

**Université Sidi Mohammed Ben Abdellah  
Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Fès  
Centre d'Etudes Doctorales  
"Sciences et Technologies"**

**Formation Doctorale : STIC**

**Discipline : Informatique**

**Spécialité : Informatique**

**Laboratoire : Laboratoire Informatique et Modélisation (LIM)**

**THESE DE DOCTORAT**

Présentée par

**S Q U A L L I H O U S S A I N I Z i n e b**

**Étude, Évaluation et Amélioration des Performances du  
Protocole de Routage GPSR dans les  
Réseaux Véhiculaires Ad-hoc**

Soutenue le 06/01/2018 devant le jury composé de :

<b>Pr. MEKNASSI Mohammed</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès</b>	<b>Président</b>
<b>Pr. BENABBOU Rachid</b>	<b>Faculté des Sciences et Techniques - Fès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. BERRADA Ismail</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. OUZZIF Mohamed</b>	<b>Ecole Supérieure de Technologie - Casablanca</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Pr. ALAOUI ZIDANI Khalid</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. LASFAR Abdel Ali</b>	<b>Ecole Supérieure de Technologie - Salé</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. OUATIK EL ALAOUI Saïd</b>	<b>Faculté des Sciences Dhar El Mahraz - Fès</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>Pr. OUMSIS Mohammed</b>	<b>Ecole Supérieure de Technologie - Salé</b>	<b>Co-Directeur de thèse</b>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فَدَلَّ عَلَىٰ نَدَامَتِهِمْ كَمَا تَوَلَّىٰ جَمَاعًا

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمَ

À mes parents,  
À mon mari,  
À ma famille,  
À tous ceux que j'aime,  
et à tous ceux qui m'aiment ...

# Remerciements

Le succès de cette thèse est dû aux contributions directes ou indirectes de nombreuses personnes que j'aimerais remercier en ce moment.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mes deux directeurs de thèse, professeur Said El Alaoui Ouatic et professeur Mohammed Oumsis, d'avoir accepté de diriger cette thèse, avec un remerciement particulier au professeur Oumsis qui a initié et orienté ce travail de thèse et qui a toujours trouvé le temps de guider et d'encourager mes activités de recherche chaque fois qu'il était nécessaire. Je saisis cette occasion pour mentionner que je suis redevable envers lui pour ses idées et suggestions pertinentes. J'apprécie beaucoup son dynamisme et ses compétences qui ont fait de cette thèse un succès.

Ensuite, j'aimerais remercier tous les membres du jury d'avoir pris de l'intérêt pour mon travail. Je remercie les rapporteurs, professeur Ben Abbou Rachid, professeur Berrada Ismail et professeur Ouzzif Mohamed, de la qualité de leurs remarques et de leurs critiques. Je les remercie de m'avoir soutenue par leur participation et discussion. Je remercie également professeur Meknassi Mohammed d'avoir accepté de présider le jury et d'avoir donné des remarques très constructifs. Je remercie aussi professeur Alaoui Zidani Khalid et professeur Lasfar Abdelali de s'intéresser à mon travail ainsi qu'à leur discussion très enrichissante.

Ma plus grande reconnaissance et gratitude va vers les personnes qui me sont les plus chers et qui ont eu un rôle capital de ma réussite. J'offre de tout mon cœur mes profonds remerciements à mes parents, qui m'ont motivé et encouragé sans cesse, qui m'ont toujours poussé en avant et qui attendaient avec impatience que je réussisse notre rêve partagé. C'est pour eux que je consacre ce travail.

Je voudrais également remercier mon mari, qui m'a soutenu et m'a aidé tout au long de mes études supérieures. Je le remercie d'avoir cru en moi et de m'avoir supporté et encouragé dans les moments les plus difficiles.

Je ne peux passer sous silence toute ma famille et mes proches qui m'ont encouragé. Je vous remercie mes frères Hamza, Mehdi et Otmane, mes beaux-parents, ma belle sœur Laila et sa petite famille, mes oncles, mes tantes et mes cousins en particulier Meryem, Salma, Alia, Youssef et Badr. Je remercie Dieu de vous avoir dans ma vie.

Je remercie mon amie et collègue Imane Zaimi pour son soutien et ses conseils utiles. Je la remercie pour son étroite collaboration, sa disponibilité et son professionnalisme. Je tiens à remercier également mes collègues Drissi Maroua, Abdel Ali Saidi et Raafat Al hanani pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils prodigués.

Enfin, mes remerciements vont à tous mes ami(e)s et bien sûr à toute personne que je n'ai pas cité ici et qui, a contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.



## دراسة وتقييم أداء بروتوكول التوجيه الجغرافي في الشبكات المخصصة للمركبات

**ملخص :** الشبكة المخصصة للمركبات (فانيت) هي شبكة موزعة وذاتية التكوين وتعتبر فئة فرعية من الشبكات المتنقلة المخصصة (مانيت) حيث العقد المتنقلة هي المركبات. قد تم اقتراح فانيت كمجال نشط ومفيد للبحث حيث يواجه هذا النوع من الشبكات العديد من التحديات. في الواقع، وبالنظر إلى القيود والخصائص الفريدة لفانيت، يشكل التوجيه بجودة خدمات جيدة تحديا كبيرا. إن بروتوكول التوجيه الجشع هو واحد من أكثر الآليات الواعدة المختارة لمواجهة هذا التحدي، ومع ذلك فإن فعاليته تعتمد كليا على معلومات الموقع الجغرافي للمركبات وتوصياتها. ومن ثم فإن رصد وإدارة معلومات التنقل الخاصة بالمركبات هي معايير هامة جدا يجب أخذها في الحسبان.

في هذه الأطروحة، نقترح حلين لمعالجة مشكلة التنقل وتحسين كفاءة التوجيه. نختار استخدام المعلومات الجغرافية باستعمال نظام تحديد المواقع العالمي للتنبؤ بموقعها في المستقبل القريب. الحل الأول لتحقيق هذا الهدف هو استخدام إستراتيجيتين مختلفتين للتنبؤ الحتمي تسمح للبروتوكول باتخاذ قرارات أكثر ذكاء لتوجيه المعلومات. بعد ذلك، لتحقيق نتائج أفضل مع تقليل النفقات العامة للشبكة وتكاليف التوجيه، اقترحنا حلا ثانيا يتركز على التنبؤ العشوائي باستخدام فلترة خوارزمية كالمان. ومن خلال هذا الاقتراح يمكن لكل مركبة تحديث بانتظام وبدقة عالية حركة المركبات المجاورة لها.

أجريت العديد من عمليات المحاكاة للتحقق من صحة الاستراتيجيات المقترحة وإثبات فعاليتها في تتبع تحركات المركبات المجاورة. وتظهر نتائج المحاكاة تحسنا كبيرا في أداء بروتوكولات التوجيه لدينا من حيث تكلفة التوجيه، النفقات العامة للشبكة، مدة التوجيه من طرف إلى طرف، معدل تسليم الرزم والإنتاجية العامة مقارنة ببروتوكولات التوجيه الأخرى.

**الكلمات الدالة :** الشبكة المخصصة للمركبات، فانيت، بروتوكول التوجيه الجغرافي، التنبؤ الحتمي، التنبؤ العشوائي، مرشح خوارزمية كالمان، جودة الخدمات.

---

## Study, Evaluation and Improvement of GPSR Routing Protocol Performance in Vehicular Ad-hoc Networks

**Abstract :** Vehicular ad-hoc Network (VANET) is a distributed and self-configuring network considered as a subclass of mobile ad-hoc networks (MANET) where mobile nodes are vehicles. VANET has been suggested as an active and powerful field for research as this type of environment encounters many challenges. Indeed, Regarding the constraints and unique characteristics of this network, routing with a very good quality of service (QoS) constitutes a major challenge. The Greedy Perimeter Stateless Routing protocol (GPSR) is one of the most promising mechanisms chosen to encounter this challenge. However, its effectiveness depends entirely on geographical position information of the nodes and their precisions. Therefore, the monitoring and management of vehicle's mobility information are very important parameters that must be taken into account.

In this thesis, we propose two solutions to handle the problem of mobility and improve the efficiency of GPSR routing. We opt to use the vehicle's GPS (Geographical Position System) information to predict its location in the near future. The first solution to achieve this aim is the use of two different deterministic prediction strategies that allow the GPSR routing protocol to make smarter routing decisions and to anticipate critical situations. Then, to attain better results, while minimizing the overhead and rout-costs, we proposed a second contribution based on a robust stochastic prediction approach using the Kalman filter algorithm. through this solution, each vehicle can update regularly and accurately the position of vehicles inside its neighborhood.

Extensive simulations have been carried out to validate and to prove the effectiveness of the proposed extensions of GPSR. The simulation results show a significant improvement in in the performance of our routing protocols in terms of routing cost, network overhead, end-to-end delays, packet delivery rate and throughput compared to other tested routing protocols.

**Keywords :** Vehicular ad-hoc Networks, VANET, Geographic routing protocol, GPSR, deterministic prediction, stochastic prediction, Kalman filter, QoS.

---



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>12</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>13</b>
<b>Liste des Abréviations</b>	<b>15</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>19</b>
Motivation . . . . .	19
Objectifs . . . . .	20
Méthodologie . . . . .	20
Organisation du rapport . . . . .	22
<b>1 État de l'art</b>	<b>25</b>
Introduction . . . . .	25
1.1 Réseaux sans fil . . . . .	26
1.1.1 Mode avec infrastructure . . . . .	27
1.1.2 Mode sans infrastructure ou ad-hoc . . . . .	27
1.2 MANET : réseaux mobiles ad-hoc . . . . .	28
1.3 VANET : réseaux véhiculaires ad-hoc . . . . .	29
1.3.1 Scénarios de communication dans VANET . . . . .	30
1.3.2 Standardisation et normalisation . . . . .	32
1.3.3 Applications et services des VANET . . . . .	33
1.3.4 Caractéristiques des VANET . . . . .	38
1.3.5 Défis et exigences des VANET . . . . .	39
1.4 Protocoles de routage dans les réseaux VANET . . . . .	41
1.5 Classification des protocoles de routage . . . . .	42
1.5.1 Stratégies de transmission . . . . .	42
1.5.2 Informations de routage . . . . .	45
Conclusion . . . . .	48
<b>2 Étude comparative des performances des protocoles de routage dans un environnement VANET</b>	<b>49</b>
Introduction . . . . .	49
2.1 Représentation des protocoles de routage . . . . .	50
2.1.1 Destination Sequence Distance Vector (DSDV) . . . . .	50
2.1.2 Optimized link state routing (OLSR) . . . . .	50
2.1.3 Fisheye state routing (FSR) . . . . .	51
2.1.4 Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) . . . . .	51
2.1.5 Dynamic source routing (DSR) . . . . .	52

2.1.6	Dynamic MANET on Demand (DYMO)	52
2.1.7	Zone Routing Protocol (ZRP)	53
2.1.8	Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)	53
2.2	Simulation des protocoles de routage dans VANET	55
2.3	Outils de simulation	55
2.3.1	Simulateur de mobilité	56
2.3.2	Simulateur de réseau	58
2.3.3	L'outil de simulation des VANET : NS-2/VanetMobiSim	58
2.4	Scénario de simulation	60
2.4.1	Critères d'évaluation	61
2.4.2	Résultats des simulations	62
	Conclusion	68
<b>3</b>	<b>GPSR : présentation, adaptation et optimisation</b>	<b>69</b>
	Introduction	69
3.1	Stratégies et politique de routage	69
3.1.1	Stratégie de transmission "Greedy"	70
3.1.2	Stratégie de transmission par périmètre	73
3.2	Stratégie "Beaconing"	74
3.3	Gestion du voisinage	74
3.4	Limites du protocole GPSR	75
3.5	Correction d'une anomalie identifiée lors de l'intégration du protocole GPSR	76
3.6	Optimisation du processus de recherche du meilleur prochain relais	77
3.7	Validation du paramétrage apporté à GPSR	79
3.7.1	Description de nos scénarios de simulation	79
3.7.2	Résultats des simulations	80
	Conclusion	82
<b>4</b>	<b>Amélioration du protocole de routage GPSR par application des approches de prédiction déterministe</b>	<b>83</b>
	Introduction	83
4.1	Motivation derrière l'utilisation de la prédiction de la mobilité	84
4.2	Prédiction de la mobilité	86
4.2.1	Approches de prédiction	86
4.2.2	Différentes techniques de prédiction	86
4.3	Travaux antérieurs	88
4.4	Stratégie de prédiction proactive appliquée au protocole GPSR : GPSR+Predict	90
4.4.1	Échange d'informations entre voisins par le biais des messages HELLO	91
4.5	Stratégie de prédiction réactive appliquée au protocole GPSR : GPSR+PR	93
4.5.1	Gestion de la mobilité par le biais des messages HELLO	93
4.5.2	Routage des paquets de données	93
4.6	Évaluation des performances	96

4.6.1	Scénario de simulation . . . . .	96
4.6.2	Critères d'évaluation . . . . .	97
4.6.3	Résultats des simulations . . . . .	98
4.6.4	Discussions . . . . .	103
	Conclusion . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Amélioration du protocole de routage GPSR par application d'une approche de prédiction stochastique</b>	<b>105</b>
	Introduction . . . . .	105
5.1	Travaux antérieurs . . . . .	106
5.2	Le principe du filtre de Kalman . . . . .	108
5.2.1	Modèle d'évolution et modèle d'observation . . . . .	108
5.2.2	Filtrage . . . . .	109
5.3	KF-GPSR : L'algorithme du filtre Kalman appliqué au protocole GPSR	112
5.3.1	Initialisation des vecteurs d'état des véhicules voisins . . . . .	114
5.3.2	Gestion de la mobilité des véhicules voisins . . . . .	114
5.3.3	Correction et mise à jour de l'estimation . . . . .	114
5.3.4	Impact de la période de diffusion des messages HELLO "BP" sur le protocole KF-GPSR . . . . .	116
5.4	BOD-KF-GPSR : l'approche des messages HELLO à la demande ap- pliqué au protocole KF-GPSR . . . . .	119
5.4.1	Rupture de lien . . . . .	119
5.4.2	Nombre de voisins . . . . .	120
5.5	Evaluation des performances . . . . .	123
5.5.1	Paramètres de simulation . . . . .	123
5.5.2	Résultats expérimentaux en considérant la QoS . . . . .	124
	Conclusion . . . . .	131
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>133</b>
	<b>Liste des Publications</b>	<b>137</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>139</b>



# Table des figures

1.1	Mode avec infrastructure . . . . .	27
1.2	Mode sans infrastructure (Réseau Mobile Ad-hoc) . . . . .	28
1.3	Exemple de transmission d'un message dans MANET . . . . .	28
1.4	Hierarchie des réseaux sans fil . . . . .	29
1.5	Véhicules intelligents . . . . .	29
1.6	Différentes architectures de communications dans les réseaux VANET : V2V, V2I et hybride . . . . .	31
1.7	Taxonomie des différentes applications dans les VANET . . . . .	34
1.8	Exemple des applications d'info-divertissement . . . . .	37
1.9	Exemple d'une carte routière . . . . .	39
1.10	Taxonomie des techniques de routage dans les VANET . . . . .	43
2.1	Architecture générale des simulateurs NS-2/VanetMobiSim . . . . .	59
2.2	Exemple de la topologie urbaine générée avec VanetMobiSim . . . . .	61
2.3	Taux de paquets délivrés en fonction de la densité . . . . .	63
2.4	Délai de bout en bout en fonction de la densité . . . . .	64
2.5	Débit en fonction de la densité . . . . .	64
2.6	Coût du routage en fonction de la densité . . . . .	65
2.7	Taux de paquets délivrés en fonction de la charge . . . . .	65
2.8	Délai de bout en bout en fonction de la charge . . . . .	66
2.9	Débit en fonction de la charge . . . . .	67
2.10	Coût du routage en fonction de la charge . . . . .	67
3.1	Alternance entre les deux stratégies de GPSR . . . . .	70
3.2	Stratégie de transmission "Greedy" . . . . .	71
3.3	Échec de la stratégie de transmission greedy . . . . .	73
3.4	Stratégie de la transmission par périmètre : la règle de la main droite . . . . .	73
3.5	Stratégie Beaconing . . . . .	74
3.6	Imprimés écran du terminal avant et après la correction de l'erreur des mises à jour des positions des véhicules . . . . .	78
3.7	Résultats des métriques de performance de chacun des protocoles GPSR et GPSR+ en fonction de la densité . . . . .	80
3.8	Taux des paquets délivrés avec succès en fonction de la charge du trafic de données . . . . .	81
4.1	Problème des directions opposées dans GPSR . . . . .	84
4.2	Problème des véhicules hors zone de transmission dans GPSR . . . . .	85
4.3	Problème des différentes vitesses des véhicules dans GPSR . . . . .	85
4.4	Exemple de prédiction de la mobilité d'un véhicule . . . . .	87

4.5	Stratégie de la transmission 'greedy' du protocole GPSR+Predict proposée. . . . .	92
4.6	Stratégie de la transmission 'greedy' du protocole GPSR+PR proposée. . . . .	95
4.7	Impact de la densité sur le taux de paquet délivrés respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier . . . . .	98
4.8	Impact de la densité sur le délai de bout en bout respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier . . . . .	99
4.9	Impact de la densité sur le débit respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier . . . . .	100
4.10	Impact de la densité sur le coût de routage respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier . . . . .	101
4.11	Impact de la densité sur la surcharge du réseau respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier . . . . .	102
5.1	Prédiction stochastique avec le modèle du filtre de Kalman . . . . .	111
5.2	Illustration du mécanisme du filtre de Kalman proposé pour la gestion de la mobilité des voisins dans le protocole KF-GPSR. . . . .	115
5.3	Impact de l'intervalle <i>BP</i> sur les performances des protocoles KF-GPSR, GPSR+Predict et GPSR . . . . .	118
5.4	Rupture des liens entre véhicules . . . . .	120
5.5	Processus d'envoi d'une demande d'échange de message HELLO et le processus de réponse . . . . .	121
5.6	Illustration du scénario autoroutier utilisé . . . . .	123
5.7	Impact de la densité sur NRL dans un scénario autoroutier pour respectivement des paquets de taille moyenne et des paquets volumineux . . . . .	125
5.8	Impact de la densité sur le délai de bout en bout dans un scénario autoroutier pour respectivement des paquets de taille moyenne et des paquets volumineux . . . . .	126
5.9	Impact de la densité sur le débit dans un scénario autoroutier pour respectivement des paquets de taille moyenne et des paquets volumineux . . . . .	128
5.10	Impact de la densité sur le coût du routage dans un scénario autoroutier pour respectivement des paquets de taille moyenne et des paquets volumineux . . . . .	129
5.11	Impact de la densité sur NRL dans un scénario autoroutier pour respectivement des paquets de taille moyenne et des paquets volumineux . . . . .	130

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison des propriétés entre MANET et VANET . . . . .	30
1.2	DSRC Service Channel Plan. source Report and Order, 2004 . . . . .	32
1.3	Normes régionales pour DSRC . . . . .	33
2.1	Avantages et inconvénients des différents protocoles de routage . . . . .	54
2.2	Différents paramètres utilisés dans la simulation . . . . .	60
3.1	Liste des voisins du véhicule source . . . . .	71
3.2	Format de la liste des voisins . . . . .	75
3.3	Paramètres généraux de la simulation . . . . .	79
4.1	Notations utilisées dans la prédiction déterministe . . . . .	87
4.2	Format des messages HELLO du protocole GPSR+Predict . . . . .	91
4.3	Format de la liste des voisins du protocole GPSR+Predict . . . . .	91
4.4	Format du message HELLO du protocole GPSR+PR . . . . .	93
4.5	Format de la liste des voisins du protocole GPSR+PR . . . . .	93
4.6	Paramètres généraux de la simulation . . . . .	96
4.7	Paramètres du modèle de mobilité urbain . . . . .	97
4.8	Paramètres du modèle de mobilité autoroutier . . . . .	97
5.1	Format des messages HELLO . . . . .	113
5.2	Format des listes de voisins . . . . .	113
5.3	Résumé des notations . . . . .	113
5.4	Paramètres utilisés dans la simulation . . . . .	117
5.5	Paramètres de simulation . . . . .	124



# Liste des Abréviations

A-AODV On-demand anycast routing in mobile ad-hoc networks

A-STAR Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing

AAPP Anycast Based AODV Routing Protocol for Peer to Peer

AGF Advanced Greedy Forwarding

AntHocNet Adaptive Nature-Inspired Algorithm for Routing in Mobile Ad-hoc Networks

AODV Ad-hoc On Demand Distance Vector

ARIB Association of Radio Industries and Businesses

ASTM American Society for Testing and Materials

C2C-CC Car 2 Car - Communication Consortium

CanuMobiSim CANU Mobility Simulation Environment

CAR Connectivity-Aware Routing

CBDRP Cluster Based Directional Routing Protocol

CBF Contention-Based Forwarding

CBRP Cluster Based Routing Protocol

CEN Committee for European Standardization

CGSR Cluster-head Gateway Switch Routing

CMGR Connectivity aware minimum delay geographic routing protocol

COIN Clustering for Open Ivc Network

CVIS Cooperative Vehicle Infrastructure Systems

DAR-RH Density aware routing using road hierarchy

DECA Density-aware reliable broadcasting protocol

DFIA-AODV Dynamic Frequency Interference Aware AODV

DG-CASTOR Direction-based Geocast Routing Protocol for Query Dissemination

DG-CastoR Direction-based GeoCast Routing

DSDV Destination Sequenced Distance Vector

DSR Dynamic Source Routing

DSRC Dedicated Short Range Communications

DTN Delay Tolerent Network  
DTSG Dynamic Time Dtable Geocast Routing  
DV-CAST Distributed vehicular broadcast protocol  
DYMO Dynamic MANET on Demand  
EED End to End Delay  
EHMRP Hybrid Location-based Ad-hoc Routing  
EODMRP Enhanced on Demand Multicast Routing Protocol  
FCC Federal Communications Commission  
FLUTE File Delivery over Unidirectional Transport  
FSR Fisheye State Routing  
Geodtn+nav Hybrid Geographic and DTN Routing with Navigation Assistance  
GeOpps Geographical Opportunistic Routing  
GPCR Greedy Perimeter Coordinator Routing  
GPRS General Packet Radio Service  
GPS Global Positioning System  
GPSR Greedy Perimeter Stateless Routing  
GPSR\_L Greedy Perimeter Stateless Routing with Lifetime  
GRANT Greedy Routing with Abstract Neighbor Table  
GSM Global System for Mobile  
GSR Geographic Source Routing  
GSR Global State Routing Protocol  
GyTAR Greedy Traffic Aware Routing  
GyTAR Improved Greedy Traffic Aware Routing protocol  
HHLS Hybrid Hierarchical Location Service  
HLAR Hybrid Location-based Ad-hoc Routing  
HyBR Hybrid Bio-inspired Bee Swarm routing protocol  
ICT Information and communication technology  
IDM Intelligent driving model  
IDM-CF Intelligent driving model with car Following  
IDM-IM Intelligent driving model with Intersection Management  
IDM-LC Intelligent driving model with Lane Changing

ITS Intelligent Transportations Systems

IVG Inter Vehicles Geocast Protocol

JARR Junction Based Adaptive Reactive Routing

LORA-CBF Location Routing Algorithm with Cluster Based Flooding

LOUVRE Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments

LQHR Link Quality-based Hybrid Routing Protocol

LTE Long Term Evolution

MDD Message Delivery Delay

MGM Multi-Generation Mixing

MMMR Multi-Metric Map aware routing protocol

MOBICAST MOBILE Juste In Time MultiCASTing

MOVE Motion Vector Routing Algorithm

NOW Network on Wheels

NRL Normalized routing Load

NS-2 Network Simulator 2

OLSR Optimized Link State Routing

P2P Peer to Peer

P2P Peer-to-Peer

PBR-DV Position-Based Routing with Distance-Vector recovery

PDR Packet Delivery Ratio

PGB Preferred group broadcast

POCA Position-aware reliable broadcasting protocol

QoS Quality of Services

RAR Roadside-Aided Routing

ROVER ROBust VEhicular Routing

RSU Road Side Units

SADV Static Node Assisted Adaptive Data Dissemination Protocol

SADV Static-node Assisted Adaptive Routing

SeVeCOM Secure Vehicle Communication

SGSR Secure Global State Routing Protocol

SKVR Scalable Knowledge-Based Routing

- STAR Source Tree Adaptive Routing Protocol
- STBR Street-topology based routing
- STI Systèmes Intelligents de Transport
- STRAW Street Random Waypoint
- TIC Technologies de l'Information et de la Communication
- TIGER Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing
- To-GO Topology- assist Geo-Opportunistic
- TORA Temporary Ordered Routing Algorithm
- UMTS Universal Mobile Telecommunications System
- V-TRADE Vector Based Tracing Detection
- V2V Vehicle to Vehicle
- VADD Vehicle-Assisted Data Delivery
- VADD Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad-hoc networks
- VANET Vehicular Ad-hoc Network
- VHRP Velocity Heading based Routing Protocol
- WAVE Wireless Ability in Vehicular Environments
- WIMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access
- WNPRP Wagon Next Point Routing Protocol
- WRP Wireless Routing Protocol
- ZOF Zone Of Forwarding
- ZOR Zone Of Relevance
- ZRP Zone Routing Protocol

# Introduction générale

## Motivation

Les systèmes de transport actuels jouent un rôle essentiel à la réalisation d'un développement durable dans un monde en évolution rapide. Cependant, dans ce domaine, il existe un large éventail de défis insolubles, tels que la pollution causée par les émissions de carbone, les accidents de la circulation, les embouteillages, l'épuisement des ressources et la difficulté d'assurer une expérience de conduite agréable. À cette fin, l'innovation, la créativité et l'amélioration des systèmes existants sont obligatoires et c'est désormais le devoir de toute la société, à savoir le gouvernement, les chercheurs et les acteurs de l'industrie de surmonter tous ces problèmes et d'améliorer davantage la mobilité dans les villes.

Les systèmes de transport intelligents (STI) visent donc à rendre l'utilisation des réseaux de transport plus sûr et plus efficace [1]. En effet, les STI utilisent les technologies de l'information et des communications (TIC) [2] pour accroître les connaissances en matière de gestion de la circulation et de la mobilité. L'approbation récente de l'union européenne concernant l'obligation d'intégrer le système d'appel d'urgence eCall sur toutes les voitures neuves à partir de 2018 [3] afin d'informer et d'avertir automatiquement les services de secours en cas d'accident sur la route est un exemple de l'engagement des pays envers un transport meilleur et plus sûr. D'autre part, les fabricants de voitures sont également conscients que la connectivité devient plus importante et ils s'attendent à ce que les véhicules connectés à internet atteignent les 20% d'ici 2020 [4]. Par conséquent, dans un avenir proche, les véhicules connectés entre eux seront la règle et non pas l'exception. Dans ce contexte, les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET) représentent un domaine prometteur pour les STI, et donc les applications basées sur cette technologie devraient fournir une excellente solution méthodique et éprouvée pour ces systèmes de transport intelligents, innovants, plus rentables et plus fiables. Ces applications couvrent de nombreux domaines, tels que les services de sécurité (par exemple, en évitant des collisions et en respectant la distance de sécurité) et les services d'information routière, de publicité et de divertissement pour les conducteurs et les passagers (par exemple, l'assistance au conducteur, le stationnement automatique et l'accès à Internet [5]).

De nos jours, certains fabricants comme Toyota [6], Mercedes [7] et BMW [8] travaillent déjà dans les communications véhicule-à-véhicule (V2V) pour partager surtout les informations sur la route (détectées par les véhicules) avec des fins de sécurité. Cependant, ils ne sont qu'en phase expérimentale et plusieurs problématiques doivent être résolues avant de pouvoir déployer de telles applications comme le problème de routage des données. En effet, les applications véhiculaires exigent dans la plupart des cas une fiabilité de communication, une qualité de service (QoS) satisfaisante, mais également dans certains cas des communications en temps réel. Or, ceci contraste beaucoup avec la nature très dynamique des réseaux véhiculaires.

Compte tenu de ce qui précède, cette thèse vise à contribuer à l'étude des protocoles de routage VANET pour améliorer le routage ainsi que la qualité de services pour une meilleure utilisation des différentes applications véhiculaires.

## Objectifs

La motivation principale de cette thèse est de contribuer au développement des communications entre véhicules. Un système de communication véhiculaire augmenterait la sécurité des routes et améliorerait la qualité de vie dans le monde grâce à une meilleure gestion des problèmes de mobilité.

Par conséquent, notre défi est la conception d'un mécanisme intelligent de routage pour les réseaux véhiculaires ad-hoc qui soit capable d'assurer l'acheminement de l'information entre tous les véhicules, réponde aux exigences des différentes applications et qui puisse être utilisé dans n'importe quel scénario (milieu urbain ou autoroute).

Nous estimons devoir résoudre certains problèmes de VANET et augmenter la QoS. Cependant, pour cela, il faut un environnement de simulation réaliste qui garantit des résultats fiables. Aussi, dans la conception des propositions, tous les aspects qui contribuent à accroître la performance des protocoles de routage et du réseau véhiculaire ont une énorme importance. En outre, une communication inter-véhiculaire nécessite des mécanismes d'acheminement simples et efficaces qui peuvent fonctionner avec des informations de topologie limitées et qui doivent s'adapter efficacement aux changements rapides du réseau.

Pour atteindre cet objectif général, nous avons travaillé sur des objectifs partiels qui ont été identifiés comme suit :

- Examiner les protocoles existants et les études de recherche dans le domaine des réseaux véhiculaires ad-hoc ;
- Évaluer par une étude comparative les performances des protocoles de routage ordinaires existants dans le domaine des réseaux véhiculaires ad-hoc afin d'extraire le meilleur protocole le plus adapté pour ce type d'environnement ;
- Optimiser et améliorer sur plusieurs étapes le protocole de routage géographique nommé Greedy Perimeter Stateless Routing protocol (GPSR) [9] dans des scénarios réels pour atteindre des performances élevées du réseau et pour augmenter le taux de livraison des paquets tout en minimisant la charge et le coût de routage.

## Méthodologie

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

La première étape est le choix du protocole de routage le plus approprié. Pour cela, nous nous sommes investie dans la recherche du protocole de routage le plus pertinent et le plus prometteur dans les réseaux véhiculaires ad-hoc. En effet, nous

---

avons commencé par étudier les stratégies de routage adoptées par plusieurs protocoles de routage et nous les avons classifiés. Dans un second temps, nous avons décrit brièvement le principe de fonctionnement de huit différents protocoles de routage et nous les avons intégré au sein du simulateur de réseau NS-2.33. Grâce à ce dernier et au générateur de mobilité VanetMobiSim nous avons évalué par une étude comparative les performances de ces protocoles afin d'arriver à élire le meilleur parmi eux en termes de QoS et de rendement.

Nos résultats, appuyés par les études réalisées des autres chercheurs, ont attesté que les protocoles de routage géographique sont les plus appropriés et les plus adaptés pour les réseaux véhiculaires fortement dynamiques. En revanche, dans le cadre de notre étude, nous avons accordé une attention particulière au protocole GPSR puisqu'il est un exemple typique des protocoles géographiques.

Pour une meilleure amélioration du protocole GPSR, il était indispensable de bien cerner ce protocole, comprendre son mécanisme dans différentes situations et ses limites.

Le protocole GPSR utilise deux principales stratégies : La première est appelée stratégie de routage gourmand "greedy forwarding strategy". Elle est utilisée par défaut et consiste à transmettre les paquets de données au nœud voisin le plus proche de la destination finale. La seconde stratégie est la stratégie de routage par périmètre "perimeter forwarding strategy" qui n'est invoquée que lorsque le premier processus gourmand échoue.

L'avantage le plus important du protocole GPSR est qu'il élimine certaines limitations du routage basé sur la topologie en utilisant des informations sur les positions géographiques des véhicules à l'aide d'un système de positionnement comme GPS. Néanmoins, nous avons constaté que GPSR a une certaine défaillance au niveau de la gestion de la mobilité des véhicules. Effectivement, le protocole GPSR utilise les messages hello "hello packets" envoyés périodiquement par les nœuds à leur voisinage pour assurer la connectivité et maintenir à jour les informations circulants dans le réseau. L'envoi périodique de ces messages contribue à la diffusion des informations dans tout le réseau en utilisant la méthode d'un seul saut (one-hop) ce qui minimise la surcharge du réseau, mais, en même temps qui engendre plusieurs inconvénients, notamment, les inexactitudes des informations sur les positions des nœuds, surtout dans un réseau comme VANET, ce qui conduit facilement à de mauvaises décisions de routage.

Puisque le mécanisme de routage du protocole GPSR dépend entièrement des informations de positions des nœuds, et puisque le besoin de gestion et de suivi de ces informations dans un environnement très dynamique dépasse les capacités de GPSR, alors, l'utilisation de la prédiction de la mobilité dans un tel environnement présente des avantages potentiels. Assurément, nous nous sommes basés dans nos contributions sur les positions des nœuds et leurs précisions en utilisant différentes techniques de prédiction, à savoir, la prédiction déterministe et la prédiction stochastique.

Nous avons proposé comme première contribution une prédiction déterministe proactive et une autre réactive. En ce qui concerne la prédiction proactive. L'idée

est de prédire les futures positions de tous les véhicules circulant dans le réseau sans qu'il n'y est un envoi de paquets. Grâce à cette technique, chaque véhicule aura, avant que la demande de routage ne soit effectuée, un aperçu anticipé sur le futur état de son voisinage. Ainsi, il pourra prendre les décisions plus intelligentes et qui conviendront et pour le présent et pour le futur proche.

Comme suite de la première proposition, nous avons présenté une deuxième technique de prédiction qui est la prédiction réactive. Cette technique n'est appliquée qu'au moment du routage, cela veut dire que la prédiction des futures positions n'est exécutée que lorsqu'un nœud veut transmettre un paquet, et n'est appliquée que sur les nœuds concernés, à savoir, le nœud qui possède le paquet, ses nœuds appartenant à sa portée radio et la destination finale. En appliquant cette technique, chaque véhicule aura au besoin un aperçu anticipé du futur état de son voisinage et par conséquent il pourra aussi prendre des décisions de routage intelligentes.

La plupart des propositions, comme dans [10, 11, 12], utilisent la prédiction de la mobilité, bien qu'elles soient basées sur le modèle de prédiction déterministe. Ce dernier représente une méthode rapide et simple, mais ne fournit pas des mesures parfaites en raison du bruit et des interférences qui peuvent survenir, ce qui le rend très limité par rapport aux autres méthodes existantes.

De ce fait, l'idée de notre deuxième contribution est d'appliquer une méthode de prédiction plus sophistiquée et plus robuste qui sera apte de garantir des prédictions plus proches à la réalité. À cette fin, nous avons choisi d'intégrer et d'adapter l'algorithme du filtre de Kalman (qui est plus précis dans la prevision) dans le protocole de routage GPSR dans le but d'utiliser sa puissance et sa robustesse pour prédire avec une grande précision des futurs emplacements des véhicules. Le filtre de Kalman de base repose sur deux phases essentielles : la prédiction et la correction (la mise à jour). Ces deux phases sont complémentaires pour avoir une estimation très proche de la réalité tout en maintenant à jour les informations sur les positions des véhicules, ce qui aidera à prendre de meilleures décisions de routage et par conséquent augmentera les performances du protocole GPSR. Un autre mécanisme que nous avons mis en place garantit que, lorsqu'un véhicule se juge en manque de voisins, il diffuse dans son voisinage une demande d'échange d'information, mettant à jour ainsi sa liste des voisins. Les résultats de simulation obtenus attestent d'une amélioration remarquable des performances et de la qualité de service tout en réduisant la surcharge du réseau et le coût de routage.

## Organisation du rapport

Cette thèse est organisée de la manière suivante : L'introduction a permis d'illustrer la problématique du routage et de la qualité de service dans des réseaux véhiculaires, d'expliquer les motivations qui ont poussé à la conception de nouvelles approches ainsi de présenter la méthodologie suivie pour la réalisation des objectifs.

Le chapitre I introduit les réseaux ad-hoc (MANET et VANET) et présente l'état d'art des VANET tout en ciblant les normes utilisées, les domaines d'application,

les caractéristiques et les défis liés à ce type de réseau. Aussi, dans le même chapitre on trouve une classification des différentes techniques de routage utilisées par les protocoles de routage.

Dans le chapitre II, nous avons présenté le principe de fonctionnement de huit protocoles de routage principalement utilisés dans les réseaux MANET, à savoir : DSDV, OLSR, FSR, AODV, DSR, DYMO, ZRP et GPSR. Nous avons confronté par simulations dans des scénarios VANET, à l'aide du simulateur réseau NS-2 et le générateur de mobilité VanetMobiSim, les performances de ces huit protocoles de routage. Nous avons évalué l'impact de la densité des véhicules et de la charge du trafic sur le comportement de ces protocoles. Notre analyse s'est basée sur les métriques de performance suivantes : le coût de routage, le taux de paquets délivrés, le délai et le débit et le taux de surcharge du réseau.

Le chapitre III se concentre sur le protocole GPSR, son intégration et son bon fonctionnement. En effet, nous avons en premier lieu présenté GPSR et sa politique de routage, après, nous avons identifié ses limites et les lacunes rencontrées en phase de simulation. Par la suite, nous avons proposé une solution pour corriger une anomalie identifiée lors de l'intégration du protocole GPSR, ainsi qu'une optimisation de ce protocole. Enfin, Les solutions apportées sont analysées et validées par une étude expérimentale sous NS-2.

Dans le chapitre IV, nous avons présenté la première contribution de cette thèse. nous avons décrit le principe et le fonctionnement de ses deux extensions (GPSR+Predict et GPSR+RP) que nous avons implémenté sur NS-2. Les résultats de simulation ont été comparés avec ceux du GPSR standard.

Dans le chapitre V, la deuxième contribution est présentée. nous avons détaillé le principe, le fonctionnement et l'implémentation de notre amélioration BOD-KF-GPSR sur NS2. nous avons aussi présenté les résultats de comparaison avec plusieurs protocoles : GPSR standard, GPSR+Predict et d'autres protocoles de routage ordinaires basé sur la topologie (AODV, DSR et ZRP).

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale synthétisant les apports proposés. Une extension de notre travail est présentée dans les perspectives.



# État de l'art

---

## Introduction

Depuis plus d'une dizaine d'années les réseaux sans fil sont devenus indispensables dans la vie quotidienne de plusieurs organisations, notamment les entreprises, les particuliers, l'industrie et bien d'autres. Ces réseaux représentent aujourd'hui une des briques de base sur lesquelles vont se fonder les systèmes intelligents pour constituer une des technologies de l'avenir. En effet, de divers composants tels que les ordinateurs, les capteurs, les puces, les réseaux numériques et autres systèmes électroniques participe actuellement à la démocratisation de l'informatique. En d'autres termes, la fusion du monde virtuel et du monde réel est établie afin de créer des environnements "intelligents" offrant à leurs usagers une multitude de services hautement disponibles, à savoir les STI, les maisons intelligentes, l'aide la surveillance médicale, etc.

Le système de transport intelligent est un exemple typique de ces applications. Parmi les principales composantes que connaît un STI, on peut souligner la communication inter-véhiculaire. Effectivement, les communications impliquant des véhicules joueront un rôle primordial dans les années à venir, que ce soit pour communiquer entre véhicules ou encore pour communiquer avec les infrastructures existantes. Ainsi, les voitures de demain ne se contenteront plus de détecter les dangers grâce à des radars ou des caméras installés sur les routes, mais elles seront capables de recevoir des messages d'alerte envoyés par les autres usagers ou par l'intermédiaire des infrastructures (panneaux, portiques, etc.) et les retransmettre à nouveau à d'autres véhicules.

Grace à cette capacité de communication, de nombreuses applications véhiculaires innovantes sont envisageables. Elles vont de la sécurité à la régulation du trafic en passant par la transmission d'information au conducteur. On peut même imaginer des applications de jeux en réseaux entre les passagers des véhicules à l'instar des jeux en réseaux sur Internet. Au regard de ces potentialités, les réseaux véhiculaires représentent un nouveau marché porteur et prometteur en termes de déploiement d'infrastructures réseau et de fourniture des services associés. Cependant, ils ne sont qu'en phase expérimentale et plusieurs problématiques doivent être résolues avant de pouvoir déployer de telles applications. En effet, les applications des communications véhiculaires exigent dans la plupart des cas une fiabilité, une bonne qualité de service et également dans certains cas des communications en temps réel. Or, ceci contraste avec la nature fortement dynamique des réseaux véhiculaires (changement de topologie, distance variable entre véhicules, perte fréquente de connectivité, non

fiabilité des communications, délai, etc.).

Dans ce chapitre nous présentons d'abord et de manière générale les réseaux sans fil et leurs descendants, à savoir les réseaux mobiles ad-hoc (MANET) et les réseaux véhiculaires ad-hoc (VANET). Par la suite, nous nous focalisons particulièrement sur les VANET tout en présentant ces différents scénarios de communication, les normes et les standards utilisées. Dans le même contexte nous exposons les différentes possibilités d'applications ainsi que les caractéristiques particulières, les défis et les exigences des VANET. D'autre part, nous avons classifié les protocoles de routage selon leurs modes de fonctionnement. Le principal objectif est de donner une étude synthétique des différentes approches de routages existantes.

## 1.1 Réseaux sans fil

L'investigation dans le domaine des réseaux sans fil n'est pas récente. En fait, il y a longtemps que la communication sans fil a commencé avec des signaux optiques comme le feu et la fumée, mais aussi avec le son comme le langage sifflé et les tambours [13]. Le premier réseau de télécommunications sans fil de grande envergure est apparu en 1794 avec le télégraphe Chappe utilisant un moyen de communication optique par sémaphore et étendant le réseau sur des centaines de kilomètres [14]. Cependant en 1895, avec les expériences de Guglielmo Marconi, la transmission sans fil à l'aide d'ondes électromagnétiques fait son apparition et devient le meilleur moyen de communication intercontinentale via le télégraphe et le langage Morse [15, 16]. Rapidement, les communications sans fil se sont développées dans de nombreux domaines comme l'aéronautique, les voitures, etc. Entre temps, le réseau téléphonique filaire s'est répandu dans le monde et, à partir des années 80, les téléphones mobiles commencèrent à se diffuser grâce au déploiement des réseaux cellulaires ainsi l'idée de pouvoir téléphoner à n'importe qui et partout dans le monde est devenue possible. En outre, plus tard après, avec l'augmentation de l'utilisation des ordinateurs personnels mobiles, les réseaux informatiques sans fil ont fait leur apparition dont le but de relier les ordinateurs dans un espace réduit (pièce, bâtiment). Rapidement, les communications sans fil ont connu un grand succès au cours des deux dernières décennies et le besoin d'être connecté à internet partout est devenu une problématique importante des réseaux informatiques sans-fil.

La transmission séparée de la voix et des données a stimulé le développement et le déploiement des différentes technologies dans l'univers des télécommunications (Bluetooth [17], ZigBee [18], Wi-Fi [19], WIMAX [20], GSM [21], GPRS [22], UMTS [23], LTE [24], etc.). Ces technologies ont été utilisées pour l'intégration des applications audiovisuels (multimédias) ces dernières années, ce qui explique la dominance des terminaux sans fil mobiles sur les terminaux fixes. Les réseaux sans fil peuvent être classés en deux principales classes :

- Réseau sans fil avec infrastructure (comme le GSM).
- Réseau sans fil sans infrastructure (comme les réseaux Ad-hoc).

### 1.1.1 Mode avec infrastructure

En mode infrastructure (Figure 1.1), un nœud mobile communique uniquement avec un nœud fixe, appelé point d'accès. Le point d'accès peut être relié à un réseau fixe et donc à Internet, mais il peut jouer aussi le rôle de concentrateur (Hub), permettant ainsi à tous les nœuds mobiles connectés à ce point d'accès de communiquer entre eux. L'avantage de ce mode est de pouvoir contrôler l'accès au réseau, car les nœuds mobiles sont obligés de passer par le point d'accès. En revanche, le seul moyen d'étendre le réseau est d'ajouter d'autres points d'accès.

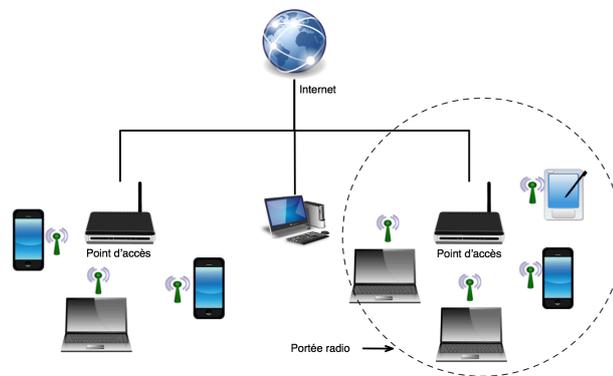


FIGURE 1.1 – Mode avec infrastructure

### 1.1.2 Mode sans infrastructure ou ad-hoc

Dans le mode sans infrastructure (Figure 1.2), la notion de terminal fixe ou de point d'accès n'existe pas. Tous les nœuds mobiles du réseau sont autonomes et se connectent les uns aux autres afin de construire un réseau point à point (p2p, Peer to Peer). Ainsi chaque machine joue en même temps le rôle de terminal et le rôle de point d'accès. Les réseaux en l'absence d'une infrastructure centralisée ou préétablie s'appellent des réseaux mobiles ad-hoc.

Dans un environnement ad-hoc, lorsqu'une donnée est envoyée d'une source à une destination, il se peut que le transfert soit directe (un-saut) si les deux nœuds, source et destination, sont à portée radio l'un de l'autre. Si ce n'est pas le cas, alors les données peuvent transiter par plusieurs nœuds intermédiaires (multi-saut) avant d'arriver à la destination finale.

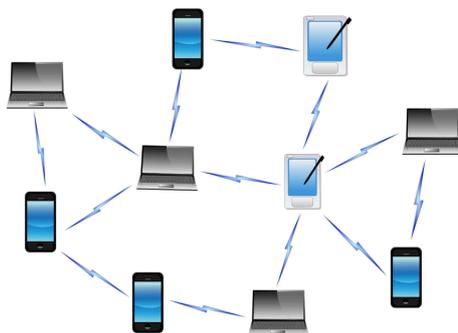


FIGURE 1.2 – Mode sans infrastructure (Réseau Mobile Ad-hoc)

## 1.2 MANET : réseaux mobiles ad-hoc

MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK) est un réseau sans-fil composé de nœuds mobiles capables de communiquer entre eux par le moyen de communication radio, et de s'auto-conFigurer sans la nécessité d'une gestion centralisée, ni d'aucune infrastructure préalablement déployée. Les nœuds dans MANET sont des terminaux légers et de taille réduite qui sont habituellement alimentés à l'aide d'une batterie, donc ils ont des capacités de traitement et de mémoire limitées. Ces réseaux étaient initialement utilisés dans les domaines militaires, mais aujourd'hui ils montrent de plus en plus de potentiel pour les applications civiles.

La Figure 1.3 illustre un exemple de transmission d'un message dans un réseau mobile ad-hoc : le nœud A veut communiquer avec le nœud C, mais puisqu'ils ne sont pas dans la même portée de transmission, le nœud A transmet son message au nœud intermédiaire B qui est dans sa portée radio et qui, à son tour, le relaie vers le nœud C.

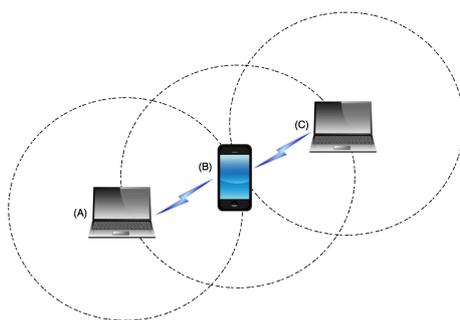


FIGURE 1.3 – Exemple de transmission d'un message dans MANET

Des réseaux semblables aux réseaux MANET sont nés pour donner à notre quotidien un champ d'application plus large et plus important. Ces nouveaux réseaux sont les réseaux véhiculaires ad-hoc.

### 1.3 VANET : réseaux véhiculaires ad-hoc

Un réseau VANET est un cas particulier d'un réseau MANET où les nœuds mobiles sont des véhicules intelligents capables de communiquer avec d'autres véhicules et avec les infrastructures situées aux bords de la route. Par rapport à un réseau ad-hoc classique, les réseaux VANET sont caractérisés par une forte mobilité des nœuds rendant la topologie du réseau très dynamique [25]. La Figure 1.4 schématise la hiérarchie des réseaux sans fil tout en précisant la relation qui lie les VANETs aux MANETs.

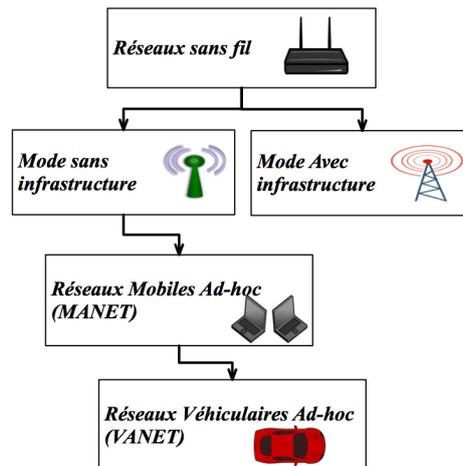


FIGURE 1.4 – Hiérarchie des réseaux sans fil

Pour la mise en place d'un tel réseau, un véhicule doit être capable de communiquer avec d'autre véhicules ou avec des infrastructures installées aux bords de la route. Par conséquent, il doit être équipé de certains dispositifs électroniques tels qu'un boîtier télématique, une interface homme/machine, des radars, des caméras, un système de localisation GPS [26, 27], des interfaces réseau ainsi que des capteurs capables de collecter les informations et de les traiter. Dans ce cas on parle des "véhicules intelligents" (voir la Figure 1.5).

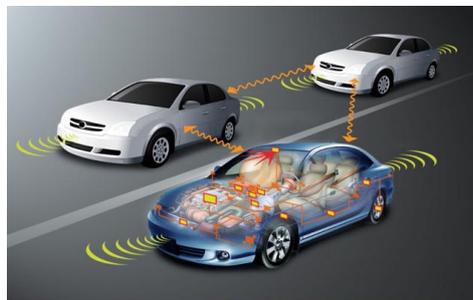


FIGURE 1.5 – Véhicules intelligents

Le modèle de mouvement dans les VANET est différent de celui de MANET, les nœuds dans ce dernier se déplacent au hasard au lieu de se déplacer dans un espace limité par des routes prédéfinies comme dans VANET. Néanmoins, la caractéristique commune entre ces deux types de réseaux est l'auto-configuration. La Table 2.1 illustre les principales différences entre MANET et VANET.

TABLE 1.1 – Comparaison des propriétés entre MANET et VANET

	<b>VANET</b>	<b>MANET</b>
La taille du réseau	Très grande	Moyenne
La capacité générale du nœud	Moyenne à élevée	Moyenne
La mobilité du nœud	Très dynamique	Moyenne
Le modèle de mobilité	Le long des routes	Au hasard
L'utilisation de la localisation	Requise	Possible
La durée de vie des nœuds(énergie)	Très élevée	Moyenne
La fiabilité	Limitée	Illimitée

### 1.3.1 Scénarios de communication dans VANET

Les progrès des communications mobiles permettent le déploiement de différentes architectures des réseaux véhiculaires pour prendre en charge de nombreuses applications avec les différentes exigences de QoS. L'objectif d'une architecture VANET est de permettre la communication entre les véhicules voisins et entre les véhicules et les équipements routiers fixes, conduisant ainsi aux trois scénarios de communication suivants :

#### 1.3.1.1 Communication véhicule à véhicule (V2V)

Dans cette catégorie, un réseau véhiculaire est vu comme un cas particulier du réseau MANET où les contraintes d'énergie, de mémoire et de capacité sont quasi nulles en plus du fait que le modèle de mobilité n'est pas aléatoire mais prévisible avec une très grande mobilité. Grâce à ce type de communication, tous les véhicules intelligents peuvent communiquer directement entre eux sans aucune infrastructure ou installation sur les routes, ce qui offre une communication moins couteuse et plus flexible. Pourtant, cette approche souffre de certains inconvénients tel que les déconnexions fréquentes dues à la mobilité des véhicules.

#### 1.3.1.2 Communication véhicule à infrastructure (V2I)

Dans cette catégorie, on se focalise sur des systèmes de communications qui utilisent des stations de bases ou des infrastructures RSU (Road Side Units, dénomination proposée par le consortium C2C-CC). Cette approche repose sur le modèle client/serveur où les véhicules sont les clients et les stations installées le long de la route sont les serveurs. Ces derniers sont connectés entre eux via une interface filaire ou sans fil. Toute communication doit obligatoirement passer par eux. Ils peuvent aussi offrir aux usagers plusieurs services concernant le trafic, l'accès à internet,

l'échange de données voiture/domicile et même la communication de voiture/garage pour le diagnostic à distance. L'inconvénient majeur de cette approche est que l'installation des stations le long des routes est une tâche coûteuse que ce soit en termes de temps ou de maintenance.

### 1.3.1.3 Communication hybride (V2V&V2I)

La combinaison des communications véhicule à véhicules et les communications de véhicules à infrastructures permet d'obtenir une communication hybride très intéressante. En effet, les portées radio des infrastructures (les stations de bases) étant limitées, l'utilisation des véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Dans un but économique et afin d'éviter les stations de bases à chaque coin de la rue, l'utilisation des sauts par des véhicules intermédiaires prend toute son importance.

Dans la Figure 1.6, un exemple de communication V2V et V2I dans les réseaux véhiculaires ad-hoc a été illustré pour l'avancement du système de contrôle de la circulation et la facilité de déplacement dans un environnement urbain.



FIGURE 1.6 – Différentes architectures de communications dans les réseaux VANET : V2V, V2I et hybride

## 1.3.2 Standardisation et normalisation

### 1.3.2.1 Le standard DSRC

Les universités, les industries de fabrication de voitures et les institutions gouvernementales ont lancé de nombreuses activités pour accomplir la conception de la communication véhiculaire à grande échelle. Les projets majeurs actuels se sont développés aux États-Unis, au Japon et en Europe [28]. En effet, aux États-Unis en octobre 1999, le standard DSRC (Dedicated Short Range Communication) a été initialement inventé [28, 29] par la fédération FCC (Federal Communications Commission) [30], qui a alloué une bande de fréquence de 5.9 GHz pour les applications liées au domaine des systèmes de transport intelligents, et qui par la suite a été adopté par le standard DSRC. Ce standard est basé sur la couche physique de la norme IEEE 802.11a et sur la couche MAC de la norme IEEE 802.11e [31].

Le standard DSRC supporte des vitesses allant jusqu'à 190 km/h, un débit de données allant de 6 Mbps jusqu'à 27 Mbps et des portées de transmission pouvant aller de 300 m jusqu'à 1000 m. Il est défini dans la bande de fréquence de 5, 9 GHz sur une bande passante totale de 75 MHz (de 5, 850 GHz à 5, 925 GHz). Comme le montre le Tableau 1.2, la FCC a adopté une bande passante composée de sept canaux de 10 MHz chacun (total de 70 MHz), y compris un canal de contrôle comme canal central et une réserve de 5 MHz juste en dessous du canal 172. En effet, Le canal de contrôle (CH 178, à 5, 890 GHz) est défini pour être utilisé dans la transmission des messages de sécurité de haute priorité et pour annoncer ou faire la publicité des services. Deux canaux (CH 180 et CH 182) sont désignés pour les communications à faible puissance et à courte portée. Les deux canaux (CH 174 et CH 176) sont désignés pour les communications à moyenne puissance et à moyenne portée. Le canal 184 est spécifiquement désigné pour la communication à haute puissance et à longue portée tel que les applications relatives à la sécurité des vies humaines.

TABLE 1.2 – DSRC Service Channel Plan. source Report and Order, 2004

5.850 GHz				5.885-5.895 GHz			5.925 GHz
		Channel 175			Channel 181		
5850-5855 réservé 5MHz	CH 172 service 10 MHz	CH 174 service 10 MHz	CH 176 service 10 MHz	CH 178 service 10 MHz	CH 180 service 10 MHz	CH 182 service 10 MHz	CH 184 service 10 MHz

Les systèmes DSRC sont utilisés dans la majorité des pays de l'Union Européenne, mais ne sont pas totalement compatibles. Par conséquent, la normalisation est essentielle pour assurer l'interopérabilité pan-européenne, en particulier pour les applications telles que le péage électronique pour lequel l'Europe impose une interopérabilité des systèmes. La normalisation aidera également à fournir des services supplémentaires et à assurer la compatibilité et l'interopérabilité dans un environnement multi-fournisseurs [32].

Le tableau 1.3 montre une comparaison entre les différentes normes régionales de DSRC [33] au Japon (ARIB), en Europe (CEN) et en Amérique du Nord (ASTM). Des informations plus détaillées sur les normes régionales de DSRC sont disponibles

dans les travaux [31], [34] et [35]. En outre, la norme IEEE 802.11p [36] a été adoptée en tant que spécification MAC (couche niveau 2) et PHY (couche niveau 1) pour les couches inférieures de la norme DSRC.

TABLE 1.3 – Normes régionales pour DSRC

Caractéristiques	Japan (ARIB)	Europe (CEN)	Amérique du Nord (ASTM)
Duplex	Semi-duplex/Full-duplex	Semi-duplex	Semi-duplex
Système de communication	Active	Passive	Active
Fréquence radio (GHz)	5.8	5.8	5.8-5.9
Bande passante (MHz)	80	20	75
Canaux	7	4	7
Séparation des canaux (MHz)	5	5	10
Débit de données	1 or 4 Mbps	500/250 Kbps	6-27 Mbps
Couverture (m)	30	15-20	1000
Modulation	2-ASK/4-PSK	2-ASK/2-PSK	OFDM

### 1.3.2.2 IEEE 802.11p ou WAVE

Pour l'échange des messages entre véhicules, l'ASTM a adopté la norme sans fil DSRC en 2002. En 2003, le groupe de travail IEEE a repris ces travaux pour définir un nouveau standard dédié aux communications inter-véhicules, nommé WAVE (Wireless Ability in Vehicular Environments en anglais) et aussi connu sous le nom de IEEE 802.11p [37]. Cette norme utilise le concept de multicanaux afin d'assurer les communications pour les applications de sécurité et les autres services du transport intelligent.

La norme IEEE 802.11p est une modification approuvée de la norme l'IEEE 802.11a de la couche PHY. Elle a été adaptée pour prendre en charge les applications des ITS ainsi pour avoir un fonctionnement à faible charge dans le spectre DSRC. Elle combine les parties de la norme d'origine avec l'amendement 802.11e MAC pour le support de QoS. Une étude plus détaillée de ces technologies utilisées pour les communications V2V est présentée par les auteurs de [38].

### 1.3.3 Applications et services des VANET

Initialement, les réseaux VANET ont été déployés pour accroître la sécurité et l'efficacité routière tout en réduisant le risque des accidents de la route. De nos jours, ces réseaux sont utilisés pour une large gamme d'applications qui peuvent être divisées en deux catégories [39, 40, 41, 42] : les applications liées à la sécurité routière et celles qui ne le sont pas.

La Figure 1.7 présente une catégorisation des applications dans les VANET ainsi qu'un large éventail d'exemples d'applications véhiculaires.



FIGURE 1.7 – Taxonomie des différentes applications dans les VANET

### 1.3.3.1 Applications liées à la sécurité routière

Comme mentionné ci-dessus, les applications dédiées à la sécurité routière représentent l'objectif principal des communications inter-véhiculaires. Ces applications visent à augmenter la protection à la fois des passagers et des véhicules, et à garantir des voyages plus sûrs par la mesure de fournir un avertissement en temps réel lorsqu'un événement critique est détecté [43]. Le message d'avertissement peut être soit par une vibration de siège, une tonalité ou un affichage visuel, soit une combinaison de ces indicateurs. Ces applications jouent un rôle important pour sauver des vies, éviter des accidents ou minimiser l'impact des accidents non évitables. En effet, selon une étude menée par les auteurs de [44], si le conducteur reçoit un avertissement en une demi seconde avant la collision, plus de la moitié des accidents peuvent être évités.

Par ailleurs, il existe tout au long de la route beaucoup de préoccupations pour un conducteur, comme faire attention aux feux de circulation, aux piétons, aux autres véhicules et aux instructions du GPS. Cependant, la gestion de tous ces événements à la fois demeure difficile et non évidente. Prenons l'exemple d'un conducteur qui se prépare à faire un virage à droite, celui-ci pourrait facilement négliger un passage piéton sur le côté gauche de la rue. De ce fait, à l'aide du système d'alerte de collision précoce, le nombre d'accidents peut être considérablement réduit. Il existe d'autres systèmes d'avertissement qui peuvent être déployés également pour prévenir et éviter les accidents, notamment, l'avertissement de la zone de travail, l'avertissement de pont bas pour les camions et l'avertissement pour les dangers environnementaux.

En plus des messages d'avertissement, certaines applications de sécurité peuvent être utiles même après un éventuel accident, comme l'envoi de notifications d'urgence aux urgences à proximité. Ces applications gèrent aussi les flux de trafic, identifient les itinéraires alternatifs, fournissent une assistance pour le changement de voie et alertent aussi le conducteur sur la limite de vitesse pour éviter les collisions.

Les applications de sécurité exigent des délais stricts [43, 44], même une fraction de seconde peut-être très importante dans la prise de décision. Ainsi, les délais restreints exigés par les applications de sécurité nécessitent un traitement spécial au niveau des couches inférieures.

Dans le même contexte, un projet européen appelé PReVENT [45] a été lancé afin de développer et de démontrer des applications et des technologies de sécurité préventives. La caractéristique importante de PReVENT est que, non seulement il peut fournir aux conducteurs un horizon accru, mais son mécanisme de prévention des accidents peut également être entièrement automatisé sans avoir besoin de manœuvres manuelles. De plus, il existe d'autres projets européens liés à la sécurité routière, à savoir : COMeSafety [46], SAFESPOT [47], SeVeCOM [48] et COOPERS [49].

Récemment, l'administration de la recherche et de la technologie innovante (RITA) du Département des Transports des États-Unis (DOT) a lancé une campagne (également appelée Transportation Vision pour 2030), visant à réduire considérablement les accidents de la circulation [50]. Le DOT se concentre sur les technologies de com-

munication V2V et V2I pour les applications de sécurité. Aussi, le consortium de communication voiture-à-voiture (C2C-CC) [51] piloté par de nombreux constructeurs automobiles européens (par exemple, Audi, BMW, Fiat, Opel, Volkswagen, etc.) se concentre sur le développement et la publication d'un standard ouvert pour les STI coopératives, y compris la sécurité routière et l'efficacité du trafic.

### 1.3.3.2 Applications non-liées à la sécurité routière

Bien que l'objectif principal de VANET est de garantir la sécurité, il existe certaines applications autre que celles de la sécurité qui sont d'un grand intérêt autant pour aujourd'hui que pour le futur [52], comme l'efficacité du trafic, l'assistance du conducteur, l'assistance de navigation et de localisation ainsi que les applications de paiement et d'info-divertissement (voir la Figure 1.8).

L'efficacité du trafic se réfère à l'augmentation de sa fluidité. Puisque la congestion du trafic devient un problème de plus en plus grave, une meilleure gestion du trafic entraîne moins de congestion et réduit la consommation de carburant contribuant ainsi à minimiser l'impact environnemental et économique.

Différentes entreprises utilisent les VANET pour des publicités ou des annonces d'informations des ventes basées sur la localisation ; Par exemple, les stations-service peuvent annoncer les mises à jour des prix ou bien les restaurants peuvent mettre en évidence différentes offres pour attirer les voyageurs. En parallèle, certaines applications dans les VANET permettent aux voyageurs de voir facilement les magasins ou les restaurants les plus proches, etc.

Grâce aux applications d'info-divertissement, la conduite devient plus confortable et plus amusante. Les passagers d'un véhicule peuvent bénéficier de la connexion internet sans utiliser les méthodes de connexion aux réseaux sans fil traditionnelles (Wi-Fi, Wi-MAX, etc.). Même en présence de telles options, un nœud connecté à internet via ces technologies peut partager sa connectivité avec d'autres véhicules via VANET [53].

Sur Internet ou indépendamment de celui-ci, plusieurs autres applications peuvent être fournies, comme par exemple, offrir un accès à différents services tels que le paiement de péage dans les autoroutes sans devoir s'arrêter, trouver facilement des places pour le parking, télécharger des applications et des données de multimédia et aussi télécharger et mettre à jour les cartes géographiques. En outre, les applications peer-to-peer (P2P) peuvent également trouver leur place dans les VANET, par exemple, les jeux, les conversations, le partage de fichiers et la navigation sur le Web.

Étant donné que cette catégorie d'applications a des exigences de QoS différentes en termes de taux de réception et de délai, garantir des communications en temps réel fiables pour les applications sensibles au délai sans pour autant impacter les applications sensibles au débit peut être une tâche extrêmement difficile.

Pour augmenter le confort et la commodité des occupants du véhicule, le soutien des services d'info-divertissement a été pris en compte dans plusieurs projets de recherche récents. Par exemple, un projet de recherche européen est lancé en mettant

l'accent sur le développement de systèmes coopératifs d'infrastructures de véhicules (CVIS). Pour permettre les communications continues V2V et V2I, le CVIS devrait supporter une variété d'applications commerciales et de sécurité. D'autre part, Fleetnet [54] est un projet de recherche allemand dont l'objectif est de développer une plate-forme pour les communications V2V, ainsi que de fournir à la fois des services de confort et de sécurité. Le réseau sur le volant (Network on Wheels (NOW)) [55] est un autre projet de recherche basé en Allemagne. Son objectif phare est de développer des protocoles de communication pour l'info-divertissement et le service d'assistance de sécurité. Un banc d'essai pour des tests fonctionnels et des démonstrations est également mis en œuvre dans "NOW" pour évaluer les performances des VANET. Toutefois, afin d'enrichir davantage l'expérience de conduite, un système intégré au véhicule appelé TracNet [56] a été introduit pour fournir un accès Internet aux usagers de la route.

Le potentiel inexploité des communications inter-véhicules a suscité un certain nombre d'initiatives de collaboration pour l'info-divertissement sur la route et les services d'assistance de sécurité. Étant donné que la synergie entre les VANET, le gouvernement, l'industrie automobile et les universités continue de croître, les projets de recherche innovants permettront d'identifier et de capitaliser sur de nouveaux marchés lucratifs pour les VANET.

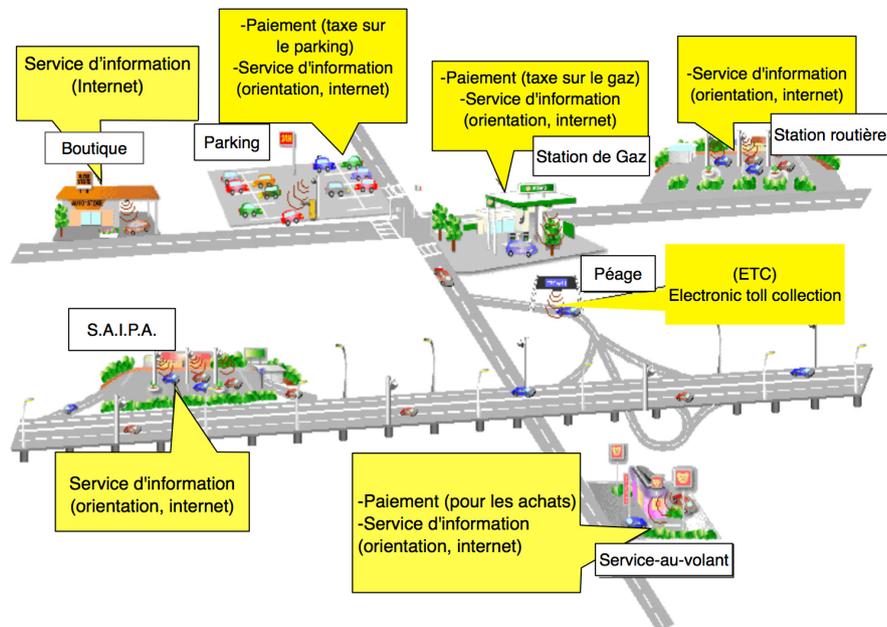


FIGURE 1.8 – Exemple des applications d'info-divertissement

### 1.3.4 Caractéristiques des VANET

En tant que classe spécifique de MANET, VANET hérite de plusieurs caractéristiques de celui-ci. En effet, tous les deux supportent des communications ad-hoc entre des nœuds mobiles dans des scénarios dynamiques. Cependant, Les réseaux véhiculaires présentent des caractéristiques spécifiques et uniques [33, 57, 58] qui rendent les architectures et les protocoles de MANET (Mac, routage, etc. ) inadaptés. Dans ce qui suit, nous soulignons certaines caractéristiques intrinsèques liées aux réseaux de véhicules qui doivent être prises en compte pour permettre la mise en œuvre des protocoles de communication hautement efficaces pour les réseaux VANET [59, 60, 61].

- Une forte mobilité : par rapport aux nœuds mobiles des MANET, les véhicules dans les VANET se caractérisent par une mobilité relativement élevée et une plus grande variabilité de vitesse (entre 30 km/h et 60 km/h en milieu urbain, entre 50 et 80 km/h en milieu rural et entre 90 et 150 km/h dans un environnement autoroutier). Tout ça fait de VANET un environnement extrêmement dynamique.
- Topologie très dynamique : compte tenu des mouvements et des changements fréquents de position et de direction des véhicules dans VANET, un nœud peut rejoindre et/ou quitter le réseau dans un très court laps de temps, de sorte que les topologies de réseau soient très dynamiques et les liens de communication ne soient plus stables. En effet, si on considère deux véhicules roulant en sens opposé à 25 m/s (90 km/h), avec une couverture radio de 250 m, alors la durée d'une communication directe entre deux véhicules est seulement de 10 secondes.
- Mobilité prévisible et restreinte : à la différence des MANET où les nœuds mobiles se déplacent de manière aléatoire, les déplacements des véhicules dans les VANET sont contrôlés par la topologie des routes, des feux de signalisation et des réglementation de la circulation routière. Compte tenu de la vitesse moyenne, de la vitesse actuelle et des informations routières, la future position d'un véhicule est prévisible au moins à court terme.
- Modèle de mobilité varié : dans les VANET, la topologie est dynamique, mais elle n'est pas complètement aléatoire car la distribution des véhicules en mouvement se fait généralement selon l'environnement qui peut être une route, une autoroute, ou une ville comme le montre la Figure 1.9. En effet, la mobilité des véhicules est limitée par des routes prédéfinies, ainsi que la direction et le nombre de voies [62].
- Évolutivité : à la différence des MANET qui sont habituellement étudiés dans des environnements de taille limitée, les VANET ont le potentiel de s'étendre sur une très grande échelle incluant ainsi de nombreux véhicules. En outre, la densité du réseau peut varier d'un réseau très dense (cas urbain) à une distribution de nœuds clairsemée (cas rurale, heure très tardive).



FIGURE 1.9 – Exemple d'une carte routière

- Information de localisation disponible : la majorité des véhicules possède ou prédispose d'un système de positionnement incorporant des cartes numériques pour connaître leur position. Le système de positionnement GPS est le plus utilisé dans les réseaux véhiculaires, car il peut fournir des informations précises en temps réel tel que la position tridimensionnelle (latitude, longitude et altitude), la direction et la vitesse.
- Une grande capacité de calcul, d'énergie et de stockage : contrairement à certains types de périphériques mobiles dans les réseaux ad-hoc où l'énergie est une contrainte majeure qu'il faut prendre en compte, les véhicules en mouvement disposent de grandes capacités énergétiques et de puissance de calcul (à la fois stockage et traitement) [63]. Par conséquent, la consommation d'énergie, la complexité du calcul ou le stockage sont des facteurs secondaires dans VANET.

### 1.3.5 Défis et exigences des VANET

Afin de satisfaire les exigences requises pour déployer le concept des VANET ainsi que les différents types d'applications véhiculaires, de nombreux facteurs qui ont un impact critique sur l'exécution de ces objectifs doivent être pris en compte. Il est donc essentiel de préciser les plus importants défis et contraintes dans les VANET qui comprennent les points suivants [25, 52, 64] :

- Faible connectivité du réseau : la densité d'un réseau véhiculaire joue un rôle très important pour déterminer sa connectivité. Une forte densité permet au réseau d'être connexe car il existe toujours un chemin pour communiquer. A l'inverse, une faible densité a pour conséquence un taux élevé de ruptures de communications et/ou un délai de transmission plus long dans le cas où le véhicule conserve le paquet. La densité dans les VANET varie selon l'environnement (urbain, rural ou autoroute) et la période (heure de pointe, vacances,

etc... ). En conséquence, la connectivité est considérée comme un problème important dans VANET. Néanmoins, elle occupe toujours une grande partie des efforts déployés pour développer les VANET.

- La sécurité et l'anonymat dans le réseau : la sécurité des données et la confidentialité constituent un problème majeur dans les VANET puisque la communication sans fil utilisée est très vulnérable. Plusieurs menaces potentielles pour le système de communication des véhicules existent, allant des faux messages (ou frauduleux) capables de perturber le trafic ou même de causer un danger, jusqu'à l'invasion de la vie privée du conducteur. Par conséquent, il est essentiel de concevoir des VANET aussi robustes que possible et de les sécuriser contre les attaques [65, 66].
- Différentes exigences de QoS : il existe plusieurs types de services qui exigent différents QoS. Comme par exemple :
  - Les applications de sécurité n'acceptent aucun retard et doivent être prioritaires.
  - Les applications en temps réel nécessitent un accès garanti au canal et ont des exigences strictes concernant le délai de bout en bout, le débit et le taux de perte de paquets.
  - Les applications d'info-divertissement ont des exigences strictes sur le taux de transmission mais pas pour le délai puisque les données ne sont pas critiques.

En raison de la grande variété d'applications, les VANET doivent prendre en charge un large éventail d'exigences de QoS.

- Faible signal : les obstacles situés entre deux véhicules communicants sont l'un des défis qui empêchent le signal d'atteindre sa destination. En conséquence, cela affecte l'efficacité des VANET et réduit la QoS. Ces obstacles peuvent être d'autres véhicules ou des bâtiments répartis le long des routes particulièrement dans les scénarios urbains [67].
- Bande passante limitée : en raison du manque d'infrastructure dans les VANET, il n'y a aucun coordinateur centralisé qui contrôle les communications entre les véhicules et qui a la responsabilité de gérer l'utilisation de la bande passante et de la contention. En effet, il existe une forte probabilité que la congestion du canal puisse se produire, en particulier dans un environnement à haute densité, car la gamme de fréquence de la bande passante pour les applications dans les VANET est limitée (seulement 75 MHz sont attribués dans le DSRC). Afin de faire face à ce problème et assurer une utilisation équitable des canaux sans collisions d'accès, les véhicules doivent échanger des messages de contrôle. Par conséquent, il est nécessaire de s'assurer que ces frais généraux ne consomment pas trop la bande passante [33].
- Protocole de routage : en raison des propriétés uniques des réseaux VANET, la conception d'un protocole de routage efficace qui respecte toutes les différentes

exigences requises par les applications véhiculaires est considérée comme un défi majeur. La conception d'un protocole de routage efficace a un impact sur l'amélioration de nombreux facteurs, à savoir : l'amélioration de la fiabilité du système (taux de livraison des paquets), la réduction des interférences causées par les bâtiments dans les environnements urbains, l'évolutivité du réseau et la livraison des paquets dans les plus brefs délais particulièrement dans les situations d'urgence.

## 1.4 Protocoles de routage dans les réseaux VANET

Le routage dans les réseaux véhiculaires ad-hoc est assez délicat en raison de la vitesse élevée et la nature très dynamique de la topologie. Ainsi, la question qui s'impose est de savoir comment assurer le routage en un bref délai et avec un minimum de paquets perdus. La clé principale pour répondre à cette question est de connaître le protocole de routage le plus approprié à ce type d'environnement en termes de performance de QoS.

L'objectif principal d'un protocole de routage pour les réseaux véhiculaires ad-hoc est d'établir correctement et efficacement une communication entre une paire de véhicules dans le réseau afin qu'un message puisse être délivré selon les paramètres de la QoS attendus [68, 69]. L'établissement d'une route devrait être effectué avec une consommation de bande passante et une surcharge de réseau minimales (minimum overhead).

Des facteurs tels que le grand nombre de véhicules qui manquent d'organisation inhérente, la nature très dynamique ainsi que les changements topologiques fréquents, font du routage une tâche complexe et contestable dans VANET. Assurément, il est fortement influencé par certaines caractéristiques mais aussi par l'utilisation des protocoles de routage inefficaces conçus initialement pour MANET [70]. En effet, l'historique des protocoles de routage VANET débute par les protocoles de routage MANET [71], mais malheureusement ces derniers sont inefficaces et ne peuvent pas atteindre de bonnes performances lorsqu'ils sont utilisés directement dans un environnement difficile comme VANET, soit en raison d'une réaction lente au changement rapide de la topologie surtout dans le cas des protocoles proactifs, soit en raison de la phase explicite de l'établissement de la route qui rend les protocoles réactifs peu pratiques pour la plupart des applications ITS qui exigent de faibles latences. Le processus du routage est probablement le problème le plus abordé et le plus étudié dans les réseaux véhiculaires ad-hoc. Par conséquent, il existe dans la littérature de nombreuses recherches qui se concentrent sur l'adaptation et l'amélioration des protocoles pour qu'ils soient appropriés aux VANET [72, 73, 74, 75].

Idéalement, un algorithme de routage pour un réseau véhiculaire ad-hoc devrait non seulement avoir les caractéristiques générales de tout protocole de routage, mais également tenir compte des caractéristiques spécifiques de cet environnement. Cependant, il n'est pas possible de concevoir une seule et unique solution pour tous

les problèmes de routage parce qu'une solution valide dans une situation particulière ne l'est pas nécessairement dans une autre. Ceci est reflété par le grand nombre d'algorithmes et de protocoles de routage proposés dans différents cadres.

## 1.5 Classification des protocoles de routage

De nombreux protocoles de routage existent et qui peuvent être classés par plusieurs manières et en fonction de différents aspects, tels que : les caractéristiques des protocoles, les techniques utilisées, la QoS, les structures du réseau, les algorithmes de routage ou la stratégie de transmission etc. En effet, certains travaux de recherche comme dans [76], [77], [78] et [79] ont classé les protocoles de routage en cinq catégories en fonction des techniques de routage utilisés : les protocoles basés sur la topologie, la position, les clusters, la multi-diffusion (Geocast) et la diffusion (Broadcast). De plus, d'autres chercheurs ont classifié les protocoles de routage en trois classes selon l'architecture du réseau : routage hiérarchique, routage à plat et routage géographique [80]. D'autres auteurs ont choisi de les classer en deux catégories selon les stratégies de routage : proactifs et réactifs [61, 81]. D'un autre côté, les auteurs de [82, 83], les ont groupé en deux catégories selon l'information de routage utilisée dans le transfert de paquets : basé sur la position et basé sur la topologie. Il existe également une classification basée sur la QoS répartie sur trois types de protocoles portant sur la topologie du réseau, la découverte d'itinéraire et l'interaction de la couche MAC [84]. Une autre classification en fonction du nombre de destinataires : unicast, multicast et broadcast [85]. Cependant il n'existe pas de classification qui donne une vue générale et regroupe toutes ces politiques de routage existantes.

Dans ce fait, nous proposons une taxonomie détaillée des différentes approches de routage dans les réseaux VANET (voir la Figure 1.10). Cette description nous permet d'avoir une vue globale sur les différents protocoles de routage et leur politique de routage. Dans cette classification, deux critères seront considérés : les informations de routage qui se concentre principalement sur le routage basé sur la topologie et le routage basé sur la position et les stratégies de transmission qui décrivent la manière adoptée par un nœud pour transiter les données.

### 1.5.1 Stratégies de transmission

Les stratégies de transmission se basent sur la diffusion de l'information provenant d'une source vers une destination. Elles peuvent être classées en cinq catégories : anycast, unicast, broadcast, multicast et geocast. Les catégories multicast et geocast peuvent être fusionnées en une seule classe puisque le geocast est un type particulier de la transmission multicast.

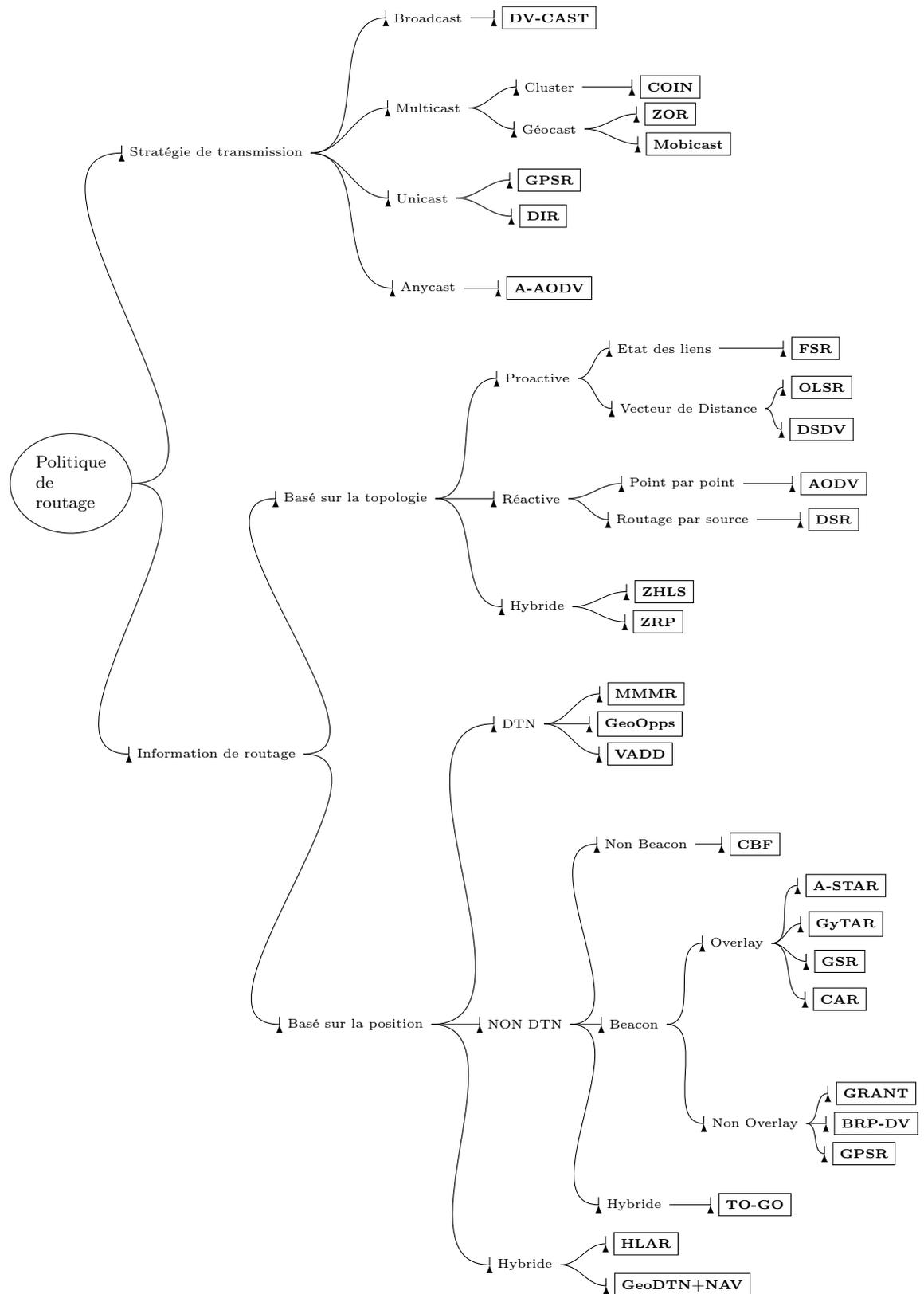


FIGURE 1.10 – Taxonomie des techniques de routage des protocoles dans les réseaux VANET. Exemples de protocoles pour chaque catégorie. Les détails de chacun peuvent être trouvés dans [86, 87, 88].

### 1.5.1.1 Routage anycast

Le routage anycast se réfère à la diffusion des informations à partir d'une source unique vers n'importe quelle destination. Dans le mécanisme anycast, une seule adresse est attribuée aux prestataires de services au sein d'un groupe anycast. Lorsqu'un client envoie des paquets à un serveur par une adresse anycast, les routeurs vont tenter de livrer les paquets à un serveur qui correspond à cette adresse [89]. Le véhicule source n'a pas besoin de se soucier de la façon dont la destination la plus proche est choisie. Les protocoles A-AODV [90], AAPP [91] et MGM [92] sont des exemples typiques des protocoles anycast existants.

### 1.5.1.2 Routage unicast

Le routage unicast [93] correspond à l'envoi des informations d'une source unique vers une destination unique en utilisant soit le mécanisme de multi-sauts où les véhicules intermédiaires sont utilisés pour transmettre les données à la destination, soit en utilisant le mécanisme de stockage et de retransmission. Le routage unicast est la technique la plus utilisée dans les réseaux ad-hoc en général. Plusieurs protocoles de routage existent comme DSR [94], DIR [95], VADD [96], GPSR [9], CGSR [97], AODV [98] et COIN [99].

### 1.5.1.3 Routage broadcast

Le routage broadcast permet aux paquets d'inonder le réseau de telle manière qu'ils seront envoyés vers tous les véhicules à l'intérieur de la portée de transmission du véhicule source. Ce mécanisme de routage permet aux paquets d'être délivrés par l'intermédiaire de nombreux véhicules qui peuvent parvenir à une transmission fiable mais qui consomment la bande passante du réseau au vu des paquets dupliqués envoyés. Parmi les protocoles de routage broadcast, on trouve V-TRADE [100], DV-CAST [101], PGB [102], POCA [103] et DECA [104].

### 1.5.1.4 Routage multicast

Le routage multicast est défini par l'envoi des paquets d'une source unique vers les membres d'un groupe spécifique. Il peut être classé en deux catégories : le routage geocast et le routage à base de clusters.

**Routage géocast :** Le routage géocast est basé sur l'envoi des paquets d'une source à un groupe de destinataires situés dans une zone géographique spécifique nommée zone de pertinence (ZOR : Zone Of Relevance) [105]. Les véhicules sont des membres d'une ZOR s'ils se trouvent dans la même zone géographique. L'adhésion d'un véhicule change quand il se déplace hors portée de ZOR, par conséquent, il abandonne le paquet. Une zone de transfert (ZOF : Zone Of Forwarding) est définie comme la zone géographique dont les véhicules membres doivent délivrer les paquets aux véhicules membres de ZOR. ZOF vise à livrer les paquets efficacement dans

une topologie très dynamique. Une variété de protocoles de routage geocast est disponible comme : ROVER [106], MOBICAST [107], IVG [108], DTSG [109], DG-CASTOR [110] et GeoDTN+Nav [111].

**Routage basé sur les clusters :** Le routage en cluster est un routage basé sur l'envoi des paquets d'une source vers des destinations qui ont les mêmes caractéristiques comme la direction ou la vitesse. Chaque groupe a une tête de cluster qui gère les processus de communication à l'intérieur et à l'extérieur de son cluster. Les véhicules à l'intérieur du groupe communiquent entre eux par des voies directes, mais leur communication avec les autres véhicules en dehors du cluster est atteinte par la tête de ce cluster. Ainsi, une infrastructure virtuelle est créée. Ce système peut fournir une bonne évolutivité mais peut augmenter la charge du réseau et les délais surtout dans les réseaux très dynamiques. Parmi les protocoles existants on trouve : COIN [99], CGSR [97], CBDRP [112], EODMRP[113] et LORA-CBF [114].

## 1.5.2 Informations de routage

Les protocoles de routage appartenants à cette classe sont divisés en deux catégories : protocoles basés sur la topologie et protocoles basés sur la position.

### 1.5.2.1 Routage basé sur la topologie

Le routage basé sur la topologie se fonde sur les informations des liens stockées dans les tables de routage pour transmettre les paquets. Il est classé en trois catégories : proactive (périodique), réactive (sur demande) et hybride.

#### 1.5.2.1.1 Routage proactif

Le principe du routage proactif est de calculer les itinéraires à l'avance et en permanence, de telle sorte que lorsqu'un véhicule envoie un paquet à un autre, une route est immédiatement trouvée. Les tables de routage doivent être mises à jour fréquemment pour refléter la topologie réelle du réseau, ainsi elles devraient être diffusées périodiquement dans le voisinage, d'où la nécessité de mise en place d'un système d'échange régulier des paquets de contrôle. Cette approche permet aux véhicules de construire de façon permanente la topologie du réseau, ainsi, de nouveaux itinéraires seront construits sur la base de ces informations topologiques. Cependant, ce processus est déclenché à chaque changement de topologie, ce qui entraîne une surcharge en particulier dans les réseaux denses à mobilité élevée. Les protocoles proactifs dépendent généralement sur des algorithmes du plus court chemin pour déterminer les itinéraires, ils utilisent principalement deux stratégies : à état de lien et à vecteur de distance.

**État des liens (Link state) :** Dans cette stratégie, chaque véhicule garde une vision sur toute la topologie du réseau et ce par l'intermédiaire des paquets de contrôle périodiques portant sur l'état des liens avec les véhicules voisins. La mise à

jour se fait pour chaque véhicule diffusant l'état des liens des véhicules voisins dans le réseau. Parmi les protocoles proactifs à état de lien, on trouve les protocoles : FSR [115], OLSR [116], STAR [117], GSR [118], CBRP [119] et SGRS [120].

**Vecteur de distance :** Grâce à cette technique, chaque véhicule partage avec ses voisins sa vision des distances qui le séparent de tous les hôtes du réseau, ainsi, il calcule le plus court chemin vers n'importe quelle destination en se basant sur les informations reçues par ses voisins. Parmi les protocoles proactifs à vecteur de distance on cite : DSDV [121], WRP [122], DFIA-AODV [123] et VHRP [124].

#### 1.5.2.1.2 Routage réactif

Le principe de ce type de routage est de chercher l'itinéraire uniquement en cas de besoin (à la demande) ce qui permet d'économiser la bande passante et l'énergie. Grâce au routage réactif, lorsqu'un paquet doit être envoyé d'une source vers une destination, le protocole va rechercher un chemin jusqu'à la destination, une fois ce chemin est trouvé, ce dernier est inscrit dans la table de routage et peut être utilisé tant que la destination est joignable ou jusqu'au moment où la route devient inutile. Le groupe réactif est divisé en deux principales approches qui suivent le même principe du routage "à la demande" mais avec des différences mineures sur la zone de découverte de route [125, 126]. La première approche représente le routage par source qui permet aux paquets de données transférés de transporter l'itinéraire complet vers la destination et chaque nœud intermédiaire les transmet en fonction des informations contenues dans l'en-tête de chaque paquet. La seconde approche évoque le routage point par point (hop-by-hop) qui permet de transmettre les paquets de données en fonction uniquement de la destination et l'adresse du saut suivant. Selon cette stratégie, chaque véhicule intermédiaire est contraint de garder à jour ses voisins et ses informations de routage liées à la destination souhaitée. Parmi les protocoles de routage réactifs qui existent, on trouve DSR [94], AODV [98], COIN [99], EODMRP [113], LORA-CBF [114], TORA [127], DYMO [128], FLUTE [129], SADV [130], MDD [131] et QoSAware [132].

#### 1.5.2.1.3 Routage hybride

Le routage hybride combine les deux approches proactive et réactive. Son principe est de diviser le réseau en deux régions : intérieure et extérieure. Il utilise un mécanisme de routage proactif pour maintenir les routes dans la région intérieure et utilise un mécanisme de découverte de route pour atteindre les véhicules dans la région extérieure. L'avantage des protocoles hybrides est qu'ils s'adaptent mieux aux réseaux de grande taille. Cependant, ce type de protocole cumule les inconvénients des protocoles proactifs et ceux des protocoles réactifs, tels que l'échange régulier des paquets de contrôle pour chercher les itinéraires vers les véhicules éloignés. Plusieurs protocoles hybrides ont été proposés dont les protocoles : CBRP [119], ZRP [133], LQHR [134], AntHocNet [135], EHMRP [136] et HyBR [137].

### 1.5.2.2 Routage basé sur la position

Le routage basé sur la position (ou routage géographique) est fondé particulièrement sur des informations géographiques des véhicules voisins et de la destination. Ce protocole requiert que chaque véhicule soit capable de connaître sa localisation ainsi que celle de ses voisins. Comparés aux protocoles de routage basés sur la topologie, les protocoles géographiques sont considérés plus stables et plus adaptés pour VANET. Ils sont généralement classés en trois catégories : Réseau tolérant au retard (DTN), Réseau non tolérant au retard (non DTN) et Hybride [82].

#### 1.5.2.2.1 Réseau tolérant au retard DTN

Les protocoles DTN implémentent la procédure dite «store and forward» qui consiste à stocker un paquet jusqu'à ce que le véhicule transporteur trouve un nouveau voisin approprié. Ce type de protocole est conçu principalement pour fonctionner dans des réseaux à faible densité dans des applications qui tolèrent le retard. En effet, dans les protocoles DTN, il n'y a aucune garantie de connectivité de bout à bout ininterrompue. Les paquets peuvent être mis en mémoire cache pendant une durée considérable dans le cas où il n'y a pas de véhicule approprié pour transmettre le paquet et le porter à une autre zone [82, 83]. Un ensemble de protocoles de routage qui reposent sur une stratégie de store-and-forward existe, nous citerons : les protocoles VADD[96], SADV [130], MOVE [138], SKVR [139], GeOpps[140], GyTAR [141], STBR[142], CMGR[143] et MMR[144].

#### 1.5.2.2.2 Réseau non tolérant au retard non-DTN

Les protocoles non-DTN ne prennent pas en considération la dis-connectivité. En fait, ils fonctionnent sous l'hypothèse qu'il y a toujours un nombre suffisant de véhicules pour router les données vers leurs destinations finales, si non, les données seront perdues. Par conséquent, ce type de protocoles est adapté seulement aux environnements à haute densité. En adoptant ce type de protocoles, le véhicule transmet son paquet au voisin le plus proche de la destination "stratégie greedy", toutefois, s'il n'y a pas de voisin plus proche de la destination à part lui-même, la transmission échoue. De nombreux protocoles de routage non-DTN gèrent cette défaillance par différentes stratégies : Beacon, Non Beacon et Hybride [145].

**Beacon :** C'est une stratégie de routage utilisant des messages HELLO pour collecter les informations des voisins à 1 ou 2 sauts. Les messages HELLO jouent généralement deux rôles dans le processus de routage : localiser les voisins les plus proches de la destination ou identifier les véhicules immobiles [146]. Les protocoles appartenant à cette stratégie sont divisés en deux groupes : protocoles overlay et protocoles non-overlay :

- **Overlay (Couverture) :** Certains protocoles de routage s'appuient sur les nœuds fixes (hôtes) situés dans des endroits spécifiques, tels que les jonctions

en milieu urbain, pour prendre des décisions concernant le chemin par lequel les paquets doivent être router. En revanche, certains de ces protocoles nécessitent d'obtenir des informations supplémentaires à partir des sources externes pour sélectionner le prochain saut. Une tâche essentielle dans le routage overlay est de localiser et d'identifier ces nœuds de recouvrement, quant aux autres nœuds, ils ne font que relayer les paquets conformément à la décision prise. Parmi les protocoles de routages overlay, on citera les protocoles : GSR [73], A-STAR [147], DAR-RH [148], , CAR [149], JARR [150], GPSRJ+ [151], GPCR [152] et LOUVRE [153].

- **Non-Overlay** : Ce mécanisme de transfert prend des décisions de routage à chaque saut. Normalement, les protocoles non-overlay n'utilisent dans leur décision de routage que les informations locales, comme les informations de positions ou les données obtenues grâce à l'échange des messages HELLO entre les véhicules. Parmi les protocoles de routages non-overlay, on trouve : GPSR [9], AGF [102], GRANT [154], GPSR\_L [155] et PBR-DV [156],

### 1.5.2.2.3 Hybride

Ce type de protocole fusionne les caractéristiques de deux ou plusieurs protocoles de routage basés sur la position, parfois ils fusionnent un ou plusieurs protocoles de routage basés sur la topologie (réactifs, proactifs et hybrides) avec le routage basé sur la position. Les protocoles de routage hybrides basés sur ces collaborations tirent profit des stratégies de plus d'un protocole. Les protocoles , Geodtn+nav [111], HLAR [157], HHLS [158], RAR[159] et DG-CastoR [160] sont des exemples des protocoles hybrides basés sur la position.

## Conclusion

Le but de ce chapitre est de cerner les réseaux véhiculaires ad-hoc en présentant un état d'art le plus global possible. Nous avons vu les différents scénarios de communication, les technologies de transmissions et aussi les contextes d'applications. Nous avons détaillé par la suite les caractéristiques principales et spécifiques des réseaux véhiculaires ainsi que leurs défis et exigences. Dans ce chapitre nous avons aussi traité les approches proposées pour le routage et mené une enquête sur les tendances récentes dans les différentes classes de protocoles de routage VANET.

Pour mieux choisir le protocole de routage le plus pertinent et le plus prometteur dans les réseaux véhiculaires ad-hoc, nous proposons, dans le prochain chapitre, d'étudier le comportement de plusieurs protocoles dédiés initialement pour les MANET et d'évaluer par simulation leurs performances dans différents scénarios VANET.

# Étude comparative des performances des protocoles de routage dans un environnement VANET

---

## Introduction

La conception d'un protocole de routage qui opère efficacement en toutes circonstances de VANET est très difficile. Une étude des performances des différents protocoles qui ont été proposées par la communauté scientifique est indispensable pour pouvoir suggérer de nouvelles propositions et de nouvelles améliorations qui seront bénéfiques pour le routage et la QoS. L'objectif de ce chapitre est d'analyser et de comparer les performances des protocoles de routage ad-hoc communs dans un environnement VANET, ainsi que d'observer l'impact de la densité des véhicules et de la charge du trafic sur le comportement de ces protocoles.

Plusieurs protocoles de routage ont été développés initialement pour les réseaux mobiles ad-hoc, et la communauté de recherche scientifique a été très active concernant l'évaluation des performances de ce type de protocoles de routage ad-hoc dans des différents scénarios VANET. Dans le même contexte, de nombreuses recherches comme dans [58, 102, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168] utilisent la simulation en tant que moyen d'évaluation des performances étant donné que ce type d'évaluation présente un avantage économique, présente une souplesse dans la création des scénarios de simulation et permet d'envisager un grand nombre de situations. La majorité de ces travaux comparent deux ou trois protocoles et prennent en considération un nombre limité de critères et métriques d'évaluation. Dans ce chapitre, nous essayons d'étudier, d'évaluer et de comparer les performances de huit protocoles de routage ordinaires, notamment le GPSR [9], le DSR [94], l'AODV [98], le FSR [115], l'OLSR [116], le DSDV [121], le Dymo [128] et finalement le ZRP [133]. Pour cela, nous allons utiliser le simulateur de réseau NS-2 [169] et le simulateur de mobilité VanetMobiSim [170, 171] que nous allons présenter plus en détail. Dans la suite de ce chapitre nous décrivons les scénarios de notre simulation ainsi que les métriques d'évaluation de performances considérées, à savoir : le coût de routage, le taux de paquets délivré, le délai et le débit. En fin, nous présentons et discutons les résultats obtenus.

## 2.1 Représentation des protocoles de routage

Nous nous concentrons sur huit protocoles de routage initialement conçus pour MANET, notamment DSDV, OLSR, FSR, AODV, DSR, DYMO, ZRP et GPSR. Dans les paragraphes suivants, nous donnerons plus de détails sur les mécanismes de routage ainsi que les avantages et inconvénients de chacun de ces protocoles.

### 2.1.1 Destination Sequence Distance Vector (DSDV)

Le protocole DSDV est un protocole proactif qui a été lancé à la fin des années 90 par un groupe de travail MANET [121]. C'est l'un des premiers protocoles de routage ad-hoc proactifs qui implémente la stratégie du vecteur distance développé à base de l'algorithme distribué Bellman-Ford [172, 173] afin de trouver le chemin optimal entre le nœud source et le nœud destinataire. DSDV s'adapte aux difficultés des réseaux ad-hoc tel que le changement de topologie et résoud un ensemble de problèmes tels que les boucles de routage et le comptage à l'infini.

Avec DSDV, chaque nœud doit avoir une table de routage complète qui doit être échangée avec le reste des nœuds de manière dynamique et périodique. En effet, le mécanisme de mise à jour des tables de routage se fait en fonction du temps (de façon périodique grâce à des timers) ou en fonction d'événements comme par exemple des délais trop élevés, des débits de connexion faibles, des déconnexions ou des changements fréquents de topologie. Les diffusions fréquentes des mises à jour dans DSDV surcharge excessivement le réseau et consomme une part importante de la bande passante, par conséquent, le rend inapproprié et peu adapté pour les réseaux très dynamiques et à grande échelle.

### 2.1.2 Optimized link state routing (OLSR)

Le routage d'état de lien optimisé OLSR est un protocole de routage proactif basé sur le routage point à point. Grâce à sa nature proactive, il fournit immédiatement des routes disponibles lors de la demande d'itinéraire [116, 174]. C'est une version améliorée des protocoles de routage à état de lien tel que le protocole OSPF [175, 176]. Avec OLSR, les nœuds du réseau échangent entre eux, régulièrement et d'une manière optimisée, les informations de topologie.

Chaque nœud définit à partir des messages HELLO son voisinage à un et à deux sauts, ensuite il choisit un ensemble de relais multi-point MPR (Multi Point Relay) parmi ses nœuds voisins du premier niveau (à un saut) qui lui permettent d'atteindre tous ses voisins du deuxième niveau (à deux sauts). En fait, seuls les nœuds sélectionnés comme MPR font avancer le trafic. Les trois autres messages de contrôle dans OLSR, à savoir les messages HELLO, les messages de contrôle de topologie TC (Topology Control) et les multiples interfaces de déclaration MID (Multiple Interface Declaration) sont générés afin de créer et de maintenir des tables de routage. L'utilisation du mécanisme MPR dans OLSR est la caractéristique distinctive par rapport aux autres protocoles classiques à état de lien. Cependant, OLSR peut pro-

voquer des congestions sur le réseau en raison de l'envoi fréquent de paquets de contrôle qui gèrent les modifications de la topologie.

### 2.1.3 Fisheye state routing (FSR)

Le protocole "routage à état de l'œil du poisson" FSR est un protocole de routage hiérarchique implicite basé sur l'utilisation de la technique "œil de poisson" (fisheye) [115]. Il consiste à capturer avec plus de détails et de précision les points proches du point focal, tandis que la précision diminue au fur et à mesure que la distance séparant le point vu et le point focal augmente. FSR vise à réduire la surcharge des paquets de contrôle en utilisant des périodes d'échange différentes pour les différentes entrées de la table. Cette technique est très efficace pour réduire la taille des informations requises pour représenter le réseau de sorte que les informations des entrées de la table de routage qui correspondent aux nœuds les plus proches, sont envoyées aux voisins avec une fréquence élevée, c'est-à-dire avec une période d'échange relativement petite par rapport à la période d'échange opté pour les entrées qui correspondent aux nœuds un peu éloignés. Le protocole FSR est semblable aux protocoles à état de lien en ce qui concerne la sauvegarde de la topologie au niveau de chaque nœud. La dissemblance principale est la façon par laquelle les informations de routage circulent. Dans le FSR, la diffusion par inondation de messages n'existe pas, l'échange se fait uniquement avec les voisins directs, d'une façon périodique. Cela rend le FSR plus évolutif notamment pour les grands réseaux. Cependant, cette évolution est obtenue alors que le routage est imprécis. Toutefois, cette imprécision peut être corrigée en mettant la fréquence avec laquelle les mises à jour sont envoyées aux destinations distantes proportionnelles au niveau de la mobilité.

### 2.1.4 Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

Le protocole AODV est un protocole de routage réactif qui utilise l'algorithme de vecteur de distance Bellman-Ford et qui est conçu spécialement pour les réseaux mobiles ad-hoc [98]. Il s'agit d'un algorithme à la demande, ce qui signifie qu'il détermine un itinéraire de bout en bout vers une destination uniquement lorsqu'un nœud source souhaite envoyer un paquet. Les routes sont maintenues aussi longtemps qu'elles sont utilisées par la source. Pour garder à jour la table de routage, le protocole AODV a deux tâches bien définies : la découverte des itinéraires et la maintenance des itinéraires. La découverte de l'itinéraire se déroule lorsqu'il n'y a pas d'itinéraire vers une destination. La maintenance d'itinéraire est chargée de garder un itinéraire tant qu'il existe une communication entre une source et une destination. AODV utilise deux tampons FIFO comme mécanisme de protection. Un tampon pour stocker les paquets pendant l'établissement de l'itinéraire et un autre tampon pour éviter les pertes de paquets lorsqu'une rupture de route se produit pendant une courte durée. Le protocole AODV est très léger, a de faibles besoins de traitement et une faible surcharge de la mémoire. En plus il élimine les boucles

de routage avec l'utilisation des numéros de séquence de destination. Néanmoins, le mécanisme de découverte de route rajoute des délais significatifs qui retardent la transmission des données. Les messages de contrôle sont donc diffusés dans tout le réseau ce qui peut conduire à une forte surcharge du réseau. AODV a été évalué dans des scénarios véhiculaires avec des circonstances différentes montrant qu'il peut être adapté pour VANET, en particulier pour les zones de haute densité [177, 166] et avec un faible nombre de connexions actives [58].

### 2.1.5 Dynamic source routing (DSR)

DSR est un protocole réactif, il ne forme les itinéraires que lorsqu'un nœud source souhaite envoyer un paquet (comme c'est le cas dans AODV). Il est conçu spécifiquement pour les réseaux ad-hoc multi-hop [94]. Contrairement à d'autres protocoles, le DSR est un protocole à état de lien basé sur le concept de routage source au lieu de compter sur la table de routage de chaque nœud intermédiaire. Grâce à cette technique, le nœud source indique la séquence des nœuds intermédiaires pour atteindre la destination. La découverte et la maintenance des itinéraires sont les deux opérations effectuées dans DSR, comme dans AODV, sauf qu'il est sans apprentissage en arrière. Chaque nœud est chargé de maintenir à jour un cache de route (cache routes) qui contient les itinéraires accessibles menant aux nœuds destinataires. Le protocole DSR a l'avantage d'inclure l'adresse de chaque nœud traversé dans l'en-tête des paquets, ce qui élimine les boucles de routage. Cependant, il utilise le cache de routes avant chaque processus de découverte. L'emploi d'un itinéraire invalide du cache génère des pertes de données et des délais de transmission additionnelles. Dans les petits réseaux, les performances de DSR sont évidentes. Par contre, il n'est pas très efficace dans les réseaux dynamiques et à grande échelle car il génère un nombre important de messages de contrôle qui inondent le réseau.

### 2.1.6 Dynamic MANET on Demand (DYMO)

DYMO ou DYMOUM est le successeur du protocole de routage AODV. Il a été développé par le groupe de travail IETF MANET [128] afin de simplifier le protocole AODV tout en conservant le mode de fonctionnement de base. DYMOUM adopte également les mécanismes de découverte et de maintenance des itinéraires. Le processus de découverte est très similaire à celui de AODV, à l'exception de la fonctionnalité d'accumulation des chemins. En fait, lorsqu'un nœud veut envoyer un paquet à une destination non incluse dans sa table, à cet instant, la découverte des itinéraires est effectuée : le message RREQ est diffusé dans le réseau. Par la suite, le message RREP est renvoyé contenant tout le chemin accumulé pour que le paquet atteigne sa destination. En diffusant le message RREQ, le nœud intermédiaire joindra son adresse dans le message RREP. Chaque nœud intermédiaire diffusant le message RREQ, prend note du chemin vers l'arrière. DYMO partage de nombreux avantages de AODV et DSR. En outre, ce protocole est un peu plus facile à mettre en œuvre et à personnaliser via des améliorations simples et précises.

Néanmoins, si sa surcharge supplémentaire en vaut la peine ou non, cela dépend beaucoup du scénario (le modèle de communication le déterminerait) [178].

### 2.1.7 Zone Routing Protocol (ZRP)

Le protocole de routage ZRP est un protocole hybride utilisé dans des réseaux à grande échelle [133, 179]. Un tel protocole peut effectuer la découverte de la route à la demande avec un nombre limité de recherches d'itinéraires en bornant la zone des techniques de routage proactifs à des nœuds voisins locaux. Aussi pour rechercher les nœuds souhaités, il utilise un routage réactif en interrogeant les nœuds sélectifs du réseau au lieu d'envoyer la requête à tous les nœuds du réseau. ZRP utilise le routage "Inter-zone" et "Intra-zone" pour fournir une découverte de route flexible et une maintenance de route dans les environnements ad-hoc. Le routage inter-zone effectue la découverte d'itinéraire à travers un routage réactif, tandis que le routage intra-zone est basé sur un routage proactif afin de maintenir à jour des informations d'itinéraire dans sa propre plage de routage [179]. ZRP réduit la surcharge du réseau causée par le routage proactif, gère également le retard causé par le routage réactif et effectue la découverte d'itinéraires plus efficacement. Cependant, il n'est pas conçu pour des environnements très dynamiques tels que VANET.

### 2.1.8 Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

GPSR est un protocole de routage qui appartient à la catégorie des protocoles géographiques. Il est conçu à l'origine pour MANET, mais a été rapidement adapté pour les VANET [9]. GPSR est la base de nombreux nouveaux protocoles qui ont l'intention d'améliorer les performances de GPSR basique, soit en modifiant les exigences pour transférer des paquets, soit en changeant le mécanisme de recherche du meilleur prochain relais. Ce protocole exploite la correspondance entre la position géographique des nœuds (obtenue à l'aide d'un équipement tel que le GPS) et leur connectivité dans le réseau pour prendre des décisions de routage. Le GPSR fonctionne en deux modes : le routage gourmand, qui est utilisé par défaut ; Et le routage par périmètre, qui est utilisé comme un routage alternatif quand le routage gourmand ne peut être utilisé. Avec ces techniques de routage, GPSR garantit un routage optimal en termes de distance. GPSR sélectionne l'itinéraire le plus court possible vers la destination. Cependant, dans un environnement très dynamique, il peut être soumis à une dégradation des performances en raison des fréquentes déconnexions.

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients des différents protocoles de routage

Protocoles	Avantages	Inconvénients
DSDV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantit un chemin libre en boucle</li> <li>- Ne nécessite pas de découverte d'itinéraire</li> <li>- Maintient le meilleur chemin possible au lieu de plusieurs chemins</li> <li>- Il réduit la quantité d'espace dans la table de routage               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit la bande passante consommée</li> <li>- Réduit les frais généraux</li> </ul> </li> <li>- Ne déclenche aucun message de contrôle pour l'échec de la liaison               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit la retransmission des paquets</li> <li>- Convient bien aux réseaux à haute densité</li> <li>- Prend en charge les applications nécessitant de courts délais de transmission</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne supporte pas le routage multi-chemin</li> <li>- Il est difficile de déterminer le délai pour la diffusion des itinéraires</li> <li>- Augmente les frais généraux dans le réseau               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inefficacité dans les petits réseaux</li> <li>- Moins de connaissances des nœuds lointains</li> </ul> </li> <li>- Pas assez d'information pour l'établissement d'itinéraire</li> </ul>
FSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit la bande passante consommée</li> <li>- Réduit les frais généraux</li> <li>- Ne déclenche aucun message de contrôle pour l'échec de la liaison</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une grande quantité de bande passante et de puissance du processeur sont nécessaires pour calculer le chemin optimal</li> <li>- Congestion du réseau en raison de l'envoi fréquent des paquets de contrôle</li> </ul>
OLSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit la retransmission des paquets</li> <li>- Convient bien aux réseaux à haute densité</li> <li>- Prend en charge les applications nécessitant de courts délais de transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Une grande quantité de bande passante et de puissance du processeur sont nécessaires pour calculer le chemin optimal</li> <li>- Congestion du réseau en raison de l'envoi fréquent des paquets de contrôle</li> </ul>
AODV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Met à jour souvent le chemin vers la destination</li> <li>- Réduit les exigences de mémoire excessives</li> <li>- Réduit la redondance d'itinéraire</li> <li>- Dispose d'un mécanisme en cas d'échec de l'itinéraire</li> <li>- Approuve un réseau ad-hoc à grande échelle               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de paquet de contrôle</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Provoque un retard dû au processus de découverte</li> <li>- Induit une incohérence dans la route lorsque les nœuds intermédiaires contiennent les anciennes entrées               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produit beaucoup de frais généraux</li> <li>- Consomme une bande passante supplémentaire</li> </ul> </li> <li>- Inefficace en mobilité élevée : la perte de paquets est élevée</li> <li>- Impossible de réparer les liens brisés localement</li> </ul>
DSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilise la mise en cache pour sauvegarder plusieurs itinéraires</li> <li>- Inutile de découvrir de nouvelles routes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inefficace en mobilité élevée : la perte de paquets est élevée</li> <li>- Impossible de réparer les liens brisés localement</li> </ul>
DYMOUM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de mémoire consommée par table de routage</li> <li>- Les frais généraux diminuent avec l'augmentation des tailles de réseau et la mobilité élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les frais généraux du message de contrôle sont élevés</li> <li>- Congestion : retransmission des paquets               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inefficace avec une faible mobilité</li> </ul> </li> </ul>
ZRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduit les frais généraux du réseau causés par IARP et IERP</li> <li>- Gère le retard du réseau causé par l'IERP réactif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non compatible avec une topologie hautement dynamique et en évolution rapide</li> <li>- La taille de la zone est prédéfinie, fixe et ne peut être modifiée après la mise en œuvre               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible au interférences</li> <li>- Inutilisable sans dispositif GPS</li> <li>- Gestion du voisinage est passable</li> </ul> </li> </ul>
GPSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Convient aux autoroutes et aux environnements évolutif</li> <li>- Utilise une technique gourmande pour router les paquets</li> <li>- Dispose d'une technique alternative en cas d'échec de routage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensible au interférences</li> <li>- Inutilisable sans dispositif GPS</li> <li>- Gestion du voisinage est passable</li> </ul>

## 2.2 Simulation des protocoles de routage dans VANET

L'évaluation des protocoles et les applications des VANET pourrait être effectuée grâce à des expériences extérieures réelles, qui sont à la fois longues et coûteuses et demandent un grand nombre de ressources afin d'obtenir des résultats significatifs. Au lieu de cela, il est possible de recourir à la simulation qui est une méthode beaucoup plus rentable puisqu'elle ne nécessite qu'un ordinateur et un logiciel de simulation (qui est disponible gratuitement dans le cas de NS-2). Cette méthode d'évaluation permet aussi d'expérimenter un grand nombre de scénarios de simulation (différentes topologies et protocoles utilisés, etc.). Cette souplesse dans la création des scénarios permet d'envisager et d'évaluer un grand nombre de situations, ce qui n'est pas possible avec le mode d'évaluation dans un environnement réel. Cela a incité les développeurs de réseaux et d'applications à utiliser la simulation afin d'évaluer différentes solutions (simples ou compliquées) avant de les mettre en œuvre. D'autre part, cela a stimulé l'intérêt pour le développement de simulateurs qui intègrent facilement les modèles et répondent aux exigences des applications des VANET. Et Malheureusement, à l'heure actuelle, il n'y a pas de simulateur de réseau véhiculaire standard.

Les simulations des VANET nécessitent à la fois un composant de réseau et un composant de mobilité. Dans la plupart des cas, ces composants sont fournis par deux simulateurs distincts. Les chercheurs construisent une topologie et produisent une trace de mouvements de véhicules à l'aide d'un simulateur de mobilité. Ces traces de mouvements, qui représentent la mobilité des nœuds dans le réseau, sont ensuite introduites dans le simulateur de réseau. Il y a eu des travaux sur le développement de simulateurs intégrés qui contiennent à la fois les deux composants de réseau et de mobilité, permettant un feedback entre les deux composants. Mais jusqu'à présent, la plupart des recherches ont été effectuées à l'aide de deux simulateurs distincts.

## 2.3 Outils de simulation

Comme nous l'avons déjà mentionné, simuler un VANET implique deux aspects différents. Il y a les simulateurs de réseau, comme Network Simulator NS-2 [169], OPNET et Jist/SWANS [180] qui font face aux problèmes liés à la communication entre les véhicules et se concentrent sur les caractéristiques des protocoles réseaux. Et il y a le deuxième aspect très important qui est lié à la mobilité des nœuds VANET. Les simulateurs de trafic routier (ou de mobilité) capable de fournir un modèle de mobilité précis pour les nœuds d'un VANET.

Dans le cadre de cette thèse, nous considérons NS-2/VanetMobiSim comme l'outil de simulation pour réaliser toutes nos simulations et tester nos propositions. Pour cela, nous décrivons le simulateur de mobilité utilisé pour donner du réalisme à nos scénarios de simulation, et nous présentons également le simulateur de réseau NS-2. Pour plus de détails, un survey et une comparaison détaillée de nombreux générateurs de mobilité publiquement disponibles, des simulateurs de réseau et des

simulateurs des VANET sont présentés dans [181].

### 2.3.1 Simulateur de mobilité

Les auteurs de [182] ont montré que le modèle de mobilité des véhicules (trafic routier) est très important et son intégration au modèle du réseau sans fil pourrait produire des résultats plus significatifs. Ils présentent un simulateur intégré qui utilise un modèle de trafic automobile original appelé Street Random Waypoint (STRAW) implanté sur JiST/SWANS. Les auteurs ont utilisé le simulateur pour montrer que l'étude des protocoles de routage pour un réseau véhiculaire sans modèle précis de circulation des véhicules constitue une mauvaise approche.

Pour assurer l'interaction entre le modèle de mobilité de véhicule et le modèle de communication de réseau, il existe deux approches différentes. La première consiste à mettre en œuvre le modèle de mobilité à partir de zéro. Dans cette situation, l'intégration entre le modèle de mobilité et le modèle de communication réseau est assurée implicitement dans la phase de conception. Il existe plusieurs exemples de cette approche comme GrooveSim [183], TraNS [184] et ASH [185]. L'autre approche est d'utiliser une implémentation de modèle de mobilité existante et de l'intégrer avec un simulateur de réseau. Cette approche tire parti des simulateurs de mobilité existants, complexes et déjà validés. En revanche, le défi de cette approche sera de réaliser une intégration en ligne dans laquelle le mouvement des véhicules est directement influencé par les applications véhiculaires. La façon d'intégration la plus simple et la plus utilisée consiste à générer des modèles de mobilité hors ligne, puis d'utiliser ses résultats comme paramètre d'un simulateur de réseau. De nombreux modèles de mobilité ont été publiés récemment comme par exemple SUMO [186], Citymob [187] et VanetMobiSim [170].

Les générateurs de mobilité des VANET peuvent être classés comme microscopiques ou macroscopiques. Les simulateurs microscopiques mettent l'accent sur le comportement individuel de chaque véhicule en représentant sa vitesse et sa position à un moment donné. Ce type de simulation est particulièrement utile pour étudier les interactions des véhicules les uns les autres et avec l'infrastructure routière, mais il est fourni avec la contrainte d'une évolutivité réduite. Les simulateurs macroscopiques consistent à modéliser les aspects macroscopiques qui influencent le trafic véhiculaire. Ils captent les conditions de circulation de manière globale. Par exemple, la topologie du réseau routier, les caractéristiques de chaque route (à double sens ou à sens unique, le nombre de voies et la vitesse limite), les signaux dans les intersections (feux de signalisation, panneaux stop, etc.), les règles de dépassement et de sécurité au niveau de chaque route, etc. Toutefois, la plupart des auteurs se mettent d'accord sur le fait qu'un modèle de mobilité macroscopique n'est pas suffisant pour permettre l'étude d'un réseau véhiculaire. Donc la simulation microscopique, bien que plus complexe, est nécessaire.

### 2.3.1.1 Le générateur de mobilité VanetMobiSim

Dans nos simulations, nous avons utilisé le générateur de mobilité VanetMobiSim [181]. C'est une extension du simulateur CANU Mobility Simulation Environment (CanuMobiSim) [188] améliorée afin de fournir un haut niveau de réalisme. C'est un outil qui génère une trace de mobilité à partir d'une configuration XML aléatoirement ou définie par l'utilisateur en suivant un motif de mobilité. Les principaux avantages de ce type de simulateurs de VANET sont :

- La possibilité de développer des modèles de mobilité des véhicules complexes pour les simulations.
- La possibilité de générer le modèle de mobilité une seule fois puis l'utiliser pour simuler différents types de configurations de réseau.
- La réutilisation du logiciel : Des simulateurs de réseau largement acceptés peuvent être utilisés.

Comme nous l'avons déjà mentionné, pour réaliser des simulations réalistes de trafic routier, le modèle de mobilité doit prendre en compte les caractéristiques de la macro-mobilité et de la micro-mobilité du scénario. VanetMobiSim a été sélectionné car il considère à la fois les deux aspects macroscopique et microscopique de la mobilité. Il considère les caractéristiques de la macro-mobilité, tel que la topologie des routes, le nombre de voies, la direction, les flux unidirectionnels, la gestion des routes à plusieurs voies de circulation, les limites de vitesse, les contraintes de vitesse aux intersections etc., et les caractéristiques de micro-mobilité, comme les carrefours réglementés par les panneaux de signalisation, la capacité de changement de voie ou l'accélération et la décélération du véhicule.

Différents modèles de mobilité existent dans VanetMobiSim, à savoir : le modèle de conduite intelligente IDM (Intelligent driving model), le modèle de conduite intelligente avec les changements des voies IDM-LC (Intelligent driving model with Lane Changing), le modèle de conduite intelligente avec la gestion des intersections IDM-IM (Intelligent driving model with Intersection Management) et le modèle de conduite intelligente avec le suivi du véhicule IDM-CF (Intelligent driving model with car Following) utilisée pour modéliser l'interaction du conducteur avec son environnement. VanetMobiSim permet aussi d'importer des cartes à partir de la base de données TIGER [189] ou de générer des cartes aléatoires à l'aide de Voronoi tessellation.

Afin d'évaluer l'impact de ces modèles de mobilité, de nombreux travaux ont été résumés dans [190], confirmant que chacun de ces modèles convient à certaines circonstances spécifiques et à un protocole spécifique. D'une part, IDM utilise des voies simples pour décrire la mobilité des voitures sans tenir compte des intersections. En effet, selon [191], IDM ne gère pas correctement la mobilité des intersections des véhicules et ne tient pas compte de l'accélération et la décélération d'une bonne manière. D'autre part, IDM-IM ne permet pas de changer de voie. Par la suite, IDM-LC a ses propres inconvénients mais semble le plus pratique pour nos besoins

car il prend en compte les intersections, les feux de signalisation, la vitesse des véhicules, la considération des voisins et aussi les voies changeantes [170].

En outre, VanetMobiSim a été validé contre le générateur de commerce CORSIM. Il est le seul qui fournit un excellent support de trace. CanuMobiSim et VanetMobiSim ont des composants de visualisation pour les mouvements et la topologie des nœuds, dont un exemple est illustré à la figure 2.2.

### 2.3.2 Simulateur de réseau

Les simulateurs de réseau permettent aux chercheurs d'étudier comment le réseau se comporterait dans différentes conditions, de personnaliser le simulateur pour répondre à leurs besoins d'analyses spécifiques ainsi de tester des scénarios qui pourraient être particulièrement difficiles ou coûteux en cas d'utilisation du matériel réel (en particulier dans les VANET). Les simulateurs de réseau sont devenus des outils indispensables et particulièrement utiles pour tester de nouveaux protocoles de réseau ou pour proposer des modifications à ceux existants de manière contrôlée et reproductible.

#### 2.3.2.1 Le simulateur de réseau NS-2

NS-2 [192] est un simulateur d'événement discret développé par le groupe de recherche du projet VINT à l'Université de Californie à Berkeley. Il a été amélioré par le groupe de recherche Monarch à l'université Carnegie Mellon [193] pour inclure : (a) la mobilité des nœuds, (b) une couche physique réaliste avec un modèle de propagation radio, (c) des interfaces de réseau radio, et (d) le Protocole MAC (IEEE 802.11) [181].

NS-2 est très largement utilisé dans la recherche académique et dans l'industrie. Il est considéré par beaucoup de spécialistes des télécommunications comme le meilleur logiciel de simulation par événements discrets, en raison de son modèle libre, permettant l'ajout très rapide des modèles correspondants à des technologies émergentes. Il est très utilisé dans le domaine de développement, d'évaluation et de validation des protocoles réseaux [192].

Ns-2 est un logiciel libre, orienté objet, écrit en C++ avec une interface qui utilise le langage OTcl (Object Tool Command Langage) pour la commande des simulations (tcl/tk). À travers ces deux langages, il fournit aux utilisateurs un moyen flexible et puissant de contrôle de la simulation comme le déclenchement d'événements, la configuration du réseau, la configuration du trafic, le choix des protocoles utilisés, la collecte de statistiques, etc. Il s'agit d'un outil de simulation de réseau largement accepté qui fournit une large gamme de protocoles. D'autant plus, il a été vraiment validé ce qui fait de lui un outil d'une valeur pédagogique très intéressante

### 2.3.3 L'outil de simulation des VANET : NS-2/VanetMobiSim

La Figure 2.1 présente l'architecture de base de notre outil de simulation NS-2/VanetMobiSim. Comme nous pouvons le constater, avant la phase de simulation,

il y a une autre phase réalisée avant le lancement de la simulation nommée Pre-processing. Dans cette phase, le NS-2 fait appel à des fichiers extérieurs contenant le modèle de trafic CBR qui est généré automatiquement par l'outil "cbrgen" intégré dans NS-2, et le modèle de mobilité qui est généré grâce au simulateur VanetMobiSim. Pendant la simulation, les informations des flux de paquets peuvent être collectées à travers deux fichiers traces d'extensions .tr et .nam. Après la simulation, une phase nommée Post-processing est utilisée. Elle consiste, d'une part, à analyser le fichier trace d'extension .tr pour extraire les paramètres de performance avec un programme écrit en AWK, C, Java ou Perl, et d'autre part, à lancer l'animation du réseau à partir du fichier d'extension .nam en utilisant le programme NAM (Network AniMator) intégré dans NS-2. Ce dernier permet de visualiser le déplacement des nœuds et le parcours des paquets dans le réseau.

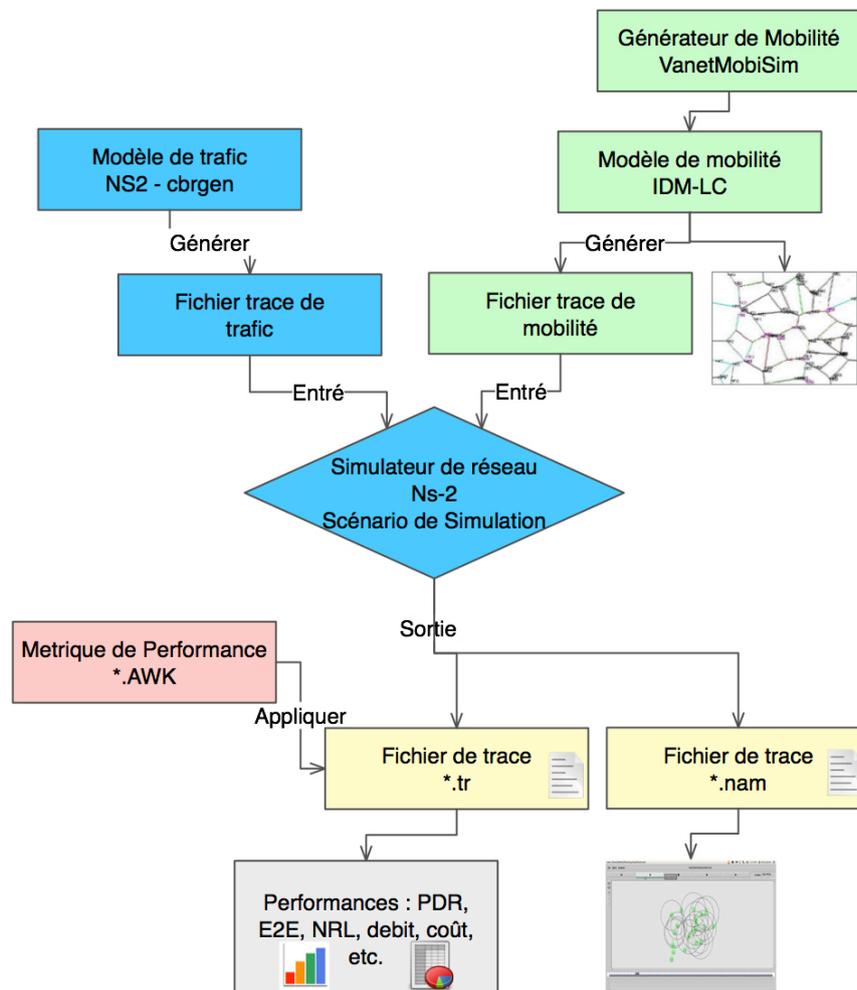


FIGURE 2.1 – Architecture général du simulateur VANET basé sur l'association du simulateur de trafic 'VanetMobiSim' et du simulateur de réseau "NS-2".

## 2.4 Scénario de simulation

Le scénario de simulation que nous avons utilisé dans nos simulations pour analyser les performances des différents protocoles consiste en un VANET, en milieu urbain, multi-hop et purement ad-hoc. Les principaux paramètres de simulation sont présentés dans la Table 2.2 et sont divisées en trois blocs : les paramètres utilisés pour générer le modèle de mobilité, les paramètres utilisés pour générer le trafic de données et les paramètres concernant la simulation et les caractéristiques du réseau.

TABLE 2.2 – Différents paramètres utilisés dans la simulation

Paramètres	Valeur	Unité
Modèle de Mobilité	IDM-LC	–
Dimension du la zone de simulation	1000*1000	$m^2$
Nombre des noeuds	20, 50, 100, 150 et 200	véhicules
Nombre de voies par direction	2*2	voies*directions
Nombre maximal des feux de signalisation	10	feux de signalisation
Vitesse minimale des véhicules	20	km/h
Vitesse maximal des véhicules	60	km/h
Type de trafic	CBR/UDP	–
Taille des paquets	32	bytes/paquet
Taux d’envoi des paquets	4	paquets/s
Nombre de trafic de données	15	sources, destinations
Protocoles de routage	AODV, DSDV, FSR, DYMO GPSR, AODV, DSR, ZRP	–
Durée de la simulation	1000	s
Nombre de simulations	20	–
Nombre de connexions	3,10,15, 20	connexions
Version du simulateur	2.33	–
Protocole des couches MAC et PHY	802.11p(802.11Ext)	–
Portée radio	532	m
Type d’antenne	Omni-directional	–
Modèle de réflexion	Two Ray Ground	–

**Milieu de simulation** Nous avons utilisé une zone urbaine de 1000 mètres<sup>2</sup> obtenue grâce au générateur de mobilité VanetMobisim (voir la Figure 2.2). Cette zone urbaine est formée par un grand nombre de rues et d’intersections avec des caractéristiques similaires à la réalité, comme la vitesse maximale et minimale du véhicule, le nombre de voies bien raccordé, le nombre maximal de signalisation, etc. Nous décrivons les paramètres de simulation dans la table 2.2.

**Densité des véhicules** Nous avons considéré cinq densités, à savoir 20, 50, 100, 150 et 200 véhicules/km<sup>2</sup>. Chacune de ces densités pourrait représenter une situation d’un jour (tôt le matin, jour/nuit et heure de pointe, etc.). L’objectif de l’utilisation des densités différentes est de tester si le nombre de véhicule a un impact sur le comportement des protocoles. En général, une densité des véhicules élevée aide à éviter le rejet des paquets, car un prochain saut approprié serait toujours disponible. Cependant, pour les réseaux très denses, les transmissions de données seraient plus susceptibles d’entrer en collision.

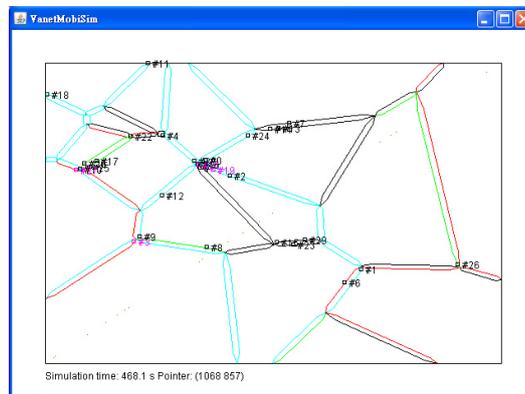


FIGURE 2.2 – Exemple de la topologie urbaine générée avec VanetMobiSim

**Pile des protocoles (Protocol stack) :** Comme le montre la table 2.2, les simulations ont été effectuées en utilisant la norme IEEE 802.11p sur les couches physiques et MAC. Nous avons choisi comme modèle de propagation le TwoRay-Ground qui prend en compte l’onde directe et la réflexion de sol.

### 2.4.1 Critères d’évaluation

Le but principal des simulations réalisées avec l’outil NS2/VanetMobiSim est d’analyser les métriques de performance les plus importants des protocoles de routage AODV, DSDV, OLSR, DSR, GPSR, FSR, DYMO et ZRP. Il est donc essentiel de comprendre tous les métriques de performance qui seront utilisés dans le processus de comparaison de ces protocoles ainsi que dans l’évaluation des performances des protocoles proposés.

- Le taux de paquets délivré avec succès ou PDR (Packet Delivery Ratio) est défini par le rapport entre le nombre total des paquets reçus et celui des paquets envoyés. Il existe une variété de raisons qui entraînent une dégradation du PDR, notamment les nœuds exposés ou cachés, les collisions, un signal à faible puissance, les ruptures des liens, etc. Grâce à cette métrique, il est possible de révéler l’efficacité et la fiabilité d’un protocole en termes de garanties de livraison des paquets. Pour calculer le PDR, l’équation 2.1 est utilisée.

$$PDR = \frac{\text{Nombre\_de\_paquets\_reus}}{\text{Nombre\_de\_paquets\_envoys}} \quad (2.1)$$

- Délai moyen de bout en bout (EED ou E2E) est le temps moyen que fait un paquet de données pour être envoyé de la source à la destination finale. EED est considéré une métrique très importante qui doit être améliorée lors de l’évaluation d’un protocole de routage. En effet, un bon protocole doit avoir un délai moyen de bout en bout aussi faible que possible. C’est à dire qu’il doit expédier les paquets de données dans les plus brefs délais surtout dans

les applications liées à la sécurité. Il peut être calculé en utilisant l'équation 2.2 suivante :

$$EED = \frac{\text{Heure\_de\_transmission\_de\_paquets}}{\sum \text{Nombre\_de\_paquets\_reus}} \quad (2.2)$$

- Le débit moyen (Average Throughput) peut être défini comme le flux ou la quantité des données véhiculée sur un canal de communication par unité de temps. Habituellement, le débit est exprimé en bits par seconde ou par paquets par seconde. C'est une métrique importante dans le choix d'un protocole de routage VANET surtout pour les applications orientées vers l'utilisateur. Le débit repose sur trois conditions : la taille des paquets de données, le nombre de sources de trafic et l'efficacité du protocole en termes de PDR. Nous utilisons l'équation 2.3 suivante pour le calculer :

$$\text{Debit} = \frac{\sum \text{Taille\_des\_paquets\_reus}}{\text{l'heure\_de\_Rception} - \text{l'heure\_d'envoi}} \quad (2.3)$$

- Le coût de routage représente la quantité moyenne d'information véhiculée dans le réseau pour recevoir un paquet de données. Il est calculé en divisant le nombre total d'octets envoyés (y compris le nombre d'octets des paquets de donnée ainsi que les paquets de contrôle) par le nombre total d'octets des paquets de données reçues. Nous utilisons l'équation 2.4 suivante pour calculer le coût de routage :

$$\text{Cout} = \frac{\sum \text{Taille\_Des\_Packets\_transmis}}{\sum \text{Taille\_des\_paquets\_de\_donnees\_reus}} \quad (2.4)$$

## 2.4.2 Résultats des simulations

### 2.4.2.1 Étude de l'impact de la densité sur les protocoles de routages étudiés

Pour étudier l'impact de la densité, nous avons varié le nombre de véhicules de 50 (faible densité) à 200 (densité importante) tout en maintenant le nombre de trafic de données CBR fixé à 3 connexions.

La Figure 2.3 indique le taux de livraison de paquets avec succès obtenu pour chaque protocole de routage en fonction du nombre de véhicules. Il est clairement démontré que le PDR des protocoles AODV et DSR est supérieur par rapport aux autres (environ 90%). Ceci est dû à leur mécanisme de découverte et de maintenance des routes. Le protocole DSR fournit des optimisations internes qui bloquent les itinéraires en cas d'erreur dans la route de réception et en cas de violation des chemins. Un nœud intermédiaire répare la route sans avertir le nœud qui génère le trafic. Les protocoles DSDV, FSR, DYMO et GPSR présentent de bons taux de paquets délivrés avec succès surtout dans les scénarios à faible densité, parce que la probabilité d'échec des communications entre les nœuds sera faible puisqu'il y

a moins d'entrées invalides dans les tables de routage. Toutefois, lorsque la densité augmente, les performances de presque tous ces protocoles diminuent. Cela peut être expliqué par un nombre considérable des collisions. Le protocole ZRP diminue progressivement au fur et à mesure que la densité du réseau augmente. Cette situation peut être expliquée par le fait que le protocole ZRP fonctionne selon le rayon de la zone. Lorsque le rayon de la zone est grand, le protocole ZRP se comporte comme un pur protocole proactif. Par conséquent, le taux de livraison est réduit en raison de sa nature proactive. En ce qui concerne le protocole OLSR, il montre également un taux intéressant de paquets délivrés avec succès mais juste dans un réseau à faible densité. Lorsque la densité augmente, le protocole OLSR échoue. En effet, nous remarquons une chute aiguë du PDR à partir de 50 véhicules, et il devient nul lorsque le nombre de véhicules dépasse 100. Nous concluons que le protocole OLSR cesse de fonctionner dans les réseaux véhiculaires à moyenne et haute densité.

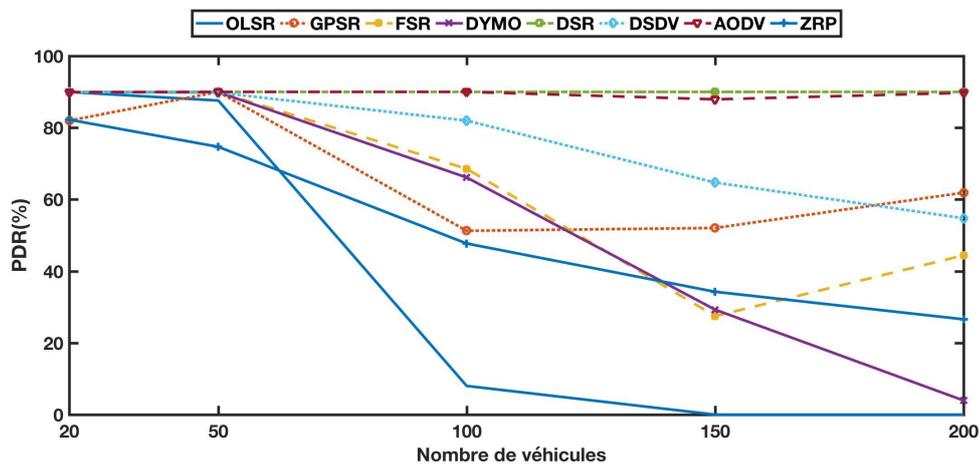


FIGURE 2.3 – Taux de paquets délivrés en fonction de la densité

La Figure 2.4 présente la moyenne du délai de bout en bout pour chaque protocole de routage testé en fonction de la densité des véhicules. Comme on peut le voir, l'EED des huit protocoles tend à augmenter avec la croissance du nombre des véhicules. Ceci est attendu car lorsque le réseau devient dense, le trafic augmente et peut entraîner des délais de bout en bout significatifs. Les plus faibles délais sont ceux des protocoles DSR et GPSR. Le protocole AODV a également un faible délai mais seulement dans le cas où la densité est faible. Dans le cas d'une densité importante, la performance en termes de EED de l'AODV diminue. En ce qui concerne les pires performances, sont respectivement ceux des protocoles ZRP, DSDV, DYMO et FSR. Par rapport aux autres protocoles, ils prennent beaucoup plus de temps pour router les paquets vers leurs destinations finales. Le protocole OLSR pourrait être bien classé s'il n'avait pas de sérieuses difficultés avec les réseaux denses. Enfin, le protocole GPSR reste le meilleur choix pour garantir les plus brefs délais en particulier avec le bon taux de paquets délivrés qu'il possède.

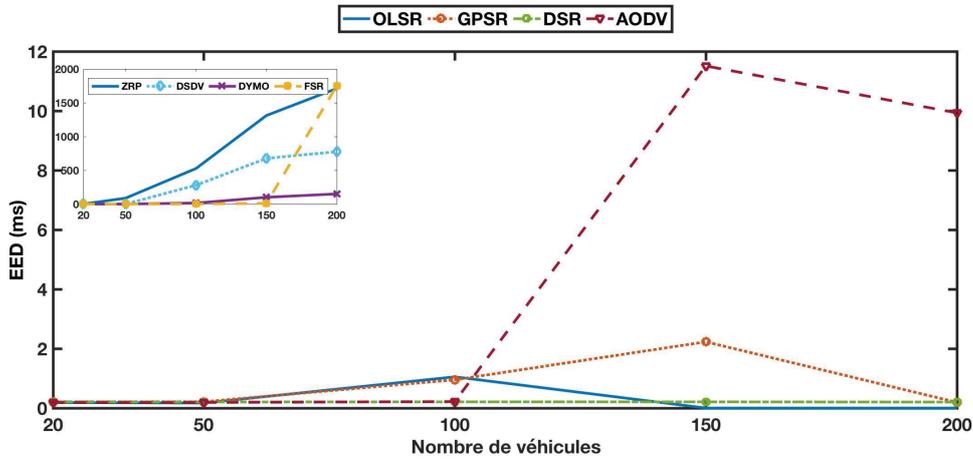


FIGURE 2.4 – Délai de bout en bout en fonction de la densité

La Figure 2.5 montre qu'en termes de débit, le GPSR a la meilleure performance, il garantit un débit plus élevé par rapport aux autres protocoles. Le débit des protocoles AODV et DSDV est presque stable dans tous les scénarios, tandis que celui des protocoles ZRP, DYMOUM et FSR varie de façon inattendue. En outre, le protocole DSR offre un faible débit où il présente les valeurs les plus déclinées par rapport aux autres protocoles.

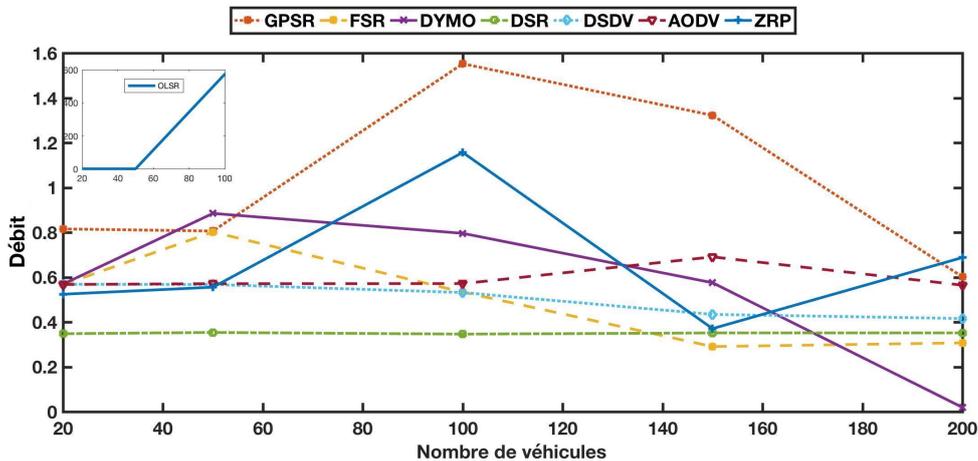


FIGURE 2.5 – Débit en fonction de la densité

La Figure 2.6 illustre le coût de routage des huit protocoles en fonction du nombre de véhicules en mouvement. Il est à noter que lorsque le nombre de véhicules augmente, le coût augmente en particulier pour FSR, ZRP, DSDV, DYMO et OLSR. Cependant, les protocoles GPSR, DSR et AODV offrent un routage à moindre coût par rapport aux cinq autres. Ce faible coût du routage s'explique par le fait que

ces protocoles réduisent le nombre de paquets de contrôle et n'augmentent pas la taille de l'en-tête de message HELLO par beaucoup d'informations. Par conséquent, aucun frais de signalisation supplémentaire n'est produit.

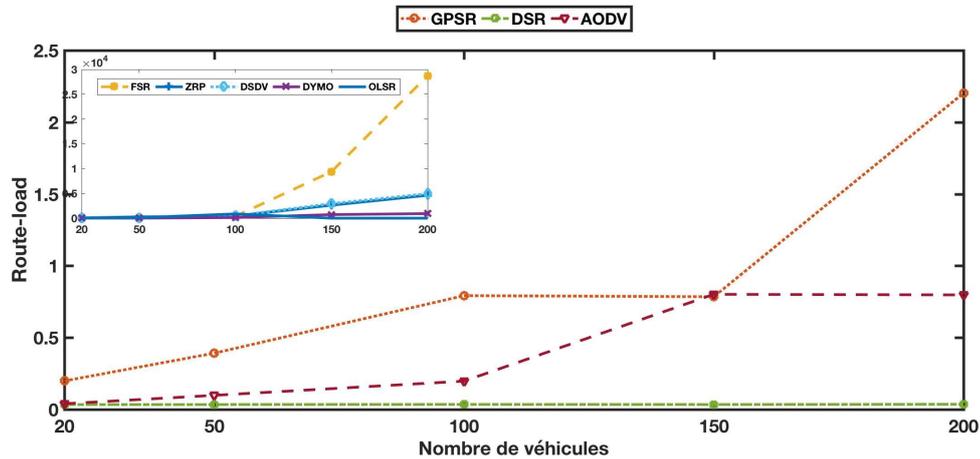


FIGURE 2.6 – Coût du routage en fonction de la densité

#### 2.4.2.2 Étude de l'impact de la charge sur les protocoles de routages étudiés

Le nombre de connexions est un autre paramètre pouvant affecter les performances des protocoles de routage dans un environnement VANET. Dans cette section, afin d'analyser et de comparer l'impact de la charge du trafic sur les huit protocoles de routage, nous avons varié le nombre de connexions entre 3 et 20 connexions tout en maintenant le nombre de véhicules à 100 véhicules.

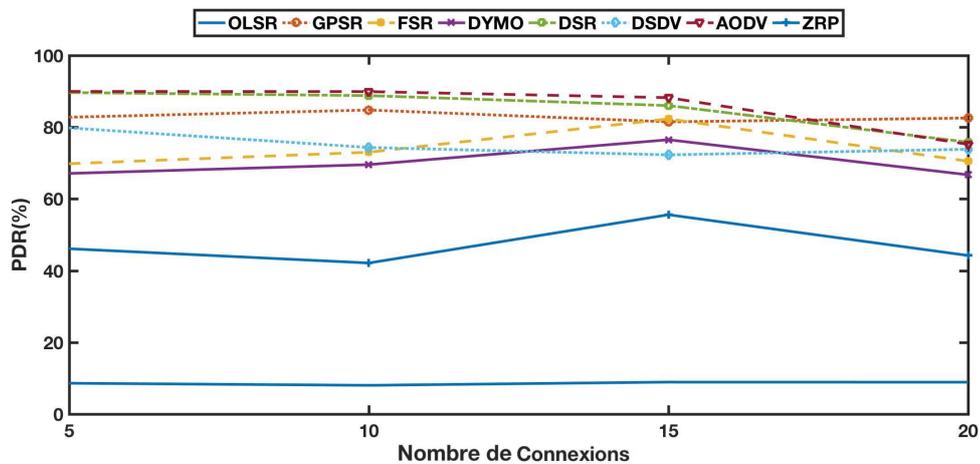


FIGURE 2.7 – Taux de paquets délivrés en fonction de la charge

On remarque dans la Figure 2.7 que le protocole OLSR est le pire des interprètes en termes de taux de paquets délivrés car il semble qu'il n'est pas très adapté pour un réseau dense avec une topologie dynamique. Bien que DSR et AODV en tant que protocoles de routage réactifs présentent de meilleures performances dans tous les cas. Le protocole GPSR présente une bonne performance dû au fait qu'il prend en compte la position des nœuds. Par la suite, on trouve respectivement les protocoles FSR, DSDV et DYMOUM. Nous remarquons que dans l'intervalle de 3 à 15 connexions, tous ces protocoles maintiennent presque le même résultat, mais avec l'augmentation progressive du nombre de connexions (20 connexions), le taux de paquets délivrés avec succès commence à diminuer légèrement. C'est également le cas pour le protocole ZRP, nous observons une diminution remarquable entre 15 et 20 connexions.

La Figure 2.8 présente le délai de bout en bout (EED) en fonction de la charge de trafic de données pour chaque protocole de routage testé. Comme nous pouvons le constater, les protocoles GPSR et DSR sont les plus efficaces puisqu'ils routent les paquets de donnée vers leurs destinations finales dans les plus brefs délais. Nous pouvons expliquer cela par le fait que le GPSR choisit le voisin le plus proche de la destination comme émetteur grâce aux informations de position géographique des voisins. Par la suite, on trouve que les protocoles AODV, FSR et OLSR ont eux aussi de bons délais mais pas mieux que celui des protocoles GPSR ou DSR. Cependant, le protocole DYMOUM obtient des résultats faibles, mais pas pire que les résultats des protocoles ZRP et DSDV. En effet, le protocole ZRP suivi par le protocole DSDV sont les moins performants parce qu'ils prennent beaucoup plus de temps pour découvrir les itinéraires disponibles. En ce qui concerne l'impact de la charge de trafic de données, nous remarquons que le délai de bout en bout de la plupart des protocoles est stable. Nous concluons alors que dans presque tous les protocoles testés, le nombre de trafic des données n'a aucun impact sur le délai de bout en bout.

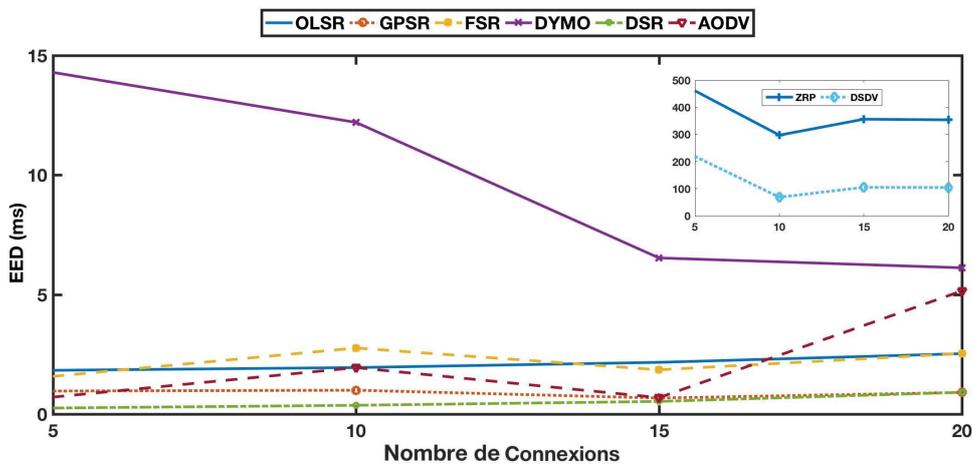


FIGURE 2.8 – Délai de bout en bout en fonction de la charge

Le débit tend par nature à augmenter lorsque le nombre de connexions augmente. Effectivement, comme on peut le voir dans la Figure 2.9, le débit augmente linéairement avec l'augmentation du nombre de connexions pour la plupart des protocoles de routage. Nous remarquons que les résultats sont très proches mais cela n'empêche pas que les protocoles DSR et DYMO restent les moins performants, alors que le GPSR semble être le meilleur choix parmi les protocoles existants.

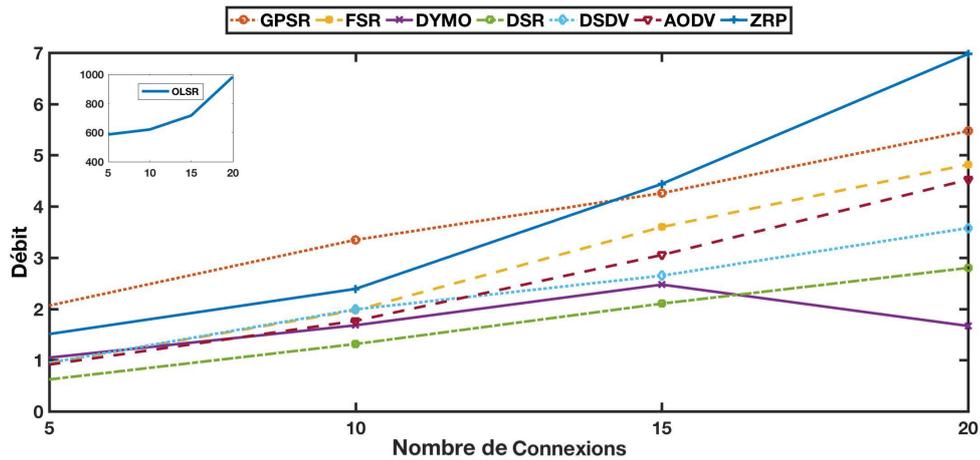


FIGURE 2.9 – Débit en fonction de la charge

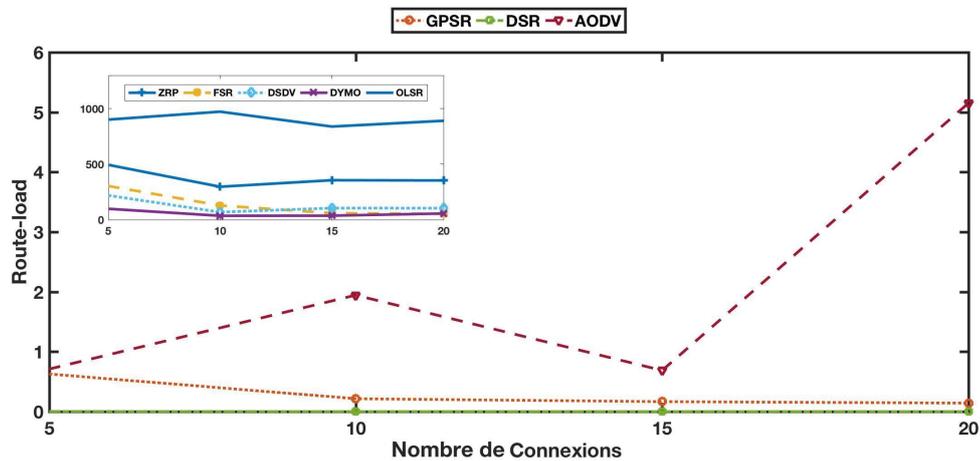


FIGURE 2.10 – Coût du routage en fonction de la charge

La Figure 2.10 indique la moyenne du coût de routage pour chaque protocole de routage testé. Les protocoles DSR et GPSR sont à nouveau les plus efficaces. Ceci est attendu car le GPSR gère les changements de topologie avec moins de messages. En ce qui concerne le protocole DSR, nous pouvons expliquer ses bons résultats par le fait qu'il utilise le cache pour la découverte d'itinéraire ce qui minimise le coût.

Notons que le cache est une structure de données qui stock les informations sur les routes existantes vers une destination spécifique. Il est utilisé pour faciliter la découverte de route fréquente dans DSR sans surcharger le réseau en envoyant des paquets de demande d'itinéraire. Le coût de routage du protocole AODV augmente à fur et à mesure que le nombre de connexions augmente. Le protocole OLSR suivie par le protocole ZRP sont les pires interprètes et doivent évidemment être évitées pour les VANET. Cela est probablement dû à la densité du réseau et aux changements fréquents de la topologie qui entraînent des ruptures des liens d'où la nécessité de relancer assez fréquemment le processus de découverte d'itinéraire, ce qui augmente le coût de routage.

## Conclusion

Ce chapitre s'intéresse à l'étude et l'évaluation de huit protocoles de routage communs dans un environnement véhiculaire, à savoir : DSR, FSR, OLSR, DYMO, AODV, DSDV, ZRP et GPSR. La comparaison de ces protocoles est réalisée en termes de QoS dans un environnement de simulation réaliste crée grâce à l'outil de simulation NS-2/VanetMobiSim que nous avons présenté en détail. Le taux de paquets délivré (PDR), le coût de routage, le délai (EED) et le débit sont les métriques d'évaluation de performances considérés dans nos évaluations.

L'objectif de cette analyse comparative dans un environnement véhiculaire dynamique est de justifier l'élimination des protocoles qui ne sont pas convenable pour les VANET et de défendre le choix du protocole le plus approprié qui sera la base de nouvelles propositions et améliorations.

À partir de l'analyse des résultats obtenus, on constate qu'il n'y a pas un protocole de routage qui est privilégié par rapport aux autres dans tous les scénarios et les critères d'évaluation. Toutefois, le protocole GPSR se classe parmi les meilleurs protocoles dans un environnement VANET et présente de bons atouts pour améliorer le routage et la QoS.

En fait, Il existe énormément d'études intéressées par l'amélioration des protocoles de routage initialement développés pour MANET pour être utilisés efficacement dans les environnements VANET [67]. En outre, À notre connaissance, la majorité des chercheurs se rassemblent sur le point que les protocoles de routage géographique sont les plus appropriés par rapport à d'autres [194, 88, 195]. Ceci nous a confirmé la robustesse et les avantages du routage basé sur la position par rapport au routage basé sur la topologie, chose qui a appuyé notre choix du protocole de routage géographique GPSR.

# GPSR : présentation, adaptation et optimisation

---

## Introduction

Comme nous l'avons mentionné dans les sections précédentes, les protocoles de routage géographique semblent être le candidat idéal pour les réseaux VANET pour plusieurs raisons. Tout d'abord parce que le routage géographique est une technique qui permet de délivrer un paquet à un nœud en se basant principalement sur les informations géographiques disponibles. Aussi, contrairement à d'autres techniques de routage, il ne nécessite aucune maintenance de route ou d'échange d'état de lien. Dans ce type de protocoles, l'itinéraire est déterminé uniquement lorsqu'il existe un besoin de transfert de paquet, ce qui minimise les possibilités de surcharger le réseau. Un autre avantage du routage basé sur la position est qu'un paquet contient la position de sa destination, en conséquence, chaque véhicule transmetteur choisit le chemin le plus optimal en termes de distance pour router le paquet au prochain saut.

Le protocole "GPSR" [9] est un exemple typique du protocole géographique. Il a été conçu à l'origine pour les réseaux MANET mais qui a été rapidement adapté pour les VANET. Comme son nom l'indique, ce protocole utilise deux différentes stratégies de routage à savoir "greedy" et "par périmètre". Dans les deux méthodes il utilise la position géographique de la destination finale d'un paquet et celle des voisins pour prendre les décisions de routage.

Dans ce chapitre, nous détaillerons tout d'abord le protocole de routage géographique GPSR. Par la suite, nous allons présenter quelques rectifications et optimisations pour adapter le protocole GPSR au réseau VANET. Les modifications que nous avons apportées à GPSR sont examinées et approuvées par une étude expérimentale sur NS-2 et elles ont considérablement amélioré les performances par rapport à la version originale.

## 3.1 Stratégies et politique de routage

GPSR est un protocole de routage géographique unicast développé en particulier pour les réseaux MANET. Ce protocole est l'un des protocoles de routage les plus prometteurs dans les réseaux VANET, il est actuellement le plus déployé dans ce type de réseau et il est sujet de plusieurs chercheurs et la base de nombreux

nouveaux protocoles (voir section GPSR). En effet Il a reçu une très grande attention en raison de ses avantages en tant que protocole géographique par rapport aux autres protocoles proactifs ou réactifs. L'avantage le plus important du GPSR est qu'il élimine certaines limitations du routage basé sur la topologie en utilisant les informations des positions géographiques qui peuvent être obtenues à l'aide d'un système de positionnement comme le dispositif GPS.

GPSR a été défini comme un protocole utilisant la géographie pour assurer le passage à l'échelle. En effet, ses développeurs "Karp et al." avaient pour objectif l'évolutivité du réseau en termes de nombre de nœuds et leur mobilité [9]. C'est-à-dire qu'ils ont visé l'élargissement du réseau dans des réseaux de grande taille pour accueillir un plus grand nombre de nœuds avec une mobilité plus importante ayant par conséquent un très faible échange d'informations.

Selon GPSR, pour transmettre des paquets, chaque véhicule transmetteur prend la décision de routage en fonction de trois informations : sa propre position géographique, la position de la destination finale et la position de ses voisins directs (à un seul saut). Il utilise deux stratégies de routage : transmission "greedy", qui est utilisée chaque fois que possible, et transmission par périmètre, qui est utilisée dans les situations où la transmission "greedy" ne peut pas être exécutée comme le montre la Figure 3.1.

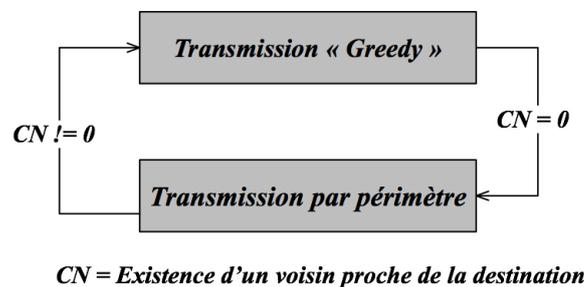


FIGURE 3.1 – Alternance entre les deux stratégies de GPSR

### 3.1.1 Stratégie de transmission "Greedy"

La stratégie de transmission "Greedy" (ou gourmand) est la stratégie de routage principale utilisée chaque fois que possible pour choisir le prochain véhicule qui prendra le relais de routage (next hop forwarder). Cette stratégie est appliquée en sélectionnant à chaque saut le voisin le plus proche de la destination finale. Son but est de se rapprocher le plus possible de la destination pour l'atteindre plus rapidement et à moindre coût. Ces stratégies sont les plus intuitives mais elles ne permettent pas toujours d'atteindre la destination.

Comme les paquets contiennent les coordonnées géographiques de leurs destinations et chaque véhicule connaît les positions géographiques de ses véhicules voisins, alors un véhicule transmetteur peut faire un choix localement optimal et gourmand

en choisissant le voisin le plus proche pour router le paquet et s'approcher le plus possible de la destination. En effet, lorsqu'un véhicule doit envoyer un paquet à une destination précise, il recherche le candidat optimal à l'intérieur de sa portée radio (situé dans sa liste de voisins) qui remplit la condition ((3.1)) du plus proche nœud de la destination. Pour cela, chaque véhicule parcourt sa liste de voisins et compare toutes les distances séparant ses voisins de la destination finale. Ainsi, il choisit le voisin qui a la distance minimale. Cette stratégie est adoptée tout au long du processus de routage, de véhicule à véhicule, jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination finale.

$$n_{min} = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \operatorname{DISTANCE}(n_i, D) \quad (3.1)$$

Un exemple qui illustre clairement le choix greedy du prochain saut apparaît dans la Figure 3.2. Ici, le véhicule  $S$  doit envoyer un paquet à  $D$ , la portée radio du véhicule  $S$  est désignée par le cercle pointillé entourant les voisins  $n_1, n_2, n_3, n_4$  et  $n_5$ . Le voisin  $n_1$  est répertorié dans la liste des voisins de  $S$  (voir la Table 3.1). Il représente le voisin le plus proche de la destination  $D$  par rapport au véhicule  $S$  et tous les autres voisins. Par conséquent, le véhicule  $S$  envoie le paquet à son voisin  $n_1$ . Ainsi, avec la même méthode le véhicule  $n_1$  transmettra le paquet à son voisin  $n_{11}$  puis ce dernier l'enverra à la destination finale  $D$ .

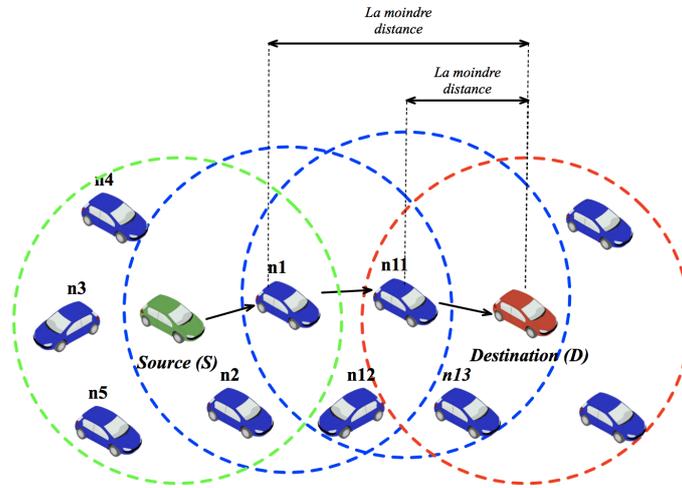


FIGURE 3.2 – Stratégie de transmission "Greedy"

Identifiant du véhicule	$\operatorname{Voisin}_i(x_i, y_i)$
$n_1$	$n_1(x_1, y_1)$
$n_2$	$n_2(x_2, y_2)$
$n_3$	$n_3(x_3, y_3)$
$n_4$	$n_4(x_4, y_4)$
$n_5$	$n_5(x_5, y_5)$

TABLE 3.1 – Liste des voisins du véhicule source

L'algorithme 1 explique le processus de la recherche du meilleur prochain relais de la transmission "greedy". On suppose que l'en-tête d'un paquet P contient " $p_D$ " la position géographique de sa destination. De plus, on suppose que chaque véhicule a une liste de voisins  $N$ , chacune de ses entrées est une paire d'un identifiant du voisin  $n_i$  et sa position géographique  $p_{ni}$ . Nous désignons l'identifiant et la position géographique du véhicule transmetteur respectivement par  $my\_id$  et  $my.p$ .

On note que  $DISTANCE(n_i, D)$  calcule la distance euclidienne entre les nœuds  $n_i$  et  $D$  en deux dimensions  $\sqrt{(x_n - x_D)^2 + (y_n - y_D)^2}$ .

---

**Algorithm 1** Transmission "Greedy" d'un paquet P
 

---

```

voisin_proche ← my_id
distance_min ← DISTANCE(my.p, pD)
Pour Tout ( $n_i, p_{ni}$ ) ∈  $N$  Faire
   $d = DISTANCE(p_{ni}, p_D)$ 
  Si  $d < distance_{min}$  Alors
    voisin_proche ←  $n_i$ 
    distance_min ←  $d$ 
  Fin Si
Fin Pour
Si voisin_proche = my_id Alors
  Retourne échec de la transmission greedy
Sinon
  Envoi P à voisin_proche
  Retourne succès de la transmission greedy
Fin Si

```

---

La transmission "greedy" est puissante et efficace tant qu'il y a un voisin proche de la destination, sinon, dans les situations où il n'y a pas de voisins adéquats, elle ne peut pas fonctionner. Dans le cas où le véhicule expéditeur est lui-même le véhicule le plus proche de la destination (par rapport à ses voisins) et cette dernière reste inaccessible en un seul saut (la destination n'est pas dans sa portée radio), alors, dans ce cas, la stratégie de transmission "Greedy" ne peut pas être appliquée.

La Figure 3.3 illustre une situation où il y a échec de cette stratégie. Ici, le véhicule  $n_{11}$  qui représente le nœud le plus proche de la destination  $D$  est sélectionné comme prochain relais. Cependant, étant donné que la destination  $D$  est en dehors de la portée radio du véhicule  $n_{11}$ , alors elle est inaccessible en un seul saut. Par conséquent, la transmission "greedy" ne peut pas être appliquée. Pour résoudre ce problème, le véhicule exécute la stratégie de transmission par périmètre qui est la stratégie de secours pour surpasser ce blocage et transférer le paquet autour de la région vide.

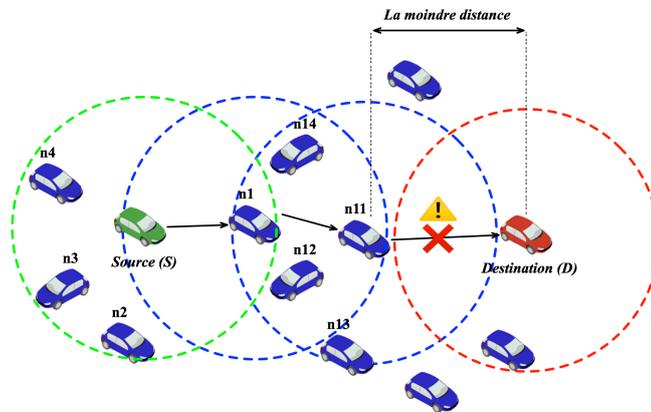


FIGURE 3.3 – Échec de la stratégie de transmission greedy

### 3.1.2 Stratégie de transmission par périmètre

Pour remédier aux échecs de la stratégie "greedy", le véhicule passe à un autre processus appelé transmission par périmètre ou périmétrique. Ce dernier consiste à tracer un graphe planaire constitué du véhicule qui possède le paquet et ses voisins et qui ne contient pas des arrêtes qui se croisent. Ensuite le paquet traverse le graphe en utilisant la règle de la main droite "Right-Hand Rule" pour contourner l'impasse et atteindre un voisin. Une fois la région vide est contournée, le processus "greedy" initial prend le relais. Ce changement de mode permet de garantir un taux de livraison beaucoup plus élevé que celui de la stratégie greedy seule.

Comme le montre la Figure 3.4, la règle de la main droite utilisée dans le "perimeter forwarding" est définie comme suit : Lorsque le véhicule  $n_{11}$  reçoit un paquet de la part du véhicule  $n_{10}$ , le chemin à suivre est le prochain qui se trouve dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en partant de  $n_{11}$  et par rapport au segment  $[n_{11}n_{10}]$  tout en évitant les "crossing links" (route déjà parcourue).

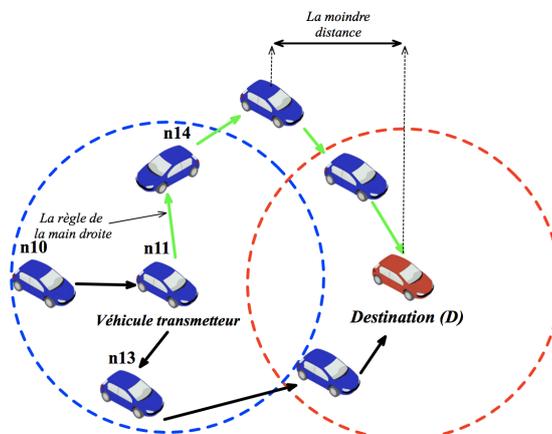


FIGURE 3.4 – Stratégie de la transmission par périmètre : la règle de la main droite

## 3.2 Stratégie "Beaconing"

Le routage selon le protocole GPSR se base sur les informations des positions géographiques de chacun des véhicules transmetteurs, de leurs voisins ainsi que celles des destinations. En fait, chaque véhicule peut obtenir facilement sa localisation grâce au dispositif GPS qu'il possède. En ce qui concerne la position de la destination, un service de localisation est utilisé par l'expéditeur du paquet pour la déterminer et l'inclure dans l'adresse de destination du paquet [196, 197, 198]. En revanche, pour connaître les voisins et leurs positions géographiques, GPSR procède à la stratégie "beaconing" [199, 200]. Cette stratégie est effectuée séparément des deux stratégies de routages "greedy" et "périmètre". En fait, même dans les cas où aucun paquet de données n'est transmis, chaque véhicule échange périodiquement avec ses voisins à un saut comme le montre la Figure 3.5 (véhicules présents dans sa portée radio), un message HELLO (ou paquet de balise "beacon packet" en anglais) qui contient son identifiant unique et sa position géographique actuelle (coordonnées géographiques  $x, y$ ). De cette manière, à chaque échange de messages "HELLO" entre voisins directs, chaque véhicule a une vision sur son voisinage d'une façon régulière.

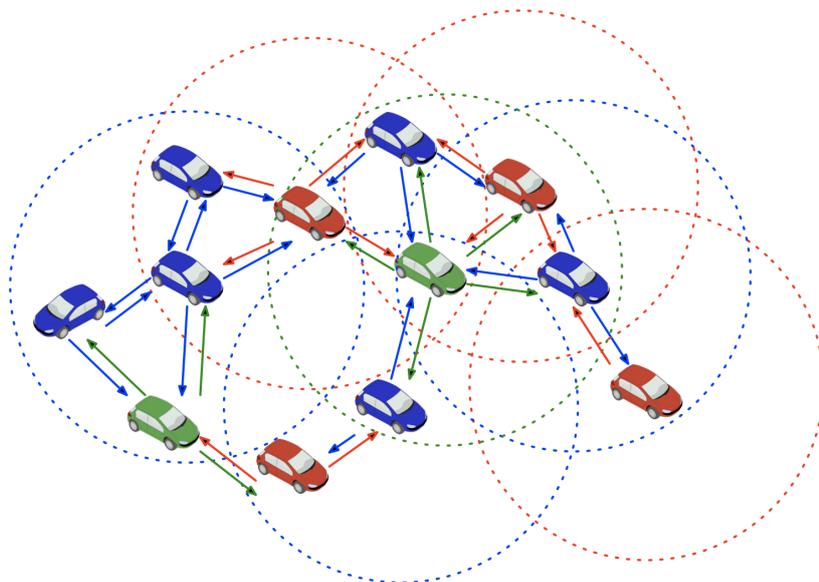


FIGURE 3.5 – Stratégie Beaconing

## 3.3 Gestion du voisinage

Dans GPSR, chaque véhicule possède sa propre liste de voisins où sont stockés ces derniers ainsi que leurs positions (voir la Table 3.2). Il remplit et met à jour les entrées de cette liste grâce aux informations collectées à partir des messages HELLO reçus périodiquement. En fait, après que chaque véhicule (supposant le véhicule  $A$ )

envoi son message HELLO à l'un des véhicules existants à l'intérieur de sa portée radio (supposant le véhicule  $B$ ), ce dernier reçoit le message HELLO de la part  $A$  contenant son identifiant ainsi que ses coordonnées géographiques  $(x_A, y_A)$ . Le véhicule  $B$  crée une entrée pour  $A$  dans sa liste de voisins s'il ne l'a pas encore. Si non, alors, il met à jour les anciennes informations du véhicule  $A$  en les remplaçant par les nouvelles informations reçues (la position géographique récente de ce dernier). Si le véhicule  $B$  ne reçoit pas un paquet de balise de son voisin  $A$  après un certain intervalle de temps, appelé temps d'expiration du voisin, alors le véhicule  $A$  n'est plus considéré comme voisin du véhicule  $B$  ayant quitté sa plage de transmission. Dans ce cas, le véhicule  $B$  supprime l'entrée du véhicule  $A$  de sa liste de voisins. Ainsi, chaque véhicule gère et maintient périodiquement son voisinage de la même manière.

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

TABLE 3.2 – Format de la liste des voisins

### 3.4 Limites du protocole GPSR

Les messages HELLO jouent un rôle très évident dans le suivi des changements fréquents de la topologie. Grâce à l'envoi périodique de ces messages (dépendamment de la fréquence d'envoi), chaque véhicule peut connaître régulièrement l'état de son voisinage. La précision de ces informations est très importante pour tout protocole de routage basé sur la position. Cela influence extrêmement l'efficacité des décisions de routage. Cependant, avec la grande mobilité et les vitesses intenses des véhicules dans l'environnement VANET, les informations géographiques échangées entre voisins deviennent très rapidement inexactes et périmées [102] et peuvent conduire à des mauvaises décisions. En effet, cette défaillance peut affecter négativement le choix du prochain relais, entraînant une baisse du taux des paquets reçus en raison de l'échec de l'itinéraire et la rupture de lien du fait que le paquet est transmis dans une zone où le véhicule destinataire n'est probablement plus présent. Pour mieux comprendre, avec l'hypothèse réaliste d'une vitesse de voiture de 100 km/h et d'une fréquence d'envoi des messages HELLO de 1 seconde. Entre deux messages HELLO successifs, la position du véhicule peut changer jusqu'à 28 mètres. Ce qui est d'une fraction considérable d'une portée radio d'un véhicule. Cela peut limiter les performances du protocole GPSR en termes d'efficacité des décisions de routage [201].

### 3.5 Correction d'une anomalie identifiée lors de l'intégration du protocole GPSR

En vue d'étudier en détail les performances de GPSR à travers son intégration dans NS-2, nous avons effectué de nombreuses simulations sous NS-2. Grâce à cette phase de test, nous avons remarqué que les positions des véhicules transmetteurs ne changent pas (comme le montre la Figure 3.6a). C'est-à-dire que les véhicules mobiles ne parviennent pas à actualiser leurs propres positions géographiques comme il est prétendu dans la réalité avec le GPS.

Afin de résoudre ce problème d'intégration, nous avons proposé une fonction qui se lance automatiquement pour chaque véhicule. Elle apporte instantanément les informations géographiques requises. De cette manière, chaque véhicule aura sa propre localisation chaque seconde conformément à la configuration réelle des GPS utilisées de nos jours [202, 203]. Après avoir appliqué cette solution, les véhicules parviennent à actualiser leur propre position géographique comme on peut le voir clairement dans la Figure 3.6b.

Notons que "nn" représente le nombre de véhicules existants, "getLocalisation" est la fonction qui récupère la position de n'importe quel  $vehicule_i$  en paramètre et "maLocalisation" désigne la propre localisation de chaque véhicule. Le pseudocode 2 suivant illustre la fonction de récupération des positions géographiques de façon périodique :

---

#### Algorithm 2 Récupération de la position géographique

---

```

Pour Chaque  $t = 1$  seconde Faire
  Pour Chaque ( $vehicule_{i=0}, vehicule_i < nn, vehicule_{i++}$ ) Faire
     $maLoc_i \leftarrow getLoc(vehicule_i)$ 
  Fin pour
Fin pour

```

---

En plus du problème de mise à jour des positions géographiques des véhicules, nous avons remarqué plusieurs autres points qui doivent être ajustés pour adapter la version classique du protocole GPSR à l'environnement dynamique de VANET. Par exemple, nous avons remarqué que les valeurs utilisées par défaut dans quelques paramètres au niveau de GPSR classique sont inappropriées avec les caractéristiques distinctives de VANET ; tel que la période d'envoi des messages HELLO qui est grande (défini par défaut à 5 secondes) par rapport à une mobilité très forte et une topologie très dynamique. C'est à dire que les véhicules ne mettent à jour la position de leurs voisins que chaque 5 secondes alors que dans 5 secondes un véhicule avec une vitesse de 100Km/h, peut rouler plus de 138 mètres. En conséquence, les positions géographiques des voisins seront très dépassées. Pareillement pour le temps d'expiration des voisins ou le temps de temporisation "time-out" des voisins qui est aussi très élevé. Notons que la période de temporisation représente le délai d'expiration d'un voisin. Cette période est définie par défaut à 200 secondes. Dans ce cas, si un véhicule  $A$  reçoit un message HELLO de  $B$  à l'instant  $t$ , le véhicule  $A$

### **3.6. Optimisation du processus de recherche du meilleur prochain relais**

ne doit supprimer  $B$  de sa liste des voisins qu'après un délai de  $t + 200$  secondes sans que  $B$  n'envoie un message HELLO à  $A$ . 200 secondes est une durée très grande puisque dans un environnement très dynamique tel que l'autoroute, deux véhicules ne sont voisins que pour quelques secondes. De ce fait, la période d'envoi des messages " HELLO " et le temps de temporisation devraient être relativement faibles afin d'éviter les mauvaises décisions basées sur des informations inexactes. Nous avons donc diminué les valeurs de chacun des deux paramètres (période d'envoi des messages HELLO et temps d'expiration) pour qu'ils soient appropriés au réseau VANET.

### **3.6 Optimisation du processus de recherche du meilleur prochain relais**

Comme nous l'avons déjà expliqué, selon GPSR, quand un véhicule doit envoyer un paquet de données à une destination précise, il cherche parmi tous ses voisins le plus proche de cette destination. Le voisin élu est désigné comme le meilleur prochain saut (ou relais). Cette approche est appliquée avant chaque envoi de paquet même si le véhicule destinataire soit parmi les voisins du véhicule transmetteur. En fait, le véhicule destinataire sera tôt ou tard le voisin d'un véhicule transmetteur alors il sera plus optimisé de vérifier à chaque transmission d'un paquet si sa destination est un voisin surtout que la recherche du meilleur prochain saut nécessite beaucoup de temps et de calculs particulièrement dans les réseaux denses. À cet égard, nous avons appliqué cette approche pour optimiser le processus de recherche du meilleur prochain saut. En tenant compte de cette optimisation ; présentée dans l'algorithme 3 ; chaque véhicule devant transmettre un paquet de données, cherche tout d'abord si la destination existe dans sa liste de voisins. S'il la trouve, le paquet de données est envoyé directement à la destination, sinon, alors le véhicule exécute sa stratégie habituelle pour prendre sa décision de routage.

```

zineb@ubuntu: ~/vanet/ns-allinone-2.33/ns-2.33/gpsr
File Edit View Terminal Help
Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 7.089644 est (180.360402,3904.537389)
35 - arpresolve
      sending HELD packet.

Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 8.820139 est (180.360402,3904.537389)
35 - arpresolve

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 11.039369 est (213.766247,4008.818112)
7 - arpresolve
      sending HELD packet.

Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 11.618968 est (180.360402,3904.537389)
35 - arpresolve

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 12.655267 est (213.766247,4008.818112)
7 - arpresolve

Je suis le noeud 11 ma position géographique (x,y) à l'instant 12.860038 est (524.288285,4893.181887)
11 - arpresolve
      sending HELD packet.

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 13.726334 est (213.766247,4008.818112)
7 - arpresolve

Je suis le noeud 11 ma position géographique (x,y) à l'instant 14.120850 est (524.288285,4893.181887)
11 - arpresolve

Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 14.593481 est (180.360402,3904.537389)
35 - arpresolve

Je suis le noeud 11 ma position géographique (x,y) à l'instant 16.142772 est (524.288285,4893.181887)
11 - arpresolve

```

(a) Avant

```

zineb@ubuntu: ~/vanet/ns-allinone-2.33/ns-2.33/gpsr
File Edit View Terminal Help
Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 7.089644 est (172.067747,3909.072625)
35 - arpresolve
      sending HELD packet.

Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 8.820139 est (168.345084,3911.108542)
35 - arpresolve

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 11.039369 est (205.564455,3978.362280)
7 - arpresolve

Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 11.618968 est (152.108780,3913.775728)
35 - arpresolve

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 12.655267 est (203.903612,3972.195050)
7 - arpresolve

Je suis le noeud 11 ma position géographique (x,y) à l'instant 12.860038 est (534.149248,4929.798741)
11 - arpresolve
      sending HELD packet.

Je suis le noeud 35 ma position géographique (x,y) à l'instant 14.415624 est (131.432170,3916.733139)
35 - arpresolve

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 14.940287 est (200.420672,3959.261798)
7 - arpresolve

Je suis le noeud 11 ma position géographique (x,y) à l'instant 15.756640 est (539.375966,4949.207188)
11 - arpresolve

Je suis le noeud 7 ma position géographique (x,y) à l'instant 16.035184 est (196.981809,3946.492218)
7 - arpresolve
      sending HELD packet.

```

(b) Après

FIGURE 3.6 – Imprimés écran du terminal avant et après la correction de l'erreur des mises à jour des positions des véhicules

**Algorithm 3** Optimisation de la transmission greedy d'un paquet P

```

DestinationTrovee ← 0;
Pour Tout  $n_i \in N$  && destinationTrovee ← 0
  Si  $n_i = D\_id$ 
    destinationTrovee ← 1
    Envoi P to  $D\_id$ 
    Retourne succès de la transmission greedy
  Fin Si
Fin Pour
Si (destinationTrovee = 0) Alors
  voisinproche ← my_id
  distance_min ← DISTANCE(my.p,  $p_D$ )
  Pour Tout  $(n_i, p_{ni}) \in N$ 
     $d = \text{DISTANCE}(p_{ni}, p_D)$ 
    Si  $d < \text{Distance}_{min}$  Alors
      voisinproche ←  $n_i$ 
      distance_min ←  $d$ 
    Fin Si
  Fin Si

```

## 3.7 Validation du paramétrage apporté à GPSR

### 3.7.1 Description de nos scénarios de simulation

Pour valider les modifications apportés à GPSR, nous avons choisi de comparer les quatre métriques de performances le PDR, le EED, le coût de routage et le débit des deux protocoles GPSR et GPSR+. Nous avons choisi le milieu autoroutier dans les scénarios de simulation en raison de la forte mobilité dans ce type d'environnement. Nous avons utilisé un espace de 700\*5000 mètres<sup>2</sup> généré au hasard et composé d'intersections, de deux routes bidirectionnelles à deux voies chacune, et des densités différentes de véhicules en mouvement (de 50 à 350 véhicules) avec une vitesse allant de 80 jusqu'à 120 km/h. Les simulations ont été effectuées en utilisant la norme IEEE 802.11p sur les couches physiques et MAC, le trafic de données est de type CBR associé au protocole UDP et les sources et les destinations sont sélectionnées au hasard. Afin d'assurer la crédibilité et la fiabilité des résultats expérimentaux, nous avons effectué 10 fois l'expérience pendant 500 secondes respectivement pour chaque simulation.

Notons que la version modifiée de GPSR est appelée dans cette simulation "GPSR+". Cette version sera la base de nos améliorations dans les prochains chapitres.

TABLE 3.3 – Paramètres généraux de la simulation

Paramètre	Valeur	Unité
Modèle de Mobilité	IDM-LC	–
Dimension du la zone de simulation	700*5000	m <sup>2</sup>
Nombre de nœuds	50, 100, 150, 200, 250, 300 and 350	véhicules
Nombre de voies par direction	2*2	voies*directions
Nombre maximal des feux de signalisation	0	feu de signalisation
Vitesse minimale des véhicules	80	km/h
Vitesse maximal des véhicules	120	km/h
Type du trafic	CBR/UDP	–
Taille des paquets	32	bytes/paquet
Taux de paquets	4	paquets/s
Protocoles de routage	GPSR, GPSR+	–
Durée de la simulation	500	s
Nombre de simulations	10	–
Nombre de connexions	5,15, 30 and 50	connexions
Délai d'attente des messages HELLO	50	s
Période des messages HELLO	5	s
Version du simulateur NS-2	2.33	–
Protocole des couches MAC et PHY	802.11p(802.11Ext)	–
Portée radio	250	m
Type d'antenne	Omni-directional	–
Modèle de réflexion	Two Ray Ground	–

### 3.7.2 Résultats des simulations

#### 3.7.2.1 Impact de la densité

Pour étudier l'impact de la densité, nous varions le nombre de véhicules de 50 à 350, tout en fixant le nombre de connexions à 15.

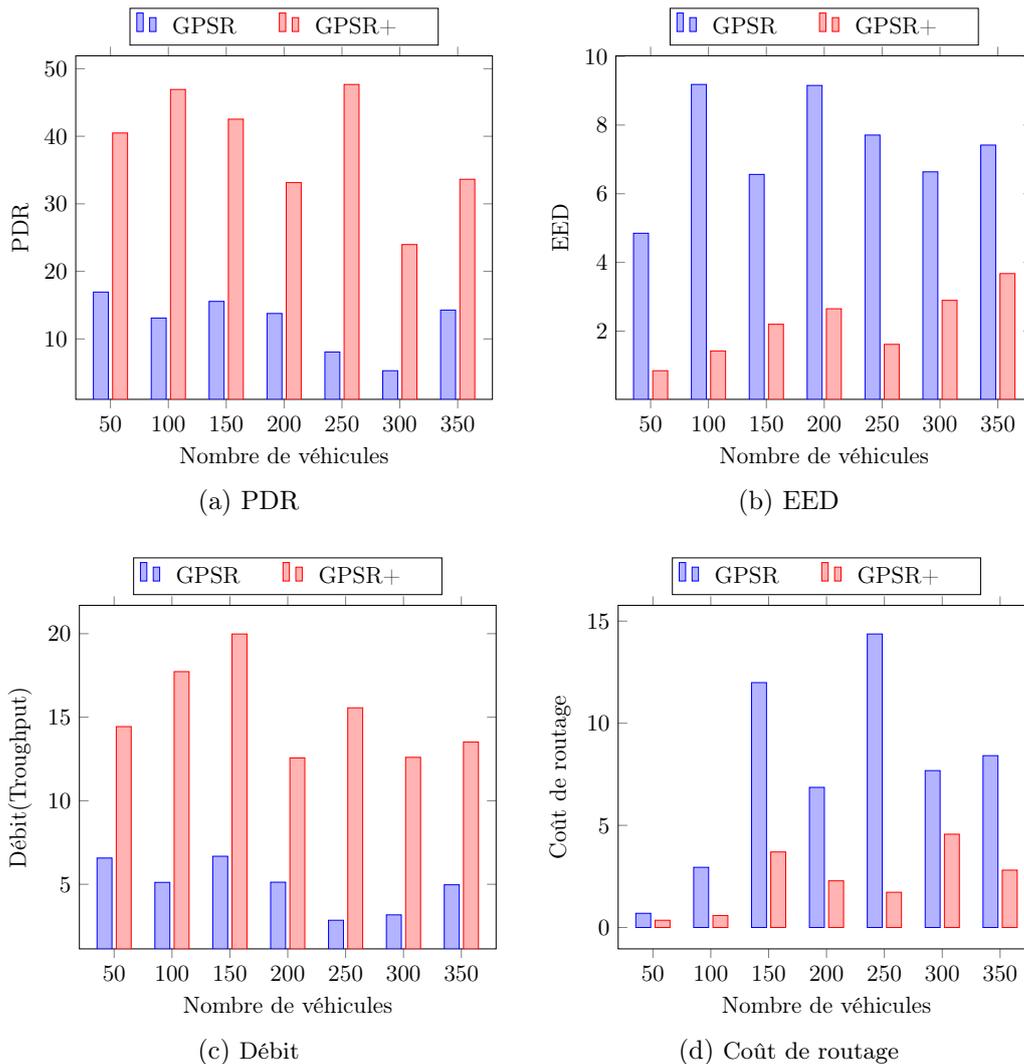


FIGURE 3.7 – Résultats des métriques de performance de chacun des protocoles GPSR et GPSR+ en fonction de la densité

La Figure 3.7a montre le taux de paquets livrés (PDR) obtenu pour chaque protocole de routage en fonction de la densité du véhicule. Il est clairement démontré que le GPSR adapté (GPSR+) garantit un PDR supérieur par rapport au GPSR basique. C'est le cas aussi dans la Figure 3.7b qui montre que la moyenne du délai de bout en bout (EED) atteinte par GPSR+ est plus courte que celle du GPSR basique. Les Figures 3.7c et 3.7d présentent respectivement le débit du flux et le coût du

routage en fonction de la densité. Aussi dans les deux figures, on voit clairement que les résultats du protocole GPSR ont été améliorés grâce aux solutions apportées.

Nous avons nettement constaté dans les Figures 3.7 que tous les performances du protocole GPSR basique sont faibles comparées au protocole GPSR+. Cela dû au fait qu'il ne prend pas en considération la mobilité des véhicules tandis que leurs positions géographiques changent constamment. Par conséquent, les décisions de routage de GPSR sont erronées d'où les mauvais résultats.

### 3.7.2.2 Impact de la charge du trafic de données

Pour étudier l'impact de la charge de trafic sur les performances des deux protocoles GPSR et GPSR+, nous modifions le nombre de connexions de 5 à 60 tout en fixant le nombre des véhicules à 200. Les résultats de la simulation concernant le taux de livraison de paquets avec succès de GPSR et de GPSR+ sont représentés dans la Figure 3.8. Nous remarquons que tant que le nombre de connexions augmente, le taux des paquets délivrés avec succès augmente aussi. Ce qui est normal, car un plus grand nombre de connexions générés signifie un plus grand nombre de paquets envoyés et un plus grand nombre de paquets reçus dans le cas où le routage est efficace. Quant à la comparaison des résultats du PDR obtenue pour chacun des protocoles de routage testés. Il est clairement démontré que GPSR+ garantit de meilleurs résultats par rapport au GPSR basic. En outre, l'amélioration proposée reste la meilleure comme elle l'avait déjà prouvé dans les autres comparaisons.

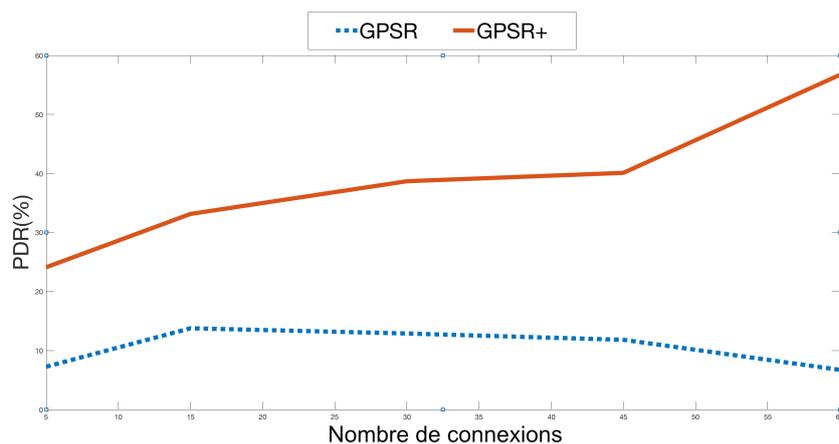


FIGURE 3.8 – Taux des paquets délivrés avec succès en fonction de la charge du trafic de données

Le paramétrage et l'optimisation appliqués au protocole GPSR afin de l'adapter à VANET ont montré leurs gains. En effet, nous constatons une amélioration importante dans toutes les métriques d'évaluation de performance.

## Conclusion

À l'égard des résultats observés dans le chapitre précédent, qui affirment le potentiel du protocole géographique GPSR pour assurer le routage dans les VANET, nous lui avons accordé une attention particulière. En effet, dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'améliorer le protocole GPSR pour parfaire ses performances et sa QoS.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les stratégies de routage du protocole GPSR, sa stratégie de gestion de la mobilité ainsi que les limites de ce dernier. Après, Suite à de nombreux tests de simulation sur le GPSR en utilisant NS-2 et VanetMobiSim, une anomalie de la mise à jour des propres positions des nœuds mobiles a été identifiée. Cela est dû probablement à un problème d'intégration du protocole GPSR dans le simulateur NS-2/VanetMobiSim. Pour résoudre ce problème, nous avons corrigé l'anomalie, aussi, nous avons proposé une optimisation dans le processus de routage "greedy" ce qui permettra de minimiser le temps de calcul surtout dans les réseaux denses à très dense. Par la suite, nous avons vérifié et validé par simulation les modifications apportées au protocole GPSR. En conclusion, les solutions que nous avons proposé ont amélioré considérablement ses performances et la QoS.

# Amélioration du protocole de routage GPSR par application des approches de prédiction déterministe

---

## Introduction

À partir des chapitres précédents, nous avons conclu que les protocoles de routage existants développés initialement pour MANET, ne garantissent pas toujours une fiabilité suffisante lorsqu'ils sont affrontés à VANET. Nous avons conclu également que les protocoles géographiques sont les plus appropriés par rapport à d'autres, ainsi que les informations concernant les positions et les déplacements des véhicules devaient être prises en compte vu leur impact primordial dans les décisions de routage.

Dans cette thèse, nous ne proposons aucun nouveau protocole de routage, car les nombreux protocoles dans la littérature ont déjà montré un potentiel intéressant pour traiter les caractéristiques de VANET. En revanche, nous proposons d'améliorer l'un des protocoles de routage existants en tenant compte des informations sur la position et la mobilité des véhicules. En effet, notre attention s'est dirigé vers le célèbre protocole de routage géographique GPSR, et nous pensons qu'il serait avantageux de prédire les futures positions des véhicules afin de les utiliser lors du processus de routage, ce qui lui permettrait de prendre des décisions de routage plus intelligentes en anticipant les mauvaises situations, et donc d'améliorer ses performances.

Le choix du modèle de prédiction est fondamental. Il n'affecte pas seulement la qualité de la prédiction, mais également la vitesse et le temps de calcul. En fait, il existe différentes méthodes d'extrapolation mathématique avec différents niveaux de complexité permettant d'estimer les futures positions des véhicules [204, 205, 206]. Dans tout ce chapitre, nous avons choisi d'utiliser une technique déterministe basée sur les anciennes positions, la direction et la vitesse. Cette méthode est basique avec une très faible complexité, de sorte que la taille des paquets HELLO n'entraîne pas une surcharge supplémentaire au réseau. En fait, nous proposons deux approches de prédiction de la mobilité, à savoir la prédiction déterministe proactive et la prédiction déterministe réactive. Ces propositions appliquées sur le protocole GPSR améliorent

davantage les performances dans les réseaux véhiculaires.

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos motivations derrière l'utilisation de la prédiction de la mobilité des véhicules. Par la suite, nous allons définir les différentes approches et techniques de prédiction existante. Après, nous allons détailler nos deux propositions, et finalement nous allons les évaluer par une étude expérimentale comparative avec le protocole GPSR basique en utilisant le simulateur NS-2/VanetMobisim.

## 4.1 Motivation derrière l'utilisation de la prédiction de la mobilité

L'utilisation de la prédiction de la mobilité a été conçu sur la base de plusieurs aspects importants : d'abord, l'impact direct que présente la mobilité et la localisation des véhicules sur l'efficacité des décisions de routage des protocoles géographiques. Ensuite, le fait qu'il y ait des informations qui sont disponibles via GPS, telles que la vitesse et la direction, mais qui ne sont pas exploitées par GPSR. Une autre raison est que parmi les caractéristiques les plus distinctives de VANET, il y a le modèle de mobilité qui est prédictif et restreint (voir la section 1.3.4). Et finalement, les différents problèmes tels que les mauvaises décisions de routage causées, entre autres, par les directions opposées des véhicules, les inexactitudes dans la prédiction de la direction du conducteur aux intersections ou les déconnexions fréquentes. Imaginez par exemple le scénario dans la Figure 4.1. Il y a deux routes qui permettent de joindre la destination finale à partir de la *source*. Selon la stratégie greedy, le véhicule *source* choisit le véhicule *A* comme prochain relais puisqu'il est le plus proche de la destination finale. Néanmoins, le paquet sera perdu puisque la direction du véhicule *A* est différente de celle de la *destination*. C'est à dire qu'après quelques instants, *A* s'éloignera de la *destination*. Le mécanisme de prédiction prévoit cette situation, constitue la voie verte et évite le problème des directions opposées qui se produira en très peu de temps dans la voie rouge.

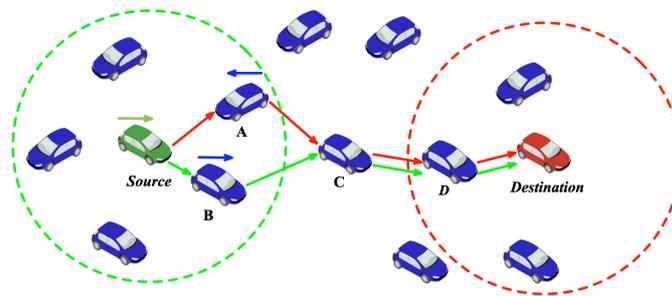


FIGURE 4.1 – Problème des directions opposées dans GPSR

C'est le cas aussi dans le scénario de la Figure 4.2, où, selon le processus d'acheminement par défaut de GPSR, le voisin élu comme prochain relais est le véhicule

$A$ , mais ce dernier sera fort probablement hors portée avant même le début de la transmission. En appliquant un mécanisme de prédiction à GPSR, nous anticipons la rupture de lien et nous choisissons le voisin le plus stable (véhicule  $B$ ). Grâce à cette proposition nous évitons autant que possible de passer par les routes estimées pas assez stables.

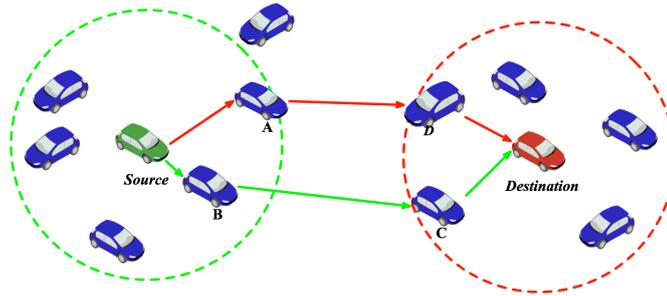


FIGURE 4.2 – Problème des véhicules hors zone de transmission dans GPSR

Un autre exemple est illustré dans la Figure 4.3, dans ce scénario, si nous considérons que le nœud *source* a deux voisins  $A$  et  $B$  et que le véhicule  $B$  est beaucoup plus rapide que  $A$ . Donc le véhicule  $B$  dépassera le véhicule  $A$  en très peu de temps. En connaissant les futures positions de  $A$  et de  $B$  grâce à la stratégie de prédiction appliquée à GPSR, le véhicule *source* s'attendra à cette situation et choisira par conséquence  $B$  comme prochain relais.

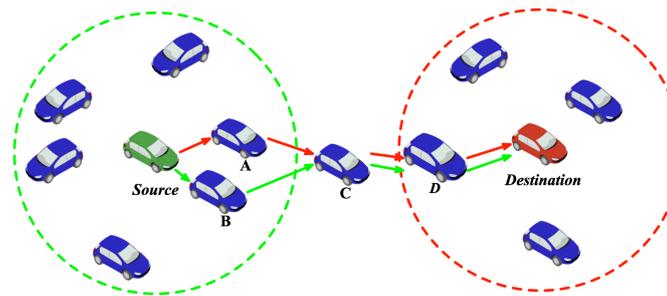


FIGURE 4.3 – Problème des différentes vitesses des véhicules dans GPSR

Certainement, il aurait été mieux si le véhicule source choisissait par défaut la route la plus stable pour atteindre la destination. Dans certains scénarios, l'itinéraire le plus stable peut être plus long en termes de distance, mais garantit moins d'échecs de routage. L'itinéraire le plus stable dans notre cas se réfère à un itinéraire composé par des véhicules estimés les plus stables et qui peuvent être utilisés pour acheminer les données de la source vers la destination.

## 4.2 Prédiction de la mobilité

Définition 1 : la prédiction de la mobilité est la capacité d'estimer une future position en connaissant la position ancienne.

### 4.2.1 Approches de prédiction

Les approches de prédiction sont les manières dont les prédictions sont réalisées. En utilisant les informations observées sur l'état du réseau, le futur état du réseau peut être prédit en utilisant des approches proactives et/ou réactives décrites dans cette section.

#### 4.2.1.1 Prédiction proactive

Les approches proactives prévoient l'évolution d'un état par rapport à l'état actuel une fois un changement est détecté. En effet, grâce à cette technique, chaque nœud prédit régulièrement le futur état de ses voisins, c'est à dire, à chaque fois qu'il récupère les informations concernant leur état actuel. L'avantage de cette approche est que les nœuds peuvent prédire à l'avance l'état futur du réseau et prendre des décisions de routage en conséquence au moment voulu.

#### 4.2.1.2 Prédiction réactive

L'approche réactive ne prédit l'état qu'au besoin lors d'un événement déclencheur. Dans cette approche, les informations requises par la prédiction sont stockées jusqu'au moment voulu (événement déclencheur). L'avantage est que cette méthode peut économiser le calcul et la bande passante puisque la prédiction ne se fait qu'au besoin.

### 4.2.2 Différentes techniques de prédiction

Étant donné que les prédictions peuvent aider les protocoles de routage à sélectionner de meilleurs chemins (à condition que les prédictions soient précises), de nombreuses techniques de prédiction de la mobilité ont été proposées pour les réseaux sans fil [207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215]. En général, elles peuvent être classées selon les catégories suivantes :

1. Déterministe
2. Stochastique
3. Historique
4. Heuristique

Dans le cadre de notre recherche, nous nous intéresserons que par les deux premières techniques, à savoir : la prédiction déterministe et la prédiction stochastique.

## 4.2.2.1 Prédiction déterministe

La prédiction déterministe est la forme la plus simple des techniques de prédiction, où les prédictions se basent sur les emplacements observés, la vitesse et/ou l'accélération du nœud cible. Dans cette technique, on suppose que le nœud cible se déplace avec une vitesse (vecteur de vitesse) constante ou une accélération constante. Notons que les nœuds sont localisés dans un système de deux dimensions indiqué par les coordonnées  $x$  et  $y$ . La Table illustre les notations utilisées dans cette technique de prédiction.

TABLE 4.1 – Notations utilisées dans la prédiction déterministe

Variables	Définitions
$(X_c^i, Y_c^i)$	Les coordonnées géographiques du véhicule $i$ à l'instant $T_c$
$(V_x^i, V_y^i)$	La vitesse du véhicule $i$ le long de la direction des axes $x$ et $y$ à l'instant $T_c$
$T_p$	L'heure voulue de la prédiction
$T_l$	L'heure actuelle
$(X_p^i, Y_p^i)$	La position prédite du véhicule $i$ à l'instant courant

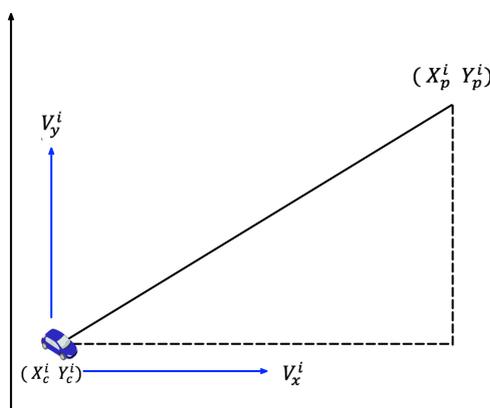


FIGURE 4.4 – Exemple de prédiction de la mobilité d'un véhicule

Comme le montre la Figure 4.4, compte tenu de la position  $(X_c^i, Y_c^i)$  du véhicule  $i$  et de sa vitesse  $(V_x^i, V_y^i)$  le long des axes  $x$  et  $y$  à l'instant  $T_c$ , on peut prédire la future position de  $i$  en utilisant les équations suivantes :

$$X_p^i = X_c^i + V_x^i * (T_p - T_c) \quad (4.1)$$

$$Y_p^i = Y_c^i + V_y^i * (T_p - T_c) \quad (4.2)$$

Le modèle ici implique le calcul des vecteurs de vitesse  $(V_x^i, V_y^i)$  qui indique la direction (ou le sens) du mouvement  $(dX_c^i, dY_c^i)$  et la vitesse  $Vitesse_c$  du véhicule à

l'instant  $T_c$ . Par conséquent, la vitesse peut être calculée selon les équations suivantes :

$$V_x^i = dX_c^i + Vitesse_c \quad (4.3)$$

$$V_y^i = dY_c^i + Vitesse_c \quad (4.4)$$

#### 4.2.2.2 Prédiction stochastique

Les modèles stochastiques ne visent pas à obtenir une prédiction exacte, mais plutôt une prédiction correcte avec une forte probabilité. Les modèles stochastiques peuvent être facilement utilisés pour ajouter une incertitude aux prédictions déterministes. Mais une utilisation plus importante est de modéliser des paramètres inconnus dans les équations d'état ou de prendre en compte l'erreur de prédiction des modèles. Les approches utilisées pour le suivi de la mobilité reposent principalement sur : le modèle autorégressif, le modèle de régression, le modèle de Markov, le filtre de Kalman et le filtre à particules ou la méthode de Monte Carlo. Le modèle autorégressif a été utilisé pour prédire l'emplacement des nœuds mobiles [216, 217, 218] ; le modèle de régression peut être utilisé pour prédire la durée du lien [219] ; le modèle Markov peut être utilisé pour prédire la disponibilité des liens [220, 221, 222] ; les filtres de Kalman sont couramment utilisés pour prédire l'état (c'est-à-dire l'emplacement, la vitesse, l'accélération et/ou la direction) des nœuds mobiles [223, 224, 225] ; et les filtres de particules ont été utilisés pour suivre l'état des nœuds mobiles [226, 227, 228]. Cependant, à notre connaissance, les chercheurs n'ont pas testé leurs méthodes de prédiction stochastique sur les protocoles de routage VANET.

Les méthodes de prédiction stochastique ont été utilisées pour estimer la position future d'un nœud ou la disponibilité des liens. Elle ont été largement utilisées dans des domaines tels que le suivi des cibles et la prédiction du trafic routier. Cependant, seuls quelques chercheurs ont choisi d'appliquer ces méthodes de prédiction pour prédire la mobilité des nœuds dans MANET. Bien que les techniques de prédiction stochastique ne soient pas couramment utilisées dans le routage MANET comme les techniques de prédiction déterministe, quelques recherches ont exploré la possibilité d'utiliser une méthode de prédiction stochastique dans le routage MANET [229, 209]. Ils ont montré que le filtre Kalman peut être utilisé pour prédire la qualité de lien et ont évalué la précision de la prédiction avec différents modèles de mobilité, mais ils n'ont pas montré si cette méthode peut améliorer les performances de routage par rapport aux autres protocoles de routage.

### 4.3 Travaux antérieurs

De nombreuses extensions ont été développées afin d'adapter le protocole GPSR et d'améliorer ses performances dans un réseau VANET. En effet, GPSR attire toujours l'intérêt des chercheurs qui continuent d'y contribuer avec différentes propositions. Dans la suite de cette section, nous présentons quelques travaux de recherche

proposés à cette fin ainsi que ceux liés à la gestion de la mobilité.

Les auteurs de [230] ont proposé un nouveau protocole de routage E-GPSR basé sur le tampon "buffer" du noeud pour contrôler la congestion du réseau. Ils ont considéré non seulement l'emplacement géographique des nœuds mais aussi leur mémoire tampon résiduelle. Dans le même contexte, les auteurs de [144] ont proposé un nouveau protocole de routage basé sur GPSR. Ces derniers considèrent quatre mesures pour prendre les décisions de routage, à savoir : la distance vers la destination, la densité des véhicules, la trajectoire et la bande passante disponible. Les auteurs de [12] ont également proposé une variante du protocole GPSR. Pour calculer le poids et produire des routes qui améliorent les performances du réseau, ils ont considéré seulement trois mesures, notamment les informations de localisation, les informations de la direction et la qualité de lien. En outre, les auteurs de [231] ont proposé un protocole de routage géographique prédictif (GPGR) basé sur la grille. En effet, ils ont utilisé des données cartographiques pour générer la grille routière et pour prédire la position mobile pendant le processus de sélection du nœud relais. Ainsi, il a été remarqué que le protocole GPGR réduit la possibilité de rupture de lien et évite de tomber sur la situation maximale locale dans les scénarios urbains. Dans [10], le protocole GPSR a été amélioré pour le cas de la très grande mobilité. En effet, un nouveau concept basé sur la prédiction des mouvements des véhicules, défini comme MOPR, a été conçu pour réaliser un processus de routage. MOPR estime la stabilité de chaque lien de communication du réseau en termes de durée de vie de la communication. Par la suite, il choisit la voie la plus stable composée par les liens intermédiaires les plus stables de la source jusqu'à la destination.

La gestion des informations des positions géographiques et des déplacements des véhicules ont conduit à beaucoup d'efforts de recherche. Exemple : Les auteurs de [11] ont étudié l'impact des métriques de mobilité (c'est-à-dire l'intervalle des messages HELLO et la vitesse du noeud) sur la précision des informations de localisation dans le protocole GPSR sur MANET. Grâce à cette étude, le problème de Neighbor Break Link (NBL) est identifié. Par conséquent, les auteurs ont proposé des schémas de prédiction pour résoudre cet inconvénient et éviter de transmettre un paquet de données vers des noeuds en dehors de la portée de transmission. Dans [232], les auteurs ont montré que les informations stockées dans la liste des voisins sont souvent expirées et ne reflètent plus la topologie réelle du réseau, ce qui entraîne une dégradation des performances. Ils ont donc proposé plusieurs alternatives simples qui adaptent l'intervalle de balise afin d'améliorer la précision de l'information du voisinage. Aussi, les auteurs de [233] ont analysé l'impact de l'inexactitude de l'information de la position causée par l'intervalle de temps des paquets beacon (BPIT) et la vitesse de déplacement du nœud (NMS) sur GPSR. Pour améliorer la fiabilité de la liste des voisins, ils ont proposé une stratégie de balisage dynamique de la logique floue (FLDB) en fonction de la corrélation entre le NMS, le nombre de nœuds voisins (NNN) et le BPIT en utilisant le mécanisme de contrôle de la logique floue (FLC). Dans le même contexte, les auteurs de [234] ont confirmé par des simulations que les informations des positions géographiques d'un véhicule voisin sont dépassées rapidement dans les VANET. Alors, pour surmonter ce problème, ils

ont proposé d'ajouter dans les messages HELLO périodiques des informations qui serviront à prédire les positions des nœuds dans le futur proche. Ainsi, chaque fois qu'un véhicule a besoin de la position des voisins, la position prévue est utilisée.

A notre connaissance, ces approches qui gèrent les informations de mobilité ont été bénéfiques dans la plupart des scénarios. Cependant, quasiment tous les calculs requis sont exécutés par les véhicules au moment de la réception des messages HELLO ou au moment de la recherche du nœud expéditeur. Aussi, dans la plupart de ces améliorations susmentionnées, les chercheurs utilisent des calculs compliqués et changent radicalement le processus de routage du protocole GPSR de base. Dans notre cas, pour améliorer encore plus le processus de routage de GPSR tout en conservant son principe de base, nous avons proposé GPSR+Predict en tant que protocole qui se base sur la prédiction proactive et GPSR+PR en tant que protocole qui utilise la prédiction réactive. Grâce à ces deux protocoles qui utilisent deux différentes approches de prédiction proactive et réactive, il est possible de prédire les déplacements des véhicules, prévoir le futur état du réseau et anticiper les situations critiques qui peuvent survenir.

#### **4.4 Stratégie de prédiction proactive appliquée au protocole GPSR : GPSR+Predict**

Notre but principal est d'améliorer le mécanisme de routage du protocole GPSR afin que les véhicules, en cas de besoin, puissent prendre des décisions de routage plus intelligentes et mieux choisir le prochain saut tout en maintenant le processus "greedy" de base. Nous visons à bénéficier des avantages de la prédiction de la mobilité de manière optimale sans envahir les véhicules transmetteurs par tous les calculs requis et sans surcharger inutilement le réseau par des données supplémentaires.

Notre solution consiste à utiliser les informations qui sont disponibles via GPS mais qui ne sont pas exploitées par GPSR, à savoir la direction et la vitesse du véhicule pour pouvoir prédire ses déplacements.

À la différence du protocole GPSR, où le véhicule expéditeur cherche tout simplement le véhicule voisin le plus proche de la destination finale, le véhicule expéditeur selon GPSR+Predict, cherche tout d'abord si la destination est dans sa liste des voisins. S'il la trouve, alors, il envoie le paquet de données directement à la destination, sinon, il cherche le meilleur prochain relais en termes de distance en se basant sur des positions prédites de ses voisins.

Grâce à cette stratégie de prédiction utilisée, lorsqu'un véhicule doit transmettre un paquet à son voisin, il choisira toujours le voisin qu'il estime encore présent dans sa portée radio. Autrement dit, il donnera la priorité aux voisins qu'il estime plus stables, il prendra ses précautions en avance et évitera les situations critiques telles que les scénarios dans les Figures 4.1, 4.2 ou 4.3. Par conséquent, cela influencera favorablement la qualité de ses décisions et donc augmentera les performances du protocole.

#### 4.4.1 Échange d'informations entre voisins par le biais des messages HELLO

Comme il est déjà indiqué, il est possible de prédire la future position d'un véhicule seulement en connaissant son ancienne position et sa vitesse. De ce fait, chaque véhicule récupère sa propre position géographique et sa vitesse à l'instant  $t$ , et prédit sa future position à l'instant  $(t+n)$  en utilisant les équations (4.5) et (4.6). Par la suite, il ajoute cette position estimée dans le message HELLO (en plus des informations habituelles existantes du véhicule) et le diffuse dans son voisinage. Chaque véhicule recevant les messages HELLO, connaîtra systématiquement l'état courant de son voisinage et aura une idée sur comment il évoluera dans le futur proche. Ainsi, il sera capable d'estimer combien de temps un voisin va rester dans sa portée radio, ce qui lui permettra d'estimer ses voisins les plus stables.

Dans la plupart des prédictions appliquées aux protocoles géographiques qui existent dans la littérature, la direction et la vitesse sont diffusées dans les messages HELLO [10, 144, 12, 234]. Par conséquent, les véhicules ne prédisent les futures positions qu'après avoir récupéré ces messages. Ainsi, chaque véhicule doit parcourir toute sa liste de voisins et doit prédire la future position de chacun de ses voisins un à un. Cette procédure engendre deux inconvénients majeurs. Le premier est que chaque véhicule a énormément de calculs à effectuer, tandis que le second désavantage réside dans le fait que le même calcul est répété par plusieurs véhicules (en cas de voisins en commun). En conséquence, cette stratégie de prédiction n'est pas optimale et peut affecter les performances du protocole et sa QoS en particulier dans les réseaux denses à très denses. Nous avons exclu ce problème en proposant que chaque véhicule exploite ses propres informations (position et vitesse) et prédit lui-même à l'avance sa future position, puis ajoute le résultat de ses prédictions dans les messages HELLO (voir la table 5.1) avant de les diffuser dans le voisinage. De cette façon, les calculs seront dispersés sur tous les véhicules et ne seront exécutés qu'une seule fois par le véhicule concerné. Par la suite, lorsqu'un véhicule reçoit des messages HELLO, il n'a besoin que de récupérer toutes les informations et les stocker dans sa liste de voisins. Ainsi, elles seront disponibles pour être employées à tout moment. Les Tables 4.2 et 4.3 présentent respectivement le format du message HELLO et celui de la liste des voisins d'un véhicule utilisés dans GPSR+Predict.

TABLE 4.2 – Format des messages HELLO du protocole GPSR+Predict

Identifiant du nœud	Coordonnées géographiques	Future position prédite
Id	$(x, y)$	$(Future(x), Future(y))$

TABLE 4.3 – Format de la liste des voisins du protocole GPSR+Predict

Identifiant du voisin	Coordonnées géographiques des voisins	Future position prédite des voisins	Temps de réception du dernier Hello message ( $T$ )
Id = $n1$	$(x, y)_{n1}$	$(Future(x), Future(y))_{n1}$	$T_{n1}$

La Figure 4.5 illustre les deux processus utilisés dans GPSR+Predict, en commençant par l'envoi des messages HELLO et puis en passant par l'envoi des paquets de données. Elle résume tout ce qui a été expliqué concernant la nouvelle stratégie de routage greedy du GPSR+Predict en utilisant la technique de prédiction proactive déterministe.

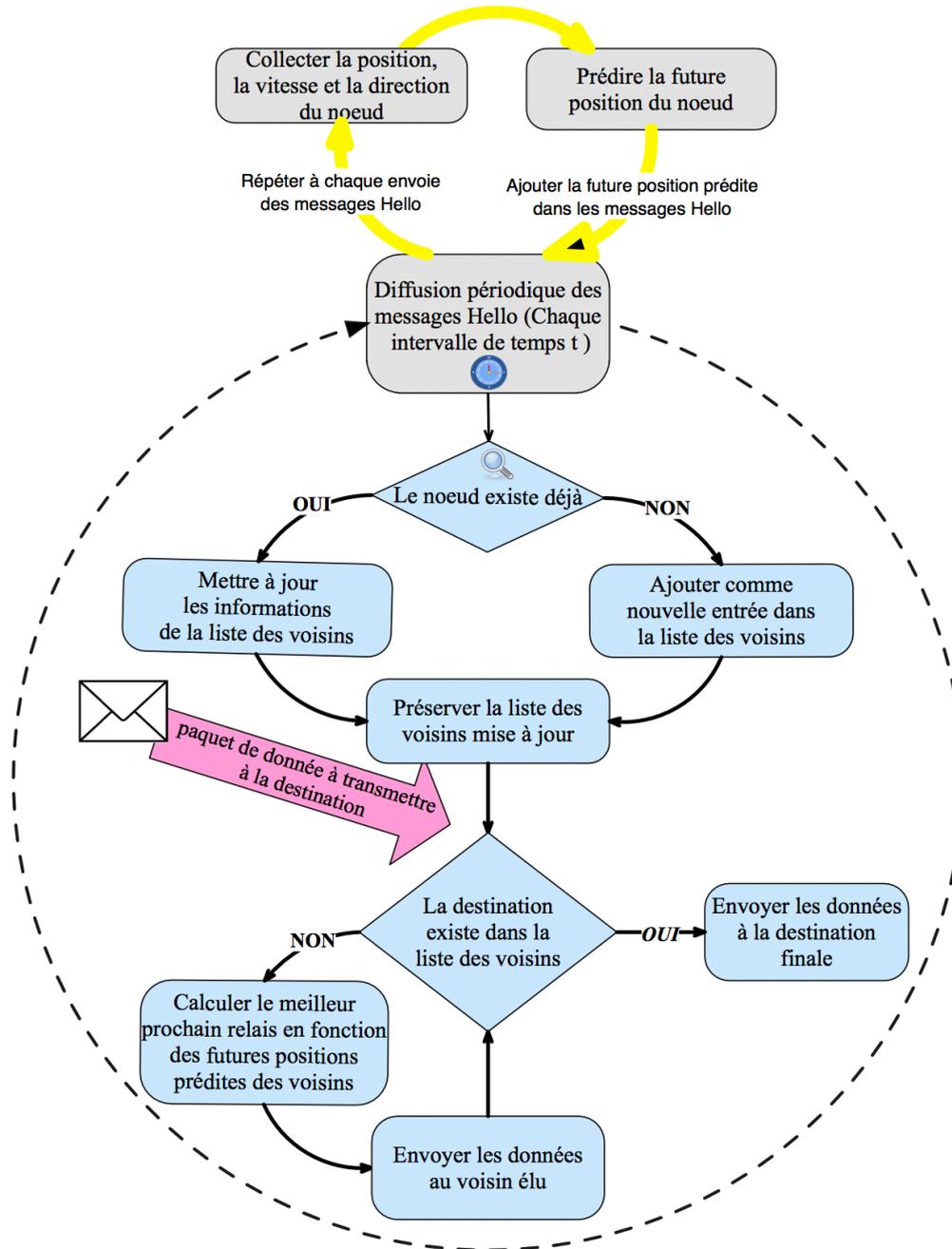


FIGURE 4.5 – Stratégie de la transmission 'greedy' du protocole GPSR+Predict proposée.

## 4.5 Stratégie de prédiction réactive appliquée au protocole GPSR : GPSR+PR

Malgré les avantages de la prédiction déterministe proactive, nous avons jugé qu'il était utile de la comparer avec une autre approche de prédiction déterministe qui est la prédiction réactive. Cette comparaison va nous permettre de connaître l'efficacité de chacune en termes de performance et de QoS.

À cette fin, nous avons proposé une amélioration du protocole GPSR (nommée GPSR+PR) en appliquant une approche de prédiction déterministe réactive à la stratégie de transmission greedy. Le protocole GPSR+PR se base lui aussi sur les deux processus fondamentaux : la gestion de la mobilité des véhicules par le biais des messages HELLO et le routage des paquets de données.

### 4.5.1 Gestion de la mobilité par le biais des messages HELLO

Ce processus est approximativement similaire à celui du protocole GPSR, la différence est que dans cette approche, une information supplémentaire qui est la vitesse est incluse dans les messages HELLO avant de les échanger entre les véhicules voisins.

Quand un véhicule reçoit un message HELLO de la part de l'un de ses voisins, il enregistre toutes les informations extraites de ce paquet ainsi que le temps de sa réception dans sa liste de voisins, soit en créant un nouveau voisin (s'il n'existe pas), soit en remplaçant les anciennes informations (s'il existe déjà). Ce processus est répété pour chaque véhicule et à chaque envoi/réception de message HELLO, ainsi la liste des voisins est mise à jour régulièrement mais pas suffisamment. Les Tables 4.4 et 4.5 présentent respectivement le format du message HELLO et le format de la liste des voisins utilisés dans GPSR+PR.

TABLE 4.4 – Format du message HELLO du protocole GPSR+PR

Identifiant du nœud	Coordonnées géographiques	Vélocité
Id	$(x, y)$	$V(x, y)$

TABLE 4.5 – Format de la liste des voisins du protocole GPSR+PR

Identifiant du voisin	Coordonnées géographiques des voisins	Vélocité des voisins	Temps de réception du dernier Hello message ( $T_a$ )
Id = n1	$(x, y)_a^{n1}$	$V(x), V(y)_a^{n1}$	$T_a^{n1}$

### 4.5.2 Routage des paquets de données

Comme c'est le cas pour le GPSR basique, lorsqu'un véhicule doit envoyer (ou transmettre) un paquet de données, il cherche le voisin le plus proche de la destination en se basant sur les informations enregistrées dans sa liste des voisins.

Cependant, avec la mobilité élevée, ces informations sont dépassées et n'indiquent plus les positions réelles. Pour essayer de résoudre ce problème, selon GPSR+PR, le véhicule transmetteur estime la position réelle de ses voisins à l'instant de l'envoi du paquet, et considère ces nouvelles positions estimées dans la recherche du meilleur prochain relais.

Le principe de la stratégie de routage greedy du protocole GPSR+PR est simple. Il adopte les mêmes étapes suivies par le protocole GPSR basique pour transmettre un paquet de données. La seule différence est qu'avec l'amélioration proposée, chaque fois qu'un véhicule nécessite l'emplacement d'un autre véhicule, il estimera sa position à cet instant, et utilisera cette nouvelle position prédite au lieu de celle initialement informée par le message HELLO. Notre objectif est d'améliorer la précision de la localisation des véhicules voisins sans avoir besoin d'augmenter le nombre de messages HELLO.

La Figure 4.6 présente les différentes étapes de la stratégie greedy suivies par le protocole GPSR+PR pour diffuser les messages HELLO périodiques, et transférer des paquets de données. Comme nous pouvons le voir, après que chaque véhicule (prenant l'exemple d'un véhicule  $V_1$ ) collecte sa position et sa vitesse, il les inclue dans son message HELLO et l'échange avec ses voisins ( $n_i$ ) d'une façon périodique (à chaque intervalle de temps  $t$ ). Au moment de la diffusion du message HELLO, le véhicule  $V_1$  reçoit à son tour des messages HELLO diffusés par ses voisins ( $n_1, n_2, \dots, n_i$ ). Ainsi, il vérifie s'ils sont de nouveaux voisins. Si c'est le cas, alors il met à jour les informations qu'il possède ainsi que l'instant de la réception de ces messages HELLO, si non, il les ajoute dans sa liste de voisins. De cette façon, cette liste est mise à jour chaque période  $t$ . En parallèle, si le véhicule  $V_1$  a besoin d'envoyer un paquet de données  $P_1$  à un véhicule  $D$  (les informations concernant la destination  $D$  est extraite du paquet  $P_1$ ), alors il utilise sa stratégie greedy pour chercher le prochain relais.  $V_1$  vérifie tout d'abord si  $D$  existe dans la liste de voisins, s'il le trouve, il envoie directement (en un seul saut)  $P_1$  à  $D$ , si non, alors il cherche le voisin le plus proche de  $D$ . Pour cela,  $V_1$  parcourt sa liste de voisins, pour chaque voisin ( $n_i$ ), il estime son actuelle position, calcule la distance qui le sépare de  $D$  (en utilisant la position prédite) et compare cette distance avec la distance qui sépare  $V_1$  et  $D$  en cherchant la  $DISTANCE(n_i, D)$  la plus inférieure. Le  $n_i$  qui accomplit cette condition est élu comme le meilleur prochain relais qui doit à son tour transférer le paquet  $P_1$  en suivant la même stratégie jusqu'à ce que le paquet atteigne la destination finale  $D$ .

Pour estimer la position de chacun des voisins  $n_i$ , les équations 4.5 et 4.6 suivantes sont utilisées :

$$X_p^{n_i} = X_a^{n_i} + V_x^{n_i} * (T_p - T_a^{n_i}) \quad (4.5)$$

$$Y_p^{n_i} = Y_a^{n_i} + V_y^{n_i} * (T_p - T_a^{n_i}) \quad (4.6)$$

Notons que  $X_a^{n_i}, Y_a^{n_i}$  et  $V_x^{n_i}, V_y^{n_i}$  sont les informations enregistrées lors de la dernière mise à jour reçue du voisin  $n_i$ ,  $T_p$  est le temps actuel, il désigne l'instant où le processus d'envoi d'un paquet de données est déclenché et  $T_a^{n_i}$  est le temps antérieur, il désigne l'instant où le dernier message hello a été reçu du véhicule  $n_i$ .

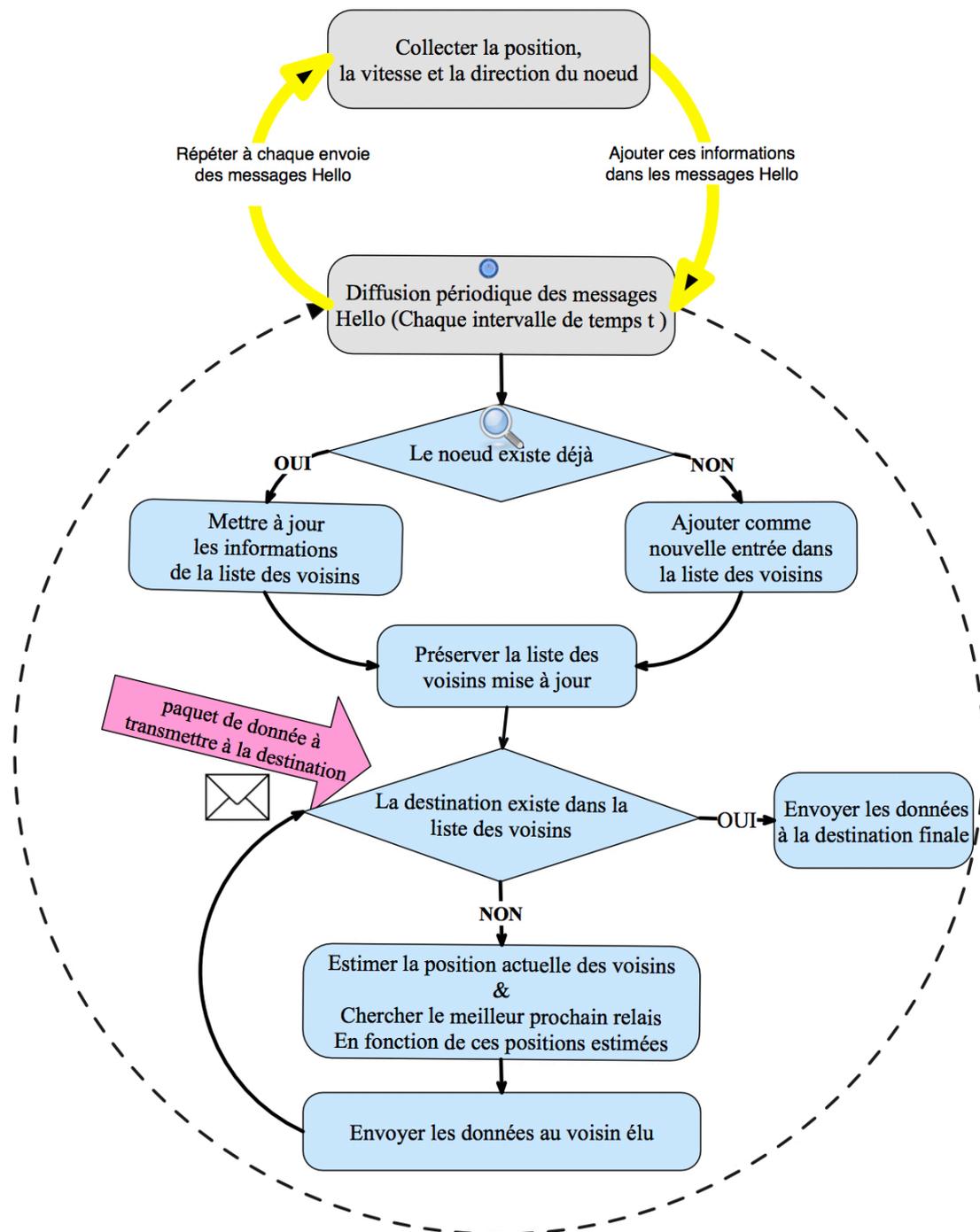


FIGURE 4.6 – Stratégie de la transmission 'greedy' du protocole GPSR+PR proposée.

## 4.6 Évaluation des performances

### 4.6.1 Scénario de simulation

Afin d'évaluer l'efficacité de nos améliorations, nous avons choisi de comparer les deux nouveaux protocoles GPSR+Predict et GPSR+PR ainsi que le protocole de base GPSR dans des scénarios urbain et autoroutier puisqu'ils sont deux milieux différents avec des infrastructures et des règles de circulation très distinctes. Chaque scénario est conçu en faisant varier le nombre de véhicules de 50 à 350 véhicules et en gardant le nombre du trafic de données fixé à 15 connexions. Nous avons utilisé le modèle TwoRayGround comme modèle de propagation et la norme IEEE 802.11p comme protocole des couches MAC/PHY. Aussi, nous avons considéré un taux de données de 6 Mbps qui correspond à la valeur la plus optimale pour avoir une communication véhiculaire sécurisée [235]. Enfin, Chaque paire de Source-Destination est choisie de manière aléatoire et tous les véhicules échangent des messages HELLO toutes les 5 secondes (valeur par défaut). La Table 4.6 montre les paramètres de configuration communs pour l'ensemble des expériences suivantes.

TABLE 4.6 – Paramètres généraux de la simulation

Paramètres	Valeur	Unité
Version du simulateur NS-2	2.33	–
Protocole des couches MAC et PHY	802.11p(802.11Ext)	–
Portée radio	250	m
Type d'antenne	Omni-directional	–
Modèle de réflexion	Two Ray Ground	–
Type du trafic	CBR/UDP	–
Taille des paquets	512	bytes/paquet
Taux d'envoi des paquets	1	paquets/s
Protocoles de routage	GPSR, GPSR+Predict, GPSR+PR	–
Durée de la simulation	500	s
Nombre de simulations	10	–
Nombre de connexions	5,15, 30 and 50	connexions
Nombre de véhicules	50, 100, 150, 200, 250, 300 and 350	véhicules
Délai d'attente des messages HELLO	50	s
Période des messages HELLO	5	s

#### 4.6.1.1 Environnement urbain

Pour le scénario urbain, un espace de 1000\*1000 mètres<sup>2</sup> est généré au hasard, composé de plusieurs intersections avec un maximum de 10 feux de signalisation et de deux voies par direction. La vitesse des véhicules varie entre 20 et 60 km/h. La Table 4.7 présente les paramètres utilisés dans VanetMobiSim pour générer les modèles de mobilité urbains utilisés dans nos expériences.

TABLE 4.7 – Paramètres du modèle de mobilité urbain

Paramètres	Valeur	Unité
Modèle de Mobilité	IDM-LC	–
Dimension de la zone de simulation	1000*1000	$m^2$
Nombre de voies par direction	2*2	voies*directions
Nombre maximal des feux de signalisation	10	feux de signalisation
Vitesse minimale des véhicules	20	km/h
Vitesse maximale des véhicules	60	km/h

#### 4.6.1.2 Environnement autoroutier

Pour avoir un modèle de mobilité autoroutier, un espace de  $700 * 5000 \text{ m}^2$  est généré au hasard. Il se compose de deux voies par direction sans aucun feu de signalisation. Les véhicules roulent à des vitesses qui varient entre 80 et 120 km/h. La Table 4.8 montre les paramètres considérés pour générer les modèles de mobilité autoroutiers utilisés dans nos simulations.

TABLE 4.8 – Paramètres du modèle de mobilité autoroutier

Paramètre	Valeur	Unité
Modèle de Mobilité	IDM-LC	–
Dimension de la zone de simulation	700*5000	$m^2$
Nombre de voies par direction	2*2	voies*directions
Nombre maximal des feux de signalisation	0	feux de signalisation
Vitesse minimale des véhicules	80	km/h
Vitesse maximale des véhicules	120	km/h

#### 4.6.2 Critères d'évaluation

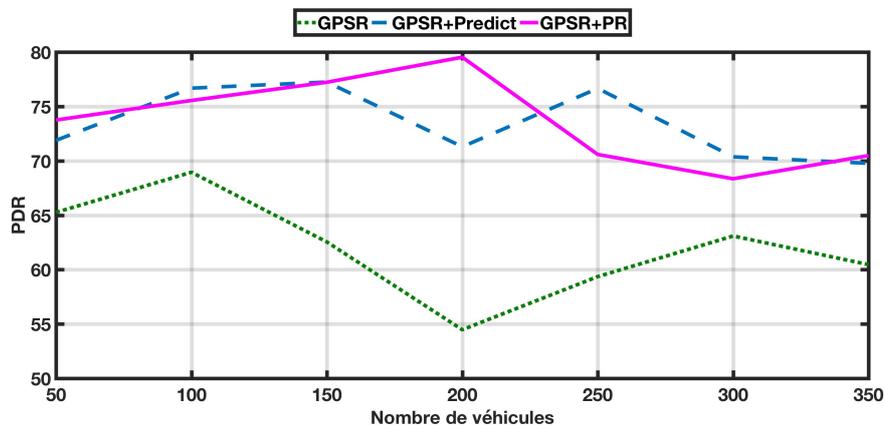
Le but des simulations réalisées avec l'outil NS-2/VanetMobiSim est d'évaluer l'efficacité de nos propositions apportées à GPSR afin de les valider, et ce par l'analyse des métriques de performance, à savoir : le taux de livraison des paquets ou le PDR, le délai moyen de bout en bout (EED), le débit et le coût de routage. Ces métriques sont définies en détail dans le Chapitre 2.

En plus de ces quatre métriques, nous analysons la surcharge des paquets de contrôle ou NRL (Normalized routing Load) qui détermine combien de paquets sont routés pour recevoir un seul paquet de données. Il est calculé en divisant le nombre total de paquets envoyés (y compris les paquets de données et les paquets de contrôle) par le nombre total des paquets de données reçus (voir l'équation 4.7). Cet indicateur reflète l'efficacité des protocoles de routage en termes de paquets de contrôle générés. Il est considéré comme important et doit être amélioré à son tour lors de l'évaluation d'un protocole de routage. Un protocole efficace ne doit pas surcharger le réseau par un grand nombre de paquet de contrôle.

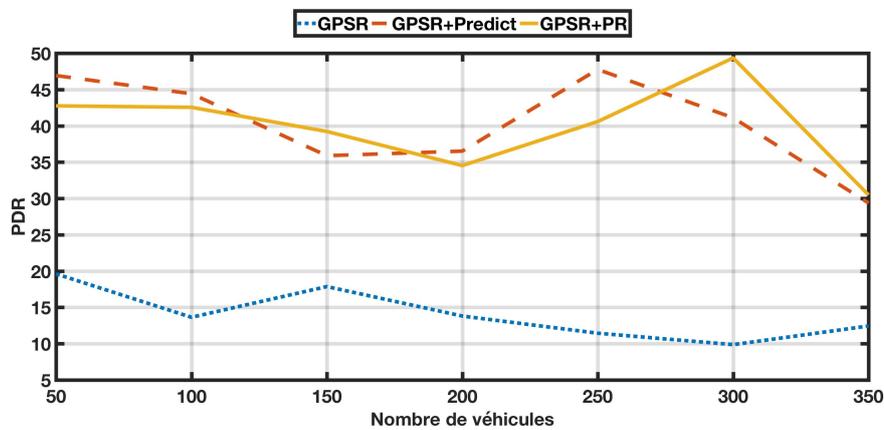
$$NRL = \frac{\text{Nombre\_de\_tous\_les\_packets\_transmis}}{\text{Nombre\_des\_paquets\_de\_donnees\_recus}} \quad (4.7)$$

### 4.6.3 Résultats des simulations

Dans nos expériences, nous avons évalué l'impact de la densité des véhicules sur la qualité du service du routage des protocoles GPSR+Predict, GPSR+PR et GPSR dans les deux différents environnements urbain et autoroutier. Nous avons varié le nombre de véhicules respectivement à 50, 100, 150, 200, 250, 300 et 350, tout en maintenant le nombre de connexions fixées à 15 connexions. Afin de garantir la crédibilité et la fiabilité des résultats expérimentaux, nous avons réalisé 10 simulations avec une durée de 500 secondes pour chacune.



(a) Scénario urbain

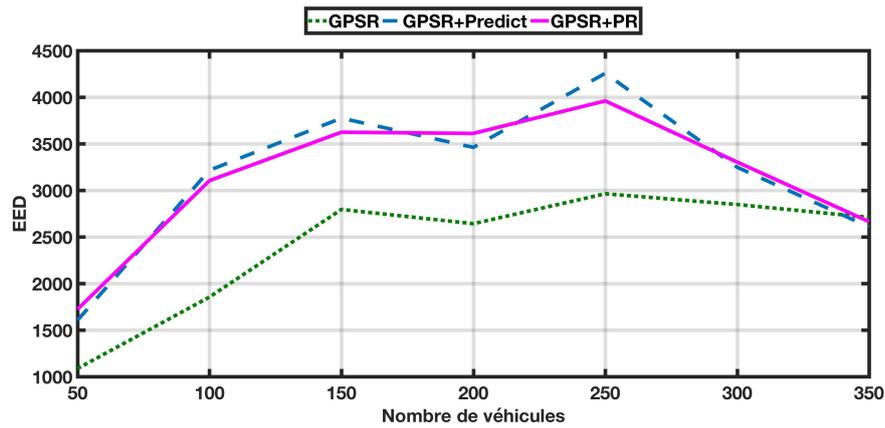


(b) Scénario autoroutier

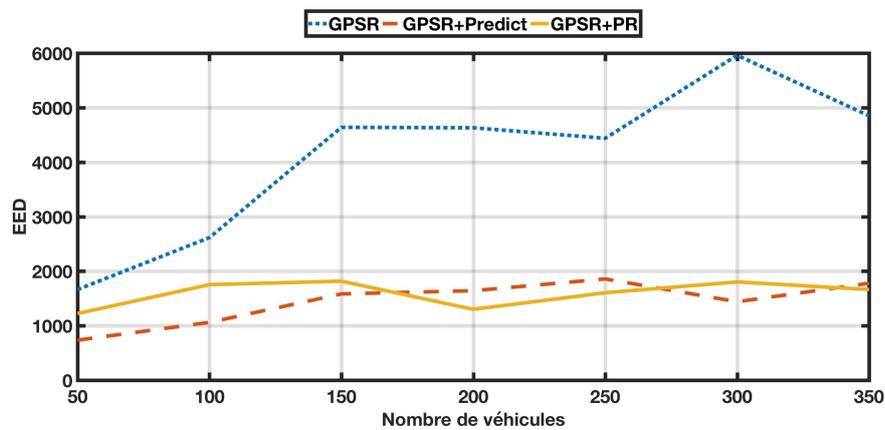
FIGURE 4.7 – Impact de la densité sur le taux de paquet délivrés respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier

Dans les deux scénarios : urbain (Figure 4.7a) et autoroutier (Figure 4.7b), le GPSR de base semble avoir les pires performances en termes de taux de paquets délivrés, alors que les deux autres protocoles GPSR+Predict et GPSR+PR garantissent de meilleurs résultats. Cela peut être expliqué par le fait que les deux propositions améliorent ; chacun à sa manière ; la gestion de mobilité des voisins, ce qui a minimisé plus ou moins le problème des informations dépassées. Nous constatons aussi

que le taux d'amélioration du PDR est beaucoup plus considérable dans le milieu autoroutier que dans le milieu urbain. C'est probablement à cause de la nature de chaque environnement. En effet, la mobilité dans le milieu autoroutier est beaucoup plus prédictive que dans le milieu urbain. En revanche, dans ce dernier les ruptures des liens sont moins fréquentes vu ses caractéristiques (mobilité moins dynamique, les stops, la distance de sécurité, etc.).



(a) Scénario urbain



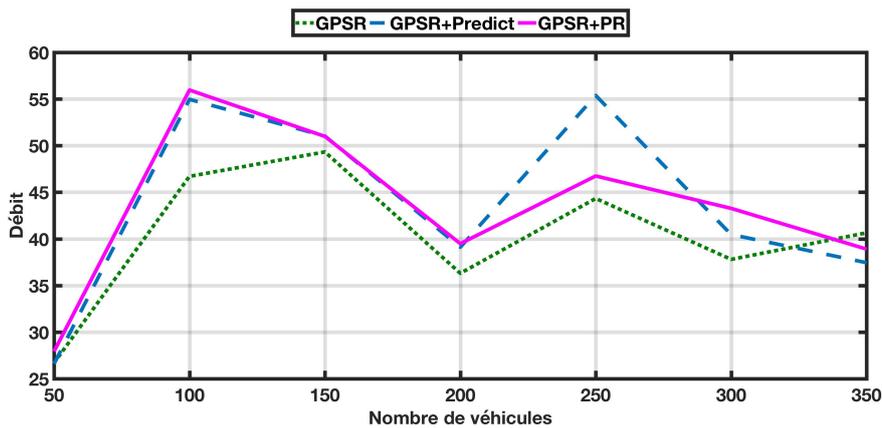
(b) Scénario autoroutier

FIGURE 4.8 – Impact de la densité sur le délai de bout en bout respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier

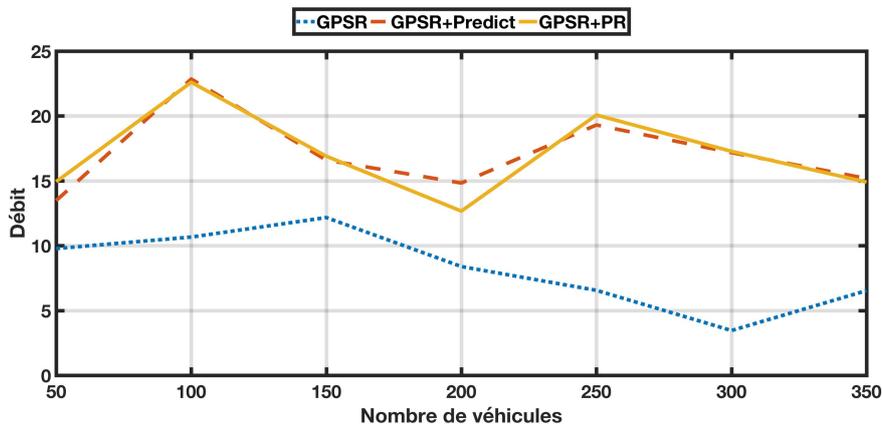
La Figure 4.8b présente le délai de bout en bout en fonction de la densité des véhicules pour les trois variantes GPSR standard, GPSR+Predict et GPSR+PR, dans un environnement autoroutier. On remarque que le protocole GPSR standard a le délai de bout en bout le plus long par rapport aux deux autres. C'est-à-dire qu'un paquet de données selon GPSR fait plus de temps pour arriver de la source vers la destination. Cela peut être expliqué par le fait que les informations concernant les positions géographiques des véhicules intermédiaires ne sont pas correctes dûes à la haute mobilité, du coup, les paquets ont du mal à les trouver. Cela conduit

en conséquence à une difficulté de transmission et très probablement à une perte des données. Cependant, les protocoles GPSR+Predict et GPSR+PR ont réussi à minimiser le délai de bout en bout, car, en utilisant la prédiction de la mobilité, les changements sont anticipés et les mauvaises décisions de routage sont évités. Par conséquent, les paquets de données routés auront moins de chance de se perdre.

Quant à la Figure 4.8a qui représente le délai de bout en bout en fonction de la densité dans un scénario urbain, on remarque que contrairement au scénario autoroutier, le délai de bout en bout des deux protocoles améliorés est relativement supérieur à celui du GPSR standard. Nous expliquons cela par la nature de cet environnement où la mobilité des véhicules n'est pas très estimable à cause des multiples arrêts et les nombreuses intersections. Aussi par le fait que dans ce type d'environnement il y a moins de rupture de lien et de déconnexion puisque les voitures sont souvent très proches (la distance de sécurité est presque nulle). Sans oublier que les véhicules sont relativement moins dynamiques par rapport à l'autoroute.



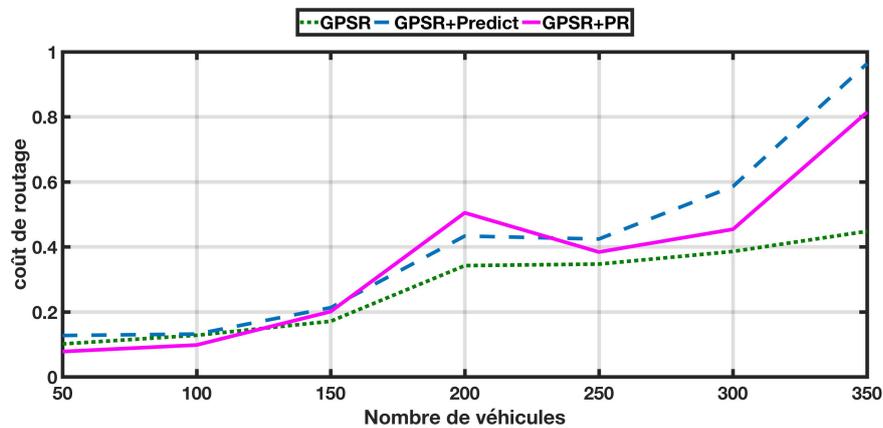
(a) Scénario urbain



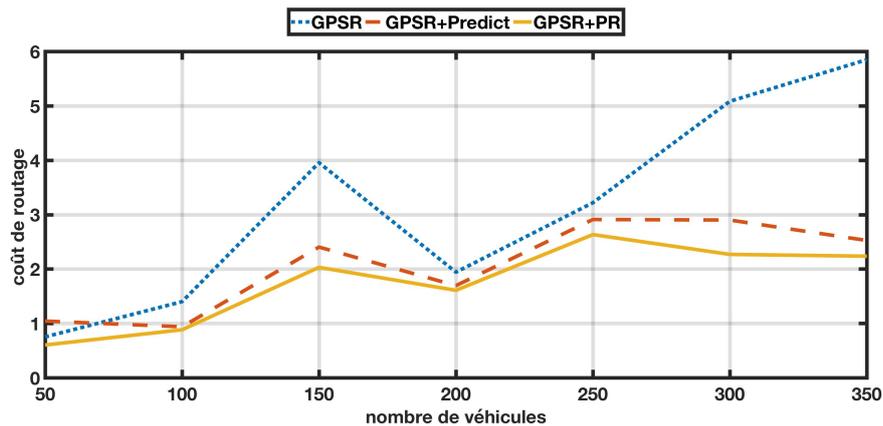
(b) Scénario autoroutier

FIGURE 4.9 – Impact de la densité sur le débit respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier

Les Figures 4.9a et 4.9b présentent le débit en fonction de la densité des véhicules pour le GPSR standard, le GPSR+Predict et le GPSR+PR respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier. Nous constatons que les protocoles proposés n'améliorent pas grandement le débit dans le milieu urbain, car, comme nous l'avons déjà expliqué, la prédiction de la mobilité dans ce milieu n'est pas très bénéfique. En revanche, dans le scénario autoroutier, on remarque clairement que nos deux propositions GPSR+Predict et GPSR+PR améliorent considérablement le débit du GPSR standard. Ceci s'explique par la bonne réception des paquets de données ainsi qu'à la stabilité des liens de communication par rapport à GPSR de base. En effet, dans le milieu autoroutier, on constate que le débit de GPSR est très bas à cause des déconnexions fréquentes en plus des mauvaises décisions de routage. Mais il a été amélioré grâce à la prédiction de la mobilité des voisins.



(a) Scénario urbain



(b) Scénario autoroutier

FIGURE 4.10 – Impact de la densité sur le coût de routage respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier

Les figures 4.10a et 4.10b illustrent le coût du routage en fonction du nombre de véhicules respectivement dans les scénarios urbains et autoroutiers. Les résultats

de la simulation de la Figure 4.10a montrent que GPSR+Predict et GPSR+PR garantissent un faible coût de routage par rapport au GPSR basique dans le milieu autoroutier. Les protocoles améliorés souffrent moins des ruptures de liens, qui conduisent à moins de perte de paquets et moins de coûts de routage. En ce qui concerne les résultats du scénario urbain présentés dans la Figure 4.10b, les deux nouvelles propositions GPSR+Predict et GPSR+PR ont légèrement augmenté le coût du routage par rapport au GPSR basique.

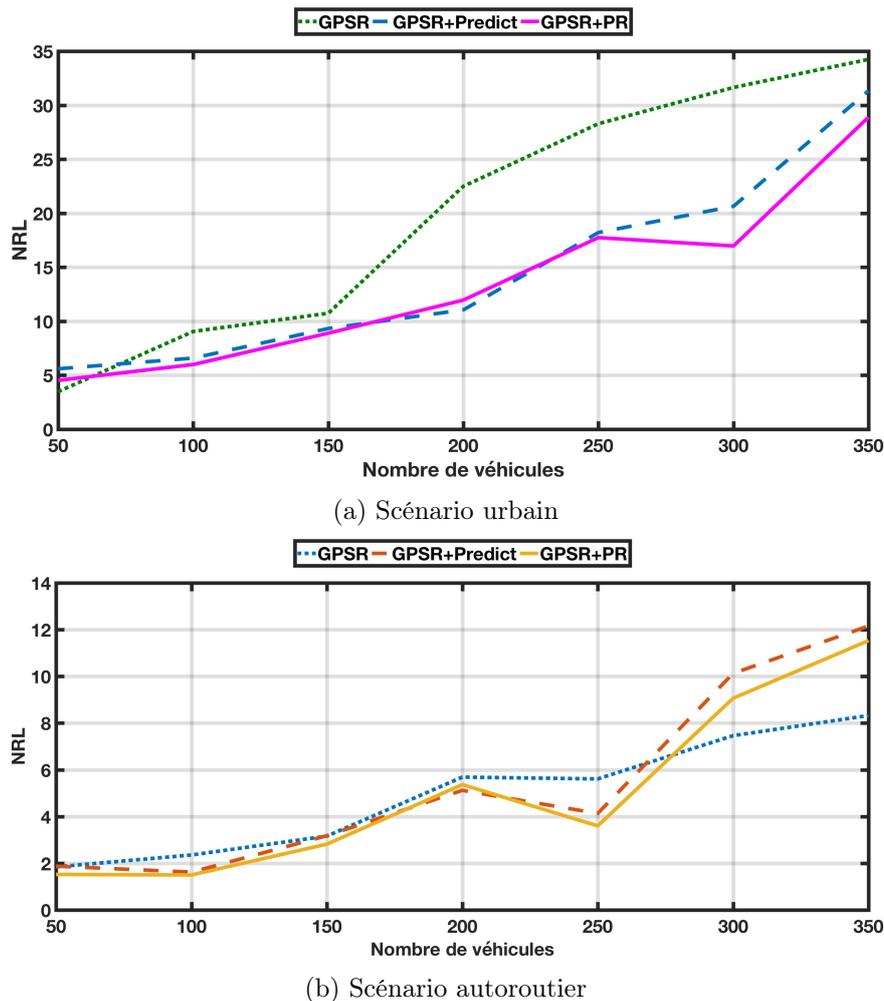


FIGURE 4.11 – Impact de la densité sur la surcharge du réseau respectivement dans les scénarios urbain et autoroutier

Les Figures 4.11a et 4.11b représente la surcharge du réseau en fonction de la densité des véhicules respectivement dans les scénarios urbains et autoroutiers. Comme le montrent les deux figures, le NRL augmente proportionnellement avec le nombre de véhicules. Ce qui est logique puisque communément, la surcharge de routage normalisée augmente quand le nombre de paquets circulant dans le réseau augmente aussi. Dans le scénario urbain présenté dans la figure 4.11a, nos deux

variantes améliorent le NRL particulièrement dans le cas des densités moyennes à très denses. Quant au scénario autoroutier (Figure 4.11b), les résultats obtenus montrent que GPSR+Predict et GPSR+PR améliorent légèrement le GPSR basique dans les cas de la densité basse à moyenne. Cependant, ils surpassent négligemment le GPSR basique dans le cas très denses. Cela est dû aux collisions qui se produisent souvent dans ce type de réseaux.

#### 4.6.4 Discussions

D'après les résultats obtenus dans les scénarios urbains, nous avons déduit que la prédiction de la mobilité n'est pas adaptée pour cet environnement vu les caractéristiques de ce dernier, à savoir : les multiples arrêts, les nombreuses intersections, les passages piétons, les arrêts brusques des transports en communs et les différentes interférences. Quant aux scénarios autoroutiers, les résultats obtenus sont plus ou moins satisfaisantes, mais il est clair que la prédiction de la mobilité a été avantageuse. En effet, ces propositions garantissent de meilleures performances par rapport au GPSR dans toutes les métriques d'évaluation, notamment : le PDR, le EED, le débit, le coût et le NRL. Cela prouve que nos suggestions améliorent les performances du GPSR sans surcharges supplémentaires.

En ce qui concerne la comparaison entre les deux variantes GPSR+Predict et GPSR+PR, nous constatons qu'il n'y pas une variante meilleure que l'autre. Au contraire, les deux approches ont presque les mêmes performances particulièrement dans les résultats du PDR, du EED et du débit. Alors que pour le coût de routage et le NRL, la prédiction déterministe proactive (GPSR+Predict) marque un léger désavantage par rapport à la prédiction déterministe réactive (GPSR+PR). Ce qui est logique puisque la prédiction réactive ne s'applique qu'à la demande alors que dans la technique proactive, elle s'applique périodiquement.

## Conclusion

Dans ce chapitre, de nouvelles approches de routage ont été proposées pour améliorer la précision de la localisation des véhicules voisins afin de garantir une qualité de service élevée et de meilleures performances dans les réseaux véhiculaires ad hoc. La nouveauté réside dans la simplicité de la conception des prédictions en préservant l'identité du protocole GPSR d'origine. En fait, les protocoles de routage GPSR+Predict et GPSR+RP exploitent de manière simple et optimisée les informations sur la mobilité des véhicules, à savoir la position géographique, la direction et la vitesse, pour estimer leur localisation dans un futur proche dans le cas du protocole GPSR+Predict ou pour estimer la position actuelle des voisins dans le cas du protocole GPSR+PR. Ces positions prédites contribueront grandement lors de la recherche du meilleur prochain relais et la prise des décisions de routage. En effet, grâce à ces prédictions, les variantes de GPSR prennent (chacune à sa manière) des décisions de routage plus intelligentes.

Dans les simulations, nous avons analysé l'impact de la densité des véhicules dans les deux environnements autoroutier et urbain. Les résultats montrent que les deux approches de prédiction déterministe proactive et réactive GPSR+Predict et GPSR+PR ont la capacité d'augmenter les performances et la qualité de service particulièrement dans le cas des autoroutes. Cela prouve que les techniques proposées évitent différents problèmes résultants des propriétés délicates de ce type de réseaux.

Les prédictions déterministes restent limitées et à faible complexité. En effet, dans ces techniques de prédiction, les imprévus qui peuvent se produire ne sont pas pris en considération. Chose qui peut influencer négativement la précision que nous estimons avoir. Dans le prochain chapitre nous proposons d'améliorer la prédiction en utilisant une technique plus sophistiquée pour avoir plus de précision et avoir des prédictions qui soient plus réalistes.

# Amélioration du protocole de routage GPSR par application d'une approche de prédiction stochastique

---

## Introduction

Dans les VANET, un routage efficace et puissant nécessite des informations de localisation extrêmement précises des véhicules voisins. En effet, la précision des positions géographiques des voisins influence grandement les décisions de routage, et par la suite le rendement des protocoles. Toutefois, en raison de la nature très dynamique de VANET, ces informations de localisation deviennent très rapidement dépassées et incorrectes. Il est alors fortement recommandé de les maintenir à jour le plus souvent possible. La solution la plus simple est d'augmenter la fréquence d'échange de ces informations en réduisant l'intervalle de temps entre deux messages HELLO successifs. Cependant, cette approche entraîne une grande quantité de paquets échangés, ce qui provoque une surcharge de réseau, une augmentation de coût de routage et, pire encore, une grande occupation des canaux avec fort probablement un grand nombre de collisions. En conséquence, le véritable challenge consiste à trouver un compromis entre la précision et le coût de routage sans oublier les autres paramètres de QoS.

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé deux variantes du protocole GPSR utilisant la technique de prédiction déterministe pour gérer la mobilité des voisins. Ce modèle est le plus appliqué de toutes les méthodes de prédiction. Il doit son succès à sa facilité de mise en œuvre, mais reste limité puisqu'il ne permet pas de calculer l'erreur de prédiction ou de tenir compte des imprévus qui peuvent se produire. C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous proposons d'utiliser une méthode de prédiction stochastique basée sur le filtre de Kalman afin de garder un niveau élevé de précision des informations de localisation. En effet, le filtre de Kalman est le prédicteur qui peut garantir cet objectif en utilisant les mesures disponibles et en supprimant l'effet du bruit pour obtenir non seulement une estimation précise de l'état des véhicules voisins, mais aussi de prévoir les ruptures de liens dans le voisinage tout en diminuant le nombre nécessaire des messages HELLO.

Un autre mécanisme que nous avons mis en place garantit que, lorsqu'un véhicule prévoit un éventuel vidage du voisinage en se basant sur deux paramètres, à savoir

les ruptures des liens et le nombre des voisins, alors il diffuse, dans sa zone de transmission, une demande d'échange des messages HELLO pour mettre à jour son voisinage. Grâce à cette approche que nous nommons "balise à la demande" ou "beacon on demand", nous pouvons diminuer encore plus la fréquence d'envoi des messages HELLO, et par conséquent, diminuer la charge du réseau et le coût de routage.

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu sur le filtre de Kalman standard, par la suite, nous présenterons la variante KF-GPSR définie par l'adaptation du filtre de Kalman au protocole GPSR. Après, nous présenterons le protocole BOD-KF-GPSR qui est une extension de KF-GPSR introduisant l'approche 'Beacon On Demand'. Enfin, grâce à la simulation, nous fournirons une évaluation des performances des protocoles KF-GPSR et BOD-KF-GPSR ainsi que d'autres protocoles bien connus, notamment : AODV, DSR, GPSR, ZRP et GPSR+Predict. Les résultats de simulation montrent les avantages des variantes proposées de GPSR dans les différents scénarios testés.

## 5.1 Travaux antérieurs

À partir de toutes les études et solutions proposées précédemment, nous avons affirmé que le mécanisme de routage de GPSR dépend entièrement des informations de la mobilité des nœuds et de leurs précision. Par conséquent, avec la grande mobilité de ces derniers dans les VANET, cela dépasse les capacités du GPSR basique. En effet, l'utilisation de la prédiction de la mobilité dans GPSR a présenté des avantages potentiels, néanmoins, la plupart des documents de recherche actuels utilisent le modèle de prédiction de la mobilité déterministe [11, 232, 234]. Ce modèle représente une méthode simple et rapide, mais ne fournit pas de mesures réelles puisqu'il ne considère pas les erreurs de prédiction, le bruit ou les imprévus qui peuvent se produire. Alors, il reste très limité par rapport aux autres méthodes plus sophistiquées. Les auteurs de [236] ont fourni une étude complète des différents modèles de prédiction. Leur enquête illustre les tentatives réussies qui visent à maîtriser la mobilité dans le réseau sans fil et à discuter de la possibilité d'adapter ces techniques aux réseaux mobiles ad hoc. Ils ont également décrit une application réussie de routage et de la gestion de localisation dans les réseaux ad hoc.

Parmi les méthodes sophistiquées de prédiction existantes, il y a le filtre de Kalman. Son but est, d'une part, de prévoir l'état du système avec une approche stochastique, et d'autre part, de corriger l'estimation grâce à des informations fournies par les mesures. Dans la littérature, il existe un grand nombre d'utilisations réussies du modèle de filtrage de Kalman dans le contexte de VANET. Par exemple, dans [237], les chercheurs ont proposé un mécanisme de prédiction automatique de la confiance basé sur le filtre de Kalman pour le calcul de la confiance. La méthode fusionne la confiance existante avec le comportement vérifié des nœuds pour obtenir une valeur de confiance mise à jour de façon itérative. Aussi dans [238], les auteurs ont proposé un protocole de gestion de l'emplacement assisté par mobilité, appelé

MALM (Mobility Assisted Location Management), dans lequel un véhicule calcule la position courante des autres véhicules voisins à l'aide de l'estimation du filtre de Kalman. Ils ont démontré que l'algorithme peut fournir une disponibilité précise des informations de localisation. Un autre travail a également utilisé le filtre de Kalman [239], les auteurs de ce dernier ont présenté une méthode qui prédit la durée de vie résiduelle d'un lien de communication. Leur méthode repose sur la prédiction de la position d'un véhicule et utilise les estimations pour trouver la durée de vie résiduelle du lien. Dans le même contexte, les auteurs de [204] étaient intéressés par la prédiction de la localisation d'un véhicule avec précision. Leur méthode de prédiction proposée repose sur le filtre de Kalman qui permet l'utilisation d'une analyse fondamentale de l'information de localisation à côté de l'analyse technique. Des expériences prolongées ont montré un degré plus élevé de performance de l'emplacement. Dans un autre article [240], les auteurs ont affirmé que l'estimation basée sur le filtre de Kalman est bénéfique pour améliorer les performances de la diffusion des messages de sécurité dans les réseaux véhiculaires.

Il existe de nombreuses autres utilisations du filtre de Kalman comme le routage. En effet, l'algorithme du filtre est amené à améliorer les protocoles de routage en exploitant ses capacités de prédiction. Par exemple, dans [241], les auteurs ont conçu une nouvelle solution appelée CR-VANET (radio cognitive des réseaux véhiculaires ad hoc) utilisant l'algorithme du filtre de Kalman. Ils visent à sélectionner le meilleur nœud intermédiaire en combinant la capacité cognitive et la technique de prédiction pour surmonter les problèmes des VANET, c'est-à-dire la rareté du spectre et la latence élevée. L'objectif principal de leur travail est d'établir un chemin de routage stable entièrement V2V entre la source et la destination sans utiliser d'unités fixes. Les chercheurs dans [242] ont proposé un service de localisation adaptable à la mobilité évolutive (MALS) avec une prédiction basée sur le filtre de Kalman pour gérer les mises à jour de localisation envoyées par les nœuds et pour résoudre leurs requêtes. En outre, une structure de regroupement géographique hiérarchique a été utilisée pour résoudre le problème d'évolutivité. Dans le même contexte, dans [243], un algorithme de routage hybride KPHR (Kalman Prediction Hybrid Routing) est proposé. Il utilise pleinement le mécanisme "store-carry-forward" ainsi que le filtre de Kalman pour prédire l'emplacement en temps réel du véhicule. Les résultats peuvent être considérés comme les valeurs de réglage du poids entre les nouvelles valeurs de mesure du modèle d'observation et les prédictions basées sur toutes les anciennes mesures. Chacun des travaux cités adopte une approche tout à fait différente de l'autre dans des environnements urbains ou autoroutiers pour résoudre le défi de la connectivité dans le réseau et modéliser la relation entre cette dernière et la localisation des véhicules.

En revanche, nous considérons que l'utilisation du modèle de prédiction stochastique (de la mobilité) dans un scénario urbain est moins intéressante que dans un scénario autoroutier. En fait, en s'appuyant sur les résultats obtenus dans le chapitre précédent, et sur la nature de l'environnement urbain, nous pensons que le protocole GPSR basique est capable de gérer avec succès la mobilité des véhicules dans ce type de scénarios. Par conséquent, nos expériences seront basées sur des

scénarios autoroutiers réalistes.

À notre connaissance, il n'y a pas d'études qui à la fois offrent un haut degré de précision dans les positions des véhicules voisins à l'aide du filtre Kalman, et diminuent la charge et le coût de routage en réduisant la fréquence de diffusion des messages HELLO. À cet égard, nous avons proposé notre contribution qui repose sur deux étapes fondamentales. Tout d'abord, l'adaptation de l'algorithme du filtre de Kalman au fonctionnement du protocole GPSR qui assurera la haute précision des informations des voisins, ensuite l'approche de "Messages HELLO à la demande" qui garantira la conservation des performances du protocole GPSR même avec une fréquence de diffusion très réduite des messages HELLO.

## 5.2 Le principe du filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un algorithme de prédiction largement utilisé dans divers domaines liés au traitement du signal, au traitement du radar et de l'image [244, 245]. C'est un contrôleur optimal au sens stochastique. Il vise à estimer l'état d'un système qui change au fil du temps de manière linéaire à partir d'une série d'observations bruyantes et incertaines.

"Le filtre de Kalman est un ensemble d'équations mathématiques qui fournit un moyen de calcul efficace (récursif) pour estimer l'état d'un système, de manière à minimiser la variance de l'erreur quadratique. Kalman est très puissant dans plusieurs aspects. Par exemple, il supporte les estimations des états passés, présents et même des états futurs, et cela peut être possible même lorsque la nature du système modélisé est inconnue." [246]. En d'autres termes, la robustesse du filtre de Kalman se manifeste par sa capacité de prédiction et de correction des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même. En effet, il considère deux vecteurs principaux : le vecteur d'état, qui représente l'état du système estimé et le vecteur de mesure qui reflète l'état du système observé et qui est utilisé pour corriger l'estimation.

### 5.2.1 Modèle d'évolution et modèle d'observation

Dans le filtre de Kalman, l'état du système est représenté par un vecteur d'état ( $X_k$ ). Ce vecteur représente l'ensemble minimal de données décrivant le comportement dynamique du système (la position et le statut de la mobilité). Quatre états du système sont nécessaires : la position géographique du nœud  $x$  et  $y$ , plus sa vitesse projetée à  $x$  et  $y$ .

Le vecteur d'état  $X$  avec l'index de temps  $k$  est illustré ci-dessous :

$$X_k = (x_k, y_k, vx_k, vy_k)^T \quad (5.1)$$

Où :

- $x_k$  et  $y_k$  sont les positions géographiques à l'instant  $k$  ;
- $vx_k$  et  $vy_k$  sont les vitesses projetées à l'instant  $k$ .

Le filtre de Kalman suppose que l'état actuel (à l'instant  $k$ ) a évolué par rapport à l'état précédent (à l'instant  $k-1$ ), alors, en considérant un processus stochastique, l'état actuel est prévu selon l'équation suivante :

$$X_k = AX_{k-1} + w_k \quad (5.2)$$

Où :

- $A$  est la matrice de transition. Elle attache l'état courant au précédent en absence de bruit. Les indices  $k$  et  $k-1$  signifient, respectivement, l'état courant et l'état précédent du système ;
- $w_k$  est le bruit de processus.

Le vecteur d'observation (ou le vecteur de mesure)  $Y_t$  relie les mesures du *GPS* (observables) à l'instant  $t$  à l'état du système. Il est réalisé selon l'équation suivante :

$$Y_k = HX_k + u_k \quad (5.3)$$

Où :

- $H$  est la matrice de mesure (observation). Elle attache les paramètres du système et les mesures ;
- $W_k$  est le bruit de mesure.

Le filtre de Kalman donne une méthode pour l'estimation récursive de l'état inconnu  $X_k$  en fonction des valeurs de mesure  $Y_t$ . Dans l'algorithme de filtrage de Kalman, une paire de points de temps "priori" (supposons l'instant  $n$ ) et "posteriori" (supposons l'instant  $m$ ) est utilisée. Nous noterons  $X_{n/m}$  l'état estimé, c'est-à-dire l'estimée à l'instant  $n$  en connaissant des informations à l'instant  $k$ . On peut considérer les trois cas possibles :

- $n > m$  : il s'agit d'estimer l'état futur ou courant en connaissant l'état précédent. Par exemple  $X_{k/k-1}$  tel que  $n = k$  et  $m = k-1$  ou  $X_{k+1/k}$  tel que  $n = k+1$  et  $m = k$ .
- $n < m$  : il s'agit d'estimer l'état à l'instant  $n$  antérieur en utilisant les mesures disponibles à l'instant  $m$ . Par exemple  $X_{k/k+1}$  tel que  $n = k$  et  $m = k+1$ .
- $n = k$  : il s'agit d'estimer l'état courant en connaissant l'état courant. Par exemple  $X_{k/k}$  tel que  $n = k$  et  $m = k$ . Ce cas d'estimation est réalisé pour vérifier la fiabilité des prédictions et les corriger.

### 5.2.2 Filtrage

Deux phases distinctes sont impliquées dans un processus d'estimation du filtre de Kalman : Prédiction et Mise à jour. À chaque itération du temps, la phase de prédiction utilise l'état estimé du système de l'instant précédent pour estimer l'état courant. Dans la deuxième étape de mise à jour, les mesures de l'instant courant sont utilisées pour corriger et mettre à jour l'état prédit pour obtenir une estimation plus précise.

### 5.2.2.1 Prédiction

Cette phase se compose de deux équations. L'une estime l'état courant du système en utilisant son état précédent, et l'autre prédit la covariance du bruit du système.

L'estimation de l'état courant est exprimée par :

$$X_{k/k-1} = AX_{k-1/k-1} + w_k \quad (5.4)$$

Avec une matrice de covariance qui estime la covariance d'erreur du système, formulée comme suit :

$$P_{k/k-1} = AP_{k-1/k-1} + MQ_{k-1}M^T \quad (5.5)$$

Où :

- $P_{k-1/k-1}$  est la matrice de covariance d'erreur précédente.

### 5.2.2.2 Mise à jour/Correction

Ce processus consiste à mettre à jour l'estimation de l'état à l'aide des mesures courantes observées et de l'estimation de l'état prévu.

La première étape pour la mise à jour/correction de la prédiction est de trouver le gain de Kalman  $G_k$  à ce moment-là.  $G_k$  a un rôle très important, il permet de connaître le niveau de confiance que nous pouvons apporter au modèle.  $G_k$  est une valeur variable comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ . Par exemple, s'il n'y a pas de bruit de processus et que le paramètre  $G_k = 0$ , le filtre de Kalman aura une grande confiance et il attachera moins d'importance aux mesures du GPS.

Le gain de Kalman dépend de la variance prédite, de l'erreur de processus qui est associée à la prédiction de la variance et de l'erreur de mesure. Il est donné par :

$$G_k = P_{k/k-1}H^T(H P_{k/k-1}H^T + R)^{-1} \quad (5.6)$$

Une autre étape qui est aussi importante est de calculer l'innovation ou la mesure résiduelle  $In$ . Elle représente la différence entre ce qui est réellement observé (l'équation (5.3)) et les valeurs prédites ( $HX_{k/k-1}$ ). Cette innovation  $In$  pondérée par le gain de Kalman  $G - k$  représente la quantité d'information supplémentaire à apporter à la correction lors d'une nouvelle mesure.  $In$  est donnée par l'équation suivante :

$$In = Y_k - (HX_{k/k-1}) \quad (5.7)$$

Dès que la nouvelle valeur d'observation (mesure GPS)  $Y_k$  est connue, l'estimation postérieure est écrite, et l'innovation et le gain de Kalman sont calculés, la mise à jour de l'état estimé est dérivée selon l'équation suivante :

$$X_{k/k} = X_{k/k-1} + G_k In \quad (5.8)$$

Une fois que la mise à jour de l'estimation est déterminée, la mise à jour de la matrice

de covariance du processus qui représente l'erreur de l'estimation est donnée par la formule suivante :

$$P_{k/k} = (I - X_k H) P_{k/k-1} \quad (5.9)$$

La Figure 5.1 ci-dessous résume le principe général du filtre de Kalman. À noter que les équations de 5.4 à 5.9 sont exécutées récursivement (À chaque itération du temps) pour construire des estimation précises.

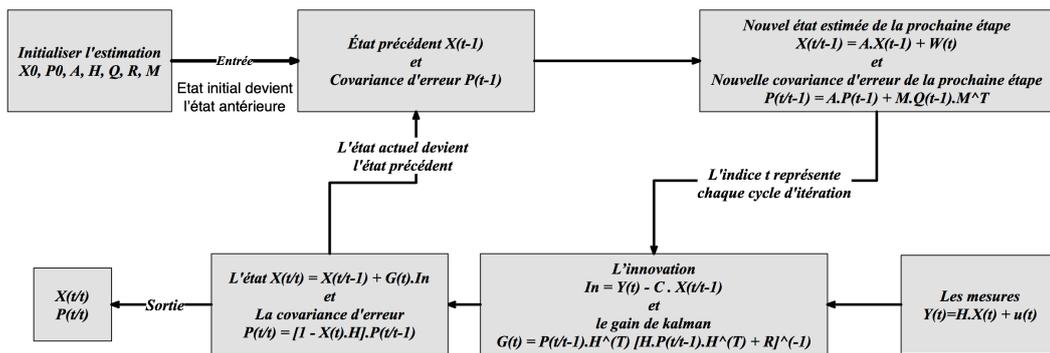


FIGURE 5.1 – Prédiction stochastique avec le modèle du filtre de Kalman

Dans cet article, les valeurs de la covariance de bruit du système  $Q$  et de la covariance de bruit de mesure  $R$  sont construites selon une analyse empirique [247]. La performance du filtre peut être obtenue en réglant les estimations des matrices de covariance d'erreur.

En outre, les variables  $A$ ,  $H$  et  $P$  sont inconnues. Par conséquent, pour pouvoir réaliser des prédictions d'état à l'aide de ce filtre de Kalman, ces variables doivent être initialisées. En supposant que l'intervalle entre deux estimations est  $\Delta k$  secondes, les variables  $A$ ,  $H$ ,  $Q$ ,  $R$  et  $P$  sont initialisées comme suit [248] :

Le modèle de transition d'état  $A$  est :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta k \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Le modèle d'observation  $H$  est :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

La covariance de bruit du système  $Q$  est :

$$Q = \begin{bmatrix} \Delta k^3/3 & 0 & \Delta k^2/2 & 0 \\ 0 & \Delta k^3/3 & 0 & \Delta k^2/2 \\ \Delta k^2/2 & 0 & \Delta k & 0 \\ 0 & \Delta k^2/2 & 0 & \Delta k \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

La covariance de bruit d'observation  $R$  est :

$$H = \begin{bmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Où :

- $R_x$  est la covariance de  $x$  ;
- $R_y$  est la covariance de  $y$ .

La matrice de covariance d'erreur  $P$  est :

$$P = \begin{bmatrix} R_x & 0 & R_x/\Delta k & 0 \\ 0 & R_y & 0 & R_y/\Delta k \\ R_x/\Delta k & 0 & 2R_x/\Delta k^2 & 0 \\ 0 & R_y/\Delta k & 0 & 2R_y/\Delta k^2 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

### 5.3 KF-GPSR : L'algorithme du filtre Kalman appliqué au protocole GPSR

Notre proposition consiste à intégrer l'algorithme du filtre de Kalman dans le protocole GPSR afin d'avoir un modèle de prédiction robuste et d'aider les serveurs de localisation à résoudre les requêtes de localisation. Cela permettrait aux véhicules du réseau de générer des mises à jour de localisation basées sur les estimations. Grâce au modèle de prédiction de la mobilité, le nombre de paquets de mise à jour (messages HELLO) échangés par les véhicules sera réduit tout en obtenant un niveau élevé de précision des informations de localisation résolues par le service de localisation.

Nous présentons un nouveau protocole défini par KF-GPSR basé sur l'algorithme du filtre Kalman adapté et intégré au protocole GPSR. Pour mettre en œuvre KF-GPSR, trois étapes fondamentales sont nécessaires, à savoir *i*) la création et l'initialisation des listes des voisins y compris leurs vecteurs d'état, *ii*) le maintien à jour des informations des listes des voisins via les prédictions, et *iii*) L'observation, la correction et la mise à jour des estimations.

Grâce au filtre de Kalman, chaque véhicule dans GPSR pourrait suivre avec précision ses voisins en prédisant leurs emplacements. Comme un véhicule n'a aucune connaissance préalable de la vitesse de ses voisins, alors, nous avons besoin des champs supplémentaires dans les messages HELLO et dans les listes des voisins pour appliquer la stratégie proposée.

- Dans les messages HELLO : nous avons besoin de l'identifiant du véhicule, de ses propres coordonnées géographiques  $x, y$  ainsi que de sa vitesse  $Vel.x, Vel.y$ . À noter que la vitesse et la direction sont utilisées pour calculer la vitesse en utilisant les formules (4.3) et (4.4) (présentées dans le chapitre 4).

Le format des messages HELLO est présenté dans la Table 5.1

TABLE 5.1 – Format des messages HELLO

Identifiant du véhicule	Coordonnées géographiques du véhicule	Vitesse du véhicule
Id	$X, Y$	$Vel.x, Vel.y$

- Dans la liste des voisins de chaque véhicule : nous avons besoin de l'identifiant du voisin, de ses deux coordonnées géographiques  $x, y$ , de sa vitesse, de son vecteur d'état de Kalman et de l'instant de réception du dernier message HELLO (RMH).

Le format de la liste des voisins est présenté dans la Table 5.2

TABLE 5.2 – Format des listes de voisins

Identifiant du voisin	Coordonnées géographiques du voisin	Vitesse du voisin	Vecteur d'état de Kalman	Temps Réception du message HELLO
Id	$X, Y$	$Vel.x, Vel.y$	$X_{etat} = (x, y, vx, vy)^T$	$T_{RMH}$

La description des notations utilisées dans le filtre de Kalman est résumée dans la Table 5.3.

TABLE 5.3 – Résumé des notations

Notation	Définition
$X_0$	L'état initial
$X_{t t-1}$	L'estimation priori du vecteur d'état en utilisant le vecteur d'état postérieur
$X_{t t}$	L'état estimé de l'état $X_t$ à l'instant $t$
$P_{t t-1}$	La matrice de covariance de l'erreur priori
$P_{t t}$	La matrice de covariance de l'erreur d'estimation
$w_t$	Le bruit de l'erreur du système à $t$
$u_t$	Le bruit de mesure sur le GPS à $t$
$Y_t$	Le vecteur de mesure
$A$	La matrice de transition d'état
$H$	La matrice d'observation
$Q$	La matrice de covariance du bruit du système
$R$	La matrice de covariance du bruit de mesure
$M$	Le nombre total des valeurs prédites
$G_t$	Le gain de Kalman
$In$	L'innovation de Kalman
$I$	La matrice d'identité
$t$	Le cycle d'estimation de l'état
$t - 1$	L'instant précédent
$BP$	L'intervalle entre deux messages HELLO successifs
$T$	L'opérateur de transposition

### 5.3.1 Initialisation des vecteurs d'état des véhicules voisins

La première étape exécutée dans le protocole KF-GPSR est l'échange d'informations concernant l'état du réseau. Grâce aux messages HELLO périodiques, chaque véhicule informe un groupe d'autres véhicules (ses voisins immédiats) de sa localisation et de sa vitesse à l'heure courante. À la réception d'un message HELLO, chaque véhicule crée une nouvelle entrée (nouveau voisin) dans sa liste des voisins, enregistre les informations reçues puis initialise le vecteur d'état de ce dernier en utilisant l'équation (5.15). Somme toute, chaque véhicule doit posséder sa liste des voisins remplie avec ces informations échangées.

$$X_t = AX_0 + w_t \tag{5.15}$$

### 5.3.2 Gestion de la mobilité des véhicules voisins

Avant de recevoir les prochains nouveaux messages HELLO (après un intervalle de temps  $BP$ ), les positions des voisins ont certainement changé à cause de la grande mobilité des véhicules dans les VANET. Alors, les informations enregistrées précédemment sont dépassées. À l'aide du processus d'estimation de l'algorithme du filtre de Kalman proposé pour KF-GPSR, les changements et les déplacements des véhicules voisins sont suivis d'une manière récursive en prédisant leur état courant  $X_{t|t-1}$  à chaque période  $t$  (tel que  $t$  est beaucoup plus inférieur que  $BP$ ). Par conséquent, la mobilité des voisins est suivie et les listes des voisins sont mises à jour régulièrement (chaque instant  $t$ ). L'état courant est prédite en se basant sur l'état précédent  $X_{t-1}$  qui a été prédite de la même façon à  $(t-1)$  en utilisant l'équation (5.4). Par la suite, la matrice de covariance d'erreur est prédite en utilisant l'équation (5.5).

Grâce à ces prédictions, chaque véhicule peut suivre et reconstruire en temps réel la topologie de son voisinage. En d'autres termes, à chaque cycle d'itération  $t$ , le véhicule expéditeur estime l'état courant de ses voisins en utilisant l'état précédent estimé auparavant. Par conséquent, quand il veut transmettre des paquets de données, il considère les positions prédites (les plus récentes) au lieu d'utiliser les informations précédentes qui sont fort probablement dépassées. En conséquence, le problème des informations périmées des voisins est traité.

### 5.3.3 Correction et mise à jour de l'estimation

Étant donné que la convergence est garantie lorsque le système est observable. Alors, en se basant sur l'observation reçue et de l'estimation de l'état courant, le filtre de Kalman optimise le poids de la correction pour obtenir des estimations plus précises. À cette fin, les étapes suivantes sont considérées :

- Après un temps  $BP$ , en parallèle qu'un véhicule reçoit les prochaines mesures réelles des véhicules voisins, il prédit l'état courant de ces voisins (à  $t$ ) en utilisant l'équation (5.4) comme il est déjà expliqué dans la section précédente.

- Puisque l'état courant des voisins est estimé, et que les mesures réelles de l'état courant sont collectées à partir des messages HELLO reçus, alors, en utilisant l'équation (5.6), chaque véhicule calcule le gain de Kalman  $G_t$  pour chacun de ses voisins.
- Par la suite, l'innovation est calculé en utilisant l'équation (5.7).
- Finalement, en exploitant les mesures des données, l'état courant estimé et l'innovation pondérée par le gain de Kalman, nous mettons à jour l'estimation de l'état et la covariance d'erreur en utilisant respectivement les équations (5.8) et (5.9).

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'innovation pondérée par le gain de Kalman  $G_t$  est utilisée pour déterminer la quantité d'informations supplémentaire à apporter lors de la mise à jour de l'estimation de l'état. Cela signifie que cette valeur est utilisée pour corriger de manière optimale les estimations de l'état selon les incertitudes dans les estimations de l'état courant et combien les mesures sont bruyantes.

La Figure 5.2 illustre les différentes étapes suivies au fil du temps pour gérer les informations concernant les déplacements des voisins. Par exemple, à  $t_0$ , lorsqu'un véhicule  $V_1$  reçoit le premier message HELLO de la part de son voisin  $n_i$ . À cet instant,  $V_1$  initialise le vecteur d'état de  $n_1$  en utilisant les mesures extraites de ce message HELLO. Dans un second temps, à  $t_1$ , en suivant le modèle d'estimation du filtre de Kalman,  $V_1$  estime l'état courant  $X_{t_1}$  de  $n_i$  en utilisant son état antérieur  $X_{t_0}$ . Comme nous pouvons le voir, cette approche sera répétée récursivement à chaque cycle d'itération  $t$  jusqu'à la réception du prochain message HELLO à  $t_5$  (par défaut  $BP = 5t$ ). En ce moment, le modèle de correction du filtre de Kalman est appliqué afin de déterminer l'erreur entre l'état prédit et l'état courant réel et de corriger l'estimation de l'état, ainsi, l'état estimé est mis à jour ( $X_{t_5}$ ) et le même cycle recommence jusqu'à l'expiration du délai.

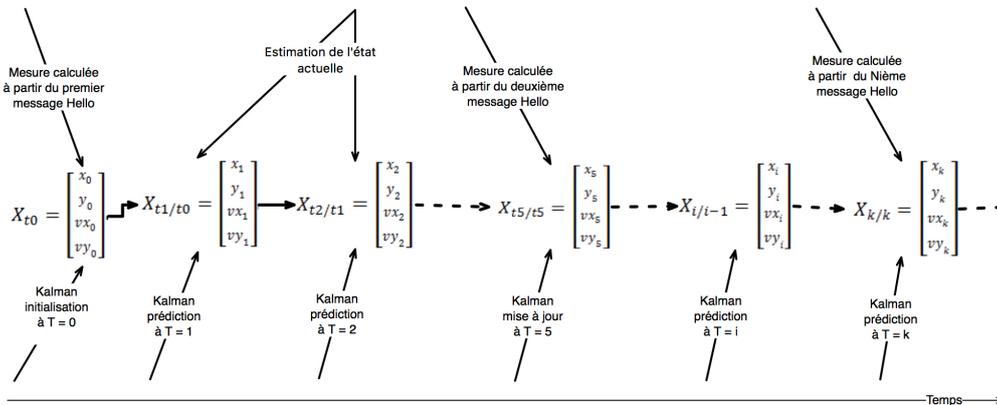


FIGURE 5.2 – Illustration du mécanisme du filtre de Kalman proposé pour la gestion de la mobilité des voisins dans le protocole KF-GPSR.

L'algorithme 4 décrit les deux phases "estimation et correction" du filtre de Kalman adaptées pour gérer les informations de la mobilité des voisins du protocole KF-GPSR.

---

**Algorithm 4** Présentation sous forme d'algorithmique des deux phases adaptées du filtre de Kalman pour la gestion des informations de mobilité d'un voisin dans le protocole KF-GPSR

---

Entrée : Les informations reçues des messages HELLO  
Sortie : L'estimation de l'état courant

---

**Phase A - L'Estimation**

---

- 1: Début de la phase A
  - 2: Réception des premiers messages HELLO de la part du voisinage
  - 3: Initialisation de  $X_t$
  - 4: Pour chaque cycle  $t$
  - 5: Estimation du vecteur d'état courant  $X_{t|t-1}$  (à  $t$ ) en se basant sur l'état précédent (à  $t-1$ )
  - 6: Estimation de l'erreur de covariance  $P_{t|t-1}$  en se basant sur la covariance précédente
  - 7: Retourne la nouvelle estimation  $X_{t|t-1}$
  - 8: Remplacement des anciennes informations par les nouvelles valeurs estimées de  $X_{t|t-1}$  dans la liste des voisins
  - 9: Jusqu'à  $minuteurT \neq TimeOut$
  - 10: Fin de la phase A
- 

**Phase B - Correction et mise à jour**

---

- 11: Début de la phase B
  - 12: Pour chaque réception des messages HELLO de la part du voisinage et  $T \neq TimeOut$
  - 13: Recevoir les mesures (x,y)
  - 14: Utiliser les valeurs des étapes 5 et 3 pour calculer l'innovation  $In$
  - 15: Utiliser les valeurs de l'étape 6 pour calculer le gain de Kalman  $G_t$
  - 16: Utiliser les valeurs des étapes 5,14 et 15 pour mettre à jour le vecteur d'état  $X_{t|t}$
  - 17: Utiliser les valeurs des étapes 6 et 16 pour mettre à jour l'erreur de covariance  $P_{t|t}$
  - 18: Remplacement des anciennes informations par les nouvelles valeurs de sortie  $X_{t|t}$  dans la liste des voisins.
  - 19: Retourne  $X_{t|t}$
  - 20: Fin Pour
  - 21: Fin de la phase B
- 

### 5.3.4 Impact de la période de diffusion des messages HELLO "BP" sur le protocole KF-GPSR

En général, dans les protocoles de routage géographique, les messages HELLO ainsi que la fréquence de leur diffusion ont un impact direct sur le routage et son efficacité. En effet, en augmentant la fréquence par laquelle les messages HELLO périodiques sont échangés, les informations concernant le voisinage seront précises et à jour. Cependant, cela conduit à un grand nombre de messages échangés, ce qui entraînent un taux d'occupation élevé du canal et un nombre accru de collisions. Par conséquent, cela implique une dégradation des performances des protocoles et de la QoS. Grâce à la prédiction stochastique du filtre de Kalman utilisée dans notre protocole KF-GPSR, ce problème est traité. En effet, chaque fois qu'un véhicule transmetteur a besoin des positions géographiques de ses voisins, il utilisera les positions prédites au lieu de celles initialement collectées à partir des messages

HELLO. Ainsi, la précision de la localisation des véhicules voisins est améliorée tout en préservant la même fréquence de diffusion des messages HELLO.

Pour évaluer l'efficacité du protocole KF-GPSR en termes de compromis entre la précision des positions, le coût de routage et le taux de surcharge du réseau, nous analysons par simulation l'impact de la période de diffusion des messages HELLO ( $BP$  : Beacon Period) sur les performances des protocoles KF-GPSR, GPSR+Predict et GPSR basique.

Comme nous pouvons constater dans la Figure 5.3, notre évaluation est basée sur la variation de l'intervalle  $BP$ . Nous considérons les cinq métriques d'analyse de performance utilisées auparavant (voir chapitre 2), à savoir le taux de paquet délivré (PDR), le délai de bout en bout (EED), le débit, la surcharge du réseau (NRL) et le coût de routage.

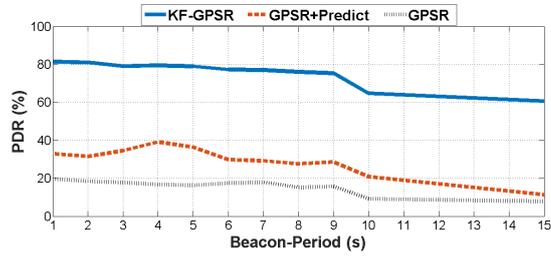
Il est important de noter que la période de temporisation  $\beta$  est aussi importante. En fait, GPSR attend la période  $\beta$  avant d'éliminer les véhicules qui ne sont plus voisins. La valeur choisie pour  $\beta$  est liée à  $BP$ . Dans ce travail, la période  $\beta$  varie entre deux et trois fois la période  $BP$ .

Les paramètres de simulation utilisés sont présentés dans la Table 5.4.

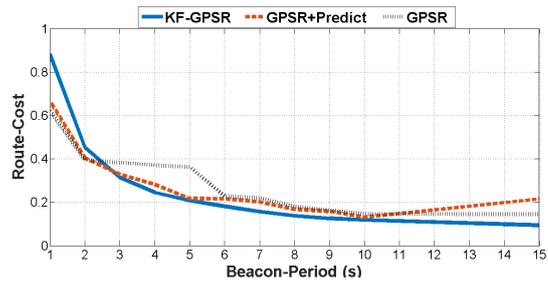
TABLE 5.4 – Paramètres utilisés dans la simulation

Paramètres	Valeur	Unité
Version de Ns-2	2.33	–
Protocole PHY-MAC	802.11p	–
Radio de Transmission	532	m
Dimension de la zone	700*5000	$m^2$
Type de trafic	CBR	–
Nombre des nœuds	100	véhicules
Protocoles de routage	KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR	–
Taille des paquets	512	bytes
Taux d'envoi de paquets	1	paquets/s
Temps de simulation	1000	s
Période $BP$	1 to 15	s
Période $\beta$	3 to 30	s

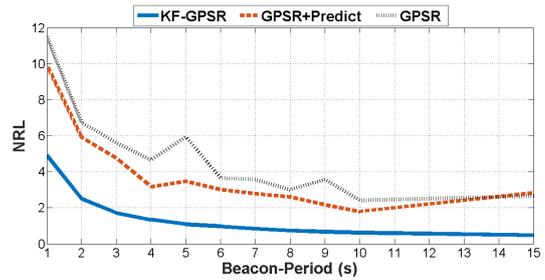
Les Figures 5.3 illustrent le compromis entre les différentes métriques d'analyse de performance. Dans le cas normal, en élargissant l'intervalle de diffusion des messages HELLO  $BP$ , toutes les performances pourraient se dégrader à l'exception du coût de routage et le NRL. Cela est à cause de la réduction du nombre des messages HELLO qui aboutit à des positions géographiques inexacts et périmées. Cependant, comme nous pouvons le constater, notre protocole contredit le cas normal et garantit de meilleurs résultats dans toutes les variations du  $BP$ . En effet, même dans une période longue  $BP = 9(s)$ , KF-GPSR garantit plus de 75% de progression dans le  $PDR$  (Figure 5.3a) avec un coût et une surcharge de routage minimales (Figures 5.3b et 5.3c). De même, pour le débit et le délai de bout en bout illustrés respectivement dans les Figures 5.3d et 5.3e, le KF-GPSR surpasse largement le reste des protocoles et assure les meilleures performances.



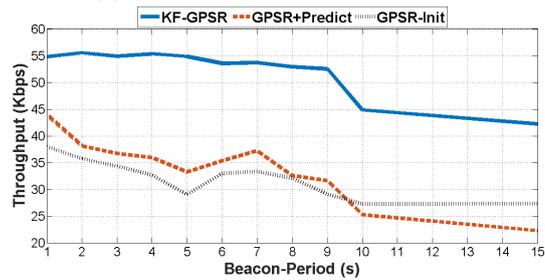
(a) Taux de livraison des Paquets



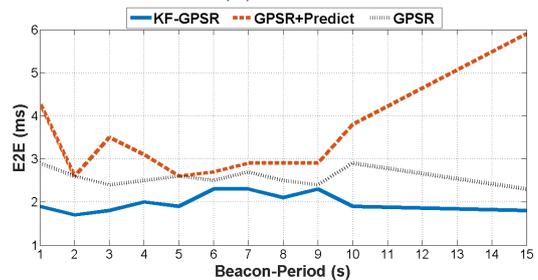
(b) Coût de routage



(c) charge de routage normalisée



(d) Débit



(e) Délai de bout-en-bout

FIGURE 5.3 – Impact de l'intervalle  $BP$  sur les performances des protocoles KF-GPSR, GPSR+Predict et GPSR

Grâce à la prédiction, nous avons l'intention d'échanger des messages HELLO périodiques à une fréquence beaucoup plus inférieure à celle utilisée par défaut, de telle manière à occuper le canal pendant une période de temps beaucoup plus courte tout en fournissant une localisation précise des véhicules voisins. En effet, KF-GPSR présente des résultats très satisfaisants et assume le compromis entre la précision et le coût. Cependant, en augmentant considérablement la période  $BP$ , cela cause des difficultés liées principalement à la perte des voisins qui ne sont plus dans la radio de transmission des véhicules ainsi que la non reconnaissance des nouveaux voisins. Pour résoudre ce problème, une approche de demande de mise à jour par message HELLO est proposée lorsqu'un besoin se présente.

## **5.4 BOD-KF-GPSR : l'approche des messages HELLO à la demande appliqué au protocole KF-GPSR**

Dans cette section, nous abordons la question de savoir comment mettre à jour la liste des voisins des véhicules au cas où une grande partie de ces derniers s'éloigne de la zone de transmission et les listes commencent à se vider. Notre tentative de résoudre ce problème consiste à envoyer, uniquement si nécessaire, une demande de messages HELLO, c'est-à-dire, contrairement aux messages HELLO périodiques qui sont diffusés à chaque intervalle  $BP$ , les "messages HELLO à la demande" ne sont échangés que si un nœud particulier présente le besoin de mettre à jour son voisinage. En fait, chaque véhicule estimant le besoin de redécouvrir ses nouveaux voisins, il diffuse un message HELLO spécial "Beacon on Demand" pour inviter ces voisins à partager avec lui ses informations. À la réception de cette demande, les véhicules voisins lui répondent en transmettant un message HELLO simple. Enfin, chaque véhicule remplira à nouveau sa liste des voisins en ajoutant les nouveaux. Cependant, pour utiliser le processus "Beacon on Demande", les véhicules doivent se baser sur deux paramètres ultimes : les ruptures des liens et le nombre de voisins. En effet, en utilisant la technique de prédiction du filtre de Kalman, chaque véhicule peut facilement estimer ces deux paramètres.

### **5.4.1 Rupture de lien**

Nous définissons une rupture de lien lorsque la communication entre deux véhicules devient impossible ; c'est-à-dire lorsque la distance qui sépare ces deux véhicules devient supérieure de la plage de transmission  $R$ . Grâce à la technique de prédiction du filtre de Kalman utilisée pour estimer les positions courantes des voisins, un véhicule peut facilement prévoir les voisins qui vont quitter sa plage de transmission. Pour cela, quand un véhicule estime la position de l'un de ses voisins, il vérifie, en utilisant l'équation (5.16), si ce voisin est hors de sa portée radio. Si c'est le cas, alors il y a certainement une rupture de lien entre eux. Par conséquent, le véhicule élimine ce dernier de sa liste des voisins étant donné qu'il ne le considère plus un voisin.

$$Distance(V, n_i) > R \tag{5.16}$$

Sachant que la distance est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$Distance(V, n_i) = \sqrt{(V(x) - n_i(x))^2 + (V(y) - n_i(y))^2} \tag{5.17}$$

Dans la Figure 5.4, à  $t_n$  le véhicule  $V_1$  a les véhicules  $n_1, n_2, n_3, n_4$  Et  $n_5$  en tant que voisins. Grâce à l'estimation du filtre de Kalman proposée,  $V_1$  prédit que les voisins  $n_2$  et  $n_3$  seront hors de sa portée radio à  $t(n+1)$ . Par conséquent,  $V_1$  les élimine ( $n_2$  et  $n_3$ ) de sa liste de voisin.

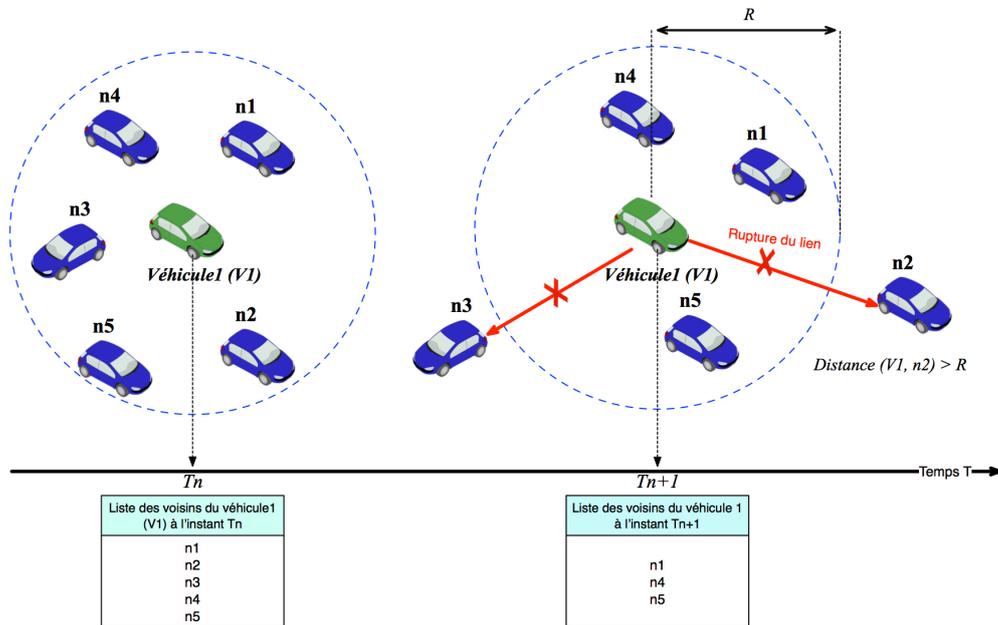


FIGURE 5.4 – Rupture des liens entre véhicules

### 5.4.2 Nombre de voisins

Le nombre de voisins diminue progressivement puisque chaque véhicule applique d'une manière récursive le nettoyage de sa liste des voisins en excluant ceux qu'il estime hors de son voisinage. En outre, étant donné que la nouvelle approche repose sur un intervalle de temps assez long (intervalle de temps entre deux diffusions successives des messages HELLO), alors, la redécouverte du voisinage sera peu fréquente. Par conséquent, on s'attend à ce que le véhicule ne trouve pas le meilleur prochain relais qui garantira les meilleurs QoS. Pire encore, le véhicule peut perdre tous ses voisins. Pour éviter ce problème, il est impérativement recommandé que chaque véhicule, à un moment donné, redécouvre son voisinage et met à jour sa liste des voisins.

Nous proposons le processus "message HELLO à la demande" ou 'Beacon on Demand'. Ce processus n'est appliqué que lorsqu'un véhicule considère qu'il n'a plus assez de voisins et qu'il est obligé de reconnaître les nouveaux et de mettre à jour sa liste des voisins. À cet égard, le véhicule en question lance un appel de découverte du voisinage en diffusant une demande de message HELLO (BRP : Beacon Request Packet) dans sa portée de transmission, puis il attend leur réponse. Une fois les véhicules voisins reçoivent ce message HELLO spécial, ils répondent en lui envoyant (à lui seul) un simple message HELLO lui indiquant ainsi qu'ils sont voisins. En fait, quand un véhicule perd la moitié de ses voisins, il se considère en état alarmant, ainsi le besoin d'actualiser les informations qu'il possède s'active. Par conséquent, il transmet un message HELLO spécial à ces voisins pour les inciter à partager leurs informations avec lui. Chaque véhicule recevant un BRP de la part d'un autre véhicule, doit lui répondre en lui envoyant un message HELLO simple. Quand le véhicule en besoin de découverte du voisinage reçoit les réponses de la part de ses voisins, il met à jour sa liste des voisins en ajoutant les nouvelles informations et il augmente le nombre de voisins (nbb : neighbors number) par le nombre de réponses reçues.

La Figure 5.5 illustre à la fois le processus d'envoi d'une demande d'échange de message HELLO et le processus de réponse. Comme nous pouvons le voir, lorsque le véhicule  $V_1$  perd la moitié de ses anciens voisins  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  et il ne lui reste que  $n_4$  et  $n_5$  dans sa liste des voisins, il diffuse dans sa portée de transmission une demande de message HELLO pour inviter ses voisins (véhicules existants dans cette portée de transmission) à lui envoyer leur information. Les nœuds  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $n_6$ ,  $n_7$  indiquent leur présence dans cette zone de transmission en envoyant à  $V_1$  un message HELLO unique en unicast. En conséquence,  $V_1$  met à jour sa liste des voisins en ajoutant les nouveaux voisins, et incrémente le nombre de voisin 'nbb' par 1 pour chaque réponse reçue.

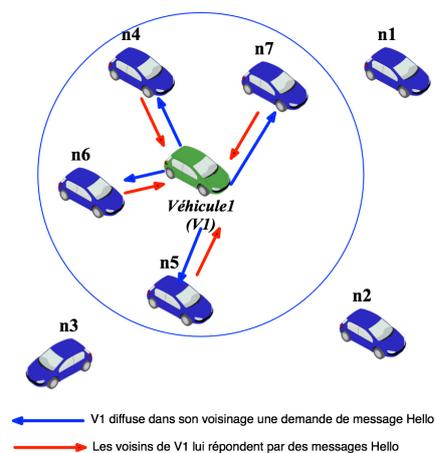


FIGURE 5.5 – Processus d'envoi d'une demande d'échange de message HELLO et le processus de réponse

Avant que le véhicule n'envoie un BRP, il doit remplir les conditions suivantes spécifiées dans l'algorithme 5 :

---

**Algorithm 5** Processus 'message HELLO à la demande'

---

```
1: Début
2:   Calculer le nombre initial des voisin du véhicule  $nbb\_initial$ 
3:   Pour chaque Réception d'un message HELLO de la part d'un voisin
4:   Faire :
5:     Si Ce voisin existe déjà dans la liste des voisins
6:       Le véhicule met à jour les informations du voisin par les mesures reçues
7:     Sinon
8:       Le véhicule crée une nouvelle entrée dans la liste des voisins
9:       Le véhicule stock les information du voisin
10:      Le véhicule augmente le nombre de ses voisins par 1  $nbb\_initial = nbb\_initial + 1$ 
11:    Fin Si
12:    Le véhicule utilise l'algorithme 4 pour estimer la position actuelle du voisin
13:    Le véhicule calcule la  $Distance(vhicule, voisin_i)$  en utilisant l'équation (5.17)
14:    Le véhicule vérifie l'équation (5.16)
15:    Si (Distance  $\gg$  R)
16:      Le véhicule supprime les informations du voisin
17:      Le véhicule décrémente le nombre de ses voisins par 1 :  $nbb = nbb\_initial - 1$ 
18:      Si ( $nbb\_initial/2 \geq nbb$ )
19:        Le véhicule diffuse une requête de message HELLO 'BRP' dans son voisinage
20:      Fin Si
21:    Fin Si
22:  Fin Pour
23: Fin
```

---

Comme il a été déjà expliqué, lorsqu'un véhicule commence à perdre beaucoup de ses voisins (plus que la moitié), il diffuse une BRP dans son voisinage pour que tous ses nouveaux voisins reçoivent cette invitation et lui répondent en lui envoyant un retour. En revanche, chaque véhicule recevant une BRP de la part d'un autre véhicule, doit procéder comme suit :

1. Tout d'abord, le véhicule vérifie le moment de la réception de la demande. Si elle est très proche du temps d'échange des messages HELLO périodiques, alors, il rejette la demande ; Sinon, il continue le processus.
2. Ensuite, le véhicule voisin répond le véhicule en question en lui envoyant un simple message HELLO
3. En parallèle, le véhicule voisin vérifie si le véhicule en question existe déjà dans sa liste des voisins ; Si oui, il met à jour les informations de ce nœud ; Sinon, il crée une nouvelle entrée et ajoute les informations collectées à partir du BRP.
4. Enfin, le véhicule voisin incrémente le nombre de ses voisins par 1.

En conclusion, grâce a cette procédure, les véhicules participants débloquent la situation critique et en même temps mettent à jour leur table de routage.

## 5.5 Evaluation des performances

### 5.5.1 Paramètres de simulation

Pour évaluer nos protocoles proposés, nous avons utilisé l'outil de simulation NS-2/VanetMobiSim puisqu'il offre un environnement à haute fidélité surtout que VanetMobiSim est considéré comme l'outil de modélisation de mobilité le plus efficace par rapport à d'autres. Dans nos expériences, nous avons été intéressés par IDM-LC en raison de ses caractéristiques, notamment pour la présence d'intersections, de feux de signalisation et des changements de voies.

Les simulations ont été effectuées en utilisant la norme IEEE 802.11p pour les couches physiques et MAC. En outre, nous avons choisi de simuler dans des scénarios autoroutiers (freeway). Alors, nous avons créé une topologie constituée par des véhicules répartis uniformément sur les voies et circulant à des vitesses aléatoires qui varient entre 90 et 120 km/h. Nous avons opté pour une superficie de 700\*5000 mètres<sup>2</sup> composée de routes droites avec 3 voies pour chaque direction. La Figure 5.6 illustre un exemple du scénario autoroutier utilisé dans nos simulations.

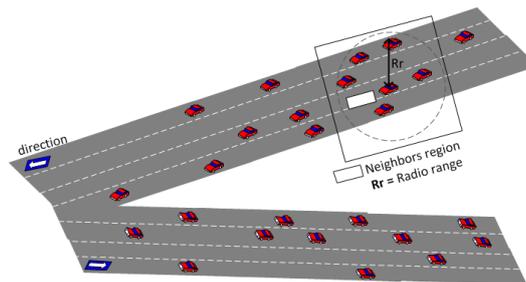


FIGURE 5.6 – Illustration du scénario autoroutier utilisé

Dans cette expérience, nous avons considéré différents protocoles ordinaires, à savoir : AODV, DSR et ZRP. Ils ont été comparés aux deux nouvelles approches KF-GPSR et BOD-KF-GPSR et aussi au protocole GPSR basique et à sa variante GPSR+Predict basée sur la prédiction déterministe de la mobilité des voisins.

Nous analysons GPSR+Predict pour présenter la différence des deux méthodes de prédiction déterministe et stochastique en termes de performance.

Dans le but d'évaluer la performance des protocoles suggérés, nous avons analysé l'impact de la densité sur les cinq métriques de QoS standardisées, à savoir le taux de livraison des paquets (PDR), le délai de bout en bout (E2E), le débit, la charge de routage normalisée (NRL) et le coût de routage (coût). Nous avons varié le nombre de véhicules de 50 (faible densité) à 350 (haute densité) et nous avons conservé le nombre de trafic de données CBR à 15 connexions. Deux tailles différentes des paquets de données CBR sont considérées, à savoir des paquets de taille moyenne (512 bytes) et des paquets volumineux (2048 bytes). Tous les paramètres généraux considérés dans cette simulation sont présentés dans la Table 5.5.

TABLE 5.5 – Paramètres de simulation

paramètres	Valeur	Unité
Ns-2 Version	2.33	–
PHY-MAC protocol	802.11p(802.11Ext)	–
Zone de transmission	532	m
Type d'antenne	Omni-directional	–
Modèle de Propagation	Two Ray Ground	–
Dimension de la zone simulée	700*5000	$m^2$
Nombre de nœuds	50, 100, 150, 200, 250, 300 and 350	vehicles
Protocoles de routage	BOD-KF-GPSR, KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR, AODV, DSR, ZRP	
$BP/\beta$ de GPSR, GPSR+Predict	3/10	s
$BP/\beta$ de BOD-KF-GPSR, KF-GPSR	10/10	s
Type de trafic	CBR	–
Taille du paquet	512, 2048	bytes/packet
Taux de paquets	1	packets/s
Nombre de trafics de données	15	source, destination
Modèle de mobilité	IDM-LC	–
Nombre de voies/direction	3*2	lanes*direction
Nombre maximale des feux de circulation	0	traffic lights
Vitesse minimale du véhicule	90	km/h
Vitesse maximale du véhicule	120	km/h
Durée de simulation	300	s
Nombre de simulations	20	–

### 5.5.2 Résultats expérimentaux en considérant la QoS

L'objectif principal de toutes nos simulations est d'analyser l'impact de la densité des véhicules sur les performances de nos protocoles proposés. Nous analysons BOD-KF-GPSR et KF-GPSR, et nous les comparons avec notre première amélioration GPSR+Predict (voir chapitre 4), avec le protocole de base GPSR, ainsi qu'avec les protocoles ordinaires AODV, DSR et ZRP.

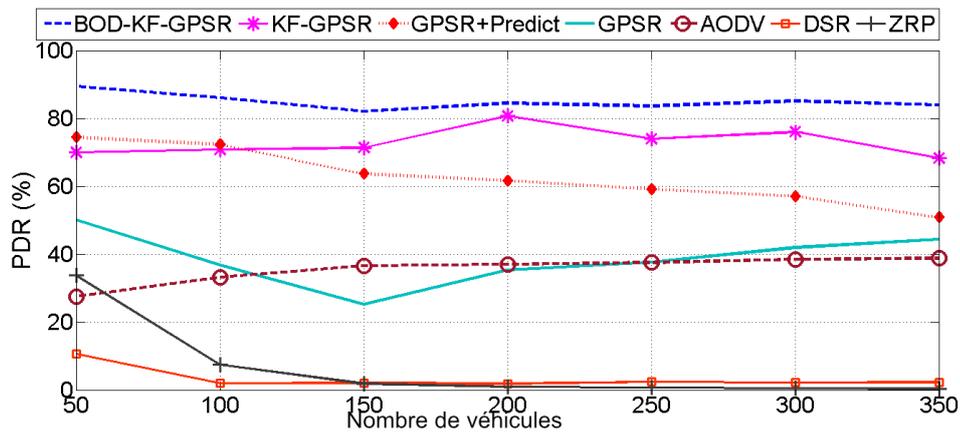
#### 5.5.2.1 Mesure du taux de paquets délivrés

Dans cette section, nous étudions le PDR qui est défini par le rapport entre le nombre de données reçues et celui des données envoyées (voir l'équation 2.1). Grâce à cette métrique, il est possible de révéler la fiabilité du protocole.

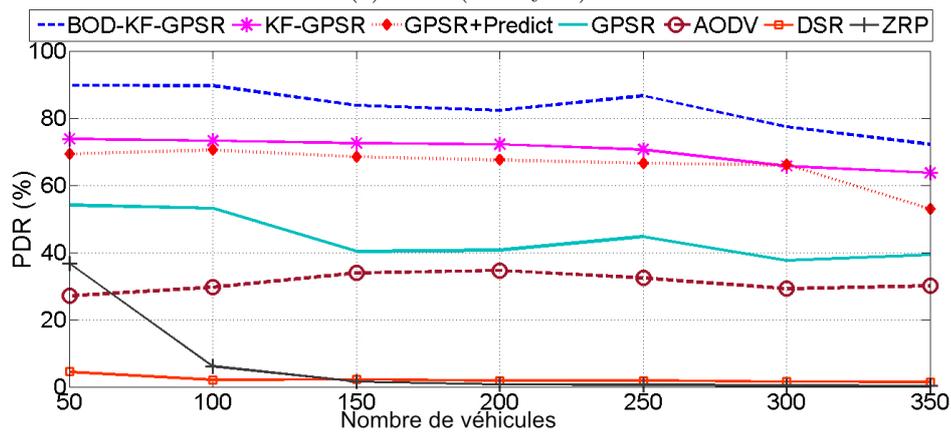
Les Figures 5.7a et 5.7b montrent que la densité des véhicules n'a pas un très grand impact sur le PDR pour les deux cas. En effet, on remarque une certaine stabilité au niveau du PDR que ce soit dans le cas des paquets de données de taille moyenne ou dans la cas des paquets volumineux.

Tout d'abord, nous allons discuter les résultats des protocoles de routage bien connus : AODV, DSR, GPSR et ZRP. Comme on peut le voir dans les Figures 5.7a et 5.7b, le meilleur pourcentage est celui du protocole GPSR puisqu'il garantit un PDR assez élevé dans les deux scénarios testés. Le protocole GPSR est suivi par le protocole AODV qui, à son tour, offre un PDR acceptable, tandis que les

résultats des protocoles ZRP et DSR sont désastreux en particulier dans le cas de la densité moyenne à élevée. Ceci montre que ces deux protocoles ne gèrent pas la très grande mobilité des véhicules. Ce qui était attendu car la plupart de ces protocoles ordinaires testés, initialement dédiés à MANET, ne sont pas très adaptés à VANET.



(a) PDR (512 bytes)



(b) PDR (2048 bytes)

FIGURE 5.7 – Impact de la densité des véhicules sur le comportement des protocoles BOD-KF-GPSR, KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR, AODV, DSR et ZRP en termes de PDR est présenté dans (a) un scénario où la taille des paquets de données est moyenne (512 octets/paquet) et (b) un scénario où la taille des paquets de données est volumineuse (2048 octets/paquet)

En ce qui concerne la différence entre les résultats des méthodes déterministes et stochastiques, nous pouvons clairement voir que KF-GPSR fonctionne mieux que le GPSR+Predict même si la période de  $BP$  considérée pour KF-GPSR est beaucoup plus grande que celle considérée dans GPSR+Predict. Ces résultats prouvent la robustesse de la technique de prédiction utilisée dans l'algorithme de filtrage de Kalman. Cela confirme l'efficacité et l'utilité du modèle stochastique par rapport au modèle déterministe simple.

Enfin, si nous voulons aborder nos deux modèles proposés, c'est-à-dire l'amélioration initiale apportée au GPSR qui est KF-GPSR et son extension BOD-KF-GPSR, on constate que cette dernière présente de meilleures performances. le PDR de BOD-KF-GPSR est plus élevé que celui du KF-GPSR et de tous les autres protocoles de routage testés. La principale raison de ces résultats est que le protocole BOD-KF-GPSR contribue à plus de précision et de fiabilité et élimine le risque de ne pas avoir suffisamment de voisins. Cet avantage est dû à la mise en œuvre de la technique 'Beacon on Demand'.

### 5.5.2.2 Mesure de délai de bout en bout

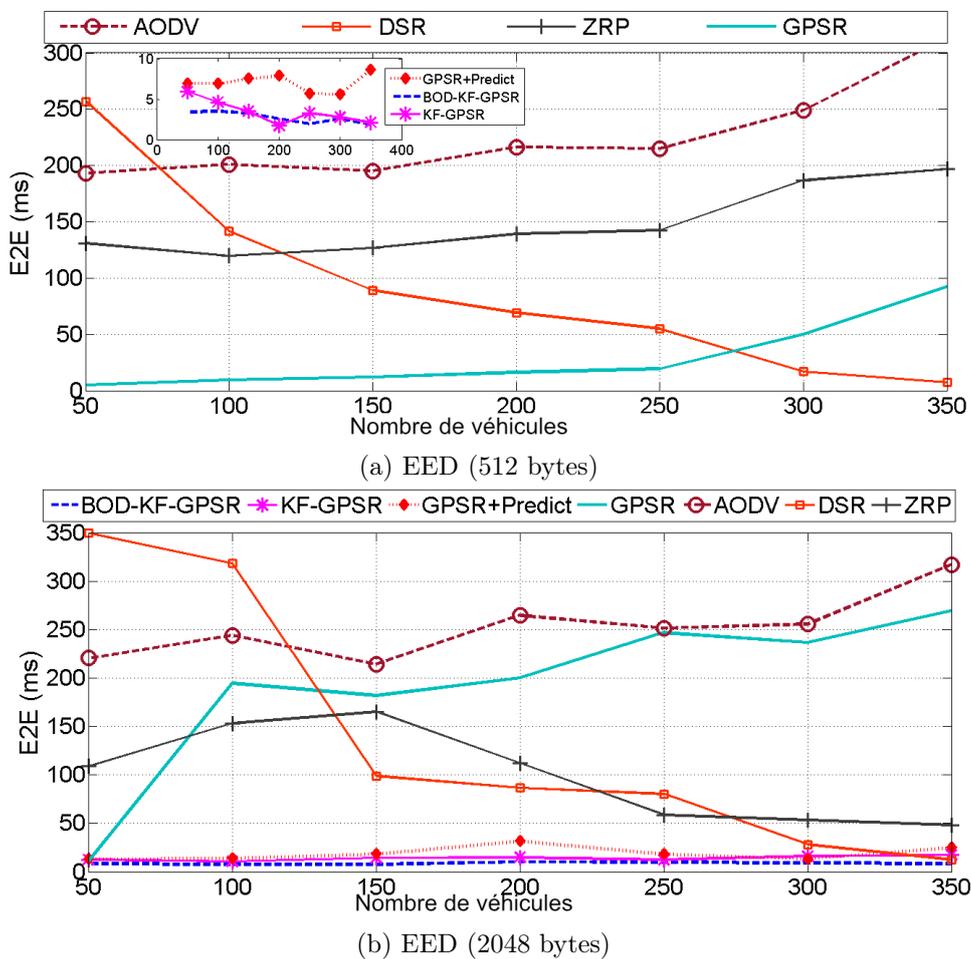


FIGURE 5.8 – Impact de la densité des véhicules sur le comportement des protocoles BOD-KF-GPSR, KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR, AODV, DSR et ZRP en termes de délai de bout en bout est présenté dans (a) un scénario où la taille des paquets de données est moyenne (512 octets/paquet) et (b) un scénario où la taille des paquets de données est volumineuse (2048 octets/paquet)

Comme il est déjà mentionné auparavant, le protocole de routage géographique utilise l'emplacement géographique des nœuds pour déterminer l'itinéraire optimal lorsque les paquets sont transmis. Étant donné que le EED représente le temps moyen qu'un paquet de données prend pour arriver de la source vers la destination, alors le protocole géographique GPSR et toutes ses variantes proposées se distinguent par les délais de transmission de bout en bout les plus bas. Ceci est clairement visible dans les Figures 5.8a et 5.8b. Cependant, les protocoles de routage basés sur la topologie utilisent des informations sur l'état des liens et les tables de routage qui offrent plus d'options pour achever le transfert des paquets. Par conséquent, nous notons que les protocoles basés sur la topologie, AODV, DSR et ZRP souffrent extrêmement des délais de bout en bout plus élevés et cela quelle que soit la taille du paquet.

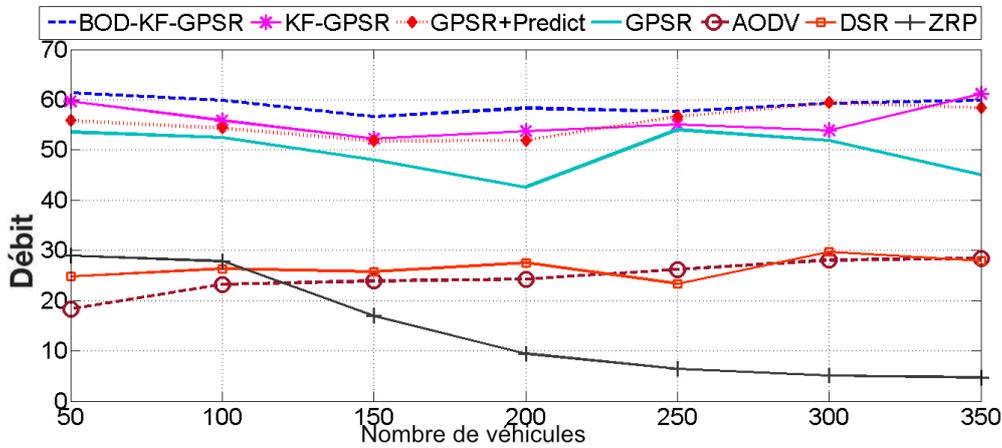
En ce qui concerne les trois protocoles GPSR+Predict, KF-GPSR et BOD-KF-GPSR ayant les délais de bout en bout les plus faibles, nous notons que la réduction du EED est assez impressionnante, ils donnent une performance très satisfaisante. En revanche, nous notons que BOD-KF-GPSR obtient le délai de transmission de paquet le plus bas. Il est suivi, respectivement, par KF-GPSR et GPSR+Predict. Cette diminution proportionnelle du délai peut être justifiée par le fait que la précision des positions géographiques atteinte est très élevée et que la mobilité des véhicules voisins est bien suivie. Effectivement, BOD-KF-GPSR élimine les entrées dont les informations sont dépassées, offrant ainsi le délai de routage de bout en bout le plus optimal.

### 5.5.2.3 Mesure de débit

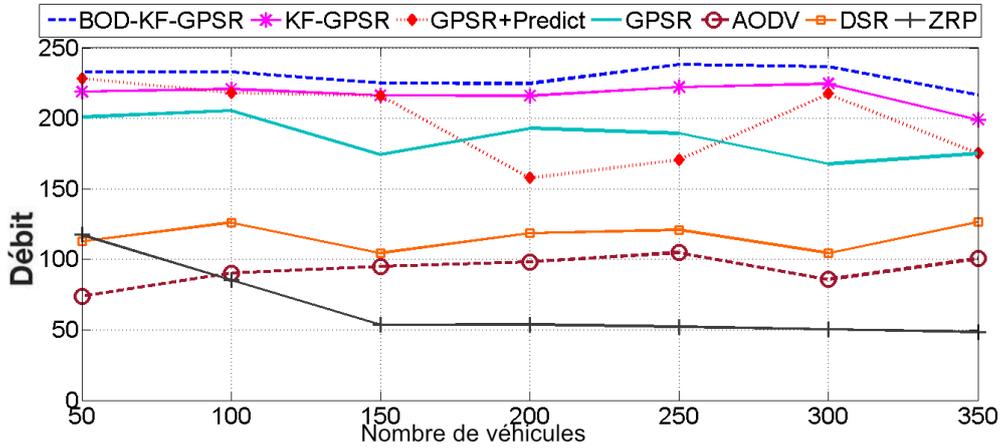
Le débit peut être défini comme le flux ou la quantité de données traversant un canal de communication par unité de temps, habituellement exprimé en kilobits par seconde (Kbps)[249]. Les niveaux du débit reposent sur trois conditions : la taille des paquets de données, le nombre de sources de trafic et l'efficacité du protocole en termes de PDR.

Les résultats observés dans les deux figures 5.9a et 5.9b confirment cette hypothèse en termes de taille et de PDR. Effectivement, le débit atteint 250 kbps lorsque la taille d'un paquet est volumineuse, alors que dans le cas d'une taille moyenne, le débit ne dépasse pas les 65 kbps. En outre, le débit obtenu pour chaque protocole est proportionnel au PDR (5.7a et 5.7b). C'est-à-dire que les protocoles qui ont un PDR élevé ont automatiquement un débit élevé. En revanche, les protocoles à faible PDR ont un faible débit.

En ce qui concerne les protocoles proposés, BOD-KF-GPSR présente à nouveau une meilleure performance dans les deux cas. En fait, il améliore le débit jusqu'à environ 50 kbps par rapport au GPSR basique.



(a) Débit (512 bytes)



(b) Débit (2048 bytes)

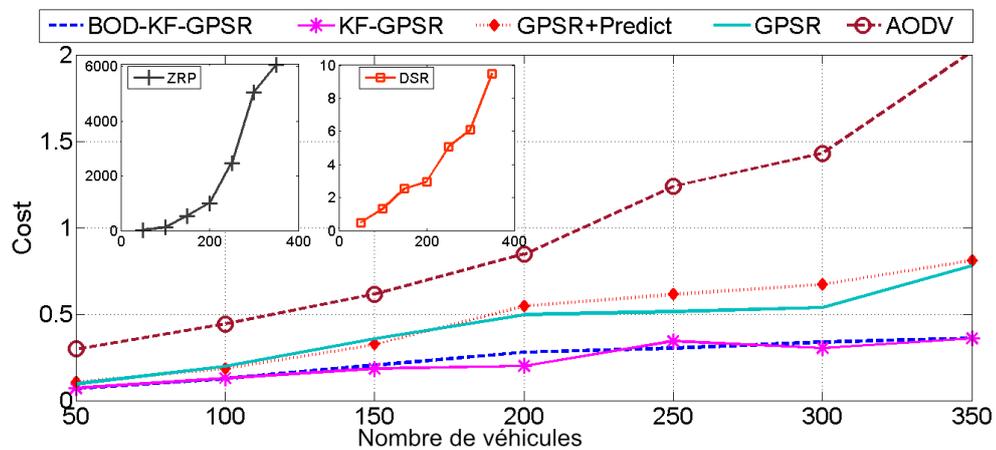
FIGURE 5.9 – Impact de la densité des véhicules sur le comportement des protocoles BOD-KF-GPSR, KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR, AODV, DSR et ZRP en termes de débit est présenté dans (a) un scénario où la taille des paquets de données est moyenne (512 octets/paquet) et (b) un scénario où la taille des paquets de données est volumineuse (2048 octets/paquet)

#### 5.5.2.4 Mesure du coûts de routage

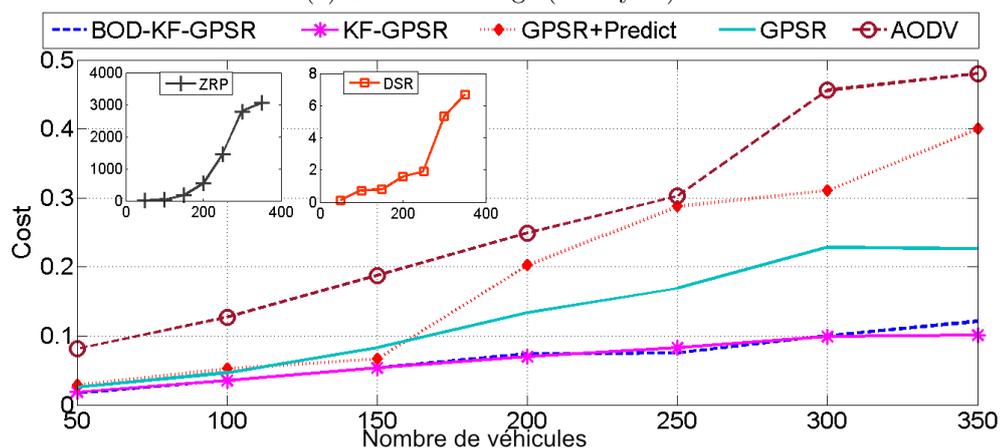
Les Figures 5.10a et 5.10b montrent que le coût de routage moyen pour chaque protocole de routage évalué augmente lorsque le nombre de véhicules augmente. Cet accroissement de coût est rationnel puisqu'en augmentant le nombre de véhicules, le nombre des messages HELLO échangés augmente aussi.

En observant les Figures 5.10a et 5.10b, nous remarquons que dans les deux scénarios, les protocoles AODV, DSR et ZRP ont de nouveau les pires performances et doivent être évités pour les VANET, en particulier dans les autoroutes. Ceci est peut-être dû aux changements récurrents de la topologie qui entraînent des déconnexions fréquentes et exigent une découverte et maintenance d'itinéraire continues.

Cependant, GPSR+Predict et GPSR basique ont presque le même coût de routage, cela s'explique par le fait qu'ils considèrent la même période BP (3 secondes). Par conséquent, ils ont pratiquement la même quantité de messages HELLO échangée. En outre, les améliorations proposées montrent une réduction du coût de routage considérable par rapport au GPSR initial malgré que la fréquence d'échange des messages HELLO considérée dans GPSR soit beaucoup plus grande que celle utilisée dans les deux protocoles KF-GPSR et BOD-KF-GPSR. En revanche, BOD-KF-GPSR a un coût de routage légèrement supérieur à celui de KF-GPSR, ce qui est attendu car BOD-KF-GPSR utilise en plus le mécanisme des messages HELLO à la demande.



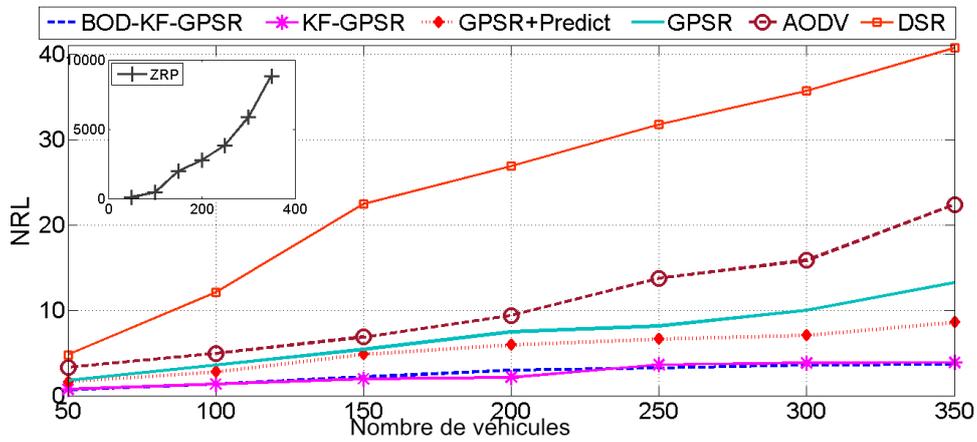
(a) Coût de routage (512 bytes)



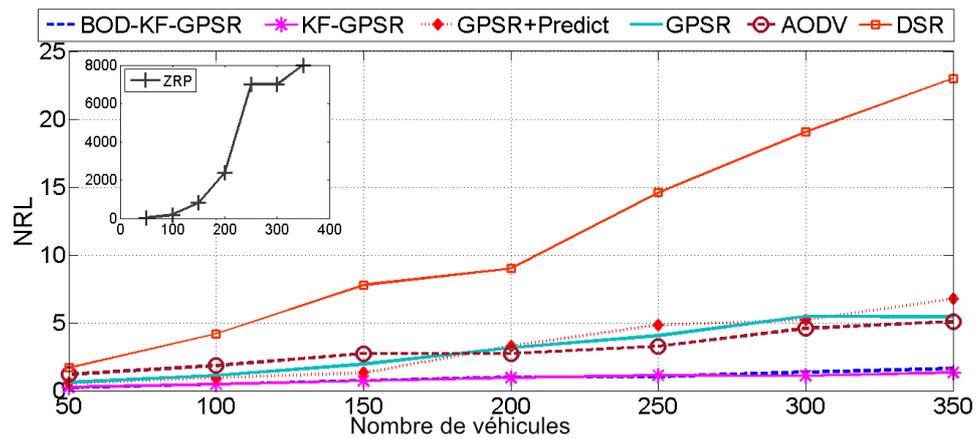
(b) Coût de routage (2048 bytes)

FIGURE 5.10 – Impact de la densité des véhicules sur le comportement des protocoles BOD-KF-GPSR, KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR, AODV, DSR et ZRP en termes de coût de routage est présenté dans (a) un scénario où la taille des paquets de données est moyenne (512 octets/paquet) et (b) un scénario où la taille des paquets de données est volumineuse (2048 octets/paquet)

5.5.2.5 Mesure de la charge de routage normalisée



(a) NRL (512 bytes)



(b) NRL (2048 bytes)

FIGURE 5.11 – Impact de la densité des véhicules sur le comportement des protocoles BOD-KF-GPSR, KF-GPSR, GPSR+Predict, GPSR, AODV, DSR et ZRP en termes de NRL est présenté dans (a) un scénario où la taille des paquets de données est moyenne (512 octets/paquet) et (b) un scénario où la taille des paquets de données est volumineuse (2048 octets/paquet)

La charge de routage normalisée NRL d'un protocole est défini par le nombre de paquets qui sont envoyés pour recevoir un seul paquet de données. le NRL dépend de trois processus, à savoir la densité des véhicules, la fréquence de diffusion des messages HELLO périodique et la grande mobilité qui implique le nombre des re-transmissions. En conclusion, plus la densité des véhicules ou la fréquence d'échange des messages HELLO sont grandes, plus la surcharge est importante [250].

À partir des résultats de simulation illustrés dans les Figures 5.11a et 5.11b, nous remarquons que le NRL n'est pas affecté par la taille des paquets de données. Par contre, il augmente proportionnellement avec la densité. Cependant, en compa-

rant le NRL de tous les protocoles testés, il est clair combien de messages HELLO supplémentaires sont échangés en utilisant une période BP réduite. Ceci explique nos motivations derrière le choix d'une BP assez large et par conséquent l'utilisation de la stratégie de 'Beacon on Demand' en cas de besoin. Ainsi, BOD-KF-GPSR a beaucoup moins de charges que les autres protocoles.

En ce qui concerne le protocole ZRP, sa nature hybride est la principale cause d'une augmentation drastique de son NRL. En fait, le comportement ZRP est instable par rapport à la mobilité élevée, par conséquent, des inondations incontrôlées et des retransmissions ont eu lieu.

#### 5.5.2.6 Discussion

Notez que notre proposition est principalement axée sur VANET, et nous essayons d'améliorer le mécanisme de routage afin d'utiliser les différentes applications véhiculaires avec une QoS élevée.

L'utilisation du mécanisme de prédiction du filtre de Kalman avec GPSR (KF-GPSR) a été avantageux en termes de QoS. En effet, toutes les métriques évaluées se sont améliorées même dans le cas d'une très petite fréquence d'envoi des messages HELLO. Toutefois, l'extension BOD-KF-GPSR utilisant le processus «Beacon on Demand» est plus avantageuse. Grâce à cette approche, les performances ont considérablement augmenté. En effet, cette solution gère mieux le compromis entre la précision, le coût de routage et les autres métriques de la QoS. Cependant, le seul inconvénient que nous trouvons dans nos propositions c'est qu'ils utilisent un modèle de prédiction complexe (algorithme de filtrage de Kalman), nécessitant une puissance de traitement et une mémoire plus grandes. Sauf que, ce n'est pas un problème puisque dans les VANET (distinct de WSN ou MANET), les véhicules sont alimentés par une batterie auto-chargeable et contiennent une mémoire assez grande. Par conséquent, il n'y a pas de problème de batterie ou de mémoire.

En ce qui concerne les célèbres protocoles de routage AODV, DSR, ZRP et GPSR, les mesures de performance obtenues sont médiocres. Ces résultats sont attribués au fait que la mobilité élevée dépasse les capacités de ces protocoles. En d'autres termes, ils ont de sérieux problèmes pour gérer les informations des véhicules et pour suivre leurs déplacements dans les VANET. En conséquence, ils doivent être évités pour un tel environnement.

## Conclusion

La localisation exacte des véhicules, du point de vue d'un noeud voisin, est très importante pour une meilleure utilité des protocoles de routage géographique. Cependant, en raison de la nature très dynamique des véhicules dans les VANET, ces informations collectées à partir des messages HELLO périodiques changent rapidement et deviennent rapidement dépassées. Cela peut influencer négativement le routage en termes de QoS. Ainsi, la question est de savoir comment assurer des

informations précises des voisins sans provoquer de surcharge de réseau et des coûts de routage supplémentaires.

Afin de gérer le compromis entre précision, coût de routage et les autres métriques de la QoS, une prédiction fiable de la mobilité des véhicules peut être significativement bénéfique car il est possible de suivre la mobilité des voisins tout en considérant un large intervalle entre l'échange des messages HELLO.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une amélioration du protocole GPSR, intitulé KF-GPSR, où chaque véhicule peut estimer la position courante du voisin en exploitant l'algorithme robuste du filtre de Kalman. Certes, en utilisant ce modèle d'estimation, la précision est assurée. Et dorénavant, à chaque fois qu'un véhicule a besoin d'informations sur la position de ses voisins, il utilise la nouvelle position estimée plutôt que l'ancienne.

Pour plus de fiabilité et d'efficacité, nous avons proposé une extension de KF-GPSR, appelée BOD-KF-GPSR, qui utilise une technique de 'Beacon on Demand'. Cette technique permet d'envoyer des requêtes aux voisins uniquement lorsqu'un véhicule nécessite de découvrir son voisinage.

Nous avons comparé quantitativement nos deux approches proposées BOD-KF-GPSR et KF-GPSR avec le protocole GPSR basique et notre proposition précédente GPSR+Predict ainsi que les protocoles classiques AODV, DSR et ZRP. Grâce aux simulations, nous avons montré que l'utilisation d'un modèle de prédiction de filtre de Kalman avec GPSR (KF-GPSR) améliore les performances de routage quelle que soit la taille des paquets de données. De plus, nous avons montré que son extension BOD-KF-GPSR qui repose principalement sur la technique de 'Beacon on Demand' permet d'obtenir des performances beaucoup plus élevées.

# Conclusion et perspectives

L'objectif principal de ce travail de thèse est de contribuer à l'amélioration des protocoles de routage des VANET afin de ne pas compromettre aux exigences de tout type d'environnement, plus particulièrement à celles des autoroutes. Dans le scénario que nous avons considéré, les protocoles de routage sont chargés de transmettre les données entre les véhicules via des communications unicast à un ou à multi sauts. Toutes les propositions présentées dans cette thèse visent à améliorer les performances des protocoles de routage afin de satisfaire les exigences des différentes applications véhiculaires en termes de qualité de service tout en respectant les caractéristiques spécifiques des VANET.

Depuis lors, divers protocoles de routage ont été développés pour MANET, comme DSDV, DSR, AODV, DYMO, FSR, OLSR, ZRP et GPSR, mais qui ont été très vite utilisés pour VANET. Par conséquent, les chercheurs scientifiques ont été extrêmement actifs vis-à-vis de l'analyse et l'évaluation des performances de ces protocoles de routage dans des scénarios VANET variés. En effet, plusieurs travaux de recherche ont été proposés dans ce sens. Ces travaux se basent sur la simulation comme méthode d'évaluation car elle est rentable, souple dans la création des scénarios de simulation ainsi qu'elle offre un nombre infini de situations véhiculaires, chose qui n'est pas facile dans un environnement réel. Dans la plupart des études comparatives menées par les chercheurs, il n'y a que trois à quatre protocoles de routage qui sont pris en considération. L'évaluation de leurs performances ne prend en compte que quelques mesures de performances. De ce fait, dans ce mémoire nous avons commencé par comparer les performances de huit protocoles de routage Ad hoc DSDV, DSR, AODV, DYMO, FSR, OLSR, ZRP et GPSR dans un environnement VANET. En effet, nous avons évalué l'impact de la densité des véhicules et de la charge du trafic sur le comportement de ces protocoles. Les résultats de simulation ont montré qu'il n'y a pas de protocole de routage privilégié par rapport aux autres dans tous les scénarios et tous les critères d'évaluation. Toutefois, le protocole de routage géographique GPSR se classe parmi les meilleurs protocoles dans un environnement VANET et présente de bons atouts pour améliorer le routage et la QoS. À l'égard des résultats observés et qui affirment que les protocoles de routage géographiques représentent la meilleure solution pour assurer le routage dans VANET, nous avons accordé une attention particulière au protocole GPSR afin de l'améliorer et de parfaire ses performances et la QoS.

GPSR est un protocole de routage géographique qui se base principalement sur les informations géographiques disponibles pour envoyer les données de la source vers la destination. Aussi, c'est un protocole qui utilise deux différentes stratégies de routage à savoir "la stratégie de routage greedy" et "la stratégie de routage par périmètre". La première est utilisée par défaut, elle se base sur la position géographique de la destination finale d'un paquet et celle des voisins pour choisir le chemin le plus optimal en termes de distance afin de router le paquet au prochain

saut. Alors que la stratégie de routage par périmètre est une stratégie alternative qui n'est appliquée que lorsque la première stratégie est rompue. Elle utilise la règle de la main droite pour surpasser la zone vide.

GPSR sélectionne l'itinéraire le plus court possible vers la destination. Cependant, dans un environnement très dynamique, il peut être soumis à une dégradation des performances en raison de la mauvaise qualité des liens de communication ou de la probabilité élevée de rupture de ces liens causée par l'expiration des informations concernant les positions géographiques des véhicules. Ceci nous a conduit à opter pour la prédiction de la mobilité dans un tel environnement due aux avantages potentiels et signifiants qu'elle représente.

En effet, afin de garantir une qualité de service élevée et de meilleures performances dans les réseaux véhiculaires ad hoc, nous avons proposé deux approches différentes de prédiction déterministe pour améliorer la précision de la localisation des véhicules voisins. Nous avons proposé le protocole GPSR+Predict qui utilise une méthode de prédiction proactive déterministe. Cette méthode exploite de manière simple et optimisée la position géographique et la vitesse des véhicules pour estimer leur localisation dans un futur proche d'une façon régulière. Ainsi, la position prédite est disponible à tout moment. Nous avons proposé aussi le protocole GPSR+PR qui se base sur une approche de prédiction déterministe réactive. Ce protocole utilise lui aussi les positions géographiques et les vitesses des véhicules voisins collectées à partir des messages HELLO pour estimer leurs positions courantes. Ces positions prédites contribueront pleinement à la recherche du meilleur prochain relais et la prise des décisions de routage. En effet, à l'aide de ces prédictions appliquées, les variantes de GPSR prennent (chacune à sa manière) des décisions de routage plus intelligentes.

Grâce aux simulations réalisées pour analyser l'impact de la densité des véhicules sur le comportement des protocoles proposés dans les deux environnements autoroutier et urbain. Nous avons remarqué que les deux approches proposées, GPSR+Predict et GPSR+PR, ont la capacité d'augmenter les performances et la qualité de service particulièrement dans le cas des autoroutes. Cela prouve que les techniques suggérées évitent différents problèmes résultants des caractéristiques délicates des VANET.

Les prédictions déterministes restent limitées et à faible complexité. En effet, dans ces techniques de prédiction, les imprévus qui peuvent se produire ne sont pas pris en considération. Chose qui peut influencer négativement la précision que nous estimons avoir. c'est pour cette raison que nous avons proposé par la suite d'améliorer la méthode de prédiction en utilisant une technique plus sophistiquée pour avoir plus de précision et avoir des estimations qui soient plus réalistes.

Nous avons proposé d'utiliser une méthode de prédiction stochastique basée sur le filtre de Kalman afin de garder un niveau élevé de précision des informations de localisation sans pour autant charger le réseau ou augmenter le coût de routage. Nous avons proposé KF-GPSR où chaque véhicule peut estimer la position courante du voisin en exploitant l'algorithme robuste du filtre de Kalman. Certes, en utilisant ce modèle de prédiction, la précision est assurée. Et désormais, chaque véhicule utilise

les nouvelles positions estimées de ses voisins plutôt que les anciennes.

Pour plus de fiabilité et d'efficacité, nous avons mis en place le protocole BOD-KF-GPSR (extension de KF-GPSR). Cette variante utilise une technique de "Beacon on Demand" qui permet d'envoyer des invitations sous forme de requêtes à des voisins du premier degré uniquement lorsqu'un véhicule nécessite la découverte de son voisinage et sa mise à jour. En effet, lorsqu'un véhicule prévoit un éventuel vidage du voisinage en se basant sur deux paramètres, à savoir les ruptures des liens et le nombre des voisins, alors il diffuse dans sa zone de transmission une demande d'échange des messages HELLO pour mettre à jour son voisinage. Ainsi, nous avons élargi encore plus l'intervalle d'envoi des messages HELLO, et par conséquent, la charge du réseau et le coût de routage ont diminué.

Grâce aux expérimentations effectuées, nous avons montré que l'application du modèle de prédiction stochastique du filtre de Kalman avec GPSR accompagnée par l'approche des messages HELLO à la demande permet d'obtenir dans un environnement très dynamique, une performance de routage très élevée avec une très bonne qualité de service quelle que soit la taille des paquets.

En revanche, plusieurs extensions de ces solutions proposées peuvent être développées dans de futures travaux. Parmi les perspectives envisagées, nous citons :

- L'extension du protocole BOD-KF-GPSR pour des applications multimédia,
- L'exploitation de la logique floue pour améliorer d'avantage les performances de ce protocole,
- L'application de l'approche proposée (càd la prédiction avec le filtre de Kalman et les messages HELLO à la demande) sur d'autres protocoles de routage géographiques,
- La réalisation des expérimentations réelles et des simulations avec d'autres Modèles de mobilité pour tester encore plus le comportement de BOD-KF-GPSR, et
- La normalisation du protocole proposé BOD-KF-GPSR.



# Liste des publications

## Articles de revues internationales

1. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Maroua Drissi, Mohammed Oumsis, Said El Alaoui Ouatik. "Trade-off between Accuracy, Cost and QoS Using Beacon on Demand Strategy and Kalman Filtering Over VANET". Digital Communication and Network (DCN),2017. Elsevier.
2. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, Said El Alaoui Ouatik. "Comparative Study of Routing Protocols Performance for Vehicular Ad-hoc Networks". International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), 2017, vol. 12, no 13, p. 3867-3878.
3. Imane Zaimi ; Abdelali Boushaba ; Zineb Squalli Houssaini ; Mohammed Oumsis. "VANET : A Fuzzy Greedy Perimeter Stateless Routing Approach to Support Real-time Multimedia Transmission". Soumis in Wireless Networks. Springer.
4. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Mohammed Oumsis, " An Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad-hoc Network Considering the Video Stream ". Wireless Personal Communications(WPC), 2017, p. 1-37. Springer.
5. Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, Said El Alaoui Ouatik. "GPSR+Predict : An Enhancement for GPSR to Make Smart Routing Decision by Anticipating Movement of Vehicles in VANETs". Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ), 2017, vol. 2, no 3, p. 137-146.

## Conférences internationales

1. Zineb Squalli Houssaini ; Zaimi, I. ; Oumsis, M. ; Ouatik, S.E.A. Improvement of GPSR protocol by using future position estimation of participating nodes in vehicular ad-hoc Networks. 2016 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), 2016, pp. 87-94.
2. Zaimi, I., Zineb Squalli Houssaini, Boushaba, A., Oumsis, M. (2016, October). An improved GPSR protocol to enhance the video quality transmission over vehicular ad-hoc networks. In Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), 2016 International Conference on (pp. 146-153). IEEE.
3. Imane Zaimi, Zineb Squalli Houssaini, Abdelali Boushaba, and Mohammed Oumsis. 2016. A New Improved GPSR (GPSR-kP) Routing Protocol for Multimedia Communication over Vehicular ad-hoc Network. In Proceedings of the International Conference on Big Data and Advanced Wireless Technologies. (BDAW '16). ACM, New York, NY, USA, , Article 14 , 7 pages.

4. Zaimi, I., Zineb Squalli Houssaini, Boushaba, A., Oumsis, M., Aboutajdine, D. (2016, May). Vehicular Ad-Hoc Network : Evaluation of QoS and QoE for Multimedia Application. InÂ International Conference on Networked Systems (pp. 367-371). Springer International Publishing. NETYS 2016.

### **Conférences nationales**

1. Zineb Squalli Houssaini, Mohammed Oumsis, "Classification des Protocoles de routage dans les réseaux VANET ." Les 5èmes Journées Doctorales en Technologies de l'Information et de la Communication (JDTIC'13), Kénitra, 29-30 Novembre 2013.

# Bibliographie

- [1] European Commission. The european parliament and of the council : directive 2010/40/eu of the european parliament and of the council on the framework for the deployment of intelligent transport systems. *Official Journal of the European Union*, 53(6) :1–13, 2015. (Cité en page 19.)
- [2] European Commission. ecall in all new cars from april 2018 | digital agenda for europe, 2016. (Cité en page 19.)
- [3] European Commission. Fp 7 information and communication technologies, 2016. (Cité en page 19.)
- [4] D Mohr, N Muller, A Krieg, P. Gao, H W Kaas, A Krieger, and R. Hensley. The road to 2020 and beyond : What’s driving the global automotive industry’. *Thec.rep*, August 2013. (Cité en page 19.)
- [5] Kashif Naseer Qureshi and Abdul Hanan Abdullah. Localization-based system challenges in vehicular ad hoc networks : Survey. *Smart CR*, 4(6) :515–528, 2014. (Cité en page 19.)
- [6] Toyota Global Site. Vehicle-infrastructure cooperative systems, 2016. (Cité en page 19.)
- [7] Mercedes-Benz. Car-to-x communication, 2016. (Cité en page 19.)
- [8] BMW. Technology guide : Car-to-car communication, 2016. (Cité en page 19.)
- [9] Brad Karp and Hsiang-Tsung Kung. Gpsr : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 243–254. ACM, 2000. (Cité en pages 20, 44, 48, 49, 53, 69 et 70.)
- [10] H. Menouar, M. Lenardi, and F. Filali. Movement prediction-based routing (mopr) concept for position-based routing in vehicular networks. In *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, pages 2101–2105, Sept 2007. (Cité en pages 22, 89 et 91.)
- [11] Raed A. Saqour, Mohamad Shanudin, and Mahamod Ismail. Prediction schemes to enhance the routing process in geographical GPSR ad hoc protocol. *Mobile Information Systems*, 3(3-4) :203–220, 2007. (Cité en pages 22, 89 et 106.)
- [12] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, and Enea Tsanai. A gpsr enhancement mechanism for routing in vanets. In *International Conference on Wired/Wireless Internet Communication*, pages 94–107. Springer, 2015. (Cité en pages 22, 89 et 91.)
- [13] Sherman Alexie. *Smoke signals*. Hyperion New York, 1998. (Cité en page 26.)
- [14] Abraham Chappe et al. *Histoire de la télégraphie*. Ch. Richelet, 1840. (Cité en page 26.)

- [15] Guglielmo Marconi. Transmitting electrical signals, July 13 1897. US Patent 586,193. (Cité en page 26.)
- [16] Guglielmo Marconi. Wireless telegraphy. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 28(139) :273–290, 1899. (Cité en page 26.)
- [17] Bluetooth Specification. Version 1.0. *Technical specification*, URL <https://trustedcomputinggroup.org>, 2003. (Cité en page 26.)
- [18] Patrick Kinney et al. Zigbee technology : Wireless control that simply works. In *Communications design conference*, volume 2, pages 1–7, 2003. (Cité en page 26.)
- [19] Wi-Fi Alliance. Wi-fi protected access : Strong, standards-based, interoperable security for today’s wi-fi networks. *White paper*, University of Cape Town, pages 492–495, 2003. (Cité en page 26.)
- [20] Jeffrey G Andrews, Arunabha Ghosh, and Rias Muhamed. *Fundamentals of WiMAX : understanding broadband wireless networking*. Pearson Education, 2007. (Cité en page 26.)
- [21] Michel Mouly, Marie-Bernadette Pautet, and Thomas Foreword By-Haug. *The GSM system for mobile communications*. Telecom publishing, 1992. (Cité en page 26.)
- [22] Regis J Bates. *GPRS : general packet radio service*. McGraw-Hill Professional, 2001. (Cité en page 26.)
- [23] Erik Dahlman, Bjorn Gudmundson, Mats Nilsson, and A Skold. Umts/imt-2000 based on wideband cdma. *IEEE Communications magazine*, 36(9) :70–80, 1998. (Cité en page 26.)
- [24] Harri Holma and Antti Toskala. *WCDMA for umts : hspa evolution and lte*. John Wiley & sons, 2007. (Cité en page 26.)
- [25] Felipe Domingos Da Cunha, Azzedine Boukerche, Leandro Villas, Aline Carneiro Viana, and Antonio AF Loureiro. *Data communication in VANETs : a survey, challenges and applications*. PhD thesis, INRIA Saclay-INRIA, 2014. (Cité en pages 29 et 39.)
- [26] Elliott Kaplan and Christopher Hegarty. *Understanding GPS : principles and applications*. Artech house, 2005. (Cité en page 29.)
- [27] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. *Global positioning system : theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012. (Cité en page 29.)
- [28] Michael Shulman and Richard Deering. Vehicle safety communications in the united states. In *conference on experimental safety vehicles*, 2007. (Cité en page 32.)
- [29] John B Kenney. Dedicated short-range communications (dsrc) standards in the united states. *Proceedings of the IEEE*, 99(7) :1162–1182, 2011. (Cité en page 32.)

- [30] Federal Communications Commission. Fcc report and order, fcc 99-305, fcc report and order. *FCC*, Oct 1999. (Cité en page 32.)
- [31] Jijun Yin, Tamer ElBatt, Gavin Yeung, Bo Ryu, Stephen Habermas, Hariharan Krishnan, and Timothy Talty. Performance evaluation of safety applications over dsrc vehicular ad hoc networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 1–9. ACM, 2004. (Cité en pages 32 et 33.)
- [32] ETSI. Dsrc & electronic fee collection, 2008. (Cité en page 32.)
- [33] Mohamed Hadded. *Design and optimization of access control protocols in Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs)*. Theses, Institut National des Telecommunications, Oct 2016. (Cité en pages 32, 38 et 40.)
- [34] Katrin Bilstrup, Elisabeth Uhlemann, ErikG Str m, and Urban Bilstrup. On the ability of the 802.11 p mac method and stdma to support real-time vehicle-to-vehicle communication. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009(1) :902414, 2009. (Cité en page 33.)
- [35] Yunxin Li. *An Overview of the DSRC/WAVE Technology*, pages 544–558. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012. (Cité en page 33.)
- [36] IEEE. 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)*, pages 1–51, July 2010. (Cité en page 33.)
- [37] D. Bodson. Ieee standards revisions and approvals [standards]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 6(2) :101–103, June 2011. (Cité en page 33.)
- [38] Wolfgang Kiess, Jędrzej Rybicki, and Martin Mauve. On the nature of inter-vehicle communication. In *Communication in Distributed Systems (KiVS), 2007 ITG-GI Conference*, pages 1–10. VDE, 2007. (Cité en page 33.)
- [39] Asim Rasheed, Haleemah Zia, Farhan Hashmi, Umair Hadi, Warda Naim, and Sana Ajmal. Fleet & convoy management using vanet. *Journal of Computer Networks*, 1(1) :1–9, 2013. (Cité en page 33.)
- [40] Shamsul Jamel Elias, Mohd Nazri Bin Mohd Warip, R Badlishah Ahmad, and Aznor Hanah Abdul Halim. A comparative study of ieee 802.11 standards for non-safety applications on vehicular ad hoc networks : A congestion control perspective. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, volume 2, 2014. (Cité en page 33.)
- [41] Marco Di Felice, Ali J Ghandour, Hassan Artail, and Luciano Bononi. Enhancing the performance of safety applications in ieee 802.11 p/wave vehicular networks. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoW-MoM), 2012 IEEE International Symposium on a*, pages 1–9. IEEE, 2012. (Cité en page 33.)

- [42] Muh Ahyar and Riri Fitri Sari. Performance evaluation of multi-channel operation for safety and non-safety application on vehicular ad hoc network iee 1609.4. *International Journal of Simulation–Systems, Science & Technology*, 14(1) :16–22, 2013. (Cité en page 33.)
- [43] Al-Sakib Khan Pathan. *Security of self-organizing networks : MANET, WSN, WMN, VANET*. CRC press, 2016. (Cité en page 35.)
- [44] Anis Laouiti, Amir Qayyum, and Mohamad Naufal Mohamad Saad. *Vehicular Ad-Hoc Networks for Smart Cities : Second International Workshop, 2016*, volume 548. Springer, 2017. (Cité en page 35.)
- [45] European Commission. Preventive and active safety application, 2004-2008. (Cité en page 35.)
- [46] Communication for eSafety. Comesafety, 2006-2013. (Cité en page 35.)
- [47] SAFESPOT. connecting smart vehicles with intelligent infrastructure, 2010. (Cité en page 35.)
- [48] SeVeCOM. Secure vehicular communications, 2014. (Cité en page 35.)
- [49] COOPERS. Cooperative systems for intelligent road safety, 2016. (Cité en page 35.)
- [50] U.S. Department of transportation, 2016. (Cité en page 35.)
- [51] European Commission. Car-to-car communication consortium, 2009. (Cité en page 36.)
- [52] Saif Al-Sultan, Moath M Al-Doori, Ali H Al-Bayatti, and Hussien Zedan. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. *Journal of network and computer applications*, 37 :380–392, 2014. (Cité en pages 36 et 39.)
- [53] Ho Ting Cheng, Hanguan Shan, and Weihua Zhuang. Infotainment and road safety service support in vehicular networking : From a communication perspective. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(6) :2020–2038, 2011. (Cité en page 36.)
- [54] Hannes Hartenstein, Bernd Bochow, André Ebner, Matthias Lott, Markus Radimirsch, and Dieter Vollmer. Position-aware ad hoc wireless networks for inter-vehicle communications : the fleetnet project. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 259–262. ACM, 2001. (Cité en page 37.)
- [55] NOW. Network on wheels, 2004. (Cité en page 37.)
- [56] TracNet. Network on wheels, 2016. (Cité en page 37.)
- [57] Brijesh Kumar Chaurasia, Ranjeet Singh Tomar, Shekhar Verma, and Geetam Singh Tomar. Suitability of manet routing protocols for vehicular ad hoc networks. In *Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2012 International Conference on*, pages 334–338. IEEE, 2012. (Cité en page 38.)

- [58] Evjola Spaho, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, and Fatos Xhafa. Performance comparison of olsr and aodv protocols in a vanet crossroad scenario. In *Information Technology Convergence*, pages 37–45. Springer, 2013. (Cité en pages 38, 49 et 52.)
- [59] Baraa T Sharef, Raed A Alsaqour, and Mahamod Ismail. Vehicular communication ad hoc routing protocols : A survey. *Journal of network and computer applications*, 40 :363–396, 2014. (Cité en page 38.)
- [60] Bijan Paul, Md Ibrahim, Md Bikas, and Abu Naser. Vanet routing protocols : Pros and cons. *arXiv preprint arXiv :1204.1201*, 2012. (Cité en page 38.)
- [61] Rabah Meraihi, Sidi-Mohammed Senouci, Djamel-Eddine Meddour, and Moez Jerbi. Vehicle-to-vehicle communications : Applications and perspectives. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, pages 285–308, 2006. (Cité en pages 38 et 42.)
- [62] Atulya Mahajan, Niranjana Potnis, Kartik Gopalan, and Andy Wang. Urban mobility models for vanets. In *2nd IEEE International Workshop on Next Generation Wireless Networks*, volume 33, 2006. (Cité en page 38.)
- [63] Rakesh Kumar and Mayank Dave. Mobile agent as an approach to improve qos in vehicular ad hoc network. *arXiv preprint arXiv :1108.2095*, 2011. (Cité en page 39.)
- [64] Elias C Eze, Sijing Zhang, and Enjie Liu. Vehicular ad hoc networks (vanets) : Current state, challenges, potentials and way forward. In *Automation and Computing (ICAC), 2014 20th International Conference on*, pages 176–181. IEEE, 2014. (Cité en page 39.)
- [65] Mohammed Saeed Al-Kahtani. Survey on security attacks in vehicular ad hoc networks (vanets). In *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2012 6th International Conference on*, pages 1–9. IEEE, 2012. (Cité en page 40.)
- [66] Khaleel Mershad and Hassan Artail. A framework for secure and efficient data acquisition in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 62(2) :536–551, 2013. (Cité en page 40.)
- [67] Peppino Fazio, Floriano De Rango, Cesare Sottile, and Carlos Calafate. A new channel assignment scheme for interference-aware routing in vehicular networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pages 1–5. IEEE, 2011. (Cité en pages 40 et 68.)
- [68] Qingming Ma and Peter Steenkiste. Routing traffic with quality-of-service guarantees in integrated services networks. In *Proceedings of Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video*, 1998. (Cité en page 41.)
- [69] Mohammad Ilyas. *The handbook of ad hoc wireless networks*. CRC press, 2002. (Cité en page 41.)

- [70] Surmukh Singh and Sunil Agrawal. Vanet routing protocols : issues and challenges. In *Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014 Recent Advances in*, pages 1–5. IEEE, 2014. (Cité en page 41.)
- [71] Elizabeth M Royer and Chai-Keong Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE personal communications*, 6(2) :46–55, 1999. (Cité en page 41.)
- [72] Saeed Ahmadi Arzil, Majid Hosseinpour Aghdam, and Mohammad Ali Jabraeil Jamali. Adaptive routing protocol for vanets in city environments using real-time traffic information. In *Information Networking and Automation (ICINA), 2010 International Conference on*, volume 2, pages V2–132. IEEE, 2010. (Cité en page 41.)
- [73] Christian Lochert, Hannes Hartenstein, Jing Tian, Holger Fussler, Dagmar Hermann, and Martin Mauve. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE*, pages 156–161. IEEE, 2003. (Cité en pages 41 et 48.)
- [74] Wantanee Viriyasitavat, Fan Bai, and Ozan K Tonguz. Dynamics of network connectivity in urban vehicular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(3) :515–533, 2011. (Cité en page 41.)
- [75] Jeremy J Blum, Azim Eskandarian, and Lance J Hoffman. Challenges of intervehicle ad hoc networks. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 5(4) :347–351, 2004. (Cité en page 41.)
- [76] Bijan Paul and Mohammed J Islam. Survey over vanet routing protocols for vehicle to vehicle communication. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE), ISSN*, pages 2278–0661, 2012. (Cité en page 42.)
- [77] Vimmi A Gajbhiye and Ratnaprabha W Jasutkar. Study of efficient routing protocols for vanet. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 :1–8, 2013. (Cité en page 42.)
- [78] Rakesh Kumar and Mayank Dave. A comparative study of various routing protocols in vanet. *arXiv preprint arXiv :1108.2094*, 2011. (Cité en page 42.)
- [79] A Chinnasamy and S Prakash. Chronicles of routing protocols for vehicular ad-hoc networks. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN*, pages 2248–9622, 2013. (Cité en page 42.)
- [80] David B Johnson and David A Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile computing*, pages 153–181, 1996. (Cité en page 42.)
- [81] M Vijayalaskhmi, Avinash Patel, and Linganagouda Kulkarni. Qos parameter analysis on aodv and dsdv protocols in a wireless network. *International Journal of Communication Network & Security*, 1(1) :62–70, 2011. (Cité en page 42.)
- [82] Kevin C Lee, Uichin Lee, and Mario Gerla. Survey of routing protocols in vehicular ad hoc networks. *Advances in vehicular ad-hoc networks : Developments and challenges*, pages 149–170, 2010. (Cité en pages 42 et 47.)

- [83] Rahul Kumar and Shikha Takkar. A taxonomy of routing protocols in vanet. *International Journal of Scientific Research (IJSR)*, 2, July 2013. (Cité en pages 42 et 47.)
- [84] Lajos Hanzo and Rahim Tafazolli. A survey of qos routing solutions for mobile ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 9(2) :50–70, 2007. (Cité en page 42.)
- [85] Yun-Wei Lin, Yuh-Shyan Chen, and Sing-Ling Lee. Routing protocols in vehicular ad hoc networks : A survey and future perspectives. *J. Inf. Sci. Eng.*, 26(3) :913–932, 2010. (Cité en page 42.)
- [86] Tasneem Darwish and Kamalrulnizam Abu Bakar. Traffic aware routing in vehicular ad hoc networks : characteristics and challenges. *Telecommunication systems*, 61(3) :489, 2016. (Cité en page 43.)
- [87] Baraa T Sharef, Raed A Alsaqour, and Mahamod Ismail. Vehicular communication ad hoc routing protocols : A survey. *Journal of network and computer applications*, 40 :363–396, 2014. (Cité en page 43.)
- [88] Kuk-Hyun Cho and Min-Woo Ryu. A survey of greedy routing protocols for vehicular ad hoc networks. *SmartCR*, 2(2) :125–137, 2012. (Cité en pages 43 et 68.)
- [89] Laiq Khan, Nohman Ayub, and Aamir Saeed. Anycast based routing in vehicular ad hoc networks (vanets) using vanetmobisim. *World Applied Sciences Journal*, 7(11) :1341–1352, 2009. (Cité en page 44.)
- [90] Jidong Wu. On-demand anycast routing in mobile ad hoc networks. *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, pages 93–102, 2005. (Cité en page 44.)
- [91] Meng Qi and Ji Hong. Aapp : an anycast based aodv routing protocol for peer to peer services in manet. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 5(1) :48–48, 2009. (Cité en page 44.)
- [92] Ankit Patel and Zunnun Narmawala. Network coding with mgm based anycast packet transmission in vehicular ad-hoc networks. In *www.ijcst.com*, 2013. (Cité en page 44.)
- [93] Rainer Baumann. Vehicular ad hoc networks (vanet), 2004. (Cité en page 44.)
- [94] David B Johnson, David A Maltz, Josh Broch, et al. Dsr : The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. *Ad hoc networking*, 5 :139–172, 2001. (Cité en pages 44, 46, 49 et 52.)
- [95] Yuh-Shyan Chen, Yun-Wei Lin, and Ci-Yi Pan. Dir : diagonal-intersection-based routing protocol for vehicular ad hoc networks. *Telecommunication systems*, 46(4) :299–316, 2011. (Cité en page 44.)
- [96] Jing Zhao and Guohong Cao. Vadd : Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE transactions on vehicular technology*, 57(3) :1910–1922, 2008. (Cité en pages 44 et 47.)
- [97] Shuchita Uphadhyaya and Anil Saini. Improving the quality of cgsr routing protocol by electing suitable cluster-head using fuzzy logic system in manet.

- International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, ISSN, 2277, 2013. (Cité en pages 44 et 45.)
- [98] Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer, and Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical report, -, 2003. (Cité en pages 44, 46, 49 et 51.)
- [99] Jeremy Blum, Azim Eskandarian, and Lance Hoffman. Mobility management in ivc networks. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE*, pages 150–155. IEEE, 2003. (Cité en pages 44, 45 et 46.)
- [100] Min-Te Sun, Wu-Chi Feng, Ten-Hwang Lai, Kentaro Yamada, Hiromi Okada, and Kikuo Fujimura. Gps-based message broadcasting for inter-vehicle communication. In *Parallel Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on*, pages 279–286. IEEE, 2000. (Cité en page 44.)
- [101] Ozan K Tonguz, Nawaporn Wisitpongphan, and Fan Bai. Dv-cast : A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 17(2), 2010. (Cité en page 44.)
- [102] Valery Naumov, Rainer Baumann, and Thomas 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*, pages 108–119. ACM, 2006. (Cité en pages 44, 48, 49 et 75.)
- [103] K. Na Nakom and K. Rojviboonchai. Poca : Position-aware reliable broadcasting in vanet. In *the 2nd Asia-Pacific Conference of Information Processing APCIP2010*, September 2010. (Cité en page 44.)
- [104] Nawut Na Nakorn and Kultida Rojviboonchai. Deca : Density-aware reliable broadcasting in vehicular ad hoc networks. In *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on*, pages 598–602. IEEE, 2010. (Cité en page 44.)
- [105] Yuh-Shyan Chen, Yun-Wei Lin, and Sing-Ling Lee. A mobicast routing protocol in vehicular ad-hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 15(1) :20–35, 2010. (Cité en page 44.)
- [106] Maria Kihl, Mihail Sichitiu, Ted Ekeroth, and Michael Rozenberg. Reliable geographical multicast routing in vehicular ad-hoc networks. In *WWIC*, pages 315–325. Springer, 2007. (Cité en page 45.)
- [107] Qingfeng Huang, Chenyang Lu, and Gruia-Catalin Roman. Mobicast : Just-in-time multicast for sensor networks under spatiotemporal constraints. In *Information processing in sensor networks*, pages 558–558. Springer, 2003. (Cité en page 45.)
- [108] Abdelmalik Bachir and Abderrahim Benslimane. A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast. In *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual*, volume 4, pages 2456–2460. IEEE, 2003. (Cité en page 45.)

- [109] Hamidreza Rahbar, Kshirasagar Naik, and Amiya Nayak. Dtsgr : Dynamic time-stable geocast routing in vehicular ad hoc networks. In *Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), 2010 The 9th IFIP Annual Mediterranean*, pages 1–7. IEEE, 2010. (Cité en page 45.)
- [110] Talar Atéghian, Lionel Brunie, J Roth, and J Gutiérrez. Dg-castor : Direction-based geocast routing protocol for query dissemination in vanet. *IADIS International Telecommunications, Networks and Systems*, pages 105–109, 2008. (Cité en page 45.)
- [111] Pei-Chun Cheng, Jui-Ting Weng, Lung-Chih Tung, Kevin C Lee, Mario Gerla, and Jerome Haerri. Geodtn+ nav : a hybrid geographic and dtn routing with navigation assistance in urban vehicular networks. *MobiQuitous/ISVCS*, 47, 2008. (Cité en pages 45 et 48.)
- [112] Tao Song, Weiwei Xia, Tiecheng Song, and Lianfeng Shen. A cluster-based directional routing protocol in vanet. In *Communication Technology (ICCT), 2010 12th IEEE International Conference on*, pages 1172–1175. IEEE, 2010. (Cité en page 45.)
- [113] Raymond L Pickholtz, Laurence B Milstein, and Donald L Schilling. Spread spectrum for mobile communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2) :313–322, 1991. (Cité en pages 45 et 46.)
- [114] Hanan Saleet and Otman Basir. Location-based message aggregation in vehicular ad hoc networks. In *Globecom Workshops, 2007 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2007. (Cité en pages 45 et 46.)
- [115] Guangyu Pei, Mario Gerla, and Tsu-Wei Chen. Fisheye state routing : A routing scheme for ad hoc wireless networks. In *Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 70–74. IEEE, 2000. (Cité en pages 46, 49 et 51.)
- [116] Thomas Clausen and Philippe Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr). Technical report, -, 2003. (Cité en pages 46, 49 et 50.)
- [117] Jose Joaquin Garcia-Luna-Aceves and Marcelo Spohn. Source-tree routing in wireless networks. In *Network Protocols, 1999.(ICNP'99) Proceedings. Seventh International Conference on*, pages 273–282. IEEE, 1999. (Cité en page 46.)
- [118] Ying Ge, Thomas Kunz, and Louise Lamont. Quality of service routing in ad-hoc networks using olsr. In *System Sciences, 2003. Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on*, pages 9–pp. IEEE, 2003. (Cité en page 46.)
- [119] Mingliang Jiang. Cluster based routing protocol,(cbrp). *draft-ietf-manet-cbrp-spec-01. txt, Internet draft*, 1999. (Cité en page 46.)
- [120] Chen Jing, Cui Hua, and Hong Liang. A secure global state routing for mobile ad hoc networks. In *Personal Wireless Communications*, pages 228–238. Springer, 2006. (Cité en page 46.)

- [121] Charles E Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM computer communication review*, pages 234–244. ACM, 1994. (Cité en pages 46, 49 et 50.)
- [122] Kumar Manoj SC Sharma Chandras. Effective analysis of different parameters in ad hoc network for different protocols. -, 1(3) :2248–9738, 2012. (Cité en page 46.)
- [123] Peppino Fazio, Floriano De Rango, Cesare Sottile, Pietro Manzoni, and Carlos Calafate. A distance vector routing protocol for vanet environment with dynamic frequency assignment. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*, pages 1016–1020. IEEE, 2011. (Cité en page 46.)
- [124] Tarik Taleb, Mitsuru Ochi, Abbas Jamalipour, Nei Kato, and Yoshiaki Nemoto. An efficient vehicle-heading based routing protocol for vanet networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*, volume 4, pages 2199–2204. IEEE, 2006. (Cité en page 46.)
- [125] Angelos Marnierides. *Working with the Grid Kit Overlay Framework The Secure-AntHocNet Overlay*. PhD thesis, Thesis Lancaster University, 2007. (Cité en page 46.)
- [126] Mehran Abolhasan, Tadeusz Wysocki, and Eryk Dutkiewicz. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Ad hoc networks*, 2(1) :1–22, 2004. (Cité en page 46.)
- [127] V Park and S Corson. Temporally ordered routing algorithm (tora) version 1, functional specification ietf internet draft, 1998. (Cité en page 46.)
- [128] Sukant Kishoro Bisoyi and Sarita Sahu. Performance analysis of dynamic manet on-demand (dymo) routing protocol. *Special Issue of IJCCCT*, 1(2) :3, 2010. (Cité en pages 46, 49 et 52.)
- [129] Carlos T Calafate, Giancarlo Fortino, Sascha Fritsch, Janio Monteiro, Juan-Carlos Cano, and Pietro Manzoni. An efficient and robust content delivery solution for iee 802.11 p vehicular environments. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(2) :753–762, 2012. (Cité en page 46.)
- [130] Yong Ding, Chen Wang, and Li Xiao. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks. In *Proceedings of the fourth ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 59–68. ACM, 2007. (Cité en pages 46 et 47.)
- [131] Yazhi Liu, Jianwei Niu, Jian Ma, Lei Shu, Takahiro Hara, and Wendong Wang. The insights of message delivery delay in vanets with a bidirectional traffic model. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(5) :1287–1294, 2013. (Cité en page 46.)
- [132] Mahmood Fathy, Saeed GholamalitabarFirouzjaee, and Kaamran Raahemifar. Improving qos in vanet using mpls. *Procedia Computer Science*, 10 :1018–1025, 2012. (Cité en page 46.)

- [133] Zygmunt J Haas, Marc R Pearlman, and Prince Samar. The zone routing protocol (zrp) for ad hoc networks. -, 2002. (Cité en pages 46, 49 et 53.)
- [134] Ken Nakaoka, Makoto Oba, and Shuji Tasaka. Lqhr : A link quality-based hybrid routing protocol for wireless ad hoc networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*, pages 1–8. IEEE, 2006. (Cité en page 46.)
- [135] Gianni Di Caro, Frederick Ducatelle, and Luca Maria Gambardella. Anthocnet : an adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 16(5) :443–455, 2005. (Cité en page 46.)
- [136] Jayanta Biswas, Mukti Barai, and SK Nandy. Efficient hybrid multicast routing protocol for ad-hoc wireless networks. In *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on*, pages 180–187. IEEE, 2004. (Cité en page 46.)
- [137] Salim Bitam, Abdelhamid Mellouk, and Sherahli Zeadally. Hybr : A hybrid bio-inspired bee swarm routing protocol for safety applications in vehicular ad hoc networks (vanets). *Journal of Systems Architecture*, 59(10) :953–967, 2013. (Cité en page 46.)
- [138] Jason LeBrun, Chen-Nee Chuah, Dipak Ghosal, and Michael Zhang. Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks. In *Vehicular technology conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, volume 4, pages 2289–2293. IEEE, 2005. (Cité en page 47.)
- [139] Shabbir Ahmed and Salil S Kanere. Skvr : Scalable knowledge-based routing architecture for public transport networks. In *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 92–93. ACM, 2006. (Cité en page 47.)
- [140] Ilias Leontiadis and Cecilia Mascolo. Geopps : Geographical opportunistic routing for vehicular networks. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2007. WoWMoM 2007. IEEE International Symposium on a*, pages 1–6. Ieee, 2007. (Cité en page 47.)
- [141] Moez Jerbi, Rabah Meraihi, Sidi-Mohammed Senouci, and Yacine 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*, pages 88–89. ACM, 2006. (Cité en page 47.)
- [142] D Forderer. Street-topology based routing. *Doktorska disertacija, University of Mannheim*, 2005. (Cité en page 47.)
- [143] Kaveh Shafiee and Victor CM Leung. Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in vanets. *Ad Hoc Networks*, 9(2) :131–141, 2011. (Cité en page 47.)
- [144] Carolina Tripp-Barba, Luis Urquiza-Aguiar, Monica Aguilar Igartua, David Rebollo-Monedero, Luis J de la Cruz Llopis, Ahmad Mohamad Mezher, and

- José Alfonso Aguilar-Calderon. A multimetric, map-aware routing protocol for vanets in urban areas. *Sensors*, 14(2) :2199–2224, 2014. (Cité en pages 47, 89 et 91.)
- [145] Roberta Fracchia, Michela Meo, and Dario Rossi. Vanets : To beacon or not to beacon. *Proc. of the Autonet'06 at IEEE Globecom'06*, 2006. (Cité en page 47.)
- [146] Jonathan Loo, Jaime Lloret Mauri, and Jesús Hamilton Ortiz. *Mobile ad hoc networks : current status and future trends*. CRC Press, 2016. (Cité en page 47.)
- [147] Boon-Chong Seet, Genping Liu, Bu-Sung Lee, Chuan-Heng Foh, Kai-Juan Wong, and Keok-Kee Lee. A-star : A mobile ad hoc routing strategy for metropolis vehicular communications. In *International Conference on Research in Networking*, pages 989–999. Springer, 2004. (Cité en page 48.)
- [148] Joseph Mouzna, Sandesh Uppoor, Mounir Boussejra, and MM Manohara Pai. Density aware routing using road hierarchy for vehicular networks. In *Service Operations, Logistics and Informatics, 2009. SOLI'09. IEEE/INFORMS International Conference on*, pages 443–448. IEEE, 2009. (Cité en page 48.)
- [149] Valery Naumov and Thomas R Gross. Connectivity-aware routing (car) in vehicular ad-hoc networks. In *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 1919–1927. IEEE, 2007. (Cité en page 48.)
- [150] CATH Tee and A Lee. A novel routing protocol'junction based adaptive reactive routing (jarr) for vanet in city environments. In *Wireless Conference (EW), 2010 European*, pages 1–6. IEEE, 2010. (Cité en page 48.)
- [151] Kevin C Lee, Jérôme Härri, Uichin Lee, and Mario Gerla. Enhanced perimeter routing for geographic forwarding protocols in urban vehicular scenarios. In *Globecom Workshops, 2007 IEEE*, pages 1–10. IEEE, 2007. (Cité en page 48.)
- [152] Christian Lochert, Martin Mauve, Holger Füßler, and Hannes Hartenstein. Geographic routing in city scenarios. *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, 9(1) :69–72, 2005. (Cité en page 48.)
- [153] Kevin C Lee, Michael Le, Jerome Harri, and Mario Gerla. Louvre : Landmark overlays for urban vehicular routing environments. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pages 1–5. IEEE, 2008. (Cité en page 48.)
- [154] Sascha Schnauffer and Wolfgang Effelsberg. Position-based unicast routing for city scenarios. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008. WoWMoM 2008. 2008 International Symposium on a*, pages 1–8. IEEE, 2008. (Cité en page 48.)
- [155] Sunder Aditya Rao, Manohara Pai, Mounir Boussejra, and Joseph Mouzna. Gpsr-l : Greedy perimeter stateless routing with lifetime for vanets. In *ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on*, pages 299–304. IEEE, 2008. (Cité en page 48.)

- [156] Sascha Schnauffer, Holger Füßler, Matthias Transier, and Wolfgang Effelsberg. Unicast ad-hoc routing in vehicular city scenarios. -, 2006. (Cité en page 48.)
- [157] Mohammad Al-Rabayah. Hybrid location-based routing in ad-hoc wireless networks, 2011. (Cité en page 48.)
- [158] Marwane Ayaida, Mohtadi Barhoumi, Hacène Fouchal, Yacine Ghamri-Doudane, and Lissan Afilal. Hhls : A hybrid routing technique for vanets. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE*, pages 44–48. IEEE, 2012. (Cité en page 48.)
- [159] Yanlin Peng, Zakhia Abichar, and J Morris Chang. Roadside-aided routing (rar) in vehicular networks. In *Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on*, volume 8, pages 3602–3607. IEEE, 2006. (Cité en page 48.)
- [160] Talar Atéchian. Protocole de routage géo-multipoint hybride et mécanisme d'acheminement de données pour les réseaux ad hoc de véhicules (vanets). -, 2010. (Cité en page 48.)
- [161] Mayada Abdelgadir, Rashid Saeed, and Abuagla Babiker. Vehicular ad-hoc networks (vanets) dynamic performance estimation routing model for city scenarios. In *Information Science and Communications Technologies (ICISCT), International Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2016. (Cité en page 49.)
- [162] Bijan Paul, Aditi Roy, and Sanjit Kumar Paul. Comparison of dsr, aodv, and dsdv routing protocols with varying pause time & node density over tcp & cbr connections in vanet. In *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2014 International Conference on*, pages 374–379. IEEE, 2014. (Cité en page 49.)
- [163] Akhtar Husain and SC Sharma. Simulated analysis of location and distance based routing in vanet with ieee802. 11p. *Procedia Computer Science*, 57 :323–331, 2015. (Cité en page 49.)
- [164] L Karthikeyan, V Deepalakshmi, et al. Comparative study on non-delay tolerant routing protocols in vehicular networks. *Procedia Computer Science*, 50 :252–257, 2015. (Cité en page 49.)
- [165] Cesare Sottile, Amilcare Francesco Santamaria, and Salvatore Marano. A reactive routing protocol for vanets based on composite metric concept. In *Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS 2014), International Symposium on*, pages 642–646. IEEE, 2014. (Cité en page 49.)
- [166] Jerome Haerri, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Performance comparison of aodv and olsr in vanets urban environments under realistic mobility patterns. In *Proceedings of the 5th IFIP mediterranean ad-hoc networking workshop*, pages 14–17, 2006. (Cité en pages 49 et 52.)
- [167] Parminder Singh. Comparative study between unicast and multicast routing protocols in different data rates using vanet. In *Issues and Challenges in*

- Intelligent Computing Techniques (ICICT), 2014 International Conference on*, pages 278–284. IEEE, 2014. (Cité en page 49.)
- [168] Pramod Mutalik, S Nagaraj, J Vedavyas, Rajashree V Biradar, and Venkanna Gouda C Patil. A comparative study on aodv, dsr and dsdv routing protocols for intelligent transportation system (its) in metro cities for road traffic safety using vanet route traffic analysis (vrta). In *Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT), 2016 IEEE International Conference on*, pages 383–386. IEEE, 2016. (Cité en page 49.)
- [169] ns 2. Network simulator, 2008. (Cité en pages 49 et 55.)
- [170] Jérôme Harri, Fethi Filali, Christian Bonnet, and Marco Fiore. Vanetmobisim : generating realistic mobility patterns for vanets. In *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 96–97. ACM, 2006. (Cité en pages 49, 56 et 58.)
- [171] J Harri and Marco Fiore. Vanetmobisim–vehicular ad hoc network mobility extension to the canumobisim framework. *Institut Eurécom Department of Mobile Commu*, 6904 :1–19, 2006. (Cité en page 49.)
- [172] Dimitri P Bertsekas, Robert G Gallager, and Pierre Humblet. *Data networks*, volume 2. Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ, 1987. (Cité en page 50.)
- [173] Baruch Awerbuch, Amotz Bar-Noy, and Madan Gopal. Approximate distributed bellman-ford algorithms. *IEEE Transactions on Communications*, 42(8) :2515–2517, 1994. (Cité en page 50.)
- [174] Miray Kas, Ibrahim Korpeoglu, and Ezhan Karasan. Olsr-aware distributed channel access scheduling for wireless mesh networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009. IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2009. (Cité en page 50.)
- [175] John Moy. Ospf version 2. -, 1997. (Cité en page 50.)
- [176] Rob Coltun and F Baker. Ospf version management information base. -, 1995. (Cité en page 50.)
- [177] Juan Angel Ferreiro-Lage, Cristina Pereiro Gestoso, Oscar Rubiños, and Fernando Aguado Agelet. Analysis of unicast routing protocols for vanets. In *Networking and Services, 2009. ICNS'09. Fifth International Conference on*, pages 518–521. IEEE, 2009. (Cité en page 52.)
- [178] Christoph Sommer and Falko Dressler. The dymo routing protocol in vanet scenarios. In *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th*, pages 16–20. IEEE, 2007. (Cité en page 53.)
- [179] Zygmunt J Haas and Marc R Pearlman. The performance of query control schemes for the zone routing protocol. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 9(4) :427–438, 2001. (Cité en page 53.)
- [180] Jist/SWANS. Java in simulation time / scalable wireless ad hoc network simulator, 2008. (Cité en page 55.)

- [181] Francisco J Martinez, Chai Keong Toh, Juan-Carlos Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (vanets). *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(7) :813–828, 2011. (Cité en pages 56, 57 et 58.)
- [182] David R Choffnes and Fabián E Bustamante. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 69–78. ACM, 2005. (Cité en page 56.)
- [183] Rahul Mangharam, Daniel S Weller, Daniel D Stancil, Rangunathan Rajkumar, and Jayendra S Parikh. Groovesim : a topography-accurate simulator for geographic routing in vehicular networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 59–68. ACM, 2005. (Cité en page 56.)
- [184] Michal Piorkowski, Maxim Raya, A Lezama Lugo, Panagiotis Papadimitratos, Matthias Grossglauser, and J-P Hubaux. Trans : realistic joint traffic and network simulator for vanets. *ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review*, 12(1) :31–33, 2008. (Cité en page 56.)
- [185] Khaled Ibrahim and Michele C Weigle. Ash : Application-aware swans with highway mobility. In *INFOCOM Workshops 2008, IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2008. (Cité en page 56.)
- [186] Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker. Recent development and applications of sumo-simulation of urban mobility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4) :128–138, 2012. (Cité en page 56.)
- [187] Francisco J Martinez, J-C Cano, Carlos T Calafate, and Pietro Manzoni. Citymob : a mobility model pattern generator for vanets. In *Communications Workshops, 2008. ICC Workshops' 08. IEEE International Conference on*, pages 370–374. IEEE, 2008. (Cité en page 56.)
- [188] CanuMobiSim. Canu mobility simulation environment, 2005. (Cité en page 57.)
- [189] Tiger Database. Topologically integrated geographic encoding and referencing, 2014. (Cité en page 57.)
- [190] Md Habibur Rahman, Md Monzur Morshed, and Meftah Ur Rahman. Realistic vehicular mobility impact of ftm, idm, idm-im and idm-lc on vanets. *International Journal of Computer Applications*, 90(11), 2014. (Cité en page 57.)
- [191] Jérôme Harri, Marco Fiore, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Vehicular mobility simulation with vanetmobisim. *Simulation*, 87(4) :275–300, 2011. (Cité en page 57.)
- [192] Kevin Fall. The ns manual. *The VINT Project, a collaboration between researchers at UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC*, 2001. (Cité en page 58.)

- [193] David B Johnson, Josh Broch, Yih-Chun Hu, Jorjeta Jetcheva, and David A Maltz. The cmu monarch project's wireless and mobility extensions to ns. *Proc. of 42nd Internet Engineering Task Force*, 1998. (Cité en page 58.)
- [194] Jianqi Liu, Jiafu Wan, Qinruo Wang, Pan Deng, Keliang Zhou, and Yupeng Qiao. A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks. *Telecommunication Systems*, 62(1) :15–30, 2016. (Cité en page 68.)
- [195] Marwa Altayeb and Imad Mahgoub. A survey of vehicular ad hoc networks routing protocols. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 3(3) :829–846, 2013. (Cité en page 68.)
- [196] Y Ravi, V Venkataramana, MV Rathnamma, and P Chenna Reddy. Position based routing in mobile adhoc networks. *International Journal of Computer Applications*, 55(5), 2012. (Cité en page 74.)
- [197] Marcelo G Rubinstein, Igor M Moraes, Miguel Elias M Campista, Luis Henrique MK Costa, and Otto Carlos MB Duarte. A survey on wireless ad hoc networks. In *Mobile and Wireless Communication Networks*, pages 1–33. Springer, 2006. (Cité en page 74.)
- [198] Geetam S Tomar. Position based routing for wireless mobile ad hoc networks. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 10(1) :10–15, 2009. (Cité en page 74.)
- [199] Martin Mauve, Jorg Widmer, and Hannes Hartenstein. A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks. *IEEE network*, 15(6) :30–39, 2001. (Cité en page 74.)
- [200] Silvia Giordano and Ivan Stojmenovic. Position based routing algorithms for ad hoc networks : A taxonomy. In *Ad hoc wireless networking*, pages 103–136. Springer, 2004. (Cité en page 74.)
- [201] Fabrizio Granelli, Giulia Boato, Dzmitry Kliazovich, and Gianni Vernazza. Enhanced gpsr routing in multi-hop vehicular communications through movement awareness. *IEEE Communications Letters*, 11(10), 2007. (Cité en page 75.)
- [202] Kristine M Larson, Paul Bodin, and Joan Gomberg. Using 1-hz gps data to measure deformations caused by the denali fault earthquake. *Science*, 300(5624) :1421–1424, 2003. (Cité en page 76.)
- [203] Ahmad Abbas Al-Ameen Salih, Nur Liyana Afiqah Che Ahmad Zaini, and Amzari Zhahir. The suitability of gps receivers update rates for navigation applications. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, page 192. World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), 2013. (Cité en page 76.)
- [204] Huifang Feng, Chunfeng Liu, Yantai Shu, and Oliver WW Yang. Location prediction of vehicles in vanets using a kalman filter. *Wireless personal communications*, 80(2) :543–559, 2015. (Cité en pages 83 et 107.)
- [205] Olivier Coupelon. Neural network modeling for stock movement prediction a state of the art. *Blaise Pascal University*, 2007. (Cité en page 83.)

- [206] Dimitrios Katsaros and Yannis Manolopoulos. Prediction in wireless networks by markov chains. *IEEE Wireless Communications*, 16(2), 2009. (Cité en page 83.)
- [207] William Su, S-J Lee, and Mario Gerla. Mobility prediction in wireless networks. In *MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings*, volume 1, pages 491–495. IEEE, 2000. (Cité en page 86.)
- [208] W Creixell and K Sezaki. Routing protocol for mobile ad hoc networks using mobility prediction. 2005. (Cité en page 86.)
- [209] Károly Farkas, Theus Hossmann, Lukas Ruf, and Bernhard Plattner. Pattern matching based link quality prediction in wireless mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 9th ACM international symposium on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 239–246. ACM, 2006. (Cité en pages 86 et 88.)
- [210] Hui Xu, Min Meng, Jinsung Cho, Brian J d’Auriol, and Sungyung Lee. Mobility tracking for mobile ad hoc networks. In *International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*, pages 285–294. Springer, 2007. (Cité en page 86.)
- [211] Q Han, Y Bai, L Gong, and W Wu. Link availability prediction-based reliable routing for mobile ad hoc networks. *IET communications*, 5(16) :2291–2300, 2011. (Cité en page 86.)
- [212] Sedong Kwon, Hyunmin Park, and Kangsun Lee. A novel mobility prediction algorithm based on user movement history in wireless networks. In *Asian Simulation Conference*, pages 419–428. Springer, 2004. (Cité en page 86.)
- [213] Fazli Erbas, Jan Steuer, Dirk Eggesieker, Kyandoghene Kyamakya, and K Jobinann. A regular path recognition method and prediction of user movements in wireless networks. In *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*, volume 4, pages 2672–2676. IEEE, 2001. (Cité en page 86.)
- [214] Ing-Ray Chen and Naresh Verma. Simulation study of a class of autonomous host-centric mobility prediction algorithms for wireless cellular and ad hoc networks. In *Proceedings of the 36th annual symposium on Simulation*, page 65. IEEE Computer Society, 2003. (Cité en page 86.)
- [215] C Mala, Mohanraj Loganathan, NP Gopalan, and Balasubramanian Sivaselvan. A novel genetic algorithm approach to mobility prediction in wireless networks. In *International Conference on Contemporary Computing*, pages 49–57. Springer, 2009. (Cité en page 86.)
- [216] Zainab R Zaidi and Brian L Mark. Mobility estimation based on an autoregressive model. *Electrical Engineering Department of George Mason University, USA, Tech. Rep.*, 2004. (Cité en page 88.)
- [217] Werner Creixell and Kaoru Sezaki. Mobility prediction algorithm for mobile ad hoc network using pedestrian trajectory data. In *TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference*, pages 668–671. IEEE, 2004. (Cité en page 88.)

- [218] Zainab R Zaidi and Brian L Mark. Distributed mobility tracking for ad hoc networks based on an autoregressive model. In *International Workshop on Distributed Computing*, pages 447–458. Springer, 2004. (Cité en page 88.)
- [219] Elmano Ramalho Cavalcanti and Marco Aur lio Spohn. Predicting mobility metrics through regression analysis for random, group, and grid-based mobility models in manets. In *Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on*, pages 443–448. IEEE, 2010. (Cité en page 88.)
- [220] Brian L Mark and Zainab R Zaidi. Robust mobility tracking for cellular networks. In *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 445–449. IEEE, 2002. (Cité en page 88.)
- [221] Shun-Zheng Yu and Hisashi Kobayashi. A hidden semi-markov model with missing data and multiple observation sequences for mobility tracking. *Signal Processing*, 83(2) :235–250, 2003. (Cité en page 88.)
- [222] Hisashi Kobayashi, Shun-Zheng Yu, and Brian L Mark. An integrated mobility and traffic model for resource allocation in wireless networks. In *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Wireless mobile multimedia*, pages 39–47. ACM, 2000. (Cité en page 88.)
- [223] Tong Liu, Paramvir Bahl, and Imrich Chlamtac. Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless atm networks. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 16(6) :922–936, 1998. (Cité en page 88.)
- [224] Pubudu N Pathirana, Andrey V Savkin, and Sanjay Jha. Robust extended kalman filter based technique for location management in pcs networks. *Computer Communications*, 27(5) :502–512, 2004. (Cité en page 88.)
- [225] Zainab R Zaidi and Brian L Mark. Real-time mobility tracking algorithms for cellular networks based on kalman filtering. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4(2) :195–208, 2005. (Cité en page 88.)
- [226] Zawar Shah and Robert A Malaney. Particle filters and position tracking in wi-fi networks. In *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*, volume 2, pages 613–617. IEEE, 2006. (Cité en page 88.)
- [227] Fredrik Gustafsson, Fredrik Gunnarsson, Niclas Bergman, Urban Forssell, Jonas Jansson, Rickard Karlsson, and P-J Nordlund. Particle filters for positioning, navigation, and tracking. *IEEE Transactions on signal processing*, 50(2) :425–437, 2002. (Cité en page 88.)
- [228] Lyudmila Mihaylova, David Bull, Donka Angelova, and Nishan Canagarajah. Mobility tracking in cellular networks with sequential monte carlo filters. In *Information Fusion, 2005 8th International Conference on*, volume 1, pages 8–pp. IEEE, 2005. (Cité en page 88.)
- [229] Theus Hossmann. Mobility prediction in manets. *Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland*, 2006. (Cité en page 88.)
- [230] Tianli Hu, Minghui Liwang, Lianfen Huang, and Yuliang Tang. An enhanced gprs routing protocol based on the buffer length of nodes for the congestion

- problem in vanets. In *Computer Science & Education (ICCSE), 2015 10th International Conference on*, pages 416–419. IEEE, 2015. (Cité en page 89.)
- [231] Si-Ho Cha and Keun-Wang Lee. Location prediction for grid-based geographical routing in vehicular ad-hoc networks. *Grid and Distributed Computing*, pages 35–41, 2011. (Cité en page 89.)
- [232] Marc Heissenbuttel, Torsten Braun, Markus Walchli, and Thomas Bernoulli. Evaluating the limitations of and alternatives in beaconing. *Ad Hoc Networks*, 5(5) :558–578, 2007. (Cité en pages 89 et 106.)
- [233] Raed Alsaqour, Maha Abdelhaq, Rashid Saeed, Mueen Uddin, Ola Alsukour, Mohammed Al-Hubaishi, and Tariq Alahdal. Dynamic packet beaconing for gprs mobile ad hoc position-based routing protocol using fuzzy logic. *Journal of Network and Computer Applications*, 47 :32–46, 2015. (Cité en page 89.)
- [234] Azzedine Boukerche, Cristiano Rezende, and Richard W Pazzi. Improving neighbor localization in vehicular ad hoc networks to avoid overhead from periodic messages. In *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2009. (Cité en pages 89, 91 et 106.)
- [235] Daniel Jiang, Qi Chen, and Luca Delgrossi. Optimal data rate selection for vehicle safety communications. In *Proceedings of the fifth ACM international workshop on VehiculAr Inter-NETworking*, pages 30–38. ACM, 2008. (Cité en page 96.)
- [236] Jérôme Härri, Christian Bonnet, and Fethi Filali. Challenges of predicting mobility. Technical report, Technical Report 06-171, Institut Eurécom, 2006. (Cité en page 106.)
- [237] Arpita Bhargava, Shekhar Verma, and Brijesh Kumar Chaurasia. Kalman filter for trust estimation in vanets. In *Electrical Computer and Electronics (UPCON), 2015 IEEE UP Section Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015. (Cité en page 106.)
- [238] Zhaomin Mo, Hao Zho, Kia Makki, and Niki Pissinou. Mobility-assisted location management for vehicular ad hoc networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, pages 2224–2228. IEEE, 2008. (Cité en page 106.)
- [239] S. Shelly and A. V. Babu. Prediction of link residual lifetime using kalman filter in vehicular ad hoc networks. In *2015 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, pages 268–273, Dec 2015. (Cité en page 107.)
- [240] Mohammadreza Armaghan, Mahmood Fathy, and Saleh Yousefi. Improving the performance of beacon safety message dissemination in vehicular networks using kalman filter estimation. *Communication and Networking*, pages 74–82, 2009. (Cité en page 107.)
- [241] Huma Ghafoor and Insoo Koo. Spectrum-aware geographic routing in cognitive vehicular ad hoc network using a kalman filter. *Journal of Sensors*, 2016, 2016. (Cité en page 107.)

- [242] Ebtisam Amar and Selma Boumerdassi. A scalable mobility-adaptive location service with kalman-based prediction. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2011 IEEE*, pages 593–598. IEEE, 2011. (Cité en page 107.)
- [243] ZHAO Zeng-hua WANG Guang-yu, LIU Chun-feng and SHU Yan-tai. Hybrid routing algorithm in vehicular ad hoc network based on kalman prediction. *Computer Engineering*, 40(8) :91–95, 2014. (Cité en page 107.)
- [244] Peter S. Maybeck. *Stochastic models, estimation, and control . Vol. 2*, volume 3. Academic press, New York, N.Y., London, Paris, 1982. (Cité en page 108.)
- [245] Greg Welch and Gary Bishop. An introduction to the kalman filter. 1995. (Cité en page 108.)
- [246] Welch Greg and Gary Bishop. An introduction to the kalman filter. updated : 5.4.2004. *Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC*, 2004. (Cité en page 108.)
- [247] Jaegeol Yim, Jaehun Joo, and Chansik Park. A kalman filter updating method for the indoor moving object database. *Expert Systems with Applications*, 38(12) :15075–15083, 2011. (Cité en page 111.)
- [248] Raymee Chau. *MANET routing with prediction*. PhD thesis, 2013. (Cité en page 111.)
- [249] Saima Zafar, Hina Tariq, and Kanza Manzoor. Throughput and delay analysis of aodv, dsdv and dsr routing protocols in mobile ad hoc networks. *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 3(2) :1–7, 2016. (Cité en page 127.)
- [250] Quanjun Chen, Salil S Kanhere, and Mahbub Hassan. Adaptive position update for geographic routing in mobile ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(3) :489–501, 2013. (Cité en page 130.)

---

**Résumé :** Un réseau véhiculaire ad-hoc (VANET) est un réseau distribué et auto-configurable considéré comme une sous-classe des réseaux mobiles Ad-hoc (MANET) où les nœuds mobiles sont des véhicules. VANET est un domaine de recherche très actif et puissant étant donné qu'il affronte de nombreux défis. En effet, compte tenu des contraintes et caractéristiques uniques de ce type d'environnement, le routage avec une très bonne qualité de service (QoS) constitue un défi majeur. Le protocole de routage géographique "Greedy Perimeter Stateless Routing" (GPSR) est l'un des mécanismes les plus prometteurs élus pour relever ce challenge. Cependant, son efficacité dépend entièrement des informations sur les positions géographiques des nœuds et de leurs précisions. Le suivi et la gestion des informations de la mobilité des véhicules sont en conséquence des paramètres très importants qu'il faut impérativement prendre en considération.

Dans cette thèse, nous proposons deux solutions pour gérer le problème de la mobilité et améliorer l'efficacité du routage du GPSR. Nous optons pour l'exploitation des informations GPS (Système de positionnement mondial) du véhicule pour prédire son emplacement. La première solution pour atteindre cet objectif est l'utilisation de deux approches de prédiction déterministe différentes qui permettent au protocole GPSR de prendre des décisions de routage plus intelligentes tout en anticipant les situations critiques. Ensuite, pour obtenir de meilleurs résultats, tout en minimisant la surcharge du réseau et le coût du routage, nous avons proposé une deuxième contribution qui se base sur une approche de prédiction stochastique robuste utilisant le filtre de Kalman, permettant à chaque véhicule de suivre régulièrement et avec précision le mouvement de ses véhicules voisins.

De nombreuses simulations ont été réalisées pour valider et prouver l'efficacité des variantes proposées de GPSR. Les résultats de simulation attestent d'une amélioration remarquable des performances de nos propositions par rapport aux autres protocoles de routage de référence testés.

**Mots clés :** Réseaux véhiculaires ad-hoc, VANET, Protocole de routage géographique, GPSR, Prédiction déterministe, Prédiction stochastique, Filtre de Kalman, QoS.

---