Figure 6.12, le ratio de livraison des paquets du protocole EGYtar est bien inférieur à celui de notre protocole proposé. Ce résultat est expliqué par le fait que le protocole EGYtar n'exploite pas tous les avantages des informations sur le trafic réseau pour alléger l'impact de la mobilité.

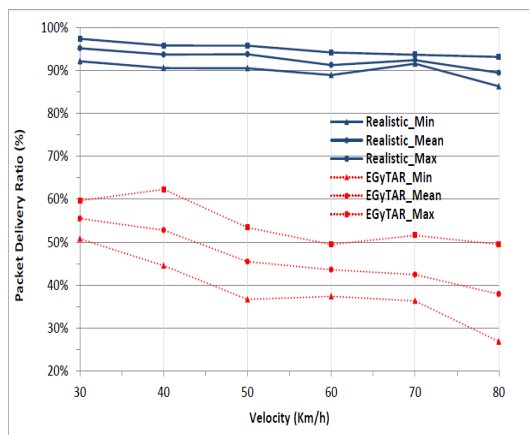


FIGURE 6.12 – Ratio de livraison de paquets en fonction de la vitesse

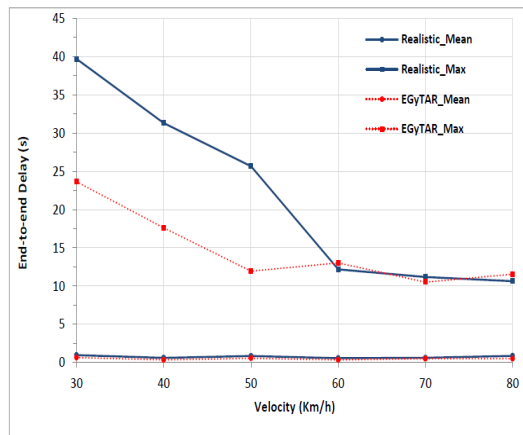


FIGURE 6.13 – Délai de bout en bout en fonction de la vitesse

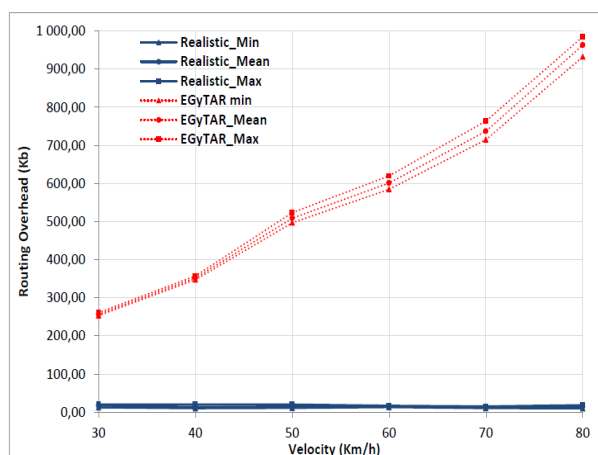


FIGURE 6.14 – Overhead de routage en fonction de la vitesse

b) **Délai de bout en bout**

La Figure 6.13 illustre le délai moyen de bout en bout en fonction de la vitesse. Quand la vitesse passe de 30km/h à 80 km/h, il n'y a pas beaucoup de changements significatifs entre les deux protocoles. De plus, dans notre protocole, nous prenons en compte le délai du service de localisation contrairement au protocole EGYTAR qui n'utilise aucun service de localisation.

c) **Overhead du routage**

La Figure 6.14 montre l'overhead du routage en fonction de la vitesse. Comme le montre la Figure 6.14, la vitesse n'a pas d'effet important sur le protocole proposé. Puisque le protocole EGYTAR est très sensible à la mobilité, l'overhead dans ce protocole est proportionnel à la vitesse des véhicules circulant dans le réseau, du fait que lorsque la vitesse augmente le nombre de messages CDP générés augmente. L'overhead de notre protocole est inférieur à celui du protocole EGYTAR, ce qui prouve que notre protocole est adapté aux réseaux ad hoc de véhicules de grande mobilité.

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un algorithme de service de localisation simple, qui pourrait être mis en œuvre dans des environnements urbains. Ce service de localisation est déployé sur des RSUs pour le routage unicast. L'approche proposée permet de mesurer la connectivité d'un chemin. Nous avons proposé pour cela une nouvelle métrique appelée connectivité du lien (LC : Link Connectivity), qui mesure cette connectivité au niveau de chaque route qui fait partie du chemin.

Nous avons mis en œuvre notre contribution à l'aide du simulateur OMNET++ et nous avons procédé à de nombreuses simulations avec divers scénarios afin d'évaluer son passage à l'échelle et sa robustesse face aux changements fréquents de la topologie. Nous avons constaté que le service de localisation proposé offre des performances réseau intéressantes en termes de ratio de livraison de paquets, de délai de bout en bout et d'overhead de routage par rapport au protocole EGyTAR.

Dans le chapitre suivant, nous proposons un autre service de localisation où l'aspect coopération entre les RSUs a été mis en œuvre.

Un service de localisation coopératif pour les VANETs

7.1 Introduction

Le routage des messages dans les réseaux VANETs est généralement réalisé par le biais de protocoles de routage géographiques. Dans de tels réseaux, la dynamique des véhicules entraîne des modifications rapides de la densité des véhicules et des liaisons de communication. De ce fait, pour être efficace dans l'acheminement des messages d'un véhicule à un autre, nous avons besoin de localiser la position de chaque nœud avant tout envoi de messages, ce qui est réalisé par un service de localisation.

Ce chapitre présente un service de localisation simple adapté au routage unicast pour les réseaux VANETs dans un environnement urbain [146]. Ce service est capable de trouver un chemin d'un véhicule source à un véhicule destinataire et ce chemin est celui qui est le plus dense pour garantir la connectivité des véhicules entre eux. Dans ce contexte, nous avons implémenté notre service de localisation en utilisant le simulateur OMNET++ et nous avons procédé à de nombreuses simulations dans différents scénarios afin d'évaluer son passage à l'échelle et sa robustesse face aux changements fréquents de la topologie. Les résultats obtenus ont montré que notre protocole proposé apportait des améliorations significatives en termes de taux de livraison des paquets, de délai de bout en bout et d'overhead de routage par rapport au protocole EGYTAR [83].

7.2 Contexte

Les réseaux VANETs sont utilisés depuis plus de dix ans dans de nombreux projets de recherche et de nombreux projets de déploiement réels de systèmes intelligents coopératifs. Dans ce type de réseaux, de nombreux types de communication sont possibles : véhicule à véhicule (V2V), véhicule à infrastructure (V2I) et un type de communication hybride qui combinent les deux. Les VANETs ressemblent aux réseaux MANETs sur de nombreuses caractéristiques mais ils diffèrent de ces réseaux sur d'autres aspects, notamment en ce qui concerne la mobilité des nœuds qui est généralement plus élevée et limitée par les routes. En outre dans les VANETs, les nœuds ne sont pas limités en termes d'énergie, de calcul et de localisation, car les appareils sont transportés par des véhicules. Par ailleurs,

dans les VANETs, la grande mobilité des véhicules et les communications à courte portée entraînent des changements fréquents de la topologie des réseaux. Cela pose de sérieux problèmes pour la diffusion des données car les messages ne peuvent pas être facilement livrés au noeud de destination.

Les VANETs fournissent l'environnement requis pour le développement de systèmes de transport intelligents (ITS) [148] dans lesquels les applications VANETs devaient améliorer la sécurité du trafic [135] et pouvaient être utilisées pour la collecte de données en temps réel dans les systèmes de contrôle de la circulation et d'entretien des routes [44, 136]. Les caractéristiques des réseaux VANETs rendent les protocoles de routage basés sur la topologie conçus pour les MANETs inadaptés aux réseaux VANETs, car les noeuds de ce type de réseaux sont très mobiles, ce qui entraîne des modifications fréquentes de la topologie et, par conséquent, la probabilité de réception des messages délivrés aux noeuds destinataires sera réduite. De plus, dans les protocoles de routage basés sur la topologie, en mode réactif ou proactif, les liens entre les noeuds sont découverts et maintenus via un échange périodique de messages "Hello". Par conséquent, pour dépasser cette limite, nous devrions minimiser la période d'envoi des messages "Hello", ce qui permet de réduire un overhead important. Cependant, dans les protocoles de routage basés sur la position tels que GSR [75], GPSR [20] ou GyTAR [82], les noeuds utilisent la localisation de leurs voisins et celle du noeud de destination pour déterminer le voisin qui permet de relayer le paquet à la destination. Ces protocoles nécessitent des informations sur la position des noeuds, ce qui est possible et moins coûteux dans les VANETs car la plupart des véhicules sont équipés d'un GPS afin de trouver leur propre position géographique, un système de localisation et la plupart du temps les noeuds n'ont pas besoin de stocker un itinéraire ou une table de routage vers la destination.

Ce chapitre présente un service de localisation adapté aux environnements urbains. Ce dernier est particulièrement adapté à ce type d'environnements où la mobilité à grande vitesse des véhicules peut entraîner des changements rapides dans la densité des véhicules. Ce service de localisation est capable de trouver non seulement la position du véhicule cible, mais également le meilleur chemin avec une connectivité élevée entre le véhicule source et le véhicule cible. Ce meilleur chemin est composé d'une séquence d'intersections obtenues à l'aide de la carte numérique de la ville et du trafic de véhicules dans le réseau en appliquant l'algorithme du plus court chemin de Dijkstra sur un sous-réseau contenant les véhicules avec un lien de connectivité supérieure à un seuil donné.

Dans ce que suit, nous mettons l'accent sur les travaux qui ont une relation étroite avec notre contribution. Nous détaillons notre contribution proposée pour traiter cette problématique. Puis, nous évaluons les performances de notre contribution via des simulations intensives et nous analysons les résultats obtenus. Enfin, nous synthétisons toute notre démarche tout en mettant en valeur les atouts de notre contribution.

7.3 Travaux Connexes

Deux services de localisation sont principalement connus : une technique basée sur l'inondation qui est un service réactif ou proactif ou une technique basée sur la synchronisation qui repose sur une méthode de quorum ou une méthode hiérarchique.

L'approche d'inondation proactive est simple à mettre en œuvre mais elle génère un overhead très important car chaque noeud doit envoyer sa position à l'ensemble du réseau.

L'approche réactive générée par l'inondation réduit l'overhead, mais introduit une latence plus élevée, car lorsqu'un nœud doit envoyer un message, il doit d'abord recevoir la réponse à sa demande de localisation envoyée sur le réseau.

La technique basée sur la synchronisation vise à diviser le réseau en groupes qui ne sont pas disjoints comme dans l'approche du quorum ou l'approche hiérarchisée avec disjonction comme dans le service de localisation de grille (GLS) [99] ou sans disjonction en tant que service de localisation hiérarchique (HLS) [101].

La plupart de ces approches sont difficiles à mettre en œuvre dans le déploiement réel des VANETs car elles génèrent soit une surcharge supplémentaire dans le réseau ou une latence plus importante. Dans ce travail, nous proposons une approche simple pour fournir un service de localisation en milieu urbain pouvant être facilement implémenté. Par ailleurs, les protocoles de routage doivent choisir certains critères pour prendre des décisions de routage, par exemple le nombre de sauts, la latence, la puissance de transmission, la bande passante, etc. Les protocoles de routage basés sur la topologie souffrent de phases de découverte et de maintenance lourdes, d'un manque de passage à l'échelle et de liens courts à forte mobilité. Par conséquent, le routage géographique convient au mieux aux réseaux dynamiques à grande échelle. Le premier protocole de routage ayant utilisé les informations géographiques est le protocole de routage à localisation "LAR" [142]. Ce protocole utilise les informations géographiques dans la découverte de chemin. Ce dernier lance une requête dans une zone et si cette requête n'aboutit pas, il lance une autre demande avec une zone de demande plus grande et la décision est prise sur une table de routage. En outre, "GPSR" [20] est considéré comme le véritable protocole de routage géographique. C'est un protocole réactif qui permet le transfert des paquets de données aux destinations voisines les plus proches (Greedy Forwarding approach) jusqu'à atteindre la destination. Par conséquent, il évolue mieux que les protocoles basés sur la topologie, mais il ne prend pas toujours en compte la topologie des zones urbaines dont le trafic est intensif et l'existence d'obstacles aux transmissions radio. Un autre protocole de routage géographique est le routage de source géographique "GSR" [75]. Il combine des informations géographiques et une topologie urbaine. Dans GSR, l'expéditeur calcule le chemin le plus court vers la destination à l'aide de l'algorithme Dijkstra à partir d'une information de localisation sur la carte. Ensuite, il sélectionne une séquence d'intersections (en utilisant des ancrages) par lesquelles les paquets de données doivent transiter, formant ainsi le routage le plus court. Pour envoyer des messages d'une intersection à une autre, il utilise l'approche gloutonne de transfert. Le choix des intersections est fixe et ne tient pas compte des variations de trafic spatio-temporelles. Par conséquent, cela augmente le risque de choisir des routes où la connectivité n'est pas garantie et de perdre des paquets.

À l'instar du GSR, le routage en fonction du trafic routier et des routes (A-STAR) [12] est basé sur l'ancrage. A-STAR reflète les caractéristiques des routes et attribue un taux de connectivité aux routes en fonction de la capacité et du nombre de bus l'utilisant. Cette métrique est utilisée en plus des métriques traditionnelles (distance, nombre de sauts, latence) lors de la prise de décisions de routage. En conséquence, les routes empruntées par les bus ne sont pas toujours les routes principales où la connectivité est assurée et l'approche gloutonne ne prend pas en compte la vitesse et la direction pour la prochaine sélection de saut. C'est pourquoi le protocole de routage "GyTAR" [94] a été conçu comme un protocole de routage géographique adapté aux environnements urbains et gérant les conditions de circulation. Un expéditeur sélectionne dynamiquement une intersection (en

fonction de la connectivité des routes) à travers laquelle un paquet doit être transmis pour atteindre le nœud de destination. Entre les intersections, une approche gloutonne améliorée pour l'acheminement des paquets est utilisée. Ce dernier est basé sur les vitesses et les directions des voisins. GyTAR tire parti des caractéristiques des routes urbaines, sélectionne des chemins robustes avec une connectivité élevée et minimise le nombre de sauts pour atteindre une intersection. Cependant, les principaux inconvénients de GyTAR sont : les informations de connectivité peuvent être gérées par les infrastructures (RSU : unité de service routière) et que les performances des réseaux en réserve sont faibles. Le protocole "GeoDTN + Nav" [143] propose une solution au dernier problème. Il bascule entre les modes DTN (réseau à tolérance de retard) et non DTN en fonction de la connectivité des routes. En mode DTN pour un réseau fragmenté, le véhicule utilise l'approche différée et le paquet sera stocké jusqu'à trouver un expéditeur éventuel. Cependant, le principal inconvénient de ce protocole est que les performances sont affectées (latences élevées) dans un réseau peu dense. Cela est dû au fait que le protocole tente constamment de basculer entre le mode DTN et l'absence de mode DTN lors du transfert des paquets.

Dans [102], les auteurs ont présenté une approche hybride, dénommée PHRHLS (Routing Hybrid Routing and Hierarchical Location), couplant un protocole de routage pour les VANETs représenté par GPSR et le service "HLS". Dans [140], les auteurs ont amélioré cette approche hybride avec évaluation des performances pour les réseaux à grande échelle. Enfin, dans [149], les auteurs ont comparé trois services de localisation : le service de localisation réactif "RLS", le service de localisation de grille "GLS" et le service de localisation hiérarchique (HLS) tout en étant couplés au célèbre protocole de routage GPSR.

7.4 Le Service de localisation proposé

Dans cette section, nous proposons un algorithme de routage de hautes performances basé sur un système de localisation simple représenté par des RSUs. Cet algorithme de routage pourra envoyer un message d'une source à la destination en utilisant le chemin le plus dense pour maximiser la probabilité de la bonne réception des paquets. Le chemin trouvé est calculé sur la base d'un paramètre de connectivité géré par tous les véhicules du réseau et les RSUs déployées. En fait, nous considérons qu'à chaque intersection, une RSU est installée et que chaque véhicule dispose d'une carte numérique statique permettant d'obtenir la position de toutes les RSUs. En effet, chaque véhicule a également une connaissance de sa position géographique en utilisant son GPS, sa vitesse et sa direction de déplacement. Cela permet au véhicule de trouver la RSU le plus proche afin de lui demander le chemin de la destination.

7.4.1 Présentation du système de localisation proposé

Notre système de localisation proposé [146] est assuré par toutes les RSUs déployées et connectées entre elles et avec un réseau réparti sur l'ensemble du réseau, comme illustré à la Figure 6.1. En fait, chaque nœud mobile envoie fréquemment sa position capturée par une RSU. Cet ensemble de RSUs joue le rôle de serveur de localisation et conserve les informations sur les véhicules. Ces informations seront périodiquement partagées avec tous les autres RSUs. Le rôle d'un serveur de localisation ne se limite pas seulement à la

conservation des informations sur les véhicules mais calcule également le meilleur chemin entre un véhicule source et un véhicule de destination lorsqu'il reçoit une demande de chemin provenant d'un véhicule (le nœud émetteur). L'algorithme 9 décrit comment le serveur de localisation met à jour sa table d'information.

Algorithm 9 : Mise à jour de la table d'informations

```

1: Begin
   -  $LS_i$  : Location server  $i$ 
   -  $L_t$  : Local information table
   -  $R_t$  : Received information table
2:  $LS_i$  receive  $R_t$ ;
3: for ( $i = 1$  to  $R_t.length$ ) do
4:    $found = false$ ;
5:   for ( $j = 1$  to  $L_t.length$ ) do
6:     if ( $R_t[i].vehicle\_id = L_t[j].vehicle\_id$ ) then
7:        $found = true$ ;
8:       if ( $R_t[i].time\_stamp > L_t[j].time\_stamp$ ) then
9:          $L_t[j] = R_t[i]$ ;
10:      end if
11:    end if
12:  end for
13:  if ( $not\ found$ ) then
14:     $L_t[L_t.length + 1] = R_t[i]$ ;
15:  end if
16: end for
17: End

```

7.4.2 L'algorithme proposé

Étant donné que chaque serveur de localisation conserve et partage une partie des informations sur les véhicules avec l'ensemble des véhicules de tous les véhicules du réseau. Selon toutes ces informations sur véhicules, le serveur de localisation est capable de représenter le réseau par un graphe $G = (V, E)$ composé d'un ensemble V de sommets (intersections) ainsi que d'un ensemble E d'arêtes (routes) dans lequel chaque arête est associée à deux sommets. Nous devons calculer un paramètre de connectivité de liaison (LC : link connectivity) qui est une fonction permettant de mesurer la connectivité d'une route. LC est calculé comme suit [134] :

$$LC : E \rightarrow [0, 1[\quad LC_{route} = \frac{ML_{route}}{R_{tr}} \quad (7.1)$$

Où ML_{route} est la qualité moyenne des liaisons entre tous les véhicules dans un tronçon donné et R_{tr} représente la gamme de transmission, ML_{route} peut être calculée comme suit :

$$ML_{route} = \frac{\sum_{i=0}^N (R_{tr} - dist(v_i, v_{i+1}))}{(N + 1)} \quad (7.2)$$

Où N représente le nombre de véhicules dans la route, et V_i représente le numéro du véhicule. L'algorithme 14 (présenté en annexe) décrit comment le serveur de localisation calcule le meilleur chemin entre deux véhicules.

a) **Demande de chemin**

Lorsque le véhicule source veut envoyer des données au véhicule de destination, il envoie d'abord un message de demande route (Route-Request) au RSU le plus proche et ce message sera transféré aux autres RSUs à l'aide d'un schéma de routage utilisant une approche gloutonne (Greedy Forwarding). Nous supposons que chaque véhicule connaît la position géographique de toutes les RSUs du réseau, cette information est obtenue à l'aide de la carte déjà intégrée dans les véhicules.

b) **Réponse de route**

Lorsque la RSU reçoit un message de demande de chemin du véhicule émetteur, elle calcule le meilleur chemin entre le véhicule source et le véhicule de destination. Ce chemin est composé d'une séquence d'intersections à travers lesquelles les paquets transiteront pour atteindre le véhicule de destination. Enfin, le chemin trouvé sera encapsulé dans un message Route-Reply et transmis au véhicule émetteur à l'aide d'un processus de routage basé sur une approche gloutonne (Greedy Forwarding).

c) **Mise à jour de la table de positions**

Chaque RSU met à jour une table contenant une liste des positions, des vitesses et des horodatages. Lorsqu'une RSU reçoit un beacon d'un véhicule ou une table locale d'une autre RSU, il met à jour les positions, les vitesses et les heures de réception de ces véhicules. Le tableau des positions sera partagé périodiquement avec toutes les autres RSUs. L'objectif est que chaque RSU connaisse les positions de tous les véhicules du réseau.

d) **Transmission entre deux intersections**

Une fois que le véhicule source a reçu le message "Route-Reply", il l'ajoute dans l'entête de son paquet et en déduit l'intersection de destination. Ensuite, il transfère le paquet au plus proche voisin de l'intersection de destination en utilisant un schéma de routage basé sur une approche gloutonne améliorée.

7.5 Evaluation des performances

Dans cette section, nous évaluons les performances d'EGyTAR [83] et de notre schéma de routage proposé en termes de taux de livraison des paquets (PDR), de délai de bout en bout et de temps système de routage. De plus, nous comparons les résultats obtenus avec ceux du protocole EGYTAR.

7.5.1 Environnement de travail

Les simulations ont été effectuées à l'aide du simulateur OMNET++. La couche MAC utilisée est 802.11p [32]. Les autres paramètres utilisés dans la simulation sont décrits dans le tableau 7.1. Les simulations ont été effectuées 10 fois et sur la base de ces résultats nous avons calculé la moyenne de chaque métrique de performance.

TABLE 7.1 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Temps de simulation	100 Secondes
MAC protocol	802.11p
La zone de simulation	1500x1500 m ²
Portée de transmission	250 mètres
Modèle de mobilité	Manhattan Mobility
Capacité du canal	3Mbps
nombre de routes	24
Modèle de trafic	UDPBasicApp
nombre d'intersection	16
intervalle d'envoi des paquets	0.1-0.9 sec
Nombre de véhicules	60-300
Heure de début	5 sec
Vitesse du véhicule	30-80 km / h
Taille du paquet	128 octets

7.5.2 Résultats de la simulation

Dans cette partie, nous présentons les résultats de la simulation obtenus et nous discutons des performances des deux protocoles.

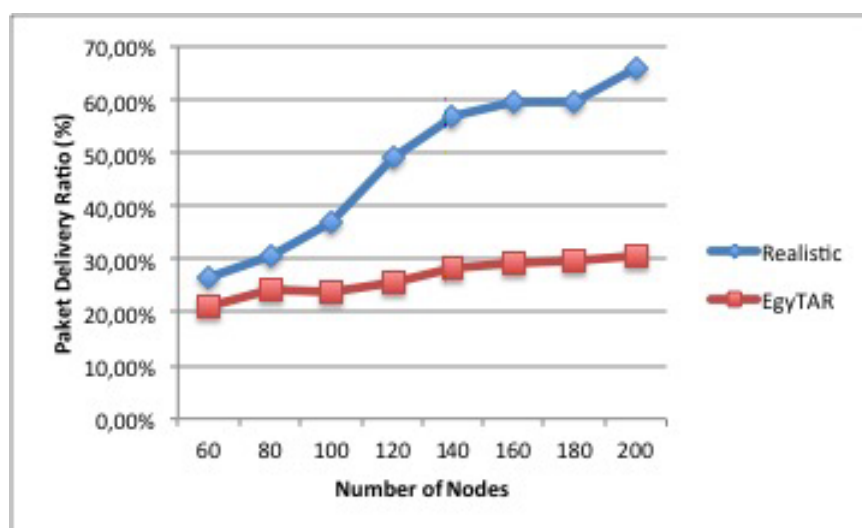


FIGURE 7.1 – Taux de livraison de paquets en fonction du nombre de noeuds

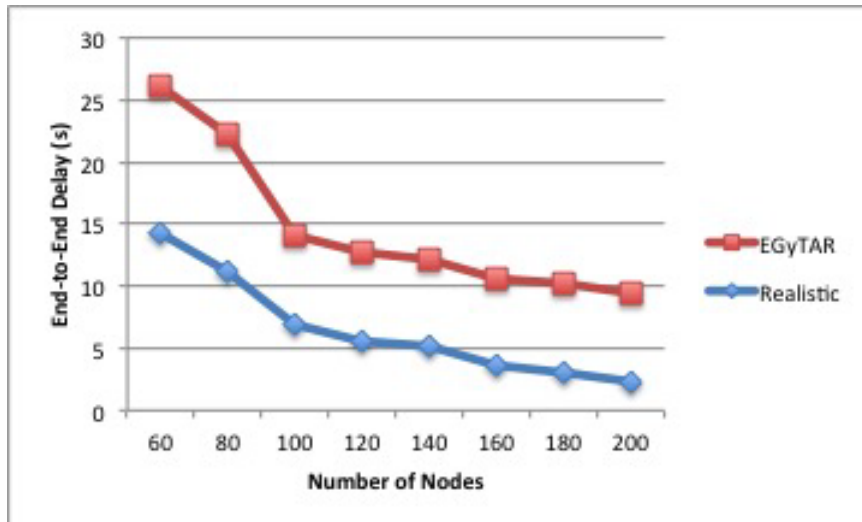


FIGURE 7.2 – Délai de bout-en-bout en fonction du nombre de noeuds

a) **Taux de livraison de paquets**

La Figure 7.1 montre le taux de livraison de paquets en fonction de la densité du trafic avec un débit d'envoi de paquets fixe (5 paquets/s). Comme le montre la figure 7.1, notre protocole atteint un taux de livraison de paquets plus élevé que le protocole EGYTAR [83]. De plus, le taux de livraison des paquets d'EGYTAR augmente lentement en fonction de la densité du réseau, ce qui signifie qu'EGYTAR ne peut tirer pleinement profit de la densité du réseau. La raison est que le mécanisme de sélection des intersections dans le protocole EGYTAR utilise uniquement la densité du trafic entre deux intersections consécutives. Ce mécanisme n'a pas une vue globale sur la densité du trafic du réseau, ce qui ne peut pas permettre le choix du meilleur chemin entre la source à la destination. Vu que notre protocole de routage utilise toute la densité du trafic du réseau afin de calculer le plus court chemin entre la source et la destination avec une connectivité considérable, le paquet est ainsi acheminé sur le chemin de la source à la destination avec la connectivité la plus élevée.

b) **Délai de bout en bout**

La Figure 7.2 illustre le délai moyen de bout en bout. Nous remarquons que la différence observée entre les deux protocoles n'est pas conséquente. Notre protocole de routage indique un délai légèrement supérieur, cela est peut-être dû au délai induit par la demande de chemin et la réponse à cette demande de chemin. Cependant, il utilise des chemins de densité supérieure et délivre plus de paquets que le protocole EGYTAR.

c) **Overhead du routage**

Dans la Figure 7.3, nous rapportons l'overhead de routage mesuré en termes de nombre total de messages de contrôle. La figure montre clairement que notre schéma de routage est supérieur à celui d'EGYTAR. Cela est dû au nombre élevé de messages de contrôle dénommés CDP (Cell Density Data Packet) dans EGYTAR, comme décrit dans [83]. Le nombre de paquets CDP augmente avec le nombre de nœuds, ce qui entraîne une surcharge de routage contrairement à notre protocole, la surcharge de routage diminue

à mesure que le nombre de nœuds augmente. La raison est que le nombre de demandes de chemins diminue lorsque la densité du trafic augmente ceci est dû à la qualité du lien entre le nœud source et une RSU, qui dépend de la densité du trafic.

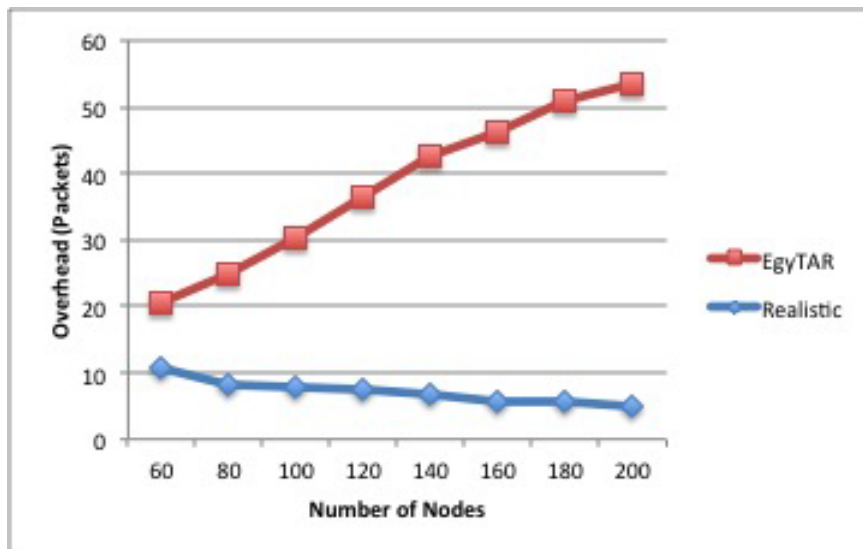


FIGURE 7.3 – Overhead du routage en fonction du nombre de noeuds

7.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un service de localisation simple basé sur un algorithme de routage, qui pourrait être mis en œuvre dans des environnements urbains et qui présente des performances très intéressantes en termes de taux de livraison de paquets, d'overhead et de délai de bout en bout.

Nous avons implémenté notre proposition en utilisant le simulateur OMNET++ et nous avons effectué plusieurs simulations afin d'illustrer les performances de notre contribution. Nous avons constaté que ce service de localisation proposé offre des performances réseau intéressantes en termes de ratio de livraison de paquets, de latence et d'overhead par rapport au protocole EGYTAR.

Conclusion Générale

Les réseaux VANETs ont hérité l'aspect auto-organisé des réseaux MANETs dans lequel chaque véhicule agit en tant que nœud mobile. De plus, les nœuds dans ce type de réseaux peuvent communiquer entre eux sans utiliser nécessairement une infrastructure préexistante. De plus, les VANETs sont caractérisés par un changement fréquent de la topologie en raison de la nature dynamique des véhicules qui les composent, ce qui complique énormément le routage des données dans ces réseaux. Par ailleurs, les protocoles de routage basés sur la topologie conçus pour les MANETs ne conviennent pas au routage dans les VANETs. Des recherches récentes montrent que les protocoles de routage géographique surpassent les protocoles de routage basés sur la topologie. De plus, les VANETs présentent plusieurs avantages par rapport aux MANETs, à savoir une mobilité prévisible, une puissance de calcul élevée et une source d'alimentation permanente.

Les protocoles de routage géographique exigent des informations géographiques des nœuds pour transmettre des paquets de données, tels que la position, la vitesse et la direction des véhicules. Ces informations peuvent être obtenues par des capteurs tels que le récepteur GPS. Par ailleurs, un véhicule est sensé d'échanger périodiquement ses propres informations géographiques avec des véhicules voisins par le biais des messages "beacons". Ainsi, avec ce mécanisme d'échange spécifique, les véhicules peuvent connaître leurs véhicules voisins à 1 saut. En outre, la localisation du véhicule destinataire est nécessaire dans ce type de réseaux avant toute transmission de paquets de données de la part d'un véhicule source. De ce fait, l'implication d'un service de localisation performant s'avère nécessaire pour localiser le véhicule cible. Dans ce contexte, nous avons traité deux problématiques dans le cadre de cette thèse. La première problématique concerne les protocoles de routage géographique et la deuxième concerne les services de localisation.

Dans la première partie de cette thèse nous avons proposé deux solutions de routage pour les réseaux VANETs. La première solution est un protocole de routage appelé "GyPTAR" pour les VANETs dans les environnements urbains. Ce protocole calcule d'une manière distribuée et avec précision les densités des routes pour établir un chemin entre le véhicule source et véhicule destinataire. GyPTAR est un algorithme distribué, qui mesure la densité sur une route en échangeant des paquets CDP (paquets de données de contrôle) entre un groupe de véhicules sur une route. Chaque groupe est représenté par un véhicule chargé de mesurer la densité périodiquement. Deuxièmement, nous avons proposé un protocole de routage appelé "PBRP". Ce protocole consiste en trois stratégies inté-

grées : diffusion des informations sur le trafic routier, algorithme de transmission partielle et stratégie de récupération en aval. Ces trois stratégies opèrent ensemble pour défier la nature dynamique des réseaux VANETs. La première stratégie est en mesure de fournir des informations permanentes sur le trafic routier, de gérer les informations sur le trafic routier au niveau de chaque route et les partager périodiquement. La deuxième stratégie adopte une approche de routage basée sur l'ancrage en utilisant des informations sur le trafic routier pour transférer les paquets du véhicule source au véhicule destinataire parmi les sous-chemins. La troisième stratégie sert de mode de recouvrement de l'algorithme de transmission partielle quand il se confronte à un problème du maximum local.

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons proposé deux services de localisation pour le routage unicast dans les VANETs. Le premier service de localisation proposé est capable de trouver le chemin ayant une grande connectivité dans un environnement urbain en exploitant les informations de chaque véhicule du réseau pour atteindre la destination. Ce service de localisation permet aussi de trouver le meilleur chemin avec une connectivité supérieure entre le véhicule source et le véhicule cible. Le deuxième service de localisation consiste en un service de localisation coopératif. Ce service de localisation est capable de trouver une route d'un véhicule source à un véhicule destinataire et cette route est celle qui passe par le chemin le plus dense pour garantir la connectivité des véhicules entre eux.

Toutes les solutions proposées ont été implémentées en utilisant le simulateur OMNET ++. Les résultats des simulations montrent les avantages de nos solutions en termes de surcoût de routage, de taux de livraison des paquets (PDR) et de délai de bout en bout comparativement à d'autres protocoles de routage à l'instar des protocoles GyTAR et EGyTAR.

En perspectives, nous visons à optimiser la durée de vie du RTIP et l'algorithme d'initiation du RTIP en utilisant l'historique des statistiques du trafic.

Bibliographie

- [1] T. M. Kurihara et al., “Trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave) - resource manager,” *IEEE Std 1609.1-2006*, pp. 1–71, Oct 2006.
- [2] Y. L. Morgan, “Novel Issues in DSRC Vehicular Communication Radios,” *IEEE Canadian Review, Vehicular Technologies*, Spring 2010.
- [3] C. Sommer and F. Dressler, *Vehicular Networking*. Cambridge University Press, November 2014.
- [4] E. Heidari, A. Gladisch, B. Moshiri, and D. Tavangarian, “Survey on location information services for Vehicular Communication Networks,” *Wireless Networks*, vol. 20, pp. 1085–1105, Jul 2014.
- [5] N. Brahmi, M. Boussedjra, J. Mouzna, A. K. V. Cornelio, and M. M. Manohara, “An improved map-based location service for vehicular ad hoc networks,” in *Proceedings of 6th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pp. 21–26, October 2010.
- [6] M. Boussedjra, J. Mouzna, P. Bangera, and M. M. Manohara Pai, “Map-based location service for vanet,” in *Proceedings of International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops*, pp. 1–6, October 2009.
- [7] H. Saleet, O. Basir, R. Langar, and R. Boutaba, “Region-based location-service-management protocol for vanets,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, pp. 917–931, February 2010.
- [8] H. Saleet, R. Langar, O. Basir, and R. Boutaba, “A distributed approach for location lookup in vehicular ad hoc networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, June 2009.
- [9] B. Jarupan and E. Ekici, “Mobility management for efficient data delivery in infrastructure-to-vehicle networks,” *Computer Communications*, vol. 35, no. 18, pp. 2274 – 2280, 2012.
- [10] M. Elshenawy, M. EL-Darieby, and B. Abdulhai, “Scalable and location-aware its content management in vehicular environments,” in *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 627–633, June 2010.

- [11] H. Füssler, M. Mauve, H. Hannes, M. M. Käseman, and D. Vollmer, “Location-Based Routing for Vehicular Ad-Hoc Networks,” in *Proceedings of the 8th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, (MOBICOM’02)*, (Atlanta, Georgia, USA), p. 2 pages, September 2002.
- [12] B.-C. Seet, G. Liu, B.-S. Lee, C.-H. Foh, K.-J. Wong, and K.-K. Lee, “A-STAR : A Mobile Ad Hoc Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications,” in *Proceedings of International Conference on Research in Networking* (N. Mitrou, K. Kontovasilis, G. N. Rouskas, I. Iliadis, and L. Merakos, eds.), (Athens, Greece), pp. 989–999, Springer Berlin Heidelberg, May 2004.
- [13] S.-M. Senouci and T. M. Rasheed, “Modified Location-Aided Routing Protocols for Control Overhead Reduction in Mobile Ad Hoc Networks,” in *Proceedings of International Conference on Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility* (D. Gaïti, ed.), (Lannion, France), pp. 137–146, Springer US, November 2007.
- [14] N.-C. Wang and C.-Y. Lee, “A reliable QoS aware routing protocol with slot assignment for mobile ad hoc networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1153 – 1166, 2009.
- [15] A. Moussaoui, F. Semchedine, and A. Boukerram, “A link-state QoS routing protocol based on link stability for Mobile Ad hoc Networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 39, pp. 117 – 125, 2014.
- [16] Q. Tse, “Improving message reception in VANETs,” in *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, (Krakow, Poland), p. 3 pages, June 2009.
- [17] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA’99)*, (New Orleans, LA, USA), pp. 90–100, February 1999.
- [18] V. Naumov, R. Baumann, and T. Gross, “An Evaluation of Inter-vehicle Ad Hoc Networks Based on Realistic Vehicular Traces,” in *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc ’06*, (New York, NY, USA), pp. 108–119, 2006.
- [19] F. Li and Y. Wang, “Routing in vehicular ad hoc networks : A survey,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 2, pp. 12–22, June 2007.
- [20] B. Karp and H. T. Kung, “GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” in *Proceedings of the 6th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom ’00)*, (New York, NY, USA), pp. 243–254, August 2000.
- [21] C. Lochert, M. Mauve, H. Füssler, and H. Hartenstein, “Geographic Routing in City Scenarios,” *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 9, no. 1, pp. 69–72, 2005.

-
- [22] V. Naumov and T. R. Gross, “Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad-hoc Networks,” in *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM’ 2007)*, pp. 1919–1927, May 2007.
- [23] K. Shafiee and V. C. Leung, “Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETs,” *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 2, pp. 131–141, 2011. Advances in Ad Hoc Networks (I).
- [24] W. Tin-Yu, W. Yan-Bo, and L. Wei-Tsong, “Mixing greedy and predictive approaches to improve geographic routing for VANET,” *Wireless Communications Mobile Computing*, vol. 12, pp. 367–378, March 2012.
- [25] X. Yingcheng, W. Li, and Y. Yuexiang, “Dynamic Vehicle Routing Using an Improved Variable Neighborhood Search Algorithm,” *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, pp. 1–18, 2013.
- [26] R. Kumar and M. Dave, “A Review of Various VANET Data Dissemination Protocols,” *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, vol. 5, September 2012.
- [27] S. Olariu and M. C. Weigle, *Vehicular Networks : From Theory to Practice*. Computer and Information Science Series, Chapman and Hall/CRC ; 1 edition, 2017.
- [28] T. M. Kurihara et al., “Ieee trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave) - networking services,” *IEEE Std 1609.3-2007*, pp. 1–99, April 2007.
- [29] “Vehicle Safety Communications Project,” tech. rep., U. S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 810 591, April 2006.
- [30] Y. J. Li, “An Overview of the DSRC/WAVE Technology,” in *Proceedings of International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness* (X. Zhang and D. Qiao, eds.), (Houston, TX, USA), pp. 544–558, Springer Berlin Heidelberg, November 2010.
- [31] B. P. Kraemer et al., “IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6 : Wireless Access in Vehicular Environments,” *IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pp. 1–51, July 2010.
- [32] Y. Wang, A. Ahmed, B. Krishnamachari, and K. Psounis, “IEEE 802.11p performance evaluation and protocol enhancement,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, (Columbus, OH, USA), doi=10.1109/ICVES.2008.4640898, pp. 317–322, September 2008.

- [33] K. Bilstrup, E. Uhlemann, E. G. Strom, and U. Bilstrup, "Evaluation of the IEEE 802.11p MAC Method for Vehicle-to-Vehicle Communication," in *Proceedings of the 68th IEEE International Conference on Vehicular Technology Conference*, (Calgary, BC, Canada), pp. 1–5, September 2008.
- [34] T. M. Kurihara, "IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages," *IEEE Std 1609.2-2006*, pp. 1–105, 2006.
- [35] T. M. Kurihara, "IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation," *IEEE Std 1609.4-2006 - Test*, pp. 1–82, Nov 2006.
- [36] A. Abunei, C. Comşa, and I. Bogdan, "Implementation of ETSI ITS-G5 based inter-vehicle communication embedded system," in *Proceedings of International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS' 2017)*, (Iasi, Romania), pp. 1–4, July 2017.
- [37] "Intelligent Transport Systems (ITS) ;European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band," tech. rep., ETSI ES 202 663 V1.1.0, Sophia Antipolis, FRANCE, November 2009.
- [38] "Intelligent Transport Systems (ITS) ; Vehicular Communications ; Basic Set of Applications," tech. rep., ETSI TS 102 637-1 V1.1.1, Sophia Antipolis, FRANCE, September 2010.
- [39] "Intelligent Transport Systems (ITS) ; Vehicular Communications ; GeoNetworking ;," tech. rep., ETSI EN 302 636-2 V1.2.1, Sophia Antipolis, FRANCE, November 2013.
- [40] Q. Chen, F. Schmidt-Eisenlohr, D. Jiang, M. Torrent-Moreno, L. Delgrossi, and H. Hartenstein, "Overhaul of Ieee 802.11 Modeling and Simulation in Ns-2," in *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, MSWiM '07, (Chania, Crete Island, Greece), pp. 159–168, ACM, October 2007.
- [41] "VANET/ITS Website (NEO)." <http://neo.lcc.uma.es/staff/jamal/vanet/index.html%3Fq=node%252F1.html>. Accessed : 06-02-2018.
- [42] A. Festag, H. Füßler, H. Hartenstein, A. Sarma, and R. Schmitz, "FleetNet : Bringing Car-to-Car Communication into the Real World," in *Proceedings of International 11th World Congress on ITS for livable society*, (Nagoya, Aichi, Japan), October 2004.
- [43] D. Reichardt, M. Miglietta, L. Moretti, P. Morsink, and W. Schulz, "CarTALK 2000 : safe and comfortable driving based upon inter-vehicle-communication," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Vehicle.*, vol. 2, (Versailles, France, France), pp. vol.2, 17–21, June 2002.

-
- [44] S. Zeadally, R. Hunt, Y.-S. Chen, A. Irwin, and A. Hassan, "Vehicular ad hoc networks (VANETS) : status, results, and challenges," *Telecommunication Systems*, vol. 50, pp. 217–241, Aug 2012.
- [45] "CARLINK : : Wireless Traffic Service Platform for Linking Cars." <http://carlink.lcc.uma.es/>. Accessed : 06-12-2012.
- [46] "Intelligent Transport Systems (ITS). (2016). European Investment Project Portal (EIPP) - The meeting place for project promoters and investors.." <https://ec.europa.eu/eipp/desktop/en/projects/project-print-86.html>. Accessed : 16-05-2018.
- [47] S. of Automotive Engineers, *Intelligent Vehicle Initiative (IVI) technology : advanced controls and vehicle navigation systems*. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 2004. SAE 2004 World Congress, Cobo Center, Detroit, Michigan, March 8-11, 2004.
- [48] S. Tsugawa, S. Kato, K. Tokuda, T. Matsui, and H. Fujii, "A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in demo 2000," in *Proceedings of International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'2001)*, (Oakland, CA, USA), pp. 918–923, August 2001.
- [49] S. Tsugawa, S. Kato, and K. Aoki, "An automated truck platoon for energy saving," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4109–4114, September 2011.
- [50] H. Narra, Y. Cheng, E. K. Çetinkaya, J. P. Rohrer, and J. P. G. Sterbenz, "Destination-sequenced Distance Vector (DSDV) Routing Protocol Implementation in Ns-3," in *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, SIMUTools '11, (ICST, Brussels, Belgium, Belgium), pp. 439–446, March 2011.
- [51] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "An efficient routing protocol for wireless networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 183–197, 1996.
- [52] Z. Hou, D. Liu, Z. Xu, and W. Li, "GSRP : An Application-Level Protocol for Grid Environments," in *Proceedings of Grid and Cooperative Computing* (M. Li, X.-H. Sun, Q.-n. Deng, and J. Ni, eds.), (Berlin, Heidelberg), pp. 825–828, Springer Berlin Heidelberg, October 2004.
- [53] M. G. Guangyu Pei and T.-W. Chen, "Fisheye state routing : a routing scheme for ad hoc wireless networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'2000), Global Convergence Through Communications*, vol. 1, (New Orleans, LA, USA), pp. 70–74 vol.1, June 2000.
- [54] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," tech. rep., RFC Editor , United States, United States, 2003.
- [55] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, "Ad hoc networking," ch. DSR : The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks, pp. 139–172, Boston, MA, USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001.

- [56] T. Jing, F. Zhang, L. Ma, W. Li, X. Chen, and Y. Huo, "TORA : A Truthful Online Reverse Auction Scheme for Access Permission Transaction in Macro-Femtocell Networks," *Ad hoc and Sensor Wireless Networks*, vol. 28, no. 3-4, pp. 347–362, 2015.
- [57] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," tech. rep., RFC Editor , United States, United States, 2003.
- [58] T. Kabir, N. Nurain, and M. H. Kabir, "Pro-AODV (Proactive AODV) : Simple modifications to AODV for proactively minimizing congestion in VANETs," in *Proceedings of International Conference on Networking Systems and Security (NSysS' 2015)*, (Dhaka, Bangladesh), pp. 1–6, January 2015.
- [59] N. Bejar, "Zone Routing Protocol (ZRP)," tech. rep., Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, Finland, 2002.
- [60] N. Nikaein, C. Bonnet, and N. Nikaein, "HARP - Hybrid Ad hoc Routing Protocol," in *Proceedings of IST International Symposium on Telecommunications*, (Teheran, Iran), p. 8 pages, September 2001.
- [61] R. Aquino and A. Edwards, "A reactive location routing algorithm with cluster-based flooding for inter-vehicle communication," *Computación y Sistemas*, vol. 9, no. 4, pp. 297–313, 2006.
- [62] S. A. Awwad, C. K. Ng, N. K. Noordin, and M. F. A. Rasid, "Cluster based routing protocol for mobile nodes in wireless sensor network," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Collaborative Technologies and Systems*, (Baltimore, MD, USA), pp. 233–241, IEEE, May 2009.
- [63] T. Song, W. Xia, T. Song, and L. Shen, "A cluster-based directional routing protocol in VANET," in *Proceedings of IEEE 12th International Conference on Communication Technology*, (Nanjing, China), pp. 1172–1175, IEEE, November 2010.
- [64] T. Wang and G. Wang, "TIBCRPH : Traffic Infrastructure Based Cluster Routing Protocol with Handoff in VANET," in *Proceedings of the 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010)*, (Shanghai, China), pp. 1–5, IEEE, May 2010.
- [65] E. M. Royer and C. E. Perkins, "Multicast operation of the ad-hoc on-demand distance vector routing protocol," in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, (Seattle, Washington, USA), pp. 207–218, ACM, August 1999.
- [66] J. G. Jetcheva and D. B. Johnson, "Adaptive demand-driven multicast routing in multi-hop wireless ad hoc networks," in *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, (Long Beach, CA, USA), pp. 33–44, ACM, October 2001.
- [67] A. Laouiti, P. Jacquet, P. Minet, L. Viennot, T. Clausen, and C. Adjih, "Multicast optimized link state routing," tech. rep., Rapport de recherche n° 4721, INRIA, France, 2003.

-
- [68] S.-J. Lee, W. Su, and M. Gerla, “On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) for Ad Hoc Networks,” tech. rep., December 1999.
- [69] Y. Yan, K. Tian, K. Huang, B. Zhang, and J. Zheng, “D-ODMRP : a destination-driven on-demand multicast routing protocol for mobile ad hoc networks,” *IET communications*, vol. 6, no. 9, pp. 1025–1031, 2012.
- [70] A. Benslimane and A. Bachir, “Inter-vehicle geocast protocol supporting non-equipped GPS vehicles,” in *Proceedings of International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, (Montreal, QC, Canada), pp. 281–286, Springer, October 2003.
- [71] C. Maihöfer, T. Leinmüller, and E. Schoch, “Abiding geocast : time-stable geocast for ad hoc networks,” in *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, (Cologne, Germany), pp. 20–29, ACM, September 2005.
- [72] Y.-S. Chen, Y.-W. Lin, and S.-L. Lee, “A mobicast routing protocol in vehicular ad-hoc networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, no. 1, pp. 20–35, 2010.
- [73] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Özgüner, and Ü. Özgüner, “Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems,” in *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular ad hoc networks*, (Philadelphia, PA, USA), pp. 76–85, ACM, October 2004.
- [74] O. Tonguz, N. Wisitpongphan, F. Bait, P. Mudaliget, and V. Sadekart, “Broadcasting in VANET,” in *Proceedings of International Conference on Mobile Networking for Vehicular Environments*, (Anchorage, AK, USA), pp. 7–12, IEEE, May 2007.
- [75] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann, and M. Mauve, “A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments,” in *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Vehicles (IV’2003)*, (Columbus, OH, USA), pp. 156–161, IEEE, June 2003.
- [76] D. Tian, K. Shafiee, and V. C. Leung, “Position-based directional vehicular routing,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Global Telecommunications (GLOBECOM’2009)*, (Honolulu, HI, USA), pp. 1–6, IEEE, November-December 2009.
- [77] N. Brahmi, M. Boussedjra, J. Mouzna, and M. Bayart, “Adaptative movement aware routing for vehicular ad hoc networks,” in *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing : Connecting the World Wirelessly*, (Leipzig, Germany), pp. 1310–1315, ACM, June 2009.
- [78] Y.-S. Chen, Y.-W. Lin, and C.-Y. Pan, “DIR : diagonal-intersection-based routing protocol for vehicular ad hoc networks,” *Telecommunication systems*, vol. 46, no. 4, pp. 299–316, 2011.
- [79] S.-H. Cha, K.-W. Lee, and H.-S. Cho, “Grid-based predictive geographical routing for inter-vehicle communication in urban areas,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 8, no. 3, p. 819497, 2012.

- [80] C. Tripp-Barba, L. Urquiza-Aguiar, M. Igartua, D. Rebollo-Monedero, L. de la Cruz Llopis, A. Mezher, and J. Aguilar-Calderón, “A multimetric, map-aware routing protocol for VANETs in urban areas,” *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 2199–2224, 2014.
- [81] X. Cai, Y. He, C. Zhao, L. Zhu, and C. Li, “LSGO : link state aware geographic opportunistic routing protocol for VANETs,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, no. 1, p. 96, 2014.
- [82] M. Jerbi, S. Senouci, T. Rasheed, and Y. Ghamri-Doudane, “Towards Efficient Geographic Routing in Urban Vehicular Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, pp. 5048–5059, November 2009.
- [83] S. M. Bilal, S. A. Madani, and I. A. Khan, “Enhanced junction selection mechanism for routing protocol in VANETs,” *Int. Arab J. Inf. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 422–429, 2011.
- [84] N. Alsharif, S. Céspedes, and X. S. Shen, “iCAR : Intersection-based connectivity aware routing in vehicular ad hoc networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC’2013)*, (Budapest, Hungary), pp. 1736–1741, IEEE, June 2013.
- [85] C. Li, C. Zhao, L. Zhu, H. Lin, and J. Li, “Geographic routing protocol for vehicular ad hoc networks in city scenarios : a proposal and analysis,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 27, no. 12, pp. 4126–4143, 2014.
- [86] Y. He, C. Li, X. Han, and Q. Lin, “A link state aware hierarchical road routing protocol for 3d scenario in vanets,” in *Proceedings of International Conference on Internet of Vehicles*, (Beijing, China), pp. 11–20, Springer, September 2014.
- [87] I. A. Abbasi, B. Nazir, A. Abbasi, S. M. Bilal, and S. A. Madani, “A traffic flow-oriented routing protocol for vanets,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, no. 1, p. 121, 2014.
- [88] N. Alsharif and X. S. Shen, “iCARI : Intersection-based connectivity aware routing in vehicular networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC’2014)*, (Sydney, NSW, Australia), pp. 2731–2735, IEEE, June 2014.
- [89] W. Lu, L. D. Han, and C. R. Cherry, “Evaluation of Vehicular Communication Networks in a Car Sharing System,” *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, vol. 11, pp. 113–119, September 2013.
- [90] L. Wei, B. Yuanlv, S. Xiaoyan, and W. Zhe, “Performance evaluation of inter-vehicle communication in a unidirectional dynamic traffic flow with shockwave,” in *Proceedings of International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops*, pp. 1–6, October 2009.
- [91] Z. Hameed Mir and F. Filali, “LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking : a performance evaluation,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, pp. 1–15, May 2014.

-
- [92] T. Taleb, M. Ochi, A. Jamalipour, N. Kato, and Y. Nemoto, "An efficient vehicle-heading based routing protocol for VANET networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking (WCNC 2006)*, vol. 4, pp. 2199–2204, april 2006.
- [93] H. Menouar, M. Lenardi, and F. Filali, "A movement prediction-based routing protocol for vehicle-to-vehicle communications," in *Proceedings of the 1st International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications, (V2VCOM 2005)*, (San Diego, USA), pp. 1–7, July 2005.
- [94] M. Jerbi, S.-M. Senouci, R. Meraihi, and Y. Ghamri-Doudane, "An improved vehicular ad hoc routing protocol for city environments," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, (ICC '07)*, pp. 3972–3979, June 2007.
- [95] T. Nebbou, H. Fouchal, and M. Lehsaini, "A distributed measurement of road density," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'2018)*, pp. 1–5, May 2018.
- [96] A. Dua, N. Kumar, and S. Bawa, "A systematic review on routing protocols for Vehicular Ad Hoc Networks," *Vehicular Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 33–52, 2014.
- [97] S. Boussoufa-Lahlah, F. Semchedine, and L. Bouallouche-Medjkoune, "Geographic routing protocols for Vehicular Ad hoc NETWORKS (VANETs) : A survey," *Vehicular Communications*, vol. 11, pp. 20 – 31, 2018.
- [98] O. S. Oubbati, A. Lakas, F. Zhou, M. Güneş, and M. B. Yagoubi, "A survey on position-based routing protocols for Flying Ad hoc NETWORKS (FANETs)," *Vehicular Communications*, vol. 10, pp. 29 – 56, 2017.
- [99] J. Li, J. Jannotti, D. S. J. De Couto, D. R. Karger, and R. Morris, "A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing," in *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '00*, (New York, NY, USA), pp. 120–130, ACM, 2000.
- [100] M. Ayaida, H. Fouchal, L. Afilal, and Y. Ghamri-Doudane, "A Comparison of Reactive, Grid and Hierarchical Location-based Services for VANETs," in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, september 2012.
- [101] W. KieB, H. Füssler, J. Widmer, and M. Mauve, "Hierarchical Location Service for Mobile Ad-hoc Networks," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 8, pp. 47–58, Oct. 2004.
- [102] M. Ayaida, M. Barhoumi, H. Fouchal, Y. Ghamri-Doudane, and L. Afilal, "PHRHLS : A Movement-prediction-based joint routing and Hierarchical Location Service for Vanets," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'2013), Budapest, Hungary*, pp. 1424–1428, IEEE Computer Society, June 2013.

- [103] M. Kasemann, H. Hartenstein, and M. Mauve, “A Reactive Location Service for Mobile Ad Hoc Networks,” *Department of Computer Science University of Mannheim Tech Rep TR02014*, pp. 121–133, 2002.
- [104] H. C. E. Renault, E. Amar and S. Boumerdassi, “Semi-Flooding Location Service,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Technology*, (Ottawa, Canada), pp. 1–5, May 2010.
- [105] T. Nebbou, M. Lehsaini, and H. Fouchal, “Advanced Measurement of Road Traffic Information in City Environments,” in *In Proceedings of 14th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC’2018)*, pp. 1255–1260, June 2018.
- [106] J. Gong, C. Z. Xu, and J. Holle, “Predictive Directional Greedy Routing in Vehicular Ad hoc Networks,” in *Proceedings of the 27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW ’07)*, (Toronto, Canada), pp. 2–2, June 2007.
- [107] R. K. Shrestha, S. Moh, I. Chung, and D. Choi, “Vertex-Based Multihop Vehicle-to-Infrastructure Routing for Vehicular Ad Hoc Networks,” in *Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1–7, Jan 2010.
- [108] M. Jerbi, R. Meraihi, S.-M. Senouci, and Y. Ghamri-Doudane, “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, VANET ’06*, (New York, NY, USA), pp. 88–89, ACM, 2006.
- [109] G. Li, L. Boukhatem, and J. Wu, “Adaptive Quality-of-Service-Based Routing for Vehicular Ad Hoc Networks With Ant Colony Optimization,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, pp. 3249–3264, April 2017.
- [110] R. S. Raw and D. K. Lobiyal, “B-MFR routing protocol for vehicular ad hoc networks,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Networking and Information Technology*, pp. 420–423, June 2010.
- [111] S.-H. Cha, K.-W. Lee, and H.-S. Cho, “Grid-Based Predictive Geographical Routing for Inter-Vehicle Communication in Urban Areas,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 8, no. 3, p. 819497, 2012.
- [112] Y. Li, A. Mohaisen, and Z. Zhang, “Trading Optimality for Scalability in Large-Scale Opportunistic Routing,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, pp. 2253–2263, Jun 2013.
- [113] I. D. Chakeres and E. M. Belding-Royer, “AODV routing protocol implementation design,” in *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 698–703, March 2004.
- [114] C. Wu, Y. Ji, F. Liu, S. Ohzahata, and T. Kato, “Toward Practical and Intelligent Routing in Vehicular Ad Hoc Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 5503–5519, Dec 2015.

-
- [115] M. Al-Rabayah and R. Malaney, "A New Scalable Hybrid Routing Protocol for VANETs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, pp. 2625–2635, July 2012.
- [116] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," *Wireless Networks*, vol. 11, pp. 419–434, Jul 2005.
- [117] D. Jiang and L. Delgrossi, "IEEE 802.11p : Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments," in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2008)*, pp. 2036–2040, May 2008.
- [118] X. . Bai, X. . Ye, J. Li, and H. Jiang, "VLS : A Map-Based Vehicle Location Service for City Environments," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'2009)*, pp. 1–5, June 2009.
- [119] Z. Guoqing, C. Wu, H. Liang, and M. Dejun, "A novel location service for urban vehicular ad hoc networks," in *Proceedings of 3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, pp. 513–516, October 2009.
- [120] M. Krohn, R. Daher, M. Arndt, A. Gladisch, and D. Tavangarian, "Mobility-aware Forwarding mechanism for QoS enhancement in Wireless Mesh Backbones," in *Proceedings of International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops*, pp. 1–9, October 2009.
- [121] C.-C. Tseng, K.-H. Chi, M.-D. Hsieh, and H.-H. Chang, "Location-based fast handoff for 802.11 networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, pp. 304–306, April 2005.
- [122] J. Montavont and T. Noel, "IEEE 802.11 Handovers Assisted by GPS Information," in *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pp. 166–172, June 2006.
- [123] K. Sampigethaya, M. Li, L. Huang, and R. Poovendran, "AMOEBA : Robust Location Privacy Scheme for VANET," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, pp. 1569–1589, October 2007.
- [124] Y. Sun, T. F. L. Porta, and P. Kermani, "A Flexible Privacy-Enhanced Location-Based Services System Framework and Practice," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, pp. 304–321, March 2009.
- [125] D. Huang, S. Misra, M. Verma, and G. Xue, "PACP : An Efficient Pseudonymous Authentication-Based Conditional Privacy Protocol for VANETs," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, pp. 736–746, September 2011.
- [126] H. Woo and M. Lee, "Mobile group based location service management for vehicular ad-hoc networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'2011)*, pp. 1–6, June 2011.

- [127] Y.-J. Chang and T. L. Shih, “Intersection location service and performance comparison of three location service algorithms for vehicular ad hoc networks in city environments,” in *Proceedings of 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, pp. 562–565, May 2008.
- [128] I. Stoica, R. Morris, D. Karger, M. F. Kaashoek, and H. Balakrishnan, “Chord : A Scalable Peer-to-peer Lookup Service for Internet Applications,” in *Proceedings of ACM International Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM '01)*, SIGCOMM '01, (New York, NY, USA), pp. 149–160, ACM, 2001.
- [129] I. Stoica, R. Morris, D. Liben-Nowell, D. R. Karger, M. F. Kaashoek, F. Dabek, and H. Balakrishnan, “Chord : A Scalable Peer-to-peer Lookup Protocol for Internet Applications,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, pp. 17–32, Feb. 2003.
- [130] G. Chang, Y. Chen, and J. Sheu, “A Region-Based Hierarchical Location Service with Road-Adapted Grids for Vehicular Networks,” in *Proceeding of the 39th International Conference on Parallel Processing Workshops*, pp. 554–561, September. 2010.
- [131] B. Jarupan and E. Ekici, “PROMPT : A cross-layer position-based communication protocol for delay-aware vehicular access networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 489 – 505, 2010. Vehicular Networks.
- [132] L. Zhou, Y. Zhang, K. Song, W. Jing, and A. V. Vasilakos, “Distributed media services in p2p-based vehicular networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 692–703, February 2011.
- [133] T. Nebbou, M. Lehsaini, H. Fouchal, and M. Ayaida, “An urban location service for vehicular area networks,” *Concurrency and Computation : Practice and Experience, Special Issue*, pp. 1–14, May 2018.
- [134] T. Nebbou, H. Fouchal, and M. Lehsaini, “Metrics for vehicle density in urban environment,” in *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'2017)*, pp. 1–6, December 2017.
- [135] Y. Zhang, C. C. Tan, F. Xu, H. Han, and Q. Li, “VProof : Lightweight Privacy-Preserving Vehicle Location Proofs,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 378–385, January 2015.
- [136] R. Du, C. Chen, B. Yang, N. Lu, X. Guan, and X. Shen, “Effective urban traffic monitoring by vehicular sensor networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 273–286, January 2015.
- [137] S. Boumerdassi and E. Renault, “A flooding-based solution to improve location services in Vanets,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'2016)*, (Kuala Lumpur, Malaysia), IEEE Computer Society, May 2016.

-
- [138] J. X. Stojmenovic I, Liu D, “A scalable quorum based location service in ad hoc and sensor networks,” *Int J Commun Netw Distrib Syst*, vol. 1, no. 1, pp. 71–94, 2008.
- [139] W. Kiess, H. Fussler, J. Widmer, and M. Mauve, “Hierarchical location service for mobile ad-hoc networks,” *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 8, pp. 47–58, October 2004.
- [140] M. Ayaida, M. Barhoumi, H. Fouchal, Y. Ghamri-Doudane, and L. Afilal, “HHLS : A hybrid routing technique for vanets,” in *Proceedings of IEEE Global Communications Conference, (GLOBECOM’2012)*, (Anaheim, CA, USA), pp. 44–48, December 2012.
- [141] M. Ayaida, M. Barhoumi, H. Fouchal, Y. Ghamri-Doudane, and L. Afilal, “PHRHLS : A Movement-prediction-based joint routing and Hierarchical Location Service for Vanets,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC’2013)*, Budapest, Hungary, pp. 1424–1428, IEEE Computer Society, June 2013.
- [142] Y.-B. Ko and N. H. Vaidya, “Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks,” *Wirel. Netw.*, vol. 6, no. 4, pp. 307–321, 2000.
- [143] P.-C. Cheng, J.-T. Weng, L.-C. Tung, K. C. Lee, M. Gerla, and J. Hårri, “GeoDTN+Nav : A Hybrid Geographic and DTN Routing with Navigation Assistance in Urban Vehicular Networks,” in *Proceedings of the 1st International Symposium on Vehicular Computing Systems (ISVCS’2008)*, Dublin, Ireland, July 2008.
- [144] J. Zhao and G. Cao, “VADD : Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, pp. 1910–1922, May 2008.
- [145] N. Mirjazaee and N. Moghim, “An opportunistic routing based on symmetrical traffic distribution in vehicular networks,” *Computers & Electrical Engineering*, vol. 47, pp. 1–12, 2015.
- [146] T. Nebbou, H. Fouchal, M. Lehsaini, and M. Ayaida, “A Cooperative location service for VANETs,” in *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 54–58, July 2017.
- [147] T. Nebbou, H. Fouchal, M. Lehsaini, and M. Ayaida, “A Realistic Location Service for VANETs,” in *Innovations for Community Services* (G. Eichler, C. Erfurth, and G. Fahrnberger, eds.), (Cham), pp. 191–196, Springer International Publishing, 2017.
- [148] T. Nadeem, P. Shankar, and L. Iftode, “A comparative study of data dissemination models for vanets,” in *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking Services*, pp. 1–10, July 2006.
- [149] M. Ayaida, H. Fouchal, L. Afilal, and Y. Ghamri-Doudane, “A Comparison of Reactive, Grid and Hierarchical Location-Based Services for VANETs,” in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5, September 2012.

Annexe

Algorithme du routage partiel utilisé par le protocole PBRP (voir le chapitre 4)

Algorithm 10 : Partial Routing Algorithm

```

1: Begin
   - path : The partial path (list of junctions)
   - data_packet : The data packet
   - G : Network graph,  $N_i$  : Node i
   - dst_p : The Destination position, self_p : The self position
   - neighbort : The neighboring table
   - next_hop : The next hop address
   - RTIt : Road Traffic Information Table
   - closestj : The closest junction to  $N_i$ , nextj : The next junction
   -  $R_{tr}$  : The range transmission
2:  $N_i$  receives datapacket ;
3: if (datapacket.destination  $\in$  neighbort ) then
4:   next_hop = datapacket.getDestinationAddress() ;
5: else
6:   dst_p = datapacket.getDestinationPosition() ;
7:   path = datapacket.getPath() ;
8:   if (path = null ) then
9:     path = PartialPath(self_p, dst_p, G, RTIt) ;
10:    datapacket.setPath(path) ;
11:    if (path is empty ) then
12:      next_hop = getClosestNeighboreTo(closestj) ;
13:    end if
14:  else
15:    nextj = path.front() ;
16:    if (distance(self_p, nextj) <  $R_{tr}$ ) then
17:      path.pop() ; /* delete front junction */
18:      if (path not empty ) then
19:        nextj = path.front() ;
20:      else
21:        path = PartialPath(nextj, dst_p, G, RTIt) ;
22:        nextj = path.front() ;
23:      end if
24:      datapacket.setPath(path) ;
25:    end if
26:    next_hop = getClosestNeighboreTo(nextj) ;
27:  end if
28: end if
29: if (next_hop  $\neq$  null) then
30:   Forward datapacket to the next_hop ;
31: else
32:   Store datapacket and carry it ;
33: end if
34: End

```

Algorithme du chemin partiel utilisé par le protocole PBRP (voir le chapitre 4)

Algorithm 11 : Partial Path Algorithm

```

1: Begin
   -  $path_{partial}$  : The partial path
   -  $path_{full}$  : The full path
   -  $G(V, E)$  : Network graph
   -  $G_w(V, E_w)$  : Weighted network graph
   -  $G_{Sub}(V_{Sub}, E_{Sub})$  : Subgraph of  $G_w$ 
   -  $RTI_t$  : Road Traffic Information Table
   -  $visited\_roads$  : Array of visited roads
   -  $dst\_p$  : The Destination position
   -  $from\_p$  : from position
2: for (all edges "e"  $\in E$ ) do
3:   if ( $e \in RTI_t$ ) then
4:      $e.weight = Score(e, RTI_t)$ ;
5:   else
6:      $e.weight = 1$ ;
7:   end if
8:    $E_w = E_w \cup \{e\}$ ;
9: end for
10:  $E_{Sub} = \{e | e \in E_w \wedge e \notin visited\_roads\}$ 
11:  $path_{full} = getShortestPath(from\_p, dst\_p, G_w)$ ;
12: for (all edges "e"  $\in path_{full}$ ) do
13:   if ( $e.weight \neq 1$ ) then
14:      $path_{partial} = path_{partial} \cup \{e\}$ ;
15:   end if
16: end for
17: Return  $path_{partial}$ ;
18: End

```

Algorithme de recouvrement : Retour en arrière utilisé par le protocole PBRP quand il est confronté au problème du maximum local (voir le chapitre 4)

Algorithm 12 : Backwards Algorithm

```
1: Begin
   - data_packet : The data packet
   - RH : The routing header of data_packet
   - partial_path : The partial path of RH
   - recovery_path : The recovery path of RH
   - V : The forwarding vehicle
2: if (recovery_path is empty) then
3:   Drop data_packet;
4:   return;
5: else
6:   if (V around recovery_path.front()) then
7:     recovery_path.pop();
8:     partial_path = compute partial path following algorithm 11
9:     RH.routing_mode = PRP_Mode;
10:    Switch to PRPRoutingAlgorithm;
11:  else
12:    next_hop = getClosestNeighboreTo(recovery_path.front());
13:    if (next_hop found) then
14:      forward data_packet to next_hop;
15:      return;
16:    else
17:      Drop data_packet;
18:      return;
19:    end if
20:  end if
21: end if
22: End
```

Algorithme du meilleur chemin en utilisant un service de localisation simple (voir chapitre 6)

Algorithm 13 : Algorithme du meilleur chemin

```

1: Begin
   -  $Con_{Thr}$  : Connectivity threshold
   -  $LS_i$  : Location Server  $i$ 
   -  $LC(e)$  : Link Connectivity of edge  $e$ 
   -  $Node_s$  : Source node,  $Node_d$  : Destination node
   -  $G(V,E)$  : Network graph,  $G_{Sub}(V_{Sub}, E_{Sub})$  : Subgraph of  $G$ 
   -  $REQUEST_{Route}(Node_s, Node_d)$  : Request route from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
   -  $REPLY_{Route}(Node_s, Node_d)$  : Reply route from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
   -  $Route_{s-to-d}$  : Route from  $Node_s$  to  $Node_d$ 
2:  $REQUEST_{Route}(Node_s, Node_d)$ ;
3:  $LS_i$  receives a  $REQUEST_{Route}$  message from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
4:  $LS_i$  checks if there is a route between these two nodes in the routing table;
5:  $Route_{(s-to-d)} = Routing_{table}(Node_d)$ ;
6: if ( $Route_{(s-to-d)} \neq NULL$ ) then
7:   Send  $REPLY_{Route}$  message to  $Node_s$ ;
8:   return  $Route_{(s-to-d)}$ ;
9: else
10:   $Con_{Thr} = 0$ ;
11:   $V_{Sub} = V$ ;
12:  Clear Buffer;
13:  repeat
14:     $E_{Sub} = \{e | e \in E \wedge LC(e) > Con_{thr}\}$ 
    /* Shortest path between  $Node_i$  and  $Node_d$  from the graph  $G_{Sub}$  */
15:     $Path = Shortest_{Path}(Node_i, Node_d, G_{Sub})$ ;
16:    if ( $Path \neq NULL$ ) then
17:      Put(Buffer, Path); /* Put the found path in buffer */
18:    end if
19:     $Con_{Thr} = Con_{Thr} + 0.05$ ;
20:  until ( $Path = NULL \vee Con_{Thr} \geq 1$ )
21:  if (Buffer not empty) then
22:     $Route_{(s-to-d)} = Buffer(Size(Buffer) - 1)$ ; /* Path with higher connectivity */
    /* Using Improved Greedy Forwarding */
23:    Send  $REPLY_{Route}$  message to  $Node_s$ ;
24:    Update( $Routing_{table}[Node_d]$ ); /* When the timeout of a route down, delete
    Entry of  $Node_d$  from routing table */
25:    Start $Timer(Node_d)$ ;
26:    return ;
27:  else
28:    return Path not found;
29:  end if
30: end if
31: End

```

Algorithme de calcul du meilleur chemin en utilisant un service de localisation coopératif (voir chapitre 7)

Algorithm 14 : Best path algorithm

```

1: Begin
   -  $Con_{Thr}$  : Connectivity threshold
   -  $LS_i$  : Location Server  $i$ 
   -  $LC(e)$  : Link Connectivity of edge  $e$ 
   -  $Node_s$  : Source node,  $Node_d$  : Destination node
   -  $G(V,E)$  : Network graph,  $G_{Sub}(V_{Sub}, E_{Sub})$  : Subgraph of  $G$ 
   -  $REQUEST_{Route}(Node_s, Node_d)$  : Request route from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
   -  $REPLY_{Route}(Node_s, Node_d)$  : Reply route from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
   -  $Route_{s-to-d}$  : Route from  $Node_s$  to  $Node_d$ 
2:  $REQUEST_{Route}(Node_s, Node_d)$ ;
3:  $LS_i$  receives a  $REQUEST_{Route}$  message from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
4:  $LS_i$  checks if there is a route between these two nodes in the routing table;
5:  $Route_{(s-to-d)} = Routing_{table}(Node_d)$ ;
6: if ( $Route_{(s-to-d)} \neq NULL$ ) then
7:   Send  $REPLY_{Route}$  message to  $Node_s$ ;
8:   return  $Route_{(s-to-d)}$ ;
9: else
10:   $Con_{Thr} = 0$ ;
11:   $V_{Sub} = V$ ;
12:  Clear Buffer;
13:  repeat
14:     $E_{Sub} = \{e | e \in E \wedge LC(e) > Con_{thr}\}$ 
    /* Shortest path between  $Node_i$  and  $Node_d$  from the graph  $G_{Sub}$  */
15:    Path =  $Shortest_{Path}(Node_i, Node_d, G_{Sub})$ ;
16:    if (Path  $\neq NULL$ ) then
17:      Put(Buffer, Path); /* Put the found path in buffer */
18:    end if
19:     $Con_{Thr} = Con_{Thr} + 0.05$ ;
20:  until (Path = NULL  $\vee$   $Con_{Thr} \geq 1$ )
21:  if (Buffer not empty) then
22:     $Route_{(s-to-d)} = Buffer(Size(Buffer) - 1)$ ; /* Path with higher connectivity */
    /* Using Improved Greedy Forwarding */
23:    Send  $REPLY_{Route}$  message to  $Node_s$ ;
24:    Update( $Routing_{table}[Node_d]$ ); /*When the timeout of a route down, delete Entry of  $Node_d$  from routing table */
25:    Start $_{Timer}(Node_d)$ ;
26:    return ;
27:  else
28:    return Path not found;
29:  end if
30: end if
31: End

```

Résumé

Les protocoles de routage géographique ont montré qu'ils sont plus adaptés aux réseaux très dynamiques et mobiles tels que les réseaux VANETs. Dans ce type de réseaux, la nécessité d'un service de localisation est devenue extrêmement importante pour que les protocoles géographiques puissent trouver la position d'un nœud cible en très peu de temps. Dans cette thèse, nous avons étudié les différentes solutions de services de localisation et de protocoles de routage géographique pour les VANETs.

La première partie de cette thèse consiste à améliorer, concevoir et développer de nouveaux protocoles de routage géographique pour le routage unicast dans les VANETs. Dans un premier temps, nous avons conçu un protocole de routage appelé GyPTAR pour les VANETs dans les environnements urbains. Ce protocole est basé sur la mesure avec précision des densités des routes de manière distribuée. Deuxièmement, nous avons proposé un protocole de routage appelé PBRP qui consiste en trois stratégies intégrées : diffusion des informations sur le trafic routier, algorithme de transmission partielle et stratégie de récupération en aval.

La deuxième partie propose des services de localisation pour le routage unicast dans les VANETs. Le premier service de localisation proposé est capable de trouver le chemin avec une connectivité supérieure dans un environnement urbain. Ce protocole est également capable de trouver le meilleur chemin ayant la plus grande une connectivité entre la source et la destination. Le deuxième service de localisation proposé consiste en un service de localisation coopératif qui est capable de trouver le chemin dont la densité est maximale pour garantir la connectivité des véhicules entre eux.

Les résultats des simulations ont montré les avantages de nos solutions en termes de surcoût de routage, de taux de livraison des paquets (PDR) et de délai de bout en bout.

Mots-clés: MANETs, VANETs, Protocoles de routage géographique, Services de localisation, Mobilité, Connectivité d'une route.

Abstract

Geographic routing protocols have shown that they are more suitable for very dynamic and mobile networks like VANET networks. Moreover, in this type of networks, the need of a location service has become extremely important for geographic protocols to find the position of a target node in a very short time. In this thesis, we studied the different solutions of location services and geographic routing protocols for VANETs.

The first part of this thesis is to improve, design and develop new geographic routing protocols for unicast routing in VANETs. First, we designed a new routing protocol called GyPTAR for VANETs in urban environments. This protocol is based on accurately measuring road densities in a distributed manner. Secondly, we proposed a routing protocol called PBRP, which consists of three integrated strategies: dissemination of traffic information, partial transmission algorithm and backward recovery strategy.

The second part of this thesis proposes location-based services for unicast routing in VANETs. The first proposed location-based service is able to find the path with high connectivity in an urban environment. This protocol is also able to find the best path with high connectivity between source and destination. The second proposed location-based service consists of a cooperative location-based service, able to find the path with maximum density to ensure the connectivity of vehicles between them.

The results of the simulations showed the benefits of our solutions in terms of overhead, packet delivery rate (PDR) and end-to-end delay.

Keywords: MANETs, VANETs, Geographical Routing Protocols, Location-based Services, Mobility, Road Connectivity.

مخلص

أظهرت بروتوكولات التوجيه الجغرافي أنها أكثر ملاءمة للشبكات الديناميكية والمعروفة بكثرة عناصرها مثل شبكات VANETs. بالإضافة إلى ذلك، في هذا النوع من الشبكات، أصبحت الحاجة إلى خدمة تحديد موقع مهمة للغاية بالنسبة للبروتوكولات الجغرافية للعثور على موضع المركبة المستهدفة في وقت قصير جداً. في هذه الرسالة، درسنا الحلول المختلفة لخدمات تحديد الموقع وبروتوكولات التوجيه الجغرافي لشبكات VANETs.

الجزء الأول من هذه الرسالة يهدف إلى تحسين وتصميم وتطوير بروتوكولات توجيه جديدة مركزة على تحديد الموقع لتوجيه البث الأحادي في شبكات VANETs. كخطوة أولى، قمنا بتصميم بروتوكول توجيه جديد يسمى "GyPTAR" لشبكات VANETs. في البيئة الحضرية، يعتمد هذا البروتوكول على قياس الكثافة المرورية على مستوى الطرق بدقة وبطريقة موزعة. ثانياً، اقترحنا بروتوكول توجيه يسمى "PBRP" يتكون من ثلاث استراتيجيات متكاملة: نشر معلومات عن حركة المرور وخوارزمية الإرسال الجزئي واستراتيجية الاسترداد.

في الجزء الثاني من هذه الأطروحة تطرقنا إلى إشكالية خدمات تحديد الموقع لتوجيه البث الأحادي في شبكات VANETs حيث اقترحنا حلين في هذا الإطار، الحل الأول يتمثل في اقتراح خدمة تحديد الموقع قادرة على العثور على الطريق ذو اتصال فائق بين المركبات في بيئة حضرية، هذا البروتوكول قادر أيضاً على العثور على أفضل مسار ذو اتصال فائق بين المصدر والوجهة. بينما المقترح الثاني يتمثل في خدمة تحديد الموقع يكون فيه تظافر عدة أطراف من أجل تحديد موقع المركبة المستهدفة حيث تستطيع خدمة تحديد الموقع المقترحة العثور على طريق من مركبة مصدر إلى مركبة مقصودة وهذا المسار هو الذي يمر بأكثر الطرق ذات كثافة عالية لضمان اتصال مستمر للمركبات فيما بينها.

أظهرت نتائج عمليات المحاكاة فوائد حلولنا من حيث التكلفة الإضافية للتوجيه ومعدل تسليم الحزمة (PDR) والوقت اللازم من طرف إلى طرف. **الكلمات المفتاحية:** VANETs, MANETs, بروتوكولات التوجيه الجغرافي, خدمات تحديد الموقع, التنقل, ربط الطريق.



An urban location service for vehicular area networks

Tawfiq Nebbou¹ | Mohamed Lehsaini¹ | Hacène Fouchal²  | Marwane Ayaida²

¹STIC Laboratory, Tlemcen University,
Tlemcen, Algeria

²CReSTIC, Université de Champagne-Ardenne,
Reims, France

Correspondence

Hacène Fouchal, CReSTIC, Université de
Champagne-Ardenne, 51100 Reims, France.
Email: hacene.fouchal@univ-reims.fr

Summary

Position-based routing, also called geographic routing, is widely recognised as an efficient routing approach for highly dynamic and mobile networks as vehicular ad hoc networks (VANETs). In this kind of networks, the high-speed mobility of vehicles causes rapid changes on the network topology measured with vehicles density, limited-time communication links, link failures, etc. In the meantime, the need of location service is a key issue; indeed, it will allow finding the position of a target node in order to reach it with a message. Some theoretical studies have proposed location services based on sharing nodes informations in different ways with hierarchy mechanism or with distribution mechanism or with centralization process. This paper proposes a location service deployed on RSUs (Road Side Units) for unicast routing over VANETs in urban environment. The proposed approach is able to measure the connectivity of a route. We propose then a new metric called Link Connectivity (LC) which measures this connectivity. Additionally, we have implemented our proposal using OMNET++ simulator and we have conducted extensive simulations with various scenarios to evaluate its scalability and robustness against frequent topology changes. As a conclusion, the proposed mechanism provides significant performance improvements in terms of packet delivery ratio, end-to-end delay, and overhead when it is compared to some other known proposals.

KEYWORDS

geographic routing protocols, location-based services, mobility, simulation, VANETs

1 | INTRODUCTION

A Mobile Ad hoc NETWORK (MANET) is composed of mobile nodes connected by wireless media without any centralized infrastructure. MANETs need efficient algorithms in order to improve the network performances in terms of connectivity, link scheduling, and routing. Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) are a subset of MANETs. VANETs differ from MANETs with their constrained mobility, ie, they move only on roads while MANETs could move without any restriction. For this reason, routing algorithms over VANETs have to be adapted. Indeed, the identification of an optimal path is usually based on metrics as route computation of shortest path between the source and the destination. In MANETs, optimal path identification is more complex, it should take into account path failures, desertion, obstruction, etc. In addition to that, in VANETs, the high level of node's mobility and the short-range communication cause frequent network topology changes. Then, messages cannot be easily delivered to destination nodes. Moreover, the mobility of the vehicular nodes are constrained by the roads topology. Contrary to Wireless Sensor Networks, the nodes are not so constrained in terms of energy, computing power, and location since the devices are carried by vehicles. Moreover, in urban areas and with the high mobility of vehicles, another feature is considered, ie, junctions between roads. Thereby, an efficient routing protocol could not ignore such issue.

Some other features of VANETs are briefly described. In these networks, communication among vehicles can be carried based on three different principles, ie, Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I), and hybrid architecture. Moreover, VANETs share some common features with MANETs, namely, in terms of self-organisation of the nodes. Furthermore, VANETs provided the required environment for Intelligent Transportation Systems (ITS) development in which VANETs applications were designed to improve traffic safety¹ and can be used for real-time data collection in traffic control and roads maintenance systems.^{2,3}

All these reasons make topology-based routing protocols designed for the MANETs unsuitable to the VANETs since the nodes in this kind of networks are highly mobile, which causes frequent changes in topology, and consequently, the probability of a successful reception of the delivered

messages will be very low. Moreover, in topology-based routing protocols, either in reactive or proactive mode, the links between the nodes are discovered and maintained through periodic Hello packet exchange. Thereby, to overtake this limit, we should minimise the sending period of Hello messages, which generates a high overhead.

However, in position-based routing protocols such as GSR,⁴ GPSR,⁵ or GyTAR,⁶ the nodes use the location of their neighbors and the location of the destination node to determine the neighbor that forwards the packet to destination. These protocols require information about the position of the nodes, which is possible and less expensive in VANETs since most vehicles are equipped with GPS (Global Positioning System) device in order to find its own geographic position; a location service is used to find the geographic position of the destination. In addition, the nodes do not need to store any route to the destination.

This paper proposes a location service for unicast routing over VANETs. This latter is specially suited for city environment wherein the high-speed mobility of vehicles may cause rapid changes in vehicles density because it is able to find not only the position of the target vehicle but also the best path with higher connectivity between the source vehicle and the target vehicle. Moreover, the best path is composed of a sequence of intersections obtained using mainly two inputs, ie, the city digital map and vehicular traffic of the network by applying Dijkstra's shortest path algorithm on a sub-network, which contains the vehicles with connectivity link upper than a given threshold.

This paper is organised as follows. Section 2 is dedicated to related works. Section 3 details our contribution, which is mainly a location service, which could be deployed in an urban area on RSUs. In Section 4, we give performance evaluation based on simulations achieved on the OMNET++ simulator. Section 5 concludes this study and gives some directions for future works.

2 | RELATED WORKS

In the literature, there are two ways to handle location services, ie, flooding-based technique, which is a reactive or a proactive service,⁷ or a synchronisation-based technique, which is based on a quorum method or a hierarchy method.⁸ The flooding proactive approach is simple to be implemented but generates a high overhead load since each node should send its position to the whole network, while the flooding reactive approach reduces the overhead but introduces higher latency, since, when a node needs to send a message, it needs first to have the response to its location request sent over the network.

The synchronisation-based technique aims to split the network into groups, which are not disjoint as in the quorum approach or which are hierarchical with disjunction as in Grid Location Service (GLS)⁹ or without disjunction as the Hierarchical Location Service (HLS)¹⁰ or its extension in the works of Ayaida et al.^{11,12}

Most of these approaches are hard to implement over real VANET deployments since they generate either higher overhead or higher latency. In this paper, we propose a simple approach to provide a location service in urban environments, which could be quickly implemented.

Routing protocols must choose some criteria to make routing decisions, for instance, the number of hops, latency, transmission power, bandwidth, etc. The topology-based routing protocols suffer from heavy discovery and maintenance phases, lack of scalability, and high mobility effects. Therefore, geographic routing protocols are suitable for large scale dynamic networks. The first routing protocol using the geographic information is the *Location-Aided Routing (LAR)*.¹³ This protocol used the geographic information in the route discovery. This latter is initiated in a *Request Zone*. If the request does not succeed, it initiates another request with a larger *Request Zone*, and the decision is made on a routing table.

One of the first geographic routing protocol is the *Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)*.⁵ It is a reactive protocol, which forwards the packet to the destination's nearest neighbor (Greedy Forwarding approach) until reaching the destination. Therefore, it scales better than the topology-based protocols, but it does still not consider the urban streets topology and the existence of obstacles to radio transmissions.

Another geographic routing protocol is the *Geographic Source Routing (GSR)*.⁴ It combines geographical information and urban topology (street awareness). The sender calculates the shortest path using Dijkstra's algorithm to the destination from a map location information. Then, it selects a sequence of intersections (anchor-based) that will be traversed by the data packet, thus forming the shortest path routing. To send messages from one intersection to another, it uses the greedy forwarding approach. The choice of intersections is fixed and does not consider the spatial and temporal traffic variations. Therefore, it increases the risk of choosing streets where the connectivity is not guaranteed and losing packets.

Like GSR, *Anchor-based Street and Traffic Aware Routing (A-STAR)*¹⁴ is anchor-based. However, it reflects streets characteristics. A connectivity rate is assigned to the roads depending on the capacity and the number of buses driving through them. This metric is used in addition to traditional metrics (distance, hops, and latency) when making routing decisions. As a consequence, the streets used by buses are not always the main roads where connectivity is ensured. The greedy approach does not consider either the speed and the direction for the next hop selection. This is why *improved Greedy Traffic Aware Routing (GyTAR)*⁶ was designed as a geographical routing protocol adapted to urban environments and managing the traffic conditions. In GyTAR, a sender selects dynamically an intersection (depending on the streets connectivity) through which a packet must be forwarded to reach the destination node. Between intersections, an improved greedy approach to forward packets is used. This latter is based on the neighbors' speeds and directions. GyTAR takes advantage of the urban roads characteristics, selects robust paths with high connectivity, and minimises the number of hops to reach an intersection. However, the main GyTAR drawbacks are that the connectivity information may be maintained by the infrastructures (RSSU: Road Side Service Unit), and it has weak performances in sparse networks.

*Geographic and Delay Tolerant Network with Navigation Assistance (GeoDTN+Nav)*¹⁵ proposes a solution to the last issue. It switches between DTN (Delay Tolerant Network) and non-DTN mode depending on the roads connectivity. In DTN mode, for a sparse network, the vehicle uses the

carry-and-forward approach. The packet will be stored until finding a possible forwarder. The main disadvantage of this protocol is that performances are affected (high latency) in a sparse network. This is due to the fact that the protocol tries constantly to switch between the DTN and non-DTN mode when forwarding packets.

*Vehicle-Assisted-Data Delivery (VADD)*¹⁶ is designed for routing data from a mobile vehicle to a fixed site in sparsely connected vehicular network. In VADD, each packet has three possible modes, namely, *Intersection*, *Straightway*, and *Destination*, where each mode is based on the location of the vehicle that carries the packet. VADD switches between these modes in order to forward data through the best packet-forwarding path. The *Intersection mode* is used to select next forwarding node (based on traffic direction and shortest path distance metrics) in the case where the forwarding node located around an intersection; for the forwarding between intersections, VADD switches to *Straightway mode* or to *Destination mode* if the distance between the forwarding node and destination is below a predefined threshold. The GPSR is used in *Straightway mode* and *Destination mode* to deliver the packet to the next intersection or to the final destination. The major weakness of VADD is the fact that it uses traffic statistics (eg, traffic density of each road), but this mechanism cannot permanently keep up with the dynamic topology changes of VANETs.

*Opportunistic routing based on Symmetrical Traffic Distribution (OSTD)*¹⁷ is an intersection-based routing protocol proposed for routing in urban scenarios. The authors of OSTD assume that the vehicles broadcast their driving path inside Hello messages and they are equipped with preloaded digital map that compresses the road topology, statistics of vehicular traffic density and average vehicles' speed on different times of the day. OSTD algorithm uses the driving path and vehicles distribution information to forward the packet through a suitable route. It has two main components, namely, *Intersection selection phase* and *Next hop selection phase*. In *Intersection selection phase*, the forwarding node gives a score to the neighboring intersections based on the vehicular density, the vehicular distribution, and the Euclidean distance to the destination in order to select the next intersection in which the packet should be forwarded towards it. The *Next hop selection phase* aims to determine the next hop by taking into account the driving path and the average speed of the neighboring vehicles. Like VADD, the major weakness of OSTD is the use of the traffic statistics. Indeed, this latter provides a static information, which cannot ensure the path connectivity especially in the dynamic nature of vehicular networks.

Furthermore, the common weakness between GyTAR,⁶ EGyTAR,¹⁸ VADD¹⁶ and OSTD¹⁷ is their principle of taking into consideration the traffic information about only the neighboring roads in the next-intersection selection process. This mechanism has a local vision and cannot ensure to have connectivity on the next roads of the selected intersection.

In order to undertake the previous weakness and to keep up with the dynamic nature of VANETs, we propose in this paper a new routing algorithm based on a *realistic location system* able to provide real traffic information of vehicular nodes in the networks and a *routing algorithm*, which computes a full-path providing higher connectivity. First ideas about this work have been presented in the works of Nebbou et al.^{19,20}

3 | CONTRIBUTION

In this paper, we propose a location service based on the cooperation of fixed RSUs (Road Side Units). We assume that a RSU is located on each junction, and every vehicle has a digital map to get the position of all RSUs. Indeed, each vehicle also has a knowledge of its geographic position by using its GPS, speed, and heading. This allows the vehicle to find the closest RSU in order to request a route to the destination.

3.1 | Location system description

A location system is a set of distributed and interconnected RSUs through the network, as shown in Figure 1.

Definition 1. $\text{Location_System} = \{LS_1, LS_2, \dots, LS_n\}$, where n is the number of RSUs and LS_i is a location server that running on RSU_i .

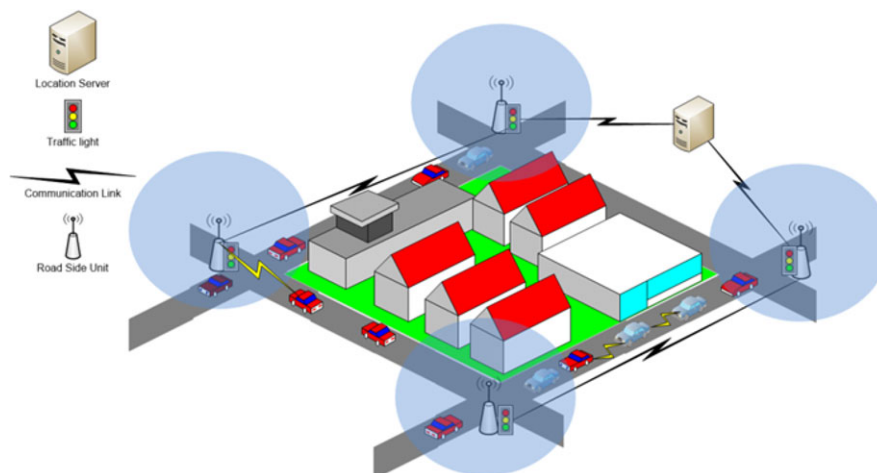


FIGURE 1 Location system communication network

Vehicle id	Position	Speed and direction	Road id	Time stamp

FIGURE 2 Table information format

Each RSU plays the role of a location server and maintains a part of all vehicles information. This information of vehicles will be periodically shared with all other location servers. The role of a location server is not only the maintenance of vehicle information but also the participation in finding the pertinent route between two nodes.

3.2 | Vehicle information maintenance

Each vehicle broadcasts beacon messages periodically. This process provides fresh information about the vehicle such as vehicle_id, position, speed, and direction. Accordingly, when the vehicle is in communication range of a RSU, this latter receives vehicle beacon and puts the recent information in this beacon (vehicle_id, position, speed, and direction) and the road_id of the current vehicle to its information table.

In fact, from a given vehicle position i , the location server is able to find the road id where the vehicle i is located.

The format of the information table is shown in Figure 2.

3.3 | Information table update

Each RSU acts as a location server and maintains a part of global vehicle information system. Moreover, each location server shares its information table with all other location servers by using RSU-to-RSU communication through wired links. Once the information table packet is received by a location server, it proceeds as illustrated in Algorithm 1. In this algorithm, the received information table will update the information of the node on the actual server. If the node is not found on the server table, it will be added to the server.

Algorithm 1 : Information Table Update

```

1: Begin
   -  $LS_i$  : Location server  $i$ 
   -  $L_t$  : Local information table
   -  $R_t$  : Received information table
2:  $LS_i$  receive  $R_t$ ;
3: for ( $i = 1$  to  $R_t.length$ ) do
4:    $found = false$ ;
5:   for ( $j = 1$  to  $L_t.length$ ) do
6:     if ( $R_t[i].vehicle\_id = L_t[j].vehicle\_id$ ) then
7:        $found = true$ ;
8:       if ( $R_t[i].time\_stamp > L_t[j].time\_stamp$ ) then
9:          $L_t[j] = R_t[i]$ ;
10:      end if
11:    end if
12:  end for
13:  if ( $notfound$ ) then
14:     $L_t[L_t.length + 1] = R_t[i]$ ;
15:  end if
16: end for
17: End

```

3.4 | Link connectivity metric

We define Link Connectivity (LC) as a metric which measures the connectivity of a given road. LC is calculated according to the position information of all vehicles over such a road. In order to define this metric and for the sake of simplicity, we will start with possible situations of two consecutive vehicles. Theoretically, we have three possible situations, as shown in Figure 3.

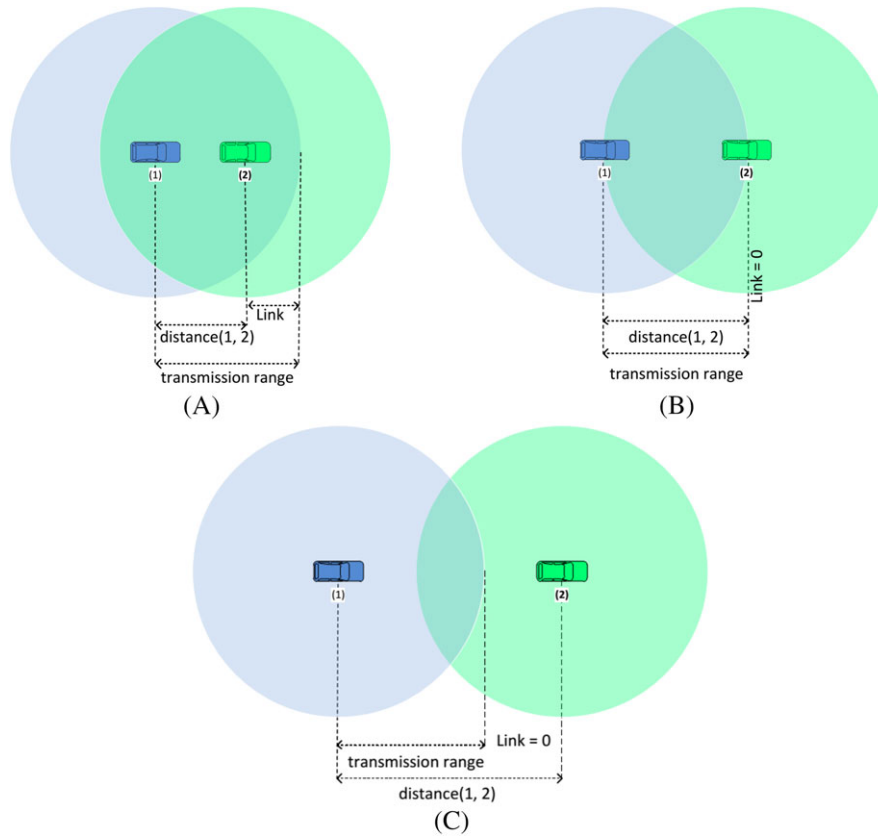


FIGURE 3 Links between vehicles. A, Situation 1: $\text{distance}(1,2) < \text{Transmission range}$; B, Situation 2: $\text{distance}(1,2) = \text{Transmission range}$; C, Situation 3: $\text{distance}(1,2) > \text{Transmission range}$

Depending on the possible situations of two consecutive vehicles, as shown in Figure 3, we can define a link between two vehicles as follows:

$$\text{Link}(v_i, v_j) = \begin{cases} R_{tr} - \text{dist}(v_i, v_j), & \text{if } \text{dist}(v_i, v_j) < R_{tr} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

The value of a link represents the remaining communication distance; accordingly, the Mean Link denoted ML between all vehicles in the same road can be expressed as follows:

$$ML_{\text{road}} = \frac{\text{Link}(RSU_n, v_1) + \sum_{i=1}^{N-1} \text{Link}(v_i, v_{i+1}) + \text{Link}(v_N, RSU_m)}{(N+1)} * \text{Link}_{\text{state}}(\text{road}) \quad (2)$$

$$\text{Link}_{\text{state}}(\text{road}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \exists i \in [0, N] / \text{Link}(v_i, v_{i+1}) = 0 \\ 1, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

where $\text{Link}_{\text{state}}(\text{road})$ returns 0 if there are two consecutive vehicles that are not connected (the distance between them is greater than the transmission range), or it returns 1 in the other cases (all vehicles are connected). This function is simply used to avoid the possibility to choose disconnected road in the routing process. N and v_i represent, respectively, the number of vehicles on a given road and the i th vehicle on such a road. RSU_n and RSU_m represent the RSUs that are at the road extremities (junctions).

Moreover, Link connectivity (LC) is a function related to a road in order to measure the link connectivity of a given road. Formally, LC can be computed as follows:

$$LC : E \rightarrow [0, 1[\quad LC_{\text{road}} = \frac{ML_{\text{road}}}{R_{tr}}, \quad (4)$$

where R_{tr} represents the transmission range. It is obvious that $LC \in [0, 1[$. According to Equations (1) and (2), ML_{road} can be expressed as follows:

$$ML_{\text{road}} = \frac{\sum_{i=0}^N (R_{tr} - \text{dist}(v_i, v_{i+1}))}{(N+1)}, \quad (5)$$

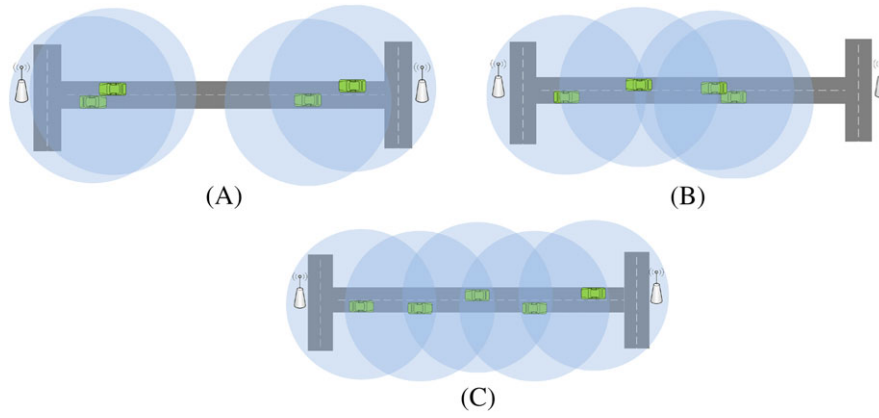


FIGURE 4 Situations to calculate LC_{road} . A, Disconnected vehicles; B, Disconnected vehicles and RSU; C, Connected vehicles and RSU

where v_0 and v_{N+1} represent, respectively, RSU_n and RSU_m , ie, the RSUs placed at the road extremities (the junctions). Equation (5) can be expressed as

$$(5) \Rightarrow ML_{road} = \frac{(N + 1)R_{tr} - \sum_{i=0}^N \text{dist}(v_i, v_{i+1})}{(N + 1)}$$

$$\sum_{i=0}^N \text{dist}(v_i, v_{i+1}) = L, \tag{6}$$

where L represents the road length, and according to Equations (5) and (6), ML_{road} can be expressed as follows:

$$ML_{road} = \frac{(N + 1)R_{tr} - L}{(N + 1)} = R_{tr} - \frac{L}{(N + 1)}. \tag{7}$$

We distinguish two situations to calculate LC_{road} , as shown in Figure 4:

- Case 1: $LC_{road} = 0$

In this case, there are at least two disconnected vehicles, or the first vehicle and the RSU at the first extremity of the road are not connected or the last vehicle is not connected to the RSU placed at the other extremity. Figures 4A and 4B illustrate these situations. Formally, LC_{road} can be expressed as follows:

$$LC_{road} = 0 \quad \text{if } \exists i \in [0, N] / \text{dist}(v_i, v_{i+1}) \geq R_{tr}.$$

- Case 2: $0 < LC_{road} < 1$

To prove these inequalities, we suppose that we have connectivity between all consecutive vehicles, as shown in Figure 4C.

- We prove that $LC_{road} > 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{dist}(v_0, v_1) < R_{tr} \\ + \\ \text{dist}(v_1, v_2) < R_{tr} \\ + \\ \dots\dots\dots \\ + \\ \text{dist}(v_N, v_{N+1}) < R_{tr}, \end{array} \right. \tag{8}$$

where v_0 and v_{N+1} represent the RSUs placed at the road extremities, as shown in Figure 4C.

According to Equation (6)

$$\begin{aligned} (8) \Rightarrow L < (N + 1)R_{tr} &\Rightarrow \frac{L}{(N + 1)} < R_{tr} \\ \Rightarrow R_{tr} - \frac{L}{(N + 1)} > 0 &\Rightarrow ML_{road} > 0 \Rightarrow \frac{ML_{road}}{R_{tr}} > 0. \end{aligned}$$

According to Equation (4)

$$LC_{road} > 0. \quad (9)$$

b) We prove that $LC_{road} < 1$

$$(N + 1) > 0 \quad \text{and} \quad L > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{L}{N + 1} > 0$$

$$\Rightarrow -\frac{L}{N + 1} < 0 \quad \Rightarrow \quad R_{tr} - \frac{L}{N + 1} < R_{tr} \Rightarrow ML_{road} < R_{tr}.$$

According to Equation (4)

$$LC_{road} < 1. \quad (10)$$

According to (9) and (10)

$$0 < LC_{road} < 1.$$

3.5 | Route selection based on ML

The proposed metric ML is useful to select an appropriate route from a source to a destination. The location server maintains vehicles information; it has information about all vehicles in the network. According to all these vehicles information, the location server can represent the network as a graph $G = (V, E)$ composed of a set V of vertices (junctions) and a set E of edges (roads). Each edge has as a weight the ML of its related road.

Algorithm 2 gives details about the selection of a route from $Node_s$ to $Node_d$. The algorithm starts with checking if a route between these two nodes has already been calculated and saved into the routing table. If this route is not available, we will only consider the subgraph of the system where each edge is weighted with a value greater than a required threshold (Figure 5). In other words, the threshold represents the lower link connectivity under which a road could not be selected in the routing process. In fact, if the threshold is too low, the road is supposed not appropriate to be a part of the derived route (its density is not enough to guarantee a correct message forwarding). When a route is found, it will be used to send a message from a source to a destination using a greedy mechanism. The core part of Algorithm 2 is the loop, and it is used to find the higher connectivity path; in the worst cases, the loop takes 20 iterations (depending on the connectivity threshold step and the connectivity max value). Theoretically, it is equal to $(1/0.05)$; since that vehicular nodes can be equipped with a higher computing power devices, the computation time of Algorithm 2 could be neglected. In addition, each calculated path will be stored in the routing table for a given timeout in order to avoid the duplicate computation.

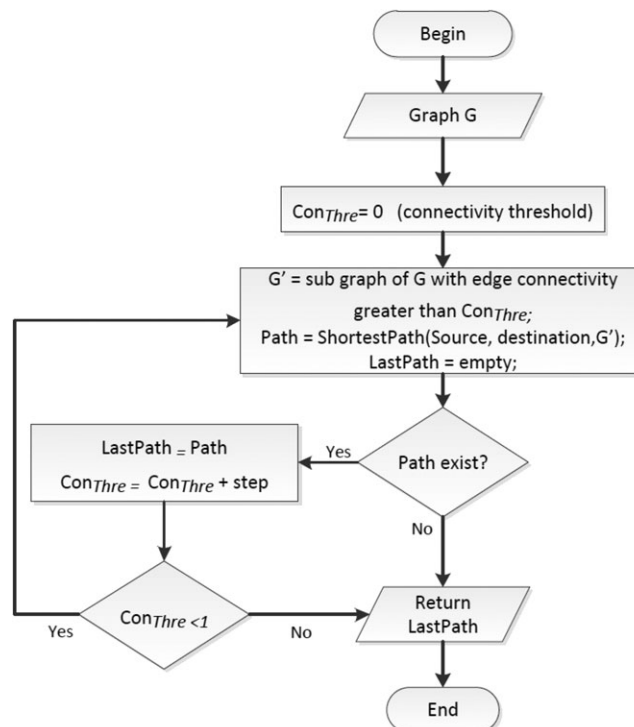


FIGURE 5 Flowchart of the proposed algorithm

Algorithm 2 : Best path algorithm

```

1: Begin
   -  $Con_{Thr}$ : Connectivity threshold
   -  $LS_i$ : Location Server  $i$ 
   -  $LC(e)$ : Link Connectivity of edge  $e$ 
   -  $Node_s$ : Source node
   -  $Node_d$ : Destination node
   -  $G(V,E)$ : Network graph
   -  $G_{Sub}(V_{Sub}, E_{Sub})$ : Subgraph of  $G$ 
   -  $REQUEST_{Route}(Node_s, Node_d)$ : Request route from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
   -  $REPLY_{Route}(Node_s, Node_d)$ : Reply route from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
   -  $Route_{s-to-d}$ : Route from  $Node_s$  to  $Node_d$ 
2:  $REQUEST_{Route}(Node_s, Node_d)$ ;
3:  $LS_i$  receives a  $REQUEST_{Route}$  message from  $Node_s$  to  $Node_d$ ;
4:  $LS_i$  checks if there is a route between these two nodes in the routing table;
5:  $Route_{(s-to-d)} = Routing_{table}(Node_d)$ ;
6: if ( $Route_{(s-to-d)} \neq NULL$ ) then
7:   Send  $REPLY_{Route}$  message to  $Node_s$ ;
8:   return  $Route_{(s-to-d)}$ ;
9: else
10:   $Con_{Thr} = 0$ ;
11:   $V_{Sub} = V$ ;
12:  Clear Buffer;
13:  repeat
14:     $E_{Sub} = \{e | e \in E \wedge LC(e) > Con_{thr}\}$ 
      /* Shortest path between  $Node_i$  and  $Node_d$  from the graph  $G_{Sub}$  */
15:    Path =  $Shortest_{Path}(Node_i, Node_d, G_{Sub})$ ;
16:    if (Path  $\neq$  NULL) then
17:      Put(Buffer, Path); /* Put the found path in buffer */
18:    end if
19:     $Con_{Thr} = Con_{Thr} + 0.05$ ;
20:  until (Path = NULL  $\vee$   $Con_{Thr} \geq 1$ )
21:  if (Buffer not empty) then
22:     $Route_{(s-to-d)} = Buffer(Size(Buffer)-1)$ ; /* Path with higher connectivity */
      /* Using Improved Greedy Forwarding */
23:    Send  $REPLY_{Route}$  message to  $Node_s$ ;
24:    Update( $Routing_{table}[Node_d]$ );
      /* When the timeout of a route down, delete Entry of  $Node_d$  from routing table */
25:    Start $_{Timer}(Node_d)$ ;
26:    return ;
27:  else
28:    return Path not found;
29:  end if
30: end if
31: End

```

4 | SIMULATIONS

In this section, we evaluate the performance of our proposal compared to the EGYTAR protocol¹⁸ based on the following metrics.

- Packet Delivery Ratio is the ratio of the total packets received by the destination compared to the total packets generated from the source.
- End-to-end delay represents the duration taken for a packet to travel from the source to the destination.
- Routing overhead is measured in terms of size of all control packets. For our proposal, the routing overhead takes into account the Route Request and the Route Replay packets while EGYTAR considers the CDP (Cell Density Packet) packets. We noticed that the beacon messages are not considered since we have the same size in both protocols; the information table packets introduced by the synchronization of vehicles

TABLE 1 Simulation parameters

Parameters	Values
Simulation Time	100 seconds
MAC protocol	802.11p
Network area	1500 × 1500 m ²
Transmission Range	250 meters
Mobility Model	Manhattan Mobility
Channel Capacity	3Mbps
Number of roads	24
Traffic Model	UDPBasicApp
Number of intersection	16
Packet Sending Interval	0.1-0.9 second
Number of vehicles	60-300
Start time	5 seconds
Vehicle speed	30-80 Km/h
Packet size	128 bytes

information are not considered, since the synchronisation between RSUs done by using RSU-to-RSU communications through wired link (theoretical throughput = 100 Mbps). Thus, this does not affect neither the throughput of the vehicular network nor causes congestion. In the worst case, which corresponds to the scenario when we have 300 vehicular nodes, 16 RSUs, and the synchronization interval between RSUs is equal to 1 second, the overhead generated by the synchronization is almost equal to 38.40 Kb.

Performances of each protocol are evaluated with three different contexts in order to illustrate the effects of the mobility, traffic density, and data density.

4.1 | Working environment

We have developed our proposed protocol over Omnet-5.0 simulator environment by using the internet stack models provided by INET-3.4.0 framework and Manhattan Grid mobility model generated by Bonnmotion-3.0.1 tools to describe the movement of nodes. We carry out all the simulations performances on a computer with Intel Core i5 64 bits processor and 4 Gb RAM. We run each simulation 10 times, and the performance results are averaged over these simulations. The remaining simulation parameters are summarised in the Table 1. Many simulations have been conducted, and the results are averaged over these simulations.

4.2 | Simulation results

In this subsection, we present the simulation results obtained from three different contexts and we discuss the performances of both protocols.

- **Context 1: Varying the number of nodes**

In this context, we have fixed the packet sending interval to 0.2 second (ie, after each 0.2 second, a packet is transmitted), the average velocity was fixed to 60 km/h and the number of nodes was varied from 60 nodes to 300 nodes.

1. **Packet Delivery Ratio:** Figure 6 shows the packet delivery ratio as a function of traffic density. As shown in Figure 6, our protocol achieves higher packet delivery ratio than EGYTAR¹⁸ protocol. Furthermore, the packet delivery ratio of EGYTAR increases slowly as the network density increases, which means that EGYTAR cannot take all the advantages of the network density. The reason behind this is that Junction Selection Mechanism in EGYTAR uses only the density of traffic between two consecutive intersections; this mechanism does not have an overview of all traffic density of the network, which may lead to choosing the path from source to the destination that is not the best according to the traffic density. Moreover, since our protocol scheme uses all traffic density of the network to calculate the shortest path from the source to the destination with a higher connectivity, this allows the packet to travel along the route from the source to the destination with the highest connectivity.
2. **End-to-end Delay:** Figure 7 illustrates the average end-to-end delay. Generally, there is not as much as difference observed between the two protocols. Our protocol scheme shows slightly higher delay. This may be due to the delay induced by route request and route replay. However, it uses higher density paths and delivers more packets than EGYTAR.
3. **Routing Overhead:** In Figure 8, we report the routing overhead measured in terms of the size of all control messages. Figure 8 clearly shows that our protocol scheme outperforms EGYTAR. This is due to the high number of control messages (CDP) in EGYTAR as described in the work of Bilal et al.¹⁸ The number of CDP packets increases as the number of nodes increases, which causes more routing overhead.

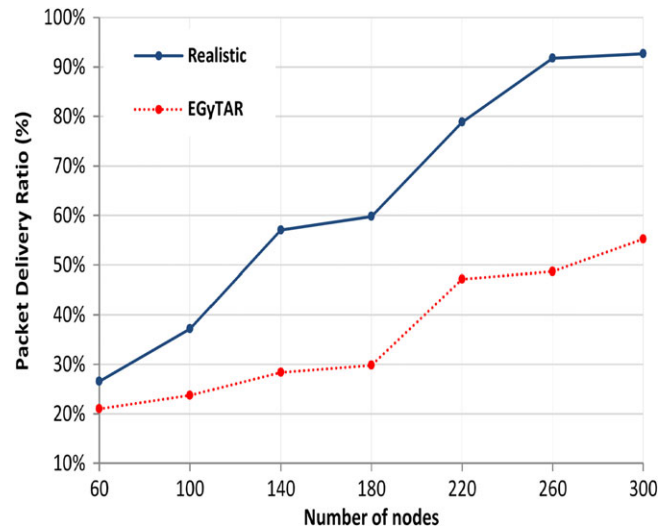


FIGURE 6 Packet delivery ratio according to the number of nodes

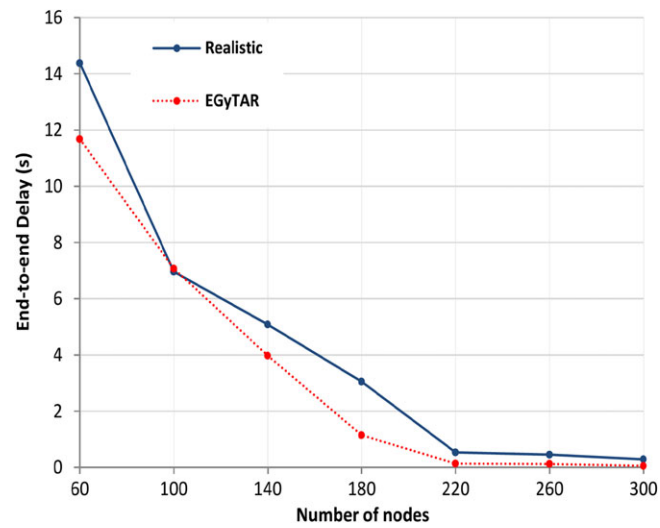


FIGURE 7 End-to-end delay according to the number of nodes

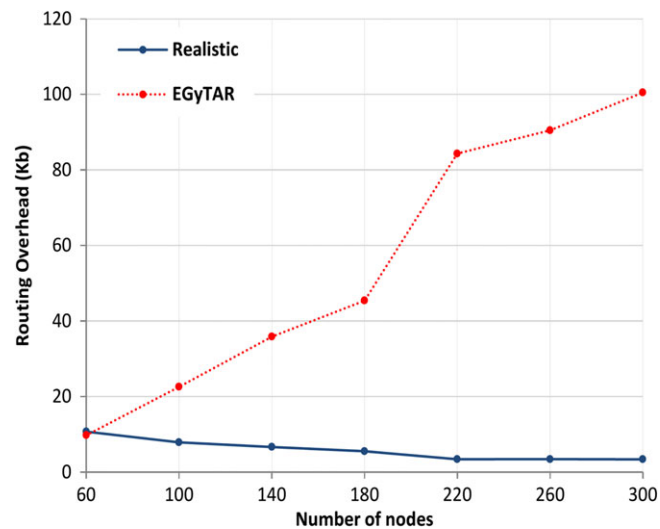


FIGURE 8 Routing overhead according to the number of nodes

In the contrast to our protocol, the routing overhead decreases as number of nodes increases. The reason behind this is that the number of route request messages decreases when the traffic density increases. This is due to the link quality between source node and RSU, which depends on the traffic density.

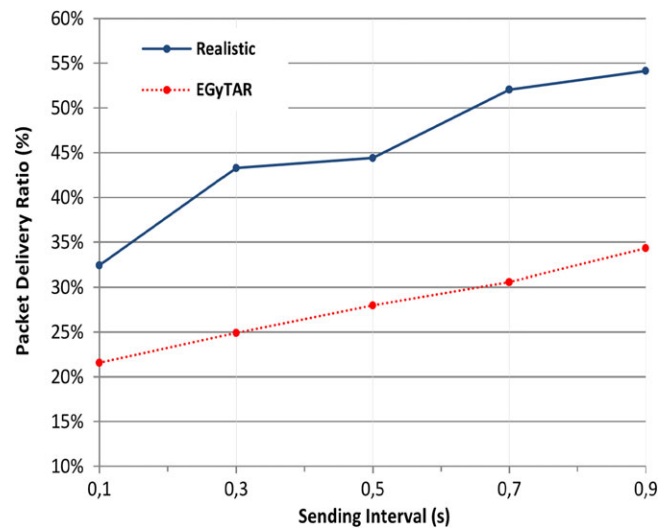


FIGURE 9 Packet delivery ratio according to the sending interval

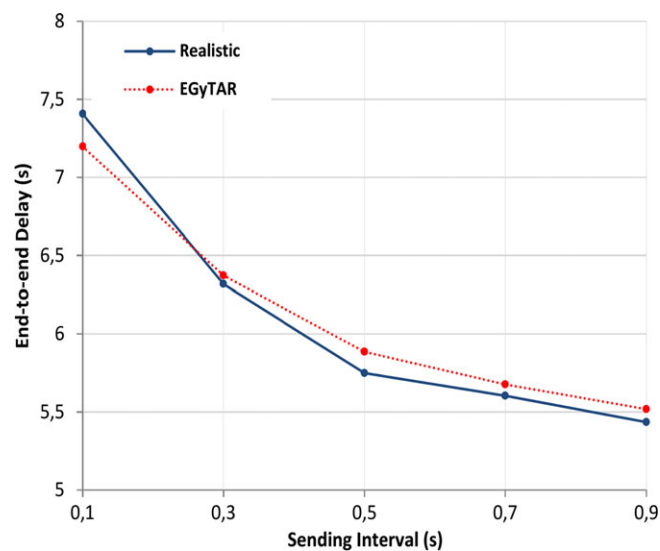


FIGURE 10 End-to-end delay according to the sending interval

- **Context 2: Varying the packet sending interval**

In this context, we have evaluated the packet delivery ratio, routing overhead, and end-to-end delay according to the packet sending interval in a network containing 100 nodes with average velocity (60 km/h), and we varied the time between two successive transmissions.

1. Packet Delivery Ratio: Figure 9 shows that the packet delivery ratio increases for both EGYTAR protocol and our proposal scheme when packet sending rate decreases. This is due to the fact that the higher throughput of network packets causes congestion, which increases the number of lost packets. The packet delivery ratio of our protocol is still greater than the one of EGYTAR. The reason behind this is that EGYTAR focuses only on the traffic density between two consecutive intersections.
2. End-to-end Delay: Figure 10 shows the end-to-end delay as a function of packet sending rate with fixed traffic density. As the packet sending rate increases, the end-to-end delay decreases for both protocols because more packets lead to congestion of network, which causes more delay. In term of delay, we can observe that our protocol has a slightly lower delay when the packet sending rate is greater than 0.3.
3. Routing Overhead: Figure 11 illustrates that the routing overhead of EGYTAR depends on the density of the traffic, and routing overhead of our protocol depends on the data density. Figure 11 shows that the routing overhead of EGYTAR is almost non-variable when fixing the number of nodes and varying the packet sending rate. In contrast, routing overhead of our protocol decreases as the packet sending rate increases. This performance makes our protocol better in term of routing overhead than EGYTAR protocol.

- **Context 3: Varying the velocity**

In the third context, we varied the average velocity from 30 km/h to 80 km/h, and we fixed the packet sending interval at 0.5 sec and the number of nodes at 150 nodes.

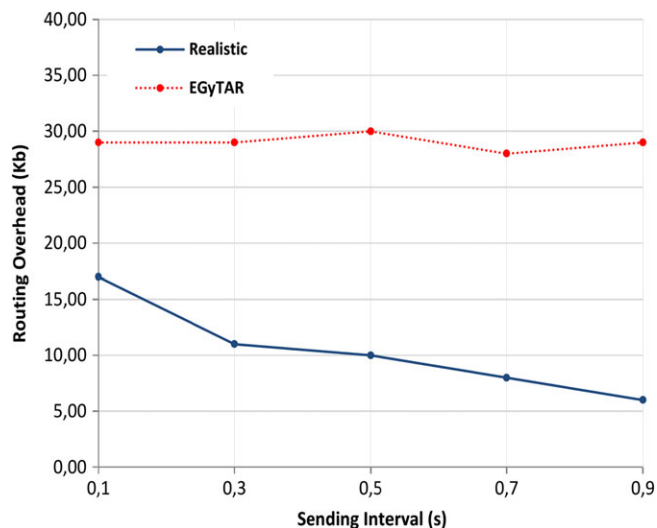


FIGURE 11 Routing overhead according to the sending interval

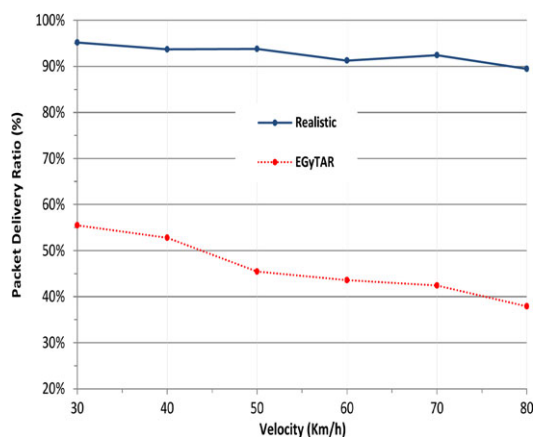


FIGURE 12 Packet delivery ratio according to the velocity

1. Packet Delivery Ratio: Figure 12 shows the packet delivery ratio as a function of the velocity. As shown in Figure 12, the packet delivery ratio of EGyTAR is much lower than our proposed protocol, ie, unlike our proposed protocol that has a large packet delivery ratio, which means EGyTAR cannot take all advantages of the network traffic information to alleviate the impact of mobility.
2. End-to-end Delay: Figure 13 illustrates the average end-to-end delay as a function of the velocity. As the velocity is changed from 30 km/h to 80 km/h does not show many significant changes between the two protocols. Moreover, in our protocol, we take into account the delay of location service; in contrary, EGyTAR does not use any location service.

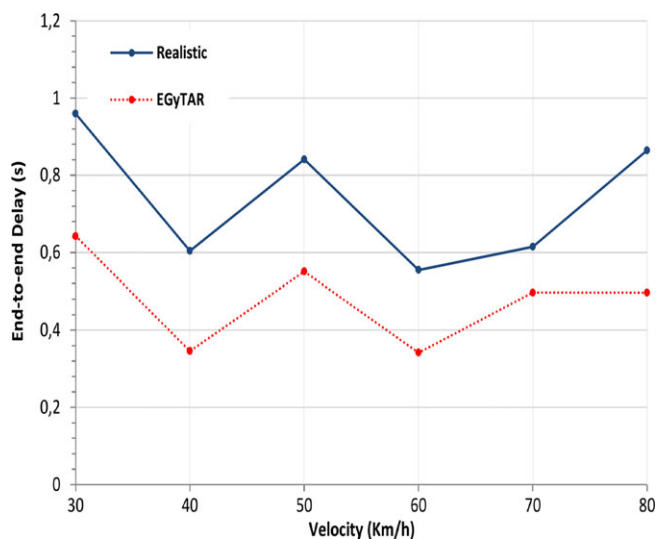


FIGURE 13 End-to-end delay according to the velocity

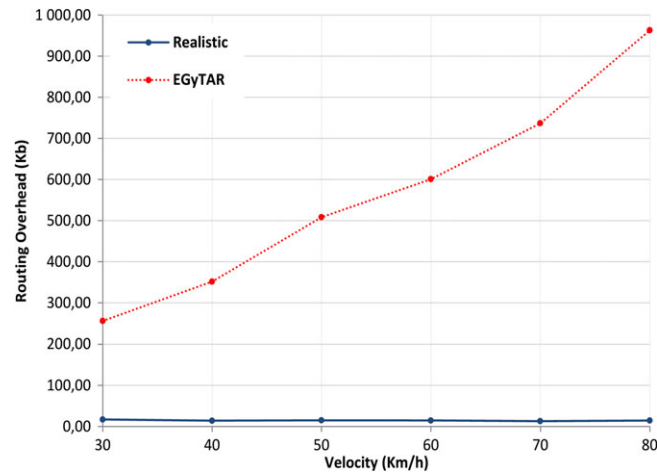


FIGURE 14 Routing overhead according to the velocity

3. Routing Overhead: Figure 14 shows the routing overhead according to the velocity. As shown in Figure 14, the velocity does not have strong effect on our proposed protocol. Since EGYTAR is very sensitive to the mobility, the routing overhead in EGYTAR is proportional to the velocity of vehicles that are moving in the network by the fact that in EGYTAR when the velocity increases more CDP messages are generated. The routing overhead of our protocol is lower than EGYTAR, which proves that our protocol is suitable for the high mobility of the vehicular ad hoc networks.

5 | CONCLUSION AND FUTURE WORKS

We have proposed a simple location service algorithm, which could be implemented in urban environments. This location service is deployed on RSUs for unicast routing. The proposed approach is able to measure the connectivity of a route. We have proposed a new metric called Link Connectivity (LC), which measures this connectivity.

We have implemented our proposal using OMNET++ simulator, and we have conducted extensive simulations with various scenarios to evaluate its scalability and robustness against frequent topology changes. We have observed that this location service provides interesting network performance in terms of packet delivery rate, latency, and overhead compared to EGYTAR protocol.

As future works, we intend to extend our simulations with larger networks in order to study better the scalability of our approach.

ORCID

Hacène Fouchal  <http://orcid.org/0000-0002-9584-3566>

REFERENCES

1. Zhang Y, Tan CC, Xu F, Han H, Q Li. VProof: lightweight privacy-preserving vehicle location proofs. *IEEE Trans Veh Technol*. 2015;64(1):378-385.
2. Du R, Chen C, Yang B, Lu N, Guan X, Shen X. Effective urban traffic monitoring by vehicular sensor networks. *IEEE Trans Veh Technol*. 2015;64(1):273-286.
3. Zeadally S, Hunt R, Chen Y-S, Irwin A, Hassan A. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges. *Telecommun Syst*. 2012;50(4):217-241.
4. Lochert C, Hartenstein H, Tian J, Fussler H, Hermann D, Mauve M. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In: Proceedings of the 2003 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003); 2003; Columbus, OH.
5. Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00); 2000; Boston, MA.
6. Jerbi M, Senouci SM, Rasheed T, Ghamri-Doudane Y. Towards efficient geographic routing in urban vehicular networks. *IEEE Trans Veh Technol*. 2009;58(9):5048-5059.
7. Boumerdassi S, Renault E. A flooding-based solution to improve location services in VANETS. Paper presented at: 2016 IEEE International Conference on Communications; 2016; Kuala Lumpur, Malaysia.
8. Stojmenovic I, Liu D, Jia X. A scalable quorum-based location service in ad hoc and sensor networks. *Int J Commun Netw Distrib Syst*. 2008;1(1):71-94.
9. Li J, Jannotti J, De Couto DSJ, Karger DR, Morris R. A scalable location service for geographic ad hoc routing. In: Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'00); 2000; Boston, MA.
10. Kieß W, Füßler H, Widmer J, Mauve M. Hierarchical location service for mobile ad-hoc networks. *SIGMOBILE Mob Comput Commun Rev*. 2004;8(4):47-58.
11. Ayaida M, Barhoumi M, Fouchal H, Ghamri-Doudane Y, Afilal L. HHLS: A hybrid routing technique for VANETS. Paper presented at: 2012 IEEE Global Communications Conference; 2012; Anaheim, CA.

12. Ayaida M, Barhoumi M, Fouchal H, Ghamri-Doudane Y, Afilal L. PHRHLS: A movement-prediction-based joint routing and hierarchical location service for VANETs. Paper presented at: 2013 IEEE International Conference on Communications; 2013; Budapest, Hungary.
13. Ko Y-B, Vaidya NH. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wirel Netw.* 2000;6(4):307-321.
14. Seet B-C, Liu G, Lee B-S, Foh C-H, Wong K-J, Lee K-K. A-STAR: A mobile ad hoc routing strategy for metropolis vehicular communications. Paper presented at: NETWORKING 2004; 2004; Athens, Greece.
15. Cheng P-C, Weng J-T, Tung L-C, Lee KC, Gerla M, Härri J. GeoDTN+Nav: A hybrid geographic and DTN routing with navigation assistance in urban vehicular networks. Paper presented at: First Annual Symposium on Vehicular Computing Systems (ISVCS'2008); 2008; Dublin, Ireland.
16. Zhao J, Cao G. VADD: vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans Veh Technol.* 2008;57(3):1910-1922.
17. Mirjazaee N, Moghim N. An opportunistic routing based on symmetrical traffic distribution in vehicular networks. *Comput Electr Eng.* 2015;47:1-12.
18. Bilal S, Madani S, Khan I. Enhanced junction selection mechanism for routing protocol in VANETs. *Int Arab J Inf Technol.* 2011;8(4):422-429.
19. Nebbou T, Fouchal H, Lehsaini M, Ayaida M. A cooperative location service for VANETs. Paper presented at: 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC); 2017; Heraklion, Greece.
20. Nebbou T, Fouchal H, Lehsaini M, Ayaida M. A realistic location service for VANETs. Paper presented at: Innovations for Community Services (I4CS 2017); 2017; Darmstadt, Germany.

How to cite this article: Nebbou T, Lehsaini M, Fouchal H, Ayaida M. An urban location service for vehicular area networks. *Concurrency Computat Pract Exper.* 2018;e4693. <https://doi.org/10.1002/cpe.4693>