

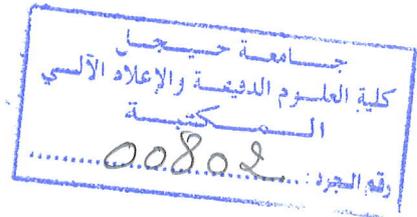
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA DE JIJEL

FACULTÉ DE SCIENCE EXACTE ET D'INFORMATIQUE

DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE

inf. RS. 14/19



MÈMOIRE DE FIN DE CYCLE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN INFORMATIQUE

OPTION : RÉSEAUX ET SÉCURITÉ

Routage et communication dans les réseaux VANET

Réalisé par :

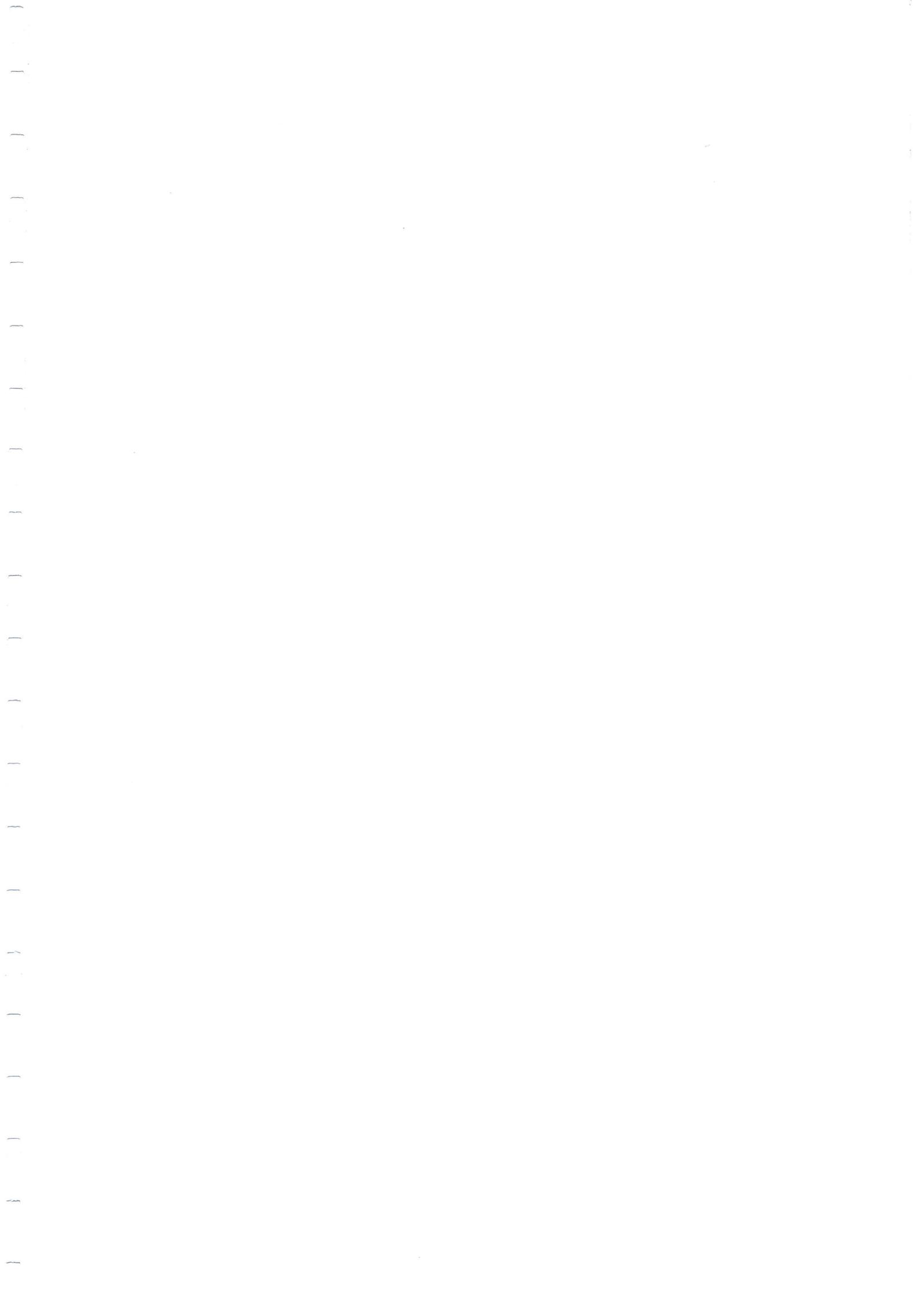
M^{elle} YOUNES SARAH

Encadré :

DR. KHELIFI MANEL

Année universitaire
2018-2019





Remerciements

JE TIENS TOUT D'ABORD À REMERCIER **Allah** LE TOUT PUISSANT ET MISÉRICORDIEUX, QUI M'A DONNÉ LA FORCE ET LA PATIENCE D'ACCOMPLIR CE TRAVAIL.

JE TIENS À REMERCIE MON ENCADREUR *M^{me}KHELIFI Manel* QUE J'APPRÉCIE FORTEMENT POUR SON SOUTIEN, SON AIDE PRÉCIEUSE ET SA CONFIANCE EN MOI SANS LESQUELS CE TRAVAIL N'AURAIT PAS ÉTÉ CE QU'IL EST. SA GÉNÉROSITÉ, SA DISPONIBILITÉ, SA RIGUEUR, SES QUALITÉS PÉDAGOGIQUES ET SCIENTIFIQUES, MAIS SURTOUT SON SOUTIEN CONSTANT M'ONT PERMIS DE MENER À BIEN CE TRAVAIL.

JE REMERCIE AUSSI LES MEMBRES DE JURY D'AVOIR ACCEPTÉ DE EXAMINER NOTRE TRAVAIL ET DE NOUS FAIRE PART DE LEURS REMARQUES PERTINENTES.

UN GRAND MERCI À MON ENSEIGNANT MR *ROUIBEH Said*, POUR SA PATIENCE ET SON AIDE.

J'ADRESSE DE SINCÈRES REMERCIEMENTS ÉGALEMENT À MR *KECIS Ilyas*, POUR SA PATIENCE, CES CONSEILS ET SON AIDE.

J'AIMERAIS ADRESSER UN REMERCIEMENT PARTICULIER À MES COLLÈGUES ET AMIES *BOUREBIA Nor Elhouda* POUR SON SOUTIEN , *BOUREBIA Soumia* POUR CES CONSEILS ET AIDE ET *MERICHE Madina et BOUSNINDJA Hasna* POUR LEURS PATIENCE.

Dédicase

À ma mère et mon père

Je vous suis très reconnaissante pour votre amour, soutien, compréhension et présence.

À mes sœurs Chaima et Amira

Je vous suis particulièrement remerciant pour votre confiance et votre amour sincère. Merci d'avoir été à mes côtés dans les moments difficiles et d'avoir partagé avec moi les moments de bonheur.

En l'honneur de mes grands parents

Je vous dédie ce travail comme symbole d'amour inconditionnel.

À mes amis

Médina, Nejla, Mekah, Nor ElHouda, Hasna, Soumia, Roufida, Zahira, Nada et Racha.

Merci à tous :)

YOUNES Sarah

Résumé

Les réseaux VANET existent depuis les années 80, mais ils sont de plus en plus développés ces dernière années à travers le monde, en raison de la grande variété des services qu'ils fournissent. Ils enrichissent le réseau routier en y apportant des communications entre ses composants. Principalement entre les véhicules, ainsi qu'avec les infrastructures qui sont directement en relation avec le réseau routier. L'objectif principal de ce type de réseaux est d'améliorer la sécurité et la circulation routière, ainsi que de fournir aux conducteurs et aux passagers des applications publicitaires et de divertissement. Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel d'assurer un bon routage d'informations dans ces réseaux.

Dans ce mémoire, nous proposons EKF-GPSR ; une solution pour améliorer le processus de routage dans le protocole GPSR. Nous choisissons d'utiliser les informations de positionnements du véhicule qui ne sont jamais utilisés par GPSR pour prédire sa position dans le future proche. La solution proposée repose sur une approche de prévision stochastique robuste utilisant le filtre de Kalman étendu. Grâce à cette solution, chaque véhicule peut actualiser régulièrement la position des véhicules dans son voisinage et suivre ainsi leur déplacements.

Plusieurs simulations ont été réalisées pour valider et prouver l'efficacité du protocole proposé EKF-GPSR. Les résultats de simulations ont montré une amélioration dans les performance de notre protocole de routage en termes de coût de routage, de taux de livraison des paquets et du débit par rapport au protocole GPSR.

Abstract

VANETs have existed since the 1980, but they have been increasingly developed in recent years around the world, due to the wide variety of services they can provide. In fact, they improve the road network by providing communications between its components. Mainly between vehicles, as well as with infrastructures that are directly related to the road network. The main objective of such networks is to improve safety and road traffic, as well as to provide the drivers and passengers advertising and entertainment applications. To achieve these objectives, it is important to ensure proper information routing in these networks.

In this thesis, we propose EKF-GPSR; a solution that improves the routing process in the GPSR protocol. We choose to use the position information of vehicles that is never used by GPRS to predict their position in the near future. The proposed solution is based on a robust stochastic forecasting approach using the Kalman filter. Thanks to this solution, each vehicle can regularly update the position of the vehicles in its neighboring and track their movements.

Several simulations were carried out to validate and prove the effectiveness of the proposed EKF-GPSR protocol. The simulation results showed an improvement in the performance of our routing protocol in terms of routing cost, packet delivery ratio and throughput, compared to GPSR protocol.

Table des matières

1	Généralités sur les VANET	3
1.1	Introduction	3
1.2	Réseaux sans fil	4
1.2.1	Selon la portée	5
1.2.2	Selon l'utilisation de l'infrastructure	6
1.2.2.1	Réseau avec infrastructure	6
1.2.2.2	Réseau sans infrastructure	7
1.3	Les réseaux véhiculaires VANET	9
1.3.1	Les entités communicantes	11
1.3.1.1	Les unités embarquées	11
1.3.1.2	Les infrastructures fixes RSUs (Road Side Unit)	12
1.3.1.3	Équipements personnels	12
1.3.1.4	La CA (Central Authority)	13
1.3.2	Architectures de communications dans les réseaux VANET	13
1.3.2.1	Mode de communication de véhicule à véhicule (V2V)	14

1.3.2.2	Mode de communication de véhicule à infrastructures (V2I)	14
1.3.2.3	Mode de communication hybride (V2R, V2D)	15
1.3.3	Les technologies de transmission et de diffusion	15
1.3.4	Les caractéristiques des VANET	18
1.3.4.1	La forte mobilité et changement fréquent de topologie	18
1.3.4.2	Faible connectivité	18
1.3.4.3	Pas de contrainte énergétique	18
1.3.4.4	L'environnement de déplacement et modèle de mobilité	19
1.3.5	Les applications des réseaux VANET	19
1.3.5.1	Application de sécurité et prévention routière	19
1.3.5.2	Applications commerciales	21
1.3.5.3	Applications de confort	21
1.3.5.4	Applications productives	22
1.3.6	Challenges et défis des réseaux VANET	23
1.4	Conclusion	24
2	Le routage dans les réseaux VANET	25
2.1	Introduction	25
2.2	Métriques de conception d'un protocole de routage pour les VANET	26
2.2.1	La forte mobilité et la topologie très dynamique	26
2.2.2	La connectivité du réseau	26
2.2.3	Les interférences	27
2.2.4	Les exigences de QoS et les métriques de performance	27

2.2.4.1	Les métriques de performance	27
2.2.5	Les modèle de mobilité et de propagation	28
2.3	Classification des protocoles de routage dans les VANET	29
2.3.1	Protocoles basés sur la topologie du réseau	30
2.3.2	Protocoles basés sur la stratégie de routage	32
2.3.3	Protocoles basés sur la structure du réseau	36
2.4	Comparaison entre les différents protocoles étudiés	39
2.5	Conclusion	40
3	Les protocoles de routage basés sur la positions	41
3.1	Introduction	41
3.2	État de l'art	42
3.2.1	Classification des approches de routage	42
3.2.1.1	La tolérance aux délais	43
3.2.1.2	Les méthodes d'acheminements	43
3.2.1.3	L'utilisation des informations de positions	45
3.2.2	Exemples de protocoles de routage basés sur la position	45
3.2.2.1	GPSR	45
3.2.2.2	GPCR	49
3.2.2.3	GSR	52
3.2.2.4	CAR	53
3.2.2.5	DIR	54
3.2.2.6	GyTAR	55
3.2.2.7	DGR	56
3.2.2.8	PDVR	57

3.2.2.9	Infrastructure-assisted geo-routing	59
3.2.2.10	SADV	59
3.2.2.11	VADD	61
3.3	Comparaison des protocoles de routage basés sur la position étudiés	62
3.4	Conclusion	64
4	EKF-GPSR : Un protocole de routage basé sur la position pour les VANET	66
4.1	Introduction	66
4.2	EKF-GPSR : un nouveau protocole de routage basé sur la position pour les VANET	67
4.2.1	Outils de modélisation	67
4.2.1.1	Les filtres de Kalman (KF)	68
4.2.1.2	Les filtres de Kalman étendus (EKF)	68
4.2.2	Fonctionnement du protocole proposé EKF-GPSR	72
4.2.2.1	La phase de prédiction	72
4.2.2.2	La phase de routage des données	74
4.3	Évaluation des performances par simulation	76
4.3.1	Environnements de simulation	76
4.4	Métriques d'évaluation d'un protocole de routage	78
4.4.1	Les métriques d'environnement	78
4.4.2	Les métriques de performance	79
4.5	Paramètres de simulation	80
4.6	Les résultats de simulation	80
4.6.1	Scénario 1 : Évaluation de la Densité	81
4.6.2	Scénario 2 : Évaluation de la Vitesse des véhicules	83

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	11
4.6.3 Scénario 3 : Le nombre de connexion	84
4.6.4 Scénario 4 : Environnement réel (Veins)	86
4.7 Conclusion	89
Conclusion	90

Table des figures

1.1	classification des réseaux sans fil	4
1.2	Technologies des réseaux sans fil	6
1.3	Réseaux sans fil avec infrastructure	7
1.4	Réseau sans fil sans infrastructure	7
1.5	Topologie dynamique des réseaux ad hoc.	8
1.6	Type de communications dans les VANET	10
1.7	Les entités communicantes dans les VANET	11
1.8	Véhicule intelligent	12
1.9	Communication véhicule à véhicule V2V	14
1.10	Communication véhicule à infrastructure	15
1.11	Communication hybride	15
1.12	Communication véhicule à dispositif.	16
1.13	Bandes allouées pour les VANET aux États-Unis	17
1.14	Bandes allouées pour les VANET en Europe	17
1.15	Notification de situation d'urgence	20
1.16	Collection de péage électronique en Inde dans VANET	22

2.1	Modèle de propagation Two-ray ground	29
2.2	Routage unicast.	33
2.3	Routage geocast.	34
2.4	Routage broadcast.	34
2.5	Routage basé sur le clustering	37
3.1	Classification des protocoles de routages basé position.	42
3.2	Routage Greedy.	44
3.3	Greedy Routing	47
3.4	Échec du relais greedy, x est le plus proche de D	47
3.5	Application de Face routing	48
3.6	Graphe RNG	48
3.7	Routage greedy vs. Routage glacé restreint dans la zone de jonction	50
3.8	Montre que les nœuds coordinateurs sont préférés aux nœuds nœudn coordinateur	50
3.9	Application de la regle de la main droite dans le protocole GPCR .	51
3.10	La séquence de jonction choisit par GSR	53
3.11	Les jonction sélectionnés par GyTAR	56
3.12	Sélection de saut prochain par PDVR.	58
3.13	(a). Chemin suivi par GSR, (b)représentation de graphe de GSR, (c)représentation de graphe d'infrastructure-assisté géo-routage .	60
3.14	routage assisté par les nœuds statiques	61
3.15	Trouver un chemin vers le café en utilisant le protocole VADD. . .	62
3.16	Trouver un chemin vers le café en utilisant le protocole VADD. . .	63
4.1	PDR	81

4.2	Débit	82
4.3	Cout	83
4.4	PDR	84
4.5	Débit	85
4.6	PDR	85
4.7	Débit	86
4.8	Carte de la Wilaya de Jijel.	87
4.9	captures d'exécution.	88
4.10	PDR	88
4.11	Débit	89

Liste des tableaux

- 1.1 Comparaison entre MANETs et VANET 9
- 2.1 Comparaison entre les classes de protocoles étudié 39
- 3.1 Classification entre les protocoles basé sur la position étudiés . . . 65
- 4.1 Format de message Hello 73
- 4.2 Format de la liste des voisins du protocole EKF-GPSR 73

Liste des abréviations

- **A-STAR** Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing.
- **AODV** Ad-hoc On Demand Distance Vector routing protocol.
- **BSS** Basic Service Set.
- **CA** Central Authority.
- **CAR** Connectivity-Aware Routing.
- **CBDRP** Cluster-Based Directional Routing Protocol.
- **CBLR** Cluster Based Location Routing.
- **DGR** Directional greedy routing.
- **DIR** Diagonal-intersection based routing.
- **DSR** Dynamic Source Routing.
- **DSDV** Dynamic destination Sequenced Distance Vector.
- **EDGE** General Packet Radio Service.
- **EDR** Event Data Recorder.

- **EKF** Extended Kalman filtr.
- **EKF-GPSR** Extended Kalman filtr-Greedy Perimeter Stateless Routing.
- **EAEP** Edge-Aware Epidemic Protocol.
- **FSR** Fisheye State Routing.
- **GPCR** Greedy Perimeter Coordinator Routing.
- **GPRS** General Packet Radio Service.
- **GPSR** Greedy Perimeter Stateless Routing.
- **GSM** Global System for Mobile communication.
- **GSR** Geographic Source Routing.
- **GyTAR** Greedy traffic aware routing.
- **HCB** Hierarchical Cluster Based Routing.
- **I2V** Infrastructure to vehicule.
- **IBSS** Independent Basic Service Set.
- **IVG** Inter-Vehicular Geocast.
- **KF** Kalman filtr.
- **LTE** Long Term Evolution.
- **MANET** Mobile Ad Hoc Network.
- **MSS** Mobile Support Station.
- **NRO** Normalized Routing Overhead.

- **OBU** On Bord Unit.
- **OPNET** Optimized Network Engineering Tools.
- **PDVR** Position-based Directional Vehicular Routing.
- **PDR** Packet Delivery Ratio.
- **QoS** Quality of Service.
- **ROVER** Robust Vehicular Routing.
- **RSU** Road Side Unit.
- **SADV** Static-Node-Assisted Adaptive Data.
- **SB** Station de base.
- **SUMO** Simulation for Urban MObility.
- **TORA** Temporally Ordered Routing Protocol.
- **UMTS** Universal Mobile Telecommunication System.
- **UM** unités mobiles.
- **V2V** Vehicule to Vehicule.
- **V2I** Vehicule to Infrastructure.
- **VADD** Vehicle-Assisted Data Delivery.
- **VANET** Vehicular Ad Hoc Network.
- **WPAN** Wireless Personal Area Network.
- **WLAN** Wireless Local Area Network.

- **WMAN** Wireless Metropolitan Area Network.
- **WWAN** Wireless Wide Area Network.
- **Wi-Fi** wireless fidelity.
- **WiMax** Worldwide Interoperability for Microwave Access.

Introduction générale

Les réseaux véhiculaires (VANET) sont des réseaux ad hoc mobiles qui sont utilisées pour assurer les communications entre les véhicules. Au fait, ces réseaux VANET sont des réseaux auto-organisées dans lesquels les véhicules communiquent entre eux sans ou avec la présence d'une infrastructure préalable, ce qui réduit les coûts de déploiement. Cependant, les VANET ont connu un développement accéléré ces derniers années et ont attiré l'attention des milieux académiques, industriels et de recherche, car ils facilitent le quotidien des utilisateurs. En effet, ces réseaux ont une très large palette d'applications, telle que la sécurité automobile et routière, le paiement automatique des droits, la gestion du trafic routier, la localisation des stations de service, etc.

De plus, les VANET sont caractérisés par la forte mobilité d'où le changement rapide de topologies, qui affecte le processus de routage. Par conséquent, les protocoles de routage MANET conventionnels sont inadéquats pour traiter efficacement cet environnement véhiculaire unique.

Diverses classes de protocoles de routage ont été proposées dans la littérature. On cite par exemple, les protocoles de routage basés sur la topologie, ceux selon le type de routage, ainsi que les protocoles basés sur la position, et bien d'autres. Cependant, les protocoles de routages basés sur la position se caractérisent par la capacité de minimiser la charge du réseau, et particulièrement leur capacité de s'adapter à des modèles a grandes mobilité. Ils se basent sur les informations géographiques partagées entre les nœuds afin d'acheminer les paquets de données vers la destination.

L'objectif principale de ce mémoire dans un premier lieu est d'étudier les protocoles de routage géographiques en mettant l'accent sur les protocole de routage basés sur la position dans les réseaux VANET. Afin de pouvoir,

dans un second lieu, concevoir un nouveau protocole de routage géographique tout en améliorant le protocole de routage GPRS (Greedy Perimeter Stateless Routing)[30]. Ce mémoire est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre sera consacré pour décrire des généralités du domaine sans fil et des réseaux VANET particulièrement. Entre autres, des détails sur les caractéristiques des VANET, leur architecture de communication, leurs technologies de transmission et de diffusion ainsi que leurs domaines d'application sont aussi présentés. Ce chapitre se termine par l'exposition de certains challenges et défis de ces réseaux.

Le deuxième chapitre sera axé sur le processus de routage. Une classification et une étude de quelques protocoles et approches de routage seront présentées. Par ailleurs, une comparaison entre les différentes classes étudiées sera introduite.

Le troisième chapitre, traite le routage basé sur la position dans les VANET. Quelques approches et protocoles de routage géographiques seront étudiés, et ce tout en leur proposant une nouvelle classification. Ce chapitre s'achève par une étude critique des protocoles de routage analysés.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présenterons notre protocole de routage géographique proposé EKF-GPSR (Extended Kalman Filter Greedy Perimeter Stateless Routing); qui est une modification du protocole GPRS. Le fonctionnement, les caractéristiques et les avantages de notre protocole seront discutés. Le reste du chapitre sera consacré à la présentation des résultats de simulations comparant notre protocole avec le protocole GPRS selon certain nombre de critères que nous avons jugé importants.

A la fin de ce mémoire, une conclusion est donnée pour récapituler les apports essentiels de notre travail.

Généralités sur les VANET

1.1 Introduction

Les réseaux véhiculaires (VANET) représentent une classe émergente des réseaux mobiles ad hoc (MANET). Au fait, les réseaux Ad-hoc désignent une classe des réseaux sans fil où, chaque entité joue le rôle d'un client et d'un serveur au même temps. Ce qui donne un aspect décentralisé à ces réseaux.

Cependant, les réseaux VANET se développent très rapidement ces dernières années et connaissant un intérêt croissant. Ils sont utilisés dans plusieurs applications. Par exemple, dans la sécurité automobile et routière, le paiement automatique des droits, la gestion du trafic routier, la localisation de la plus proche station de service à savoir, celle du carburant, ou restaurants, etc.

Par conséquent, ces réseaux VANET visent à faciliter le quotidien des utilisateurs et améliorer la sécurité routière. Pour ce faire, des messages entre les véhicules et/ou avec des infrastructures sont utilisés. Or de nombreux défis liés aux réseaux VANET sont à relever particulièrement dans certains domaines comme : le routage des données, le problème de collision et de localisation, la diffusion, l'amélioration de la qualité de service (QoS), et la sécurité.

Dans ce chapitre, on introduit les réseaux sans fil et leur descendants qui sont les réseaux MANET et VANET, et ce tout en se focalisant sur les réseaux VANET. Pour cela, on présentera un état d'art sur les réseaux VANET en décrivant les entités communicantes utilisées, leur architecture de communication, leur

technologies de transmission et de diffusion, leurs caractéristiques ainsi que leurs domaines d'application. On exposera aussi les challenges et défis des réseaux VANET dans ce chapitre.

1.2 Réseaux sans fil

Un réseau sans fil [24](Wireless network), comme son nom l'indique, est un réseau informatique qui permet de connecter des équipements en utilisant des ondes électromagnétiques sans l'utilisation des liaisons filaires. Ce réseau de communication a un périmètre de couverture géographique limité. Tout les systèmes de transmission de données on un support de transmission entre l'expéditeur et le récepteur. Ce support est le chemin physique entre ces derniers, et s'appelle aussi le média ou le médium de communication. Il peut être guidé ou non guidé.

Les supports guidés sont utilisés dans les réseaux classiques ou filaires tel que le fil de cuivre, la fibre optique, ect. Alors que les supports non-guidés sont utilisés dans les réseaux sans fils tel que les ondes infrarouges, les ondes lumineuses, etc. Les réseaux sans fils peuvent être classés selon deux critères. Ces critères sont la porté du réseau et l'existence ou l'absence de l'infrastructure (voir la figure 1.1).

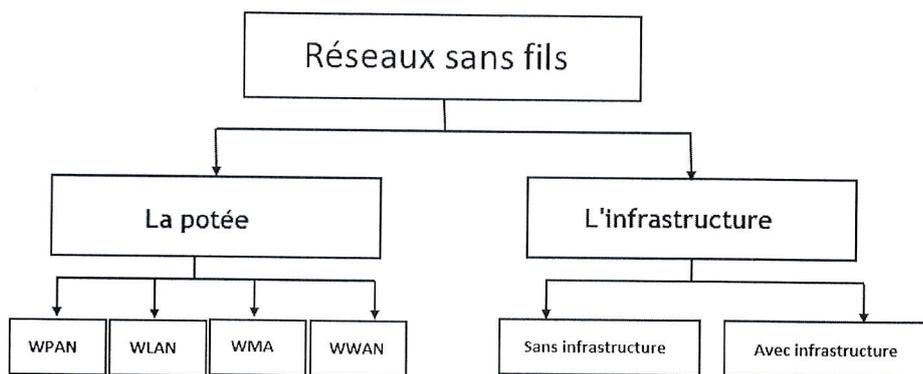


FIGURE 1.1: classification des réseaux sans fil

1.2.1 Selon la portée

Les réseaux sans fil sont classés selon leur portée de communication voir figure 1.1 en : réseaux WPAN, WLAN, WMAN et WWAN.

- WPAN

Les réseaux personnels sans fil ou Wireless Personal Area Network (WPAN) sont des réseaux à des portées très petites. Ce type de réseaux est utilisé pour interconnecter des équipements personnels. Il existe plusieurs technologies permettant la mise en oeuvre de tels réseaux comme le Bluetooth, ZigBee, ect.

- WLAN

Les réseaux locaux sans fil ou Wireless Local Area Network (WLAN), sont utilisés généralement à l'intérieur d'une entreprise ou une université, et ce afin de relier leurs différents équipements ; ordinateur, imprimantes, ect.

- WMAN

Les réseaux métropolitains sans fil ou Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) sont appelés aussi boucle locale radio (BLR). Ils utilisent la norme IEEE 802.16. Cette dernière a une portée de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres (50km de portée théorique annoncée) et un taux de transmission radio théorique pouvant atteindre 74 Mbit/s ; plus connu sous le nom commercial de WIMAX.

- WWAN

Les réseaux sans fil (WWAN pour Wireless Wide Area Network) sont également connus sous le nom de réseaux cellulaires mobile. Il s'agit des réseaux sans fil les plus répandus puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Leurs principales technologies :

- * GSM (Global System for Mobile communication),
- * GPRS et EDGE (General Packet Radio Service),
- * UMTS (Universal Mobile Telecommunication System),
- * LTE (Long Term Evolution).

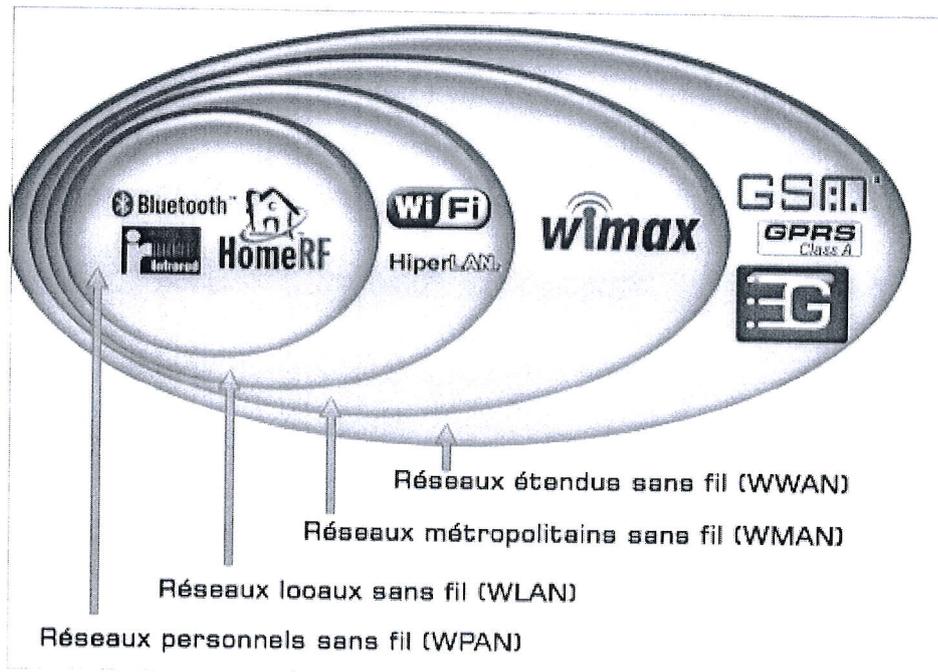


FIGURE 1.2: Technologies des réseaux sans fil

1.2.2 Selon l'utilisation de l'infrastructure

Ces réseaux informatiques peuvent être classés en deux principales catégories : réseaux sans fil avec infrastructure et les réseaux sans fil sans infrastructure.

1.2.2.1 Réseau avec infrastructure

Dans cette architecture de ce type, le réseau est obligatoirement composé par au moins un point d'accès appelé aussi station de base, muni d'une interface

de communication sans fil pour permettre une communication directe avec les nœuds mobiles se trouvant dans sa proximité. Un point d'accès couvre une zone géographique limitée. Un nœud mobile rattachée à un moment donné qu'à un point d'accès lui offrant tous les services tant que le nœud mobile est à l'intérieure de la zone de couverture du point d'accès [58], ceci est illustré par la figure 1.3.

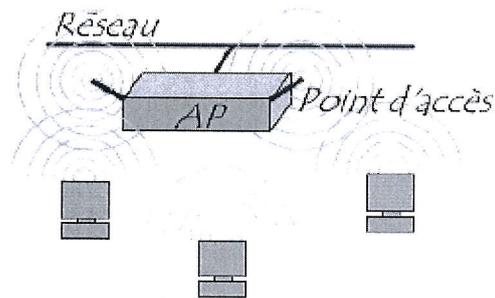


FIGURE 1.3: Réseaux sans fil avec infrastructure

1.2.2.2 Réseau sans infrastructure

Il s'agit d'un mode point à point, nécessitant pas de points d'accès. Il permet de connecter les stations quand aucun point d'accès n'est disponible. L'absence d'infrastructure oblige les stations mobiles à jouer le rôle à la fois station et routeur [58], (voir la figure 1.4).

Les MANET [42] s'agit d'un réseau sans infrastructure, se composent de nœuds

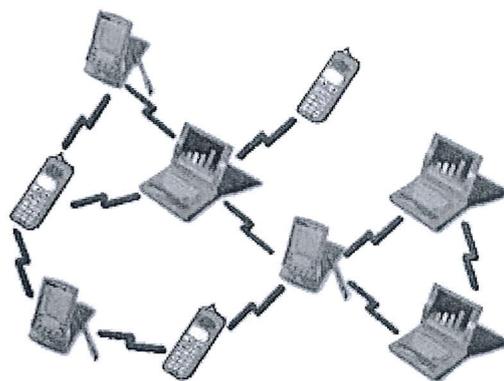


FIGURE 1.4: Réseau sans fil sans infrastructure

mobiles dynamiques avec une grande densité. L'échange de données entre les

participants se fait par le médium radio et sans aucune administration centralisée ou infrastructure fixe. Il est impossible de prévenir la topologie du réseau car les nœuds se déplacent de manière aléatoire.

• Les caractéristiques de MANET

✓ **Absence d'infrastructure** : les nœuds d'un réseau MANET agissent dans un milieu totalement distribué (c'est à dire pair à pair). Cela leur permet de se déplacer librement tout en assurant le routage des données.

✓ **Topologie dynamique** : la mobilité est la caractéristique principale d'un nœuds dans un réseau MANET. Grâce a cette mobilité les nœuds sont autonomes et se déplacent aléatoirement. Par conséquent, de nouvelle routes peuvent apparaitre alors que d'autres disparaissent. Ainsi, les protocoles de routages dédiés a ces réseaux doivent prendre en considération ces modifications et cette dynamité(voir figure 1.5).

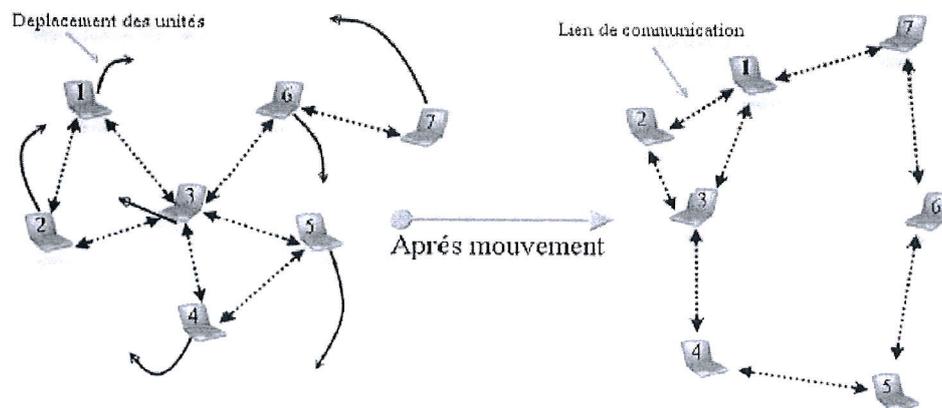


FIGURE 1.5: Topologie dynamique des réseaux ad hoc.

✓ **Hétérogénéité des nœuds** : les nœuds mobiles sont dotés d'une ou plusieurs interfaces radio. Ces derniers ont des capacités de transmission variables. Cependant, ils travaillent dans des plages de fréquences différentes. Ainsi, l'hétérogénéité de capacité peut engendrer des liaisons asymétriques. Par conséquent, les nœuds du réseau peuvent être équipés de ressources de différentes caractéristiques (CPU,MC) en termes de taille, logiciel et mobilité. Pour cela, une adaptation dynamique des protocoles s'avère nécessaire pour supporter de telles

Critère \ Type de réseau	VANET	MANET
Mobilité	Forte	Moyenne
Connectivité	Faible	Moyenne
Changement de topologie	Fréquent	Moyenne
Durée de vie	n y a pas de contrainte	dépend de batterie de nœud
Mode de communication utilisé	Centralise et décentralise	Décentralise

TABLE 1.1: Comparaison entre MANETs et VANET

situations.

✓ **La taille du réseau** : généralement les réseaux MANET sont des réseaux de petite ou moyenne taille. Ce genre de réseau est utilisé pour élargir temporairement un réseau classique. Parfois certaines applications de réseau MANET nécessitent des dizaines de milliers de nœuds.

✓ **Routage Multi-sauts** : ce type de réseau utilise plusieurs sauts afin d'éviter des obstacles, réduire la consommation énergétique ou pour communiquer avec un autre nœud qui se trouve en dehors de la portée du nœud source. Pour ce faire, les nœuds actifs du réseau jouent le rôle de routeurs. Ainsi, un nœud source peut communiquer avec un nœud de destination très éloigné malgré que ce dernier se trouve en dehors de sa portée.

1.3 Les réseaux véhiculaires VANET

Les réseaux véhiculaires [24, 73] est une classe particulière des réseaux sans fil. Ces réseaux sont composés d'un ensemble de véhicules (OBU) équipés d'une interface de communication sans fil, et d'unités au bord des routes (RSU). Ils partagent des données sur l'état du trafic des routes, et des divertissements. Ils sont connus aussi par l'acronyme VANET pour Vehicule Ad hoc NETWORK. Les VANET sont menés sur les MANET. Au-delà des caractéristiques des MANET, les VANET possèdent quelques caractéristiques particulières. Le tableau 1.1 ci-dessous, cite quelques différences entre ces deux réseaux. Dans un réseau VANET, les véhicules peuvent établir trois types de communications [16, 12, 3]. Les communications entre les véhicules (vehicule to vehicule, V2V), et les

communication entre les véhicules et les RSUs (Vehicle to Infrastructure, V2I, voir Infrastructure to Vehicule, I2V). Cependant, les communications I2V et V2I permettent aux véhicules un accès à Internet ou à des bases de données locales. Ce type de communications est très utilisé, et ce afin de permettre aux véhicules d'accéder au réseau via ces RSUs. Néanmoins, dans certaines situations les véhicules utilisent des communications V2V, si les communications I2V et V2I sont trop gourmandes, trop chères, ou inadéquates.

Les composants d'un réseau VANET sont illustrés dans la Figure 1.6 où deux véhicules 1 et 2 s'échangent les données. Si les données échangées sont très volumineuses, dans ce cas, la connexion stable allant du véhicule 1 au RSU est utilisée, puis du RSU au véhicule 2, ou dans le sens inverse. Ces communication sont de type V2I et I2V. En outre, la connexion au RSU permet d'accéder à du contenu supplémentaire car elle est généralement reliée à Internet. Cependant, lors de la rencontre d'obstacles par le Véhicule 1, le message d'urgence sera transféré de façon ad-hoc directement du véhicule 1 au véhicule 2. Cela permettra un délai de transmission plus court que si le message été passé par la RSU. Dans ce cas, il s'agit d'une communication V2V. Cependant, plusieurs technologies

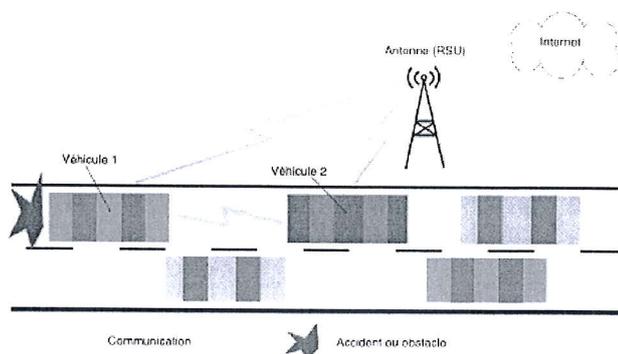


FIGURE 1.6: Type de communications dans les VANET [24].

peuvent être utilisées par les véhicules pour se communiquer. Par exemples, les communications issues de réseaux mobiles tels que 3G, 4G, ainsi que les technologies Wi-Fi, WiMax, ect. Néanmoins, la technologie Wi-Fi est la plus utilisée dans ce type de réseau. Plus exactement, la technologie DSRC ; Dedicated Short Range Communications [55]. Dans la suite de cette section, les entités communicantes utilisées, l'architecture de communication dans les VANET, leur technologies de transmission et de diffusion ainsi que leurs caractéristiques seront détaillés.

1.3.1 Les entités communicantes

Les unités communicantes [16, 56] composant un réseau VANET sont les véhicules et les infrastructures fixes appelées RSUs (road Side Unit) installées le long des routes, ainsi que les équipements personnels et les centraux d'unités. Ces derniers sont dotés d'interfaces leur permettant de communiquer via des technologies sans fil. Par ailleurs, les véhicules peuvent communiquer entre eux en mode ad hoc à l'aide de certains standards de communications GPRS (General Packet Radio Service). De nos jours, les équipements personnels sont intégrés dans les OBUs embarqués a bord des véhicules et qui sont proposés par plusieurs constructeurs automobiles. En outre, les véhicules communiquent avec les RSUs en mode cellulaire comme ils peuvent aussi communiquer en mode hybride; incluant les autres véhicules et les RSUs. Afin d'illustrer ces différents concepts, la Figure 1.7 nous montre les différentes entités communicantes ainsi que les différents types de communications qui seront présentées dans les sections suivantes.

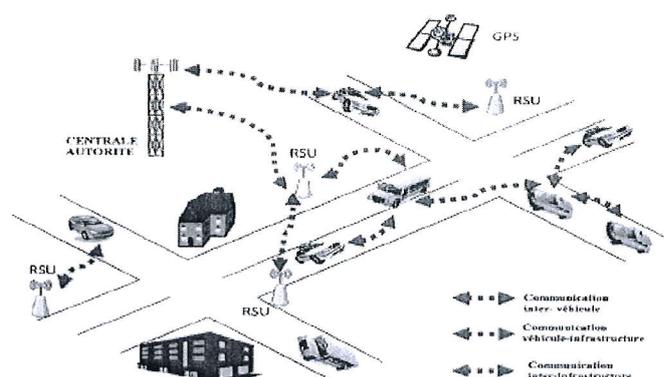


FIGURE 1.7: Les entités communicantes dans les VANET

1.3.1.1 Les unités embarquées

Un nœud dans un réseau VANET est représenté par un véhicule comme celle-ci illustré dans la figure 1.8. Ce véhicule dispose d'un processeur connecté a une plateforme, d'interfaces filaire et sans fil et d'autres terminaux. Ci-dessous on énumère quelques unités :

- Collecteur de données(EDR : Event Data Recorder) : utilisé afin d'enregistrer des paramètres importants tels que la vitesse, l'accélération

ou un événement important comme les accident. Les données collectées peuvent être utilisées pour la reconstruction des événements.

- Radar avant et arrière : permet la détection des obstacles.
- Systeme de localisation : afin de localiser et déterminer la position du véhicule.
- Plateforme de traitement pour traiter les données provenant des différents composantes utilisées.
- Une interface homme machine.

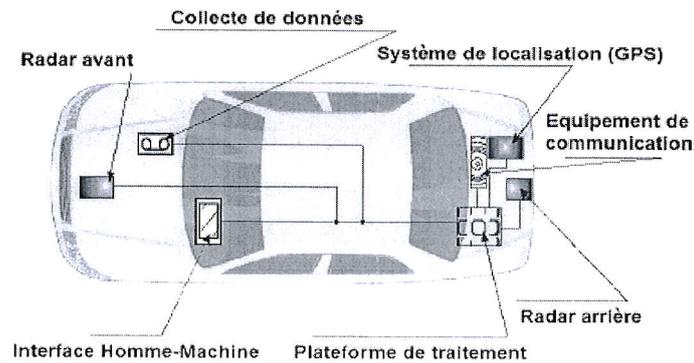


FIGURE 1.8: Véhicule intelligent
[5]

1.3.1.2 Les infrastructures fixes RSUs (Road Side Unit)

Les RSUs [16] se sont les infrastructures installées au long des routes. Leur but est d'informer les véhicules à proximité, et ce en diffusant les conditions du trafic, météorologiques ou spécifiques de la route (vitesse maximale, autorisation de dépassement, etc.). Ils peuvent aussi prendre le rôle d'une station de base afin de relayer les différentes informations envoyées par les véhicules.

1.3.1.3 Équipements personnels

Les équipements personnels [16] sont les équipements qui peuvent être apportés par les utilisateurs à l'intérieur de leurs véhicules. Cela peut être un téléphone portable, un ordinateur portable ou encore un GPS autonome. Ces équipements peuvent interagir avec le véhicule. De nos jours, en activant l'interface Bluetooth du téléphone portable, on peut utiliser le téléphone portable

par commande vocale (en utilisant les microphones intégrés au véhicule) ou par le biais de l'IHM (interface Homme-Machine) du véhicule.

1.3.1.4 La CA (Central Authority)

La CA est la Centrale d'autorité [64]. Elle gère le réseau et joue le rôle de serveur de stockage des données. La CA délivre également des certificats et des clés ou pseudonymes de communication aux véhicules.

1.3.2 Architectures de communications dans les réseaux VANET

Les réseaux VANET permettent une communication entre les véhicules voisins et entre les véhicules et les équipements routiers fixes, conduisant ainsi à plusieurs scénarios de communication qui seront détaillées par la suite. Avant de présenter ces différents scénarios et architectures de communication, nous exposerons ci-dessous les différents types de messages [54] qui peuvent être échangées dans un réseau VANET.

1. **Messages de contrôle** : Appelé aussi « Beacon ». Ils sont composés de la position, la vitesse, la direction et l'itinéraire du véhicule émetteur. Les véhicules produisent des messages de contrôle régulièrement chaque unité de temps (exemple : 100ms). Ces messages donnent une vision locale des véhicules voisins de chaque véhicule.
2. **Messages d'alerte** : Ils sont générés lors d'une détection d'un accident, d'un obstacle ou la réception d'un autre message d'alerte. En d'autres termes, ils sont créés lorsqu'un événement est détecté. Le message d'alerte doit être émis à intervalle régulier afin d'assurer la pérennité de l'alerte. Ainsi le ou les véhicules désignées pour la retransmission des messages émettront des alertes à des instants réguliers. Généralement, les messages d'alertes sont transmis rapidement car ils ont une taille réduite. Ce type de message doit contenir en particulier les coordonnées du lieu de l'accident et les paramètres de la zone de retransmission.
3. **Autres messages** : ça comprend tous les autres types de messages sauf les messages d'alertes et de contrôles. Ces messages ne sont pas générés à intervalle régulier. Ils peuvent être par exemple des messages de transaction financière ou l'envoi de courrier électronique.



1.3.2.1 Mode de communication de véhicule à véhicule (V2V)

Le mode V2V [16, 12, 3] est une communication purement ad hoc entre les véhicules à un saut ou à plusieurs sauts (voir figure 1.9). C'est un mode dans lequel aucune infrastructure n'est nécessaire sur les routes. Les véhicules communiquent entre eux n'importe où, que ce soit sur les autoroutes, des routes de montagnes ou des routes urbaines, grâce au OBU. Ce dispositif donne une communication moins coûteuse et plus flexible. Au fait, c'est l'architecture la plus utilisée en cas d'alertes (freinage d'urgence, collision, ralentissement, etc) ou pour la conduite collaborative.

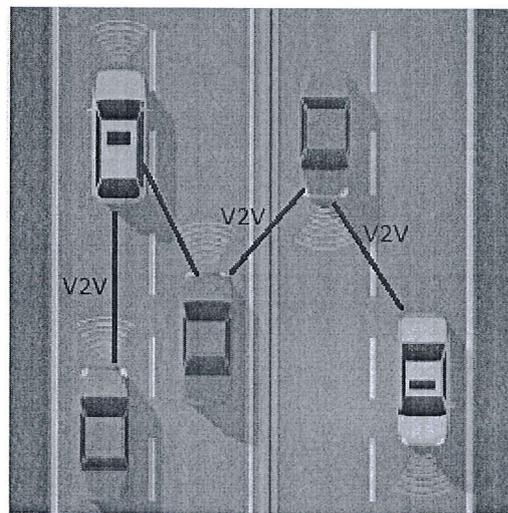


FIGURE 1.9: Communication véhicule à véhicule V2V

1.3.2.2 Mode de communication de véhicule à infrastructures (V2I)

Le mode V2I [12] [3] est une communication purement centralisée utilisée pour des communications de véhicule-à-infrastructure uniquement à un saut. Cette approche repose sur le modèle client/serveur dont les véhicules sont les clients et les RSUs installées le long de la route sont les serveurs. Ces derniers sont reliés entre eux à travers une interface filaire ou sans fil. Une meilleure utilisation des ressources partagées et des services est fournie par ce mode de communication. De plus, les points d'accès sont situés dans certaines sections critiques de la route, telles que les feux de circulation, les intersections, ou les stop. Cela est afin d'améliorer l'expérience de la conduite et la rendre plus sûre. L'inconvénient

majeur de cette approche réside dans l'installation des stations le long des routes, qui est une tâche coûteuse et prend beaucoup de temps. Sans oublier les coûts relatifs à la maintenance de ces stations.

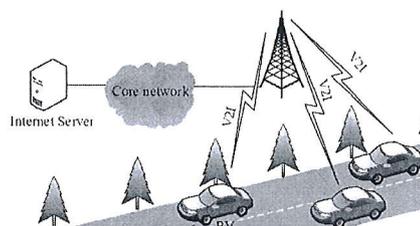


FIGURE 1.10: Communication véhicule à infrastructure

1.3.2.3 Mode de communication hybride (V2R, V2D)

Le mode V2R (Vehicle-to-Road) [3] est une approche hybride permettant à un véhicule de communiquer avec un autre véhicule et/ou avec une infrastructure à un-saut ou à multi-sauts, incluant ainsi les V2V et V2I voir figure 1.11. En

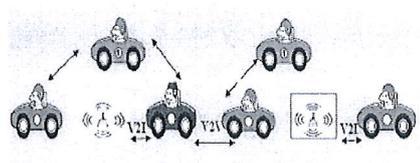


FIGURE 1.11: Communication hybride

outre, il existe une nouvelle approche permettant d'accéder depuis un équipement personnel (smartphone, tablette, ordinateur personnel, etc) au contenu de la voiture à distance ou à un-saut et vice versa. Cette nouvelle approche est appelé : mode V2D (Vehicle-to-device) [3]. La figure 1.12 illustre ce mode de communication.

1.3.3 Les technologies de transmission et de diffusion

Théoriquement de nombreuses technologies de transmission peuvent être utilisées par les réseaux véhiculaires mobiles. Par exemple, celles de la 3e génération (3G) et 4e génération (4G, Long Term Evolution (LTE)) de la

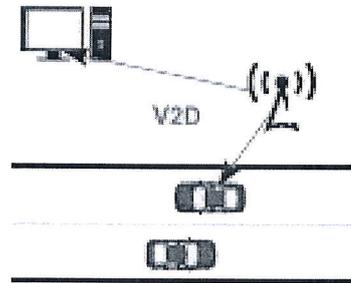


FIGURE 1.12: Communication véhicule à dispositif.

[3]

téléphonie mobile, le Wi-Fi, le WiMax, et le DSRC/WAVE [55]. De ce fait, les réseaux VANET peuvent utiliser une ou plusieurs de ces technologies que nous allons les présenter ci-dessous [56].

- ✓ **3G et 4G LTE :** Les véhicules dans un réseau VANET communiquent entre eux en utilisant des communication ad-hoc. Cependant, pour que ces derniers peuvent se connecter au réseau global, et donc à Internet, le réseau cellulaire mobile peut être utilisé. Ce dernier est plus ou moins performant, et leur débit théorique dépend fortement de la mobilité des utilisateurs. Cependant, comme les réseaux VANET sont extrêmement dynamiques, ces technologies sont peu adaptées. De même, le besoin de faire partie du réseau, via une carte SIM, et un forfait avec un opérateur, n'est pas intéressant.
- ✓ **Wi-Fi et WiMax :** Les technologies Wi-Fi et WiMax, connues par les standards 802.11 et 802.16, peuvent être utilisées dans les VANET. DSRC connus par la norme 802.11p est une norme Wi-Fi créé spécialement pour les VANET. Le WiMax, par contre, permet la transmission sur une large zone géographique. Il reste donc intéressant comme moyen de communication entre les véhicules et les infrastructures, car il autorise l'accès à Internet au réseau ad-hoc formé par les véhicules. Cependant WiMax, n'est pas non plus idéal dans les situations de très grande mobilité. C'est pourquoi, il est utilisé pour les infrastructures. Par contre, il est préférable d'utiliser DSRC/WAVE pour les véhicules. Cela peut poser

des problèmes de mise en place, les véhicules nécessitant un bloc de réception/transmission capable d'utiliser à la fois DSRC/WAVE et WiMax.

- ✓ **DSRC/WAVE** : La technologie DSRC/WAVE est déjà utilisée pour certaines applications liées à l'automobile, telles que le paiement électronique des péages sans s'arrêter. Au fait, les communications dédiées à courtes portées, DSRC, ont été créées spécialement pour les réseaux VANET. Elles regroupent les standards WAVE ainsi que la norme 802.11p, qui est la norme Wi-Fi pour les VANET. WAVE regroupe les standards IEEE 1609.x (1,2,3 et 4), qui sont les standards des couches 2, 3, 4 et 7 du modèle Open System Interconnection (OSI). De plus, IEEE 802.11p [14] gère la couche Physique (couche 1) de ce même modèle. Ils sont développés spécialement pour les réseaux VANET, en fonction des spécifications citées ci-dessus (Véhicules rapides, jusqu'à 160 km/h, portés de transmission allant de 300 à 1000 mètres, temps de latence faible (moins de 50 ms), et débit théorique allant jusqu'à 6 Mbps). Ainsi, des bandes dédiées ont été allouées par les organismes de certification aux États-Unis et en Europe. Malheureusement, ces bandes ne sont pas compatibles les unes avec les autres. Aux États-Unis, 75 MHz ont été alloués autour des fréquences de 9 GHz, et en Europe, 25 MHz ont été alloués autour de cette même bande. Ces bandes sont représentées sur les figures 1.13 et 1.14. Au Japon, 80 MHz ont été alloués autour de la bande 5,8 GHz [14].

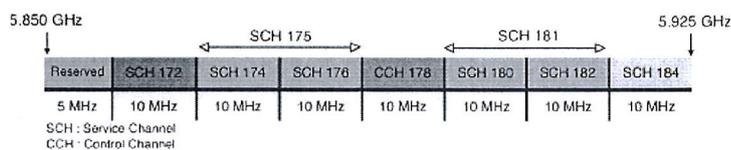


FIGURE 1.13: Bandes allouées pour les VANET aux États-Unis [56]

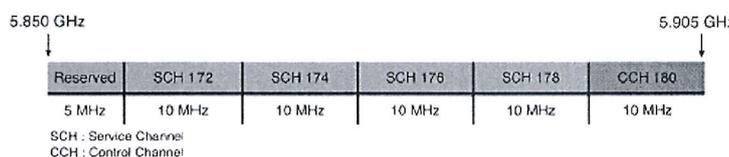


FIGURE 1.14: Bandes allouées pour les VANET en Europe [56]

1.3.4 Les caractéristiques des VANET

Les réseaux VANET ont des spécificités qui les distinguent des réseaux MANET (voir tableau 1.1). Ainsi, les protocoles et les architectures proposés pour les MANET ne peuvent pas être directement appliqués dans le domaine des réseaux VANET. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques caractéristiques liées aux réseaux VANET qui les distinguent des réseaux Ad-hoc et MANET précisément.

1.3.4.1 La forte mobilité et changement fréquent de topologie

C'est la particularité principale des véhicules dans les réseaux VANET. La vitesse des véhicules peut varier selon l'environnement ou la nature de la route. Cependant, elle est élevée dans les autoroutes, et moyenne dans les zones urbaines. A cause de cette mobilité les voitures peuvent rejoindre ou quitter un réseau d'où le changement rapide de la topologie de réseau.

Cette mobilité des nœuds peut être prédite et modélisée. En effet, la circulation sur une route ou une autoroute est facilement prévisible, car le véhicule doit en général rester sur la route. Connaissant la position actuelle du véhicule et sa vitesse, il est ainsi possible de prédire sa position, à condition de connaître par exemple la carte de l'environnement.

1.3.4.2 Faible connectivité

La faible connectivité [60] est la conséquence de la forte mobilité des véhicules. Elle peut être causée par les obstacles de l'environnement. Les liens de connections ente deux nœuds peuvent interrompre à cause de la mobilité qui éloigne les deux entités communicantes; des obstacles qui empêchent la propagation du signal.

1.3.4.3 Pas de contrainte énergétique

Contrairement, au réseau MANET les réseaux VANET n'ont pas de contrainte énergétique. Donc les entité dans les VANET disposent de grandes capacités énergétiques qu'elles tirent du système d'alimentation des véhicule [60] [12].

1.3.4.4 L'environnement de déplacement et modèle de mobilité

Dans un réseau MANET, les nœuds se déplacent aléatoirement, contrairement au réseau VANET. Dans ce dernier, les véhicules suivent un modèle de mobilité spécifique. En général, les déplacements des véhicules sont liés aux infrastructures routières.

1.3.5 Les applications des réseaux VANET

Selon le service offert, nous avons organisé les principales applications des réseaux VANET en quatre grandes classes :

- * Applications Orientées sécurité et prévention routière ;
- * Applications commerciales ;
- * Applications Orientés confort ;
- * Application productives.

1.3.5.1 Application de sécurité et prévention routière

Les applications de sécurité et de prévention routière [34, 70] comprennent la surveillance de la route environnante, des véhicules qui s'approchent, de la surface de la route, des courbes des routes, etc. Cependant, nous avons distingués les catégories suivantes :

1. Trafic en temps réel : Les données du trafic en temps réel peuvent être stockées sur les RSUs et peuvent être mises à la disposition des véhicules à tout moment et en tout lieu. Cela peut jouer un rôle important dans la résolution des problèmes d'embouteillages, éviter les congestions et les alertes d'urgence telles que les accidents.
2. Transfert coopératif des messages : un véhicule qui ralentisse ou s'arrête, échangera des messages et coopérera pour aider d'autres véhicules. Cependant, la fiabilité et la latence seraient les préoccupations majeures. Les situations d'urgence de freinage peuvent ainsi être automatisés et,

par conséquent, faire éviter les accidents potentiels. De même, le feu de freinage d'urgence électronique peut être un autre type d'application.

3. Notification après un accident : Un véhicule impliqué dans un accident diffuserait des messages d'avertissement au sujet de sa position aux véhicules qui le suivent, et ce afin qu'ils puissent prendre une décision à temps, ainsi qu'à la patrouille routière pour le remorquage (voire figure 1.15).

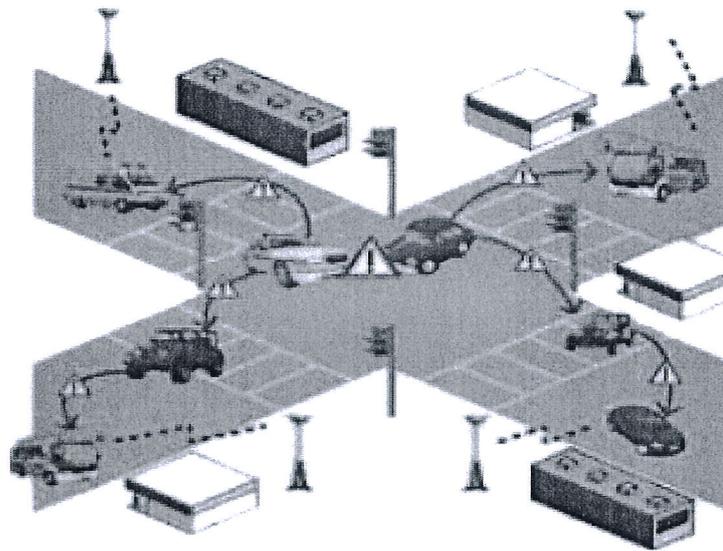


FIGURE 1.15: Notification de situation d'urgence

[34].

4. Avis de contrôle des risques routiers : des voitures peuvent avertir d'autres voitures au sujet de la route ayant des glissements de terrain ou des informations concernant les caractéristiques de la route ; des courbe de la route, descente soudaine, etc.
5. Avertissement coopératif de collision : c'est une alerter a deux ou plusieurs conducteurs potentiellement sur la route d'accident, de sorte qu'ils puissent réparer et changer leur chemin .
6. Surveillance de la circulation : Les caméras peuvent être installées sur le RSU qui peuvent servir de données et servir d'outil sophistiqué dans les campagnes pour la prévention des accidents de la route à faible tolérance.

1.3.5.2 Applications commerciales

Les applications commerciales fourniront au conducteur le divertissement et les services tels que l'accès à Internet, le streaming audio et vidéo. Ces applications commerciales peuvent être classées comme suit :

1. Personnalisation/diagnostique du véhicule à distance : ça permet de télécharger les paramètres personnalisés du véhicule, ou de télécharger vers le serveur les diagnostics du véhicule de/vers l'infrastructure [34].
2. Accès Internet : Les véhicules peuvent accéder à Internet par les RSUs si ces derniers fonctionnent comme des routeurs.
3. Téléchargement de cartes géographiques numériques : La carte des régions peut être téléchargée par les chauffeurs conformément aux exigences avant de se déplacer vers la nouvelle région, et ce pour obtenir des conseils de voyages [34].
4. Transmission de vidéo en temps réel(Streaming) : Le conducteur peut demander un relais vidéo en temps réel de ses films préférés; l'expérience cinématographique à la demande [34].
5. Publicité : Ceci s'adresse en particulier aux prestataires de services, qui veulent attirer des clients dans leurs magasins. Comme les annonces des pompes à essence, les restaurants d'autoroutes, ect. Cette application peut être offerte même en l'absence d'Internet [34].

1.3.5.3 Applications de confort

Ce type d'applications concerne principalement la gestion du trafic avec comme but l'amélioration de l'efficacité du trafic en améliorant le degré de confort des conducteurs. Les applications de confort et commodité peuvent être classées comme suit :

1. Les dérivations d'itinéraires : La planification d'itinéraires et de trajets peut être en cas d'encombrement de la route [34].
2. Le Paiement : Le paiement du péage peut s'effectuer par voie électronique à partir d'un point de péage, comme le montre la figure 1.16. Un point de péage doit pouvoir lire l'OBU du véhicule. Les OBUs utilisent le GPS [62] et le compteur kilométrique ou le tachéographe de bord pour déterminer la distance parcourue par les véhicules. Cela est à l'aide d'une

carte numérique et le GSM pour autoriser le paiement du péage par une liaison sans fil. Cette application est bénéfique non seulement pour les conducteurs, mais aussi pour les opérateurs de péage [34].



FIGURE 1.16: Collection de péage électronique en Inde dans VANET [34].

3. La disponibilité du stationnement : Les notifications concernant la disponibilité des places de stationnement dans les villes métropolitaines aident à trouver la disponibilité des places de stationnement dans les parkings d'une zone géographique donnée [34].
4. La prédiction active : Le fait d'anticiper la topographie à venir de la route, devrait optimiser l'utilisation du carburant en ajustant la vitesse de croisière avant de commencer une descente ou une montée. En outre, le conducteur est également assisté [67].

1.3.5.4 Applications productives

Nous citons comme applications productives :

1. L'économie du carburant : Lorsque l'application du système de péage des véhicules perçoivent le péage aux postes de péage sans arrêter les véhicules, le carburant est ainsi économisé. Cette économie est d'environ 3% par rapport à ce qui est consommé quand un véhicule en moyenne attend normalement pendant 2 à 5 minutes [34].
2. Avantages pour l'environnement : Par exemple le projet de recherche de l'AERIS [66] vise à produire et à acquérir des données pertinentes de l'environnement et de transport en temps réel. En outre, il utilise ces données pour créer de l'information pratique qui appuie et facilite les choix "verts" des utilisateurs et des opérateurs du réseau de transport [34].

1.3.6 Challenges et défis des réseaux VANET

Vu les caractéristiques des VANET, ces derniers ont des avantages mais aussi ils présentent quelques défis ou challenges. Cela pousse les chercheurs à effectuer plusieurs travaux de recherche sur les challenges à soulever. Ci-dessous on cite quelques un.

- La Sécurité

La sécurité est l'un des problèmes majeur dans les VANET, parce qu'elle affecte la vie des gens. Alors les exigences en termes de sécurité doivent être prises en compte aussi bien dans la conception architecturale du réseau que dans la conception des protocoles de communication. Elles diffèrent en fonction des applications et comprennent principalement la confidentialité, l'authentification, la cohérence et l'intégrité des données et la disponibilité. Par exemple : les informations vitales ne peuvent pas être modifiées ou supprimées par un attaquant. Les communications passant par un véhicule du réseau ainsi que des informations sur les véhicules et leurs conducteurs doivent être garanties et protégées de façon à assurer le bon fonctionnement des systèmes de transport intelligents [41, 12].

- Adressage

La position physique d'un véhicule ou de sa région géographique est nécessaire pour de nombreuses applications de communication de données. Cela nécessite un adressage géographique. Trois familles de solutions d'adressage géographique peuvent être utilisés à savoir les solutions de la couche application, les solutions de broadcast GPS et enfin les solution utilisant le routage IP Unicast [34].

- La qualité de service

La qualité de service [32] se mesure en fonction de l'application supportée. On peut distinguer plusieurs contraintes dans les applications utilisées dans les VANET. Parmi lesquelles on cite : la latence, les messages doivent parvenir à destination dans des délais courts ; une connectivité non intermittente. Par exemple

les applications de confort tel que le transfert de fichiers ou le téléchargement qui nécessite une connectivité permanente, etc.

- La bande passante limitée

Les réseaux véhiculaires utilisent des communications radio. Par conséquent, il est nécessaire de définir des méthodes qui permettent de faire face aux Problèmes des transmissions qui sont, les problèmes d'interférences radio, des problèmes de propagation à multi-trajets des ondes ainsi que les irrégularités électromagnétiques[15].

- Le routage

Le routage [71] joue un rôle important dans les applications VANET, mais vu la mobilité à grande vitesse des véhicules et le changement rapide de la topologie du réseau font que les protocoles de routage MANET conventionnels sont inadéquats pour traiter efficacement cet environnement véhiculaire unique. Au faite il n'est pas toujours possible de trouver des nœuds intermédiaires entre la source et la destination et il est toujours impossible de créer une connectivité de bout en bout.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, un aperçu sur les réseaux sans fil, les réseaux mobiles Ad Hoc ainsi que sur les réseaux VANET (qui ne sont qu'une particularité des réseaux MANET) a été donné. Par la suite, des détails sur les caractéristiques des VANET, leur architecture de communication, leurs technologies de transmission et de diffusion ainsi que leurs domaines d'application ont été aussi présentés.

Vu que le routage de données qui consiste à acheminer les paquet de la source vers la destination, est l'un des challenges majeur dans les réseaux VANET, le chapitre suivant sera consacré à l'étude du processus de routage dans ces réseaux.

Le routage dans les réseaux VANET

2.1 Introduction

Le routage est le processus de transmission de données de la source à la destination via de multiples sauts. Les protocoles de routage sont responsables de déterminer le chemin de la source à la destination, et l'acheminement des paquets de façon continue et efficace. Vu que les réseaux VANET sont très dynamiques et leurs topologies est variantes, plusieurs protocoles de routages dédiés aux MANET ont été adaptés aux VANET, et ce tout en respectant leurs caractéristiques. Entre autres, d'autres protocoles ont été proposés dans la littérature spécialement pour les VANET, tout en prenant en compte les spécificités de ces réseaux.

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier, les paramètres utilisés dans l'évaluation des protocoles de routage dans un réseau VANET. Par la suite, nous proposons une classification aux protocoles de routage conçus ou réadapter aux VANET, tout en étudiant certains protocoles correspondants à chaque classe. Enfin, nous dressons une table comparative des protocoles examinés. La conclusion de ce chapitre est donnée dans la section 2.5.

2.2 Métriques de conception d'un protocole de routage pour les VANET

Cependant, afin de concevoir un protocole de routage pour les réseaux VANET, plusieurs paramètres sont à prendre en considération. Ces métriques sont celles de la mobilité et la topologie de réseau, la connectivité ainsi que les exigences de l'application en termes de QoS et de performances. Le reste de cette section va les détailler.

2.2.1 La forte mobilité et la topologie très dynamique

Les réseaux VANET sont caractérisés par une forte mobilité car les véhicules ont une vitesse allant de 0 à 160 km/h, ce qui les incite à bouger très fréquemment. De plus, ces véhicules se déplacent librement dans le réseau, et à tout moment ; des véhicules actifs peuvent quitter le réseau ou de nouveaux véhicules peuvent le rejoindre. Cette caractéristique rend la topologie de ce type de réseaux sans fil très dynamique.

2.2.2 La connectivité du réseau

En raison de la forte mobilité des véhicules dans un réseau VANET, la connectivité de ce dernier doit être préservée autant que possible automatiquement, et ce lorsque la topologie du réseau change (suite à l'apparition, la disparition ou au mouvement de certains véhicules). Au fait, les VANET ont une faible connectivité [60] qui est la conséquence de la forte mobilité des véhicules. Elle peut être causée par les obstacles de l'environnement. Les liens de connections entre deux nœuds peuvent interrompre à cause de la mobilité qui éloigne les deux entités communicantes ; des obstacles qui empêchent la propagation du signal.

2.2.3 Les interférences

Il est reconnu que les taux d'erreurs de transmission dans les réseaux VANET sont nettement plus élevés que dans les réseaux filaires. Cela est dû, généralement aux problèmes d'interférences, peuvent être de natures diverses.

1. Le nombre limité de canaux disponibles.
2. Les fréquences d'émissions sont proches, ainsi, les émetteurs travaillant à des fréquences trop proches peuvent interférer entre eux.
3. Les bruits produits par l'environnement (certains équipements électriques, certains moteurs...)
4. Phénomènes d'atténuation, de réflexion et des chemins multiples qui rendent le signal incompréhensible en le déformant.

Cependant, il est nécessaire de prendre en considération ces différents facteurs lors de la conception d'un protocole de routage pour les VANET.

2.2.4 Les exigences de QoS et les métriques de performance

Certaines applications des réseaux VANET nécessitent des exigences en termes de QoS selon l'environnement de mobilité. Par ailleurs, les liaisons radio présentent des débits variables et ont généralement une bande passante limitée. Cependant, plusieurs métriques et paramètres de QoS doivent être pris en considération. Dans ce qui suit, le détail de certaines métriques.

2.2.4.1 Les métriques de performance

Parmi les les métriques de performance [56] nous citons :

- ✓ **Le taux de livraison des paquets ou Packet Delivery Ratio (PDR)** : c'est le rapport entre le nombre de paquets reçus par le nœud destinataire et le nombre de paquets envoyés par le nœud source. Il est toujours compris entre 0 et 1.
- ✓ **Le débit (Throughput)** : c'est quantité d'informations transmise via un canal de communication selon un intervalle de temps donné.
- ✓ **Le cout de routage normalisé ou Normalized Routing Overhead (NRO)** : permet d'évaluer la bande passante. C'est le ratio entre le nombre de paquets de contrôle transmis par rapport au nombre de paquets de données reçus.
- ✓ **Le délai moyen de bout en bout** : C'est le temps qui s'écoule entre l'envoi et la réception de message.
- ✓ **Le gigue** : c'est la différence du délai de deux paquets successivement reçus

appartenant au même flux de données.

2.2.5 Les modèle de mobilité et de propagation

Dans la littérature on distingue plusieurs modélise de propagation. Il en résulte que plusieurs paramètres sont à prendre en compte afin de simuler un modèle réaliste. Dans un premier temps, la distance entre les véhicules est évidemment un paramètre de base à prendre en compte. Ensuite, il faut être en mesure de simuler les différents obstacles, que ce soit les bâtiments qui annulent ou reflètent le signal, ou les arbres qui se contentent de le réduire. Dans tous ces cas, un modèle d'atténuation doit être établi, et il est nécessaire de prendre en compte les spécificités des VANETs : les antennes émettrices et réceptrices sont dans les véhicules, donc plus près du sol que la plupart des autres antennes pour lesquelles des modèles similaires ont déjà été établis.

Les modèles de la couche physique, de la couche liaison et de la sous-couche MAC sont aussi définis par le simulateur. Plusieurs modèles sont implémentés par le simulateur que nous utilisons.

- Free space model (modèle de l'espace libre) est le modèle le plus simple. Il considère que la transmission se fait de façon directe sans aucun obstacle, réflexions ou effets perturbateurs. Seule la distance entre l'émetteur et le transmetteur est prise en compte ;
- Two-ray ground reflection model (modèle à deux rayons, directs et par le sol) considère deux rayons, le rayon de transmission direct ainsi que le rayon qui se réfléchit sur le sol, comme le montre la Figure 2.11, à condition que les antennes soient séparées d'une distance minimale appelée distance de croisement. Avant cette distance, le modèle de propagation de l'espace libre est utilisé. La puissance du signal prédite par ce modèle suit l'équation :

$$P_r(d) = \begin{cases} \frac{P_e G_e G_r h_e^2 h_r^2}{d^4 L} & \text{if } d \geq \text{crossover_dist} \\ \frac{P_e G_e G_r \lambda}{(4\pi d)^2 L} & \text{if } d \leq \text{crossover_dist} \end{cases}$$

avec $P_r(d)$ la puissance reçue calculée en fonction de la distance, P_e la puissance émise, G_e , G_r , h_e et h_r , respectivement le gain de l'antenne émettrice et réceptrice ainsi que leurs hauteurs, L est le facteur de perte et d la distance entre les deux antennes. λ est calculé en fonction de la

fréquence f et de la célérité de l'onde c tel que :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

et la distance de croisement est défini par :

$$crossover_dist = \frac{(4\pi h_t h_r)}{\lambda}$$

À titre indicatif, avec les paramètres de base du simulateur utilisé par notre recherche, la distance de croisement est d'environ 86 m ;

- Shadowing model est le modèle de prise en compte des effets de masques. La probabilité pour un noeud de recevoir le message ne dépend plus seulement de la distance entre l'émetteur et le récepteur, mais aussi l'effet de perte de trajet (path lost model) qui met en jeu un paramètre aléatoire.

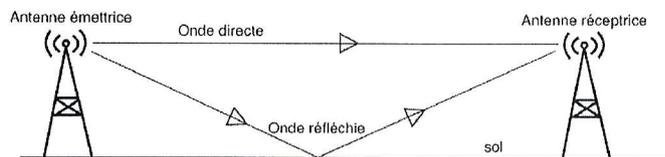


FIGURE 2.1: Modèle de propagation Two-ray ground [56].

2.3 Classification des protocoles de routage dans les VANET

En raison de la nature dynamique des nœuds mobiles du réseau VANETs, il est très difficile de trouver et d'entretenir des routes dans ces réseaux. Le routage dans les VANET a fait l'objet de nombreuses études et travaux de recherche, par conséquent, plusieurs protocoles ont été proposés [36]. On va classer ces protocoles en trois grandes familles :

- Protocoles basés sur la topologie du réseau ;
- Protocoles basés sur le type de routage ;
- Protocoles basés sur la structure du réseau.

2.3.1 Protocoles basés sur la topologie du réseau

Les protocoles de routage basés sur la topologie [21] utilisent les informations de liaison au sein du réseau pour acheminer les paquets de données de la source vers la destination. L'approche de routage basée sur la topologie peut être divisée en routage proactif et réactif.

✓ Les protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs [61] sont principalement basés sur les algorithmes de plus court chemin. Ils maintiennent et mettent à jour les informations de routage telles que les sauts suivants et qui sont sauvegardés indépendamment des demandes de communication. Ces mises à jour des itinéraires sont effectuées périodiquement, indépendamment de la charge du réseau, des contraintes de la bande passante et de la taille du réseau. Les informations de routage sont stockées dans des tables et sont basées sur le trafic de contrôle reçu. La génération des messages de contrôle et de calcul de l'itinéraire sont constamment diffusés et inondés entre les nœuds pour maintenir les chemins ou les états de liaison entre les nœuds même si certains chemins ne sont jamais utilisés. Une table est maintenue à l'intérieur des nœuds de sorte que chaque entrée de la table indique le prochain saut vers une certaine destination. Les principaux protocoles proactifs se caractérisent par le fait que les nœuds maintiennent une mise à jour permanente sur la topologie du réseau. Par conséquent, une route vers n'importe quel nœud du réseau est toujours disponible. Les protocoles sont le bon choix des application a temps réel car ils ont une faible latence par contre les chemins inutilisés occupent une partie importante de la bande passante qui est l'inconvénient majeur de ce type des protocoles. Comme exemple de protocoles de routage proactifs, les deux protocoles : LSR et FSR.

✓ Les protocoles réactifs

Le routage réactif [61, 23] est appelé routage à la demande car il lance la découverte d'itinéraires lorsqu'un nœud doit communiquer avec un autre nœud. Cela, permet de réduire le trafic du réseau. Au fait, le routage réactif consiste en une phase de découverte d'itinéraire au cours de laquelle les paquets de requêtes sont inondés dans le réseau pour la recherche de chemin. Cette phase se termine lorsque l'itinéraire est trouvé. AODV, PGB, DSR et TORA sont des exemples de protocoles de routage réactifs. Ces derniers, n'ont pas besoin d'inonder périodiquement le réseau pour

mettre à jour la table de routage. De plus, ils économisent la bande passante. Toutefois, ils engendrent une latence élevée, et l'inondation excessive du réseau perturbe la communication entre les nœuds. Quelques protocoles de routages réactifs sont présentés ci-dessous.

✓ **Exemples de protocoles de routage basés sur la topologie du réseau**

• **Le protocole FSR**

FSR (Fisheye State Routing) [51] est un protocole de routage proactif ou piloté par table, où les informations de chaque nœud sont collectées auprès des nœuds voisins. Par la suite, la table de routage est calculée en se basant sur le routage d'état de lien. FSR réduit considérablement la bande passante consommée car en cas de défaillance d'une liaison, il y aura pas de changement dans la table de routage et ne déclenchera pas des messages de contrôle. Dans ce cas, il échange des informations partielles de mise à jour de routage uniquement avec ses voisins, ce qui réduit les frais généraux de routage. Cependant, l'augmentation de la taille du réseau augmente la complexité du stockage et les frais de traitement de la table de routage. De plus, les performances sont très médiocres dans les petits réseaux, ainsi que les informations sont insuffisantes pour établir une route.

• **Le protocole TORA**

Le protocole de routage Temporally Ordered Routing Protocol [49, 50] est basé sur l'algorithme d'inversion de lien qui crée un graphe acyclique direct vers la destination où le nœud source agit comme une racine de l'arbre. Dans TORA le paquet est diffusé par le nœud émetteur, en recevant les nœuds voisins le paquet, puis ces derniers rediffusent le paquet sur la base du DAG (directed acyclic graph) si c'est le lien descendant du nœud émetteur. TORA réduit la surcharge réseau car tous les nœuds intermédiaires n'ont pas besoin de rediffuser le message donc il fonctionne bien dans les réseaux dense. Par contre, il est pas évolutif et rarement utilisé parce que il existe d'autres protocoles tels que DSR et AODV qui fonctionnent mieux.

• **Le protocole DSR**

Le protocole Dynamic Source Routing [45, 29, 19] appartient lui aussi à la classe des protocoles réactifs et permet donc aux nœuds de découvrir dynamiquement une route dans un réseau à multi-sauts vers toutes les destinations. Dans le protocole DSR, toutes les routes sont stockées dans la mémoire cache. Si la route n'est pas disponible, le nœud envoie un message RREQ (le message d'interrogation des routes

disponibles, et qui est constitué d'une trame de 24 octets). Il ajoute son adresse dans l'enregistrement de la séquence des sauts. Cette demande se propage jusqu'à la destination ou jusqu'à un nœud qui connaît la route vers la destination. Lorsque la réponse est favorable, un message de réponse RREP (le message indiquant au demandeur les routes disponibles, et qui est constitué d'une trame de 20 octets). Ce message à diffusion individuelle (unicast) est renvoyé au nœud d'origine.

Le protocole DSR n'utilise pas des messages périodiques, ce qui réduit la de charge (overhead) et la bande passante du réseau. Cependant, chaque paquet porte une légère surcharge en contenant la route de l'émetteur du paquet. Cette surcharge augmente quand le paquet doit passer par plus de sauts que prévu pour atteindre la destination. Le protocole DSR possède également un support permettant des liens unidirectionnels. Cela peut accroître les performances dans les scénarios où beaucoup de liens unidirectionnels sont présents.

2.3.2 Protocoles basés sur la stratégie de routage

Le principe des protocoles de cette famille consiste à diffuser l'information d'une source à une destination. Cette stratégie de diffusion peut être classés en Unicast, Any-cast et multicast et geo-diffusion. L'unicast diffuse l'information à partir d'une source unique vers une destination unique, en utilisant des mécanismes de multiples sauts ou de stockage et de transfert. L'any-cast permet de rediriger les données vers le nœud le plus proche ou le plus efficace selon la politique de routage et diffusion. Le multicast et geo-diffusion sont des méthodes simples pour distribuer les données à plusieurs nœuds à la fois.

✓ Protocoles de routage Unicast

L'objectif principal du routage unicast [37] dans les VANETs est de transmettre des données d'une source unique vers une destination unique. Ceci est montré dans la figure 2.2. Cette transmission sans fil est à sauts multiples ou en utilisant la technique carry-and-forward. Dans la technique de transmission sans fil à sauts multiples, ou appelée réacheminement à sauts multiples, les véhicules intermédiaires d'un chemin de routage devraient transmettre les données dès que possible de leur source à leur destination. Dans la technique de carry-and-forward, le véhicule source transporte les données le plus longtemps possible afin de réduire le nombre de paquets de données. Le coût du délai de livraison par la

technique du carry-and-forward est normalement plus élevée que celui de la technique de transmission sans fil à sauts multiples. Deux catégories de conception de protocoles de routage à savoir les protocoles de routage Min-Delay et avec limite de temps. Les protocoles de routage Min-Delay visent à minimiser le délai de livraison de la source à la destination. Les protocoles de routage limités dans le temps tentent de maintenir un faible niveau d'utilisation des canaux dans les délais de livraison limités. Dans le paragraphe suivant, quelques protocoles de routage unicast seront présentés.

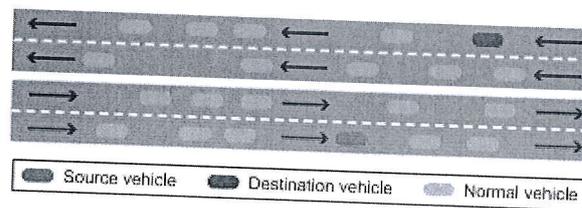


FIGURE 2.2: Routage unicast.
[36]

✓ Les protocoles de routage Géocast/Multicast

Le routage géocast[43, 36] est essentiellement un routage multicast basé sur la localisation. L'objectif d'un routage geocast est d'acheminer le paquet d'un noeud source vers tous les autres nœuds d'une région géographique donnée (Zone de pertinence). De nombreuses applications VANET bénéficieront du routage géocast. Par exemple, un véhicule s'identifie comme s'étant écrasé par des capteurs de véhicule qui détectent des événements comme le déclenchement d'un coussin gonflable. Par la suite, il peut signaler l'accident immédiatement aux véhicules à proximité. Les véhicules à l'extérieur de la zone de pertinence ne sont pas alertés pour éviter des réactions inutiles et hâtives. Dans ce type de scénarios, le nœud source se trouve généralement à l'intérieur de cette zone. Voir la figure 2.3 pour une illustration de geocast dans les VANET.

✓ Protocoles de routage Broadcast

Le routage broadcast [36] est une méthode d'acheminement fréquemment utilisée dans les réseaux VANET. Par exemple, le partage du trafic, la météo, les urgences, l'état des routes entre les véhicules et la diffusion de publicités et d'annonces. Lorsque le message doit être diffusé aux véhicules en dehors de la portée d'émission, le système multi-saut est

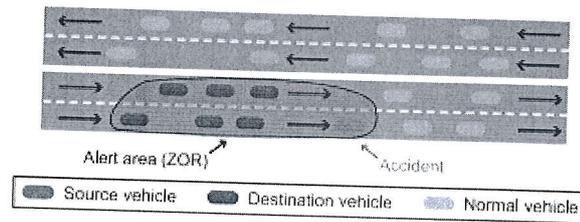


FIGURE 2.3: Routage geocast.
[36]

utilisé. La façon la plus simple de mettre en œuvre un service broadcast est l'inondation dans laquelle chaque noeud rediffuse des messages à tous ses voisins sauf à celui qui lui a envoyé ce message. L'inondation garantit que le message atteindra éventuellement tous les nœuds du réseau.

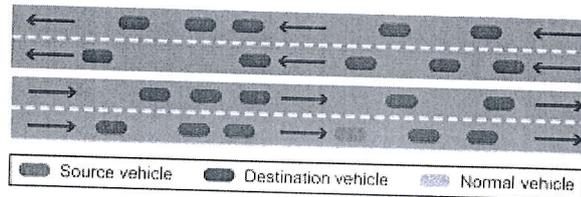


FIGURE 2.4: Routage broadcast.
[36]

✓ Exemples de protocoles basés sur la stratégie de routage

• Le protocole DSDV

Le protocole DSDV (Dynamic destination Sequenced Distance Vector [53, 57, 35] a été conçu spécialement pour les réseaux mobiles. Chaque noeud mobile maintient une table de routage qui contient toutes les destinations possibles. En addition il garde aussi, le nombre de sauts pour atteindre la destination et le numéro de séquences (SN) qui correspond à un noeud destination, lui permettant de distinguer les nouvelles routes des anciennes. Par conséquent, éviter la formation de boucles de routage. Les mises à jour des tables sont transmises périodiquement à travers le réseau afin de maintenir la consistance des informations ce qui génère un trafic important qu'il faut limiter. Pour cela, deux types de paquets de mise à jour sont utilisés : les "fulls dump", contenant toutes les informations et des paquets plus petits. Ces derniers ne contiennent que les informations ayant changées depuis le dernier full dump. Les mises à jour sont soit incrémentales ou complètes.

- **Le protocole AODV**

Le protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector routing protocol) [52, 23] est un protocole de routage réactif qui établit une route lorsqu'un noeud doit envoyer des paquets de données. Il a la capacité de routage unicast et multicast. Il utilise un numéro de séquence de destination (DestSeqNum) qui le rend différent des autres protocoles de routage à la demande. Ce type de protocole réduit les besoins de mémoire inutiles et la redondance des routes et peut être appliqué à un réseau ad-hoc à grande échelle. Enfin l'AODV envoie des réponses en cas de défaillance de liaison dans le réseau. En revanche, si les nœuds intermédiaires possèdent d'anciennes entrées, cela peut entraîner des incohérences dans l'itinéraire. De plus, l'AODV nécessite plus de temps pour l'établissement de la connexion. Enfin, il consomme plus de bande passante à cause de balisage périodique.

- **Le protocole ROVER**

ROVER (Robust Vehicular Routing) [31, 50] est un protocole de routage GeoCast dont le but principal est d'envoyer un message à tous les autres véhicules dans une zone de pertinence spécifique. Dans ce protocole, les paquets de contrôle sont diffusés sur le réseau et les paquets de données sont diffusés en unicast. ROVER est un protocole de routage Géocast fiable mais avec un nombre de retransmissions élevé. Par conséquent, la surcharge des paquet de contrôle est élevée. Cependant, en raison des messages redondants, un retard important dans le transfert de données peut survenir.

- **Le protocole IVG**

Le IVG (Inter-Vehicular Geocast) [6] a pour but d'informer les véhicules situés dans une zone à risque appelée groupe de multicast de tout danger sur la route par exemple, lors d'un accident. Pour atteindre cet objectif, la zone à risque est déterminée en tenant compte de l'emplacement précis des obstacles sur la route et des directions de conduite susceptibles d'être affectées. Le véhicule endommagé diffuse un message d'alerte au groupe de multi-diffusion. Les voisins qui reçoivent le message testent sa pertinence en fonction de leur emplacement, tout en se rapportant à la zone à risque. Tous les voisins appartenant à la zone à risque calculent un délai d'attente différé qui permet au noeud le plus éloigné d'être un relais pour rediffuser le message (plus éloigné est plus favorable). Cette technique de sélection de relais rend inutile l'utilisation de messages de beacons périodiques.

- **Le protocole BRAODCOMM**

BRAODCOMM [50, 36] repose sur une structure hiérarchique du réseau autoroutier. Dans BRAODCOMM, l'autoroute est divisée en cellules virtuelles qui se déplacent comme des véhicules. Les nœuds de l'autoroute sont organisés en deux niveaux d'hierarchie : le premier niveau comprend tous les nœuds d'une cellule. Le deuxième niveau est représenté par des réflecteurs de cellules, qui sont quelques nœuds situés à proximité du centre géographique de la cellule. Le réflecteur de cellules se comporte pendant un certain intervalle de temps, étant que tête de cellule. Ainsi, il traite les messages d'urgence provenant des mêmes membres de la cellule ou des voisins proches.

- **Le protocole EAEP**

EAEP (Edge-Aware Epidemic Protocol) [36, 50] est un protocole VANET hautement dynamique, fiable et efficace pour la diffusion de l'information sur la bande passante. Il réduit la surcharge des paquets de contrôle en éliminant l'échange de paquets hello supplémentaires pour le transfert des messages entre différents groupes de véhicules. Par ailleurs, il facilite la maintenance des groupes. Chaque véhicule a sa propre position géographique pour diffuser des messages afin d'éliminer les messages beacons. Lorsqu'il reçoit un nouveau message de rediffusion, le protocole EAEP utilise le nombre de transmissions à partir des nœuds au cours d'une période donnée pour calculer la probabilité de rediffusion du message. Malgré les avantages de ce protocole, ce dernier génère un retard élevé en terme de transmission des données.

2.3.3 Protocoles basés sur la structure du réseau

Les protocoles de cette famille nous trouverons deux famille de protocoles basés sur les clusters, ou les véhicules partageant des caractéristiques similaires telles que la performance dans la même direction avec plus ou moins la même vitesse, et basé position qui utilise des informations géographiques qu'on va les détailler dans cette section.

- ✓ **Protocoles de routage basés sur le clustering**

Les protocoles de routage basés sur les clustering [50] de créent des clusters entre les nœuds ou les véhicules. Un groupe de nœuds s'identifie par cluster. Chaque cluster n'a qu'un seul chef de cluster, qui est responsable de la communication intra et inter clusters. Pour la

communication intra-cluster à l'intérieur de chaque cluster est assurée par liaison directe. Par contre, la communication inter-cluster est assurée via les têtes des clusters. Dans le routage à base de clustering, c'est la tête de cluster qui diffuse les paquets de données vers les têtes des autres clusters. Cela offre une bonne scalabilité pour les grands réseaux, mais des retards et des frais généraux sont encourus lors de la formation des clusters dans les réseaux VANET à très forte mobilité. Comme protocoles de routage basés sur les Clustering on trouve HCB, CBDRP, CBLR, CBR, etc.

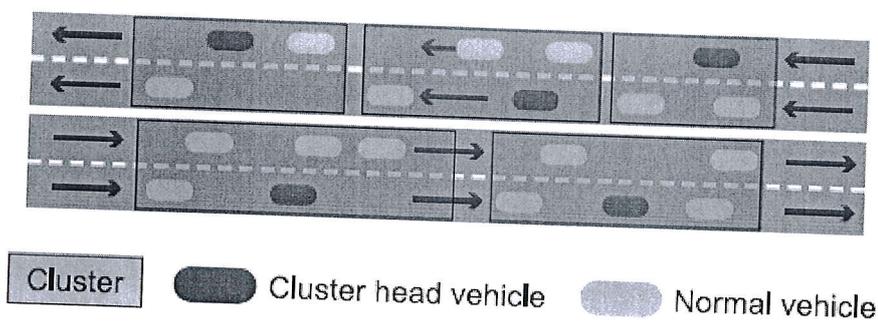


FIGURE 2.5: Routage basé sur le clustering [50].

✓ Protocoles de routage basés sur la position

Cette classe de protocoles de routage [18, 20, 21, 23], aussi appelée protocoles géographiques, utilisent l'information géographique du véhicule dans le processus de sélection des prochains-sauts. Dans ce type de protocoles, la connaissance de l'ensemble de l'itinéraire n'est pas nécessaire pour délivrer les paquets des données. Les protocoles de cette famille ne maintiennent aucune table de routage et n'échangent aucune information sur l'état des liens avec les nœuds voisins. Les informations sur la position provenant d'un dispositif GPS sont utilisées dans le processus de décision en routage. Différents protocoles basés sur la position sont proposés à savoir, GSR, GPSR, GPCR, CAR, A-STAR, STBR etc. Ces derniers, représentent la famille des meilleurs protocoles adaptés à la mobilité des nœuds. Ils sont aussi caractérisés par leur scalabilité. De plus, la découverte et la gestion des itinéraires dans ce type de protocoles ne sont pas nécessaires. Cependant, ils ont besoin de services de détermination de position comme les dispositifs GPS.

✓ Exemples de protocoles de routages basés sur structure du réseau

- **le protocole CDRP**

Ce protocole CDRP (Cluster-Based Directional Routing Protocol) [50] divise les véhicules en groupes et les véhicules qui se déplacent dans la même direction sous forme d'un cluster. La source envoie le paquet au chef de son cluster, puis ce dernier transmet le paquet au chef du cluster de destination, qui le transmet à son tour à la destination. La sélection du chef du cluster et l'entretien s'effectuent comme un CBR, sauf que le protocole CDRP prend également en considération la vitesse et la direction du véhicule. CDRP résolve les problèmes de stabilité des liens dans les VANET et assure un transfert de données fiable et rapide. Toutefois, le nombre de retransmissions est élevé ce qui peut engendrer une surcharge.

- **Le protocole CBLR**

Le protocole de routage basé sur la localisation CBLR (Cluster Based Location Routing) [22, 11] est un protocole de routage réactif et basé sur le clustering. Chaque chef de cluster conserve une table de routage contenant les adresses et les localisations géographiques des nœuds de son propre cluster et des nœuds passerelles. En plus, maintenir une table de routage des clusters voisins. Quand une source veut envoyer des données à une destination, le chef du cluster vérifie d'abord si la destination est dans le même cluster ou non. Si celle-ci est dans le même cluster, il envoie le paquet au voisin le plus proche de la destination. Le protocole CBLR est adapté aux réseaux à haute mobilité, puisqu'il met à jour la localisation de la source et de la destination à chaque fois avant de commencer la transmission de données.

- **Le protocole HCB**

HCB(Hierarchical Cluster Based Routing)[68] Il s'agit d'un protocole de routage hiérarchique basé sur le cluster conçu pour les réseaux ad hoc très mobiles. L'architecture de communication à deux couches utilisées dans HCB. Les nœuds de la 1^{ère} couche ont une interface radio unique et ils communiquent entre eux via le chemin multi-saut Dans la 2^{ème} couche, les nœuds communiquent entre eux via la station de base. Son avantage est le routage intra-cluster est exécuté indépendamment dans chaque cluster et les têtes de ce dernier échangent périodiquement les informations d'appartenance pour permettre le routage inter-cluster, mais son inconvénient c'est que le nombre de retransmission est élevé en raison d'augmentation de la

perte des paquets

- **Le protocole A-STAR**

A-STAR (Anchor-Based Street and Traffic Aware Routing) [47, 59] est un protocole de routage basé sur la position. Il est spécialement conçu pour les scénarios urbains pour les systèmes de communication entre véhicules. Il assure une connectivité élevée lors de la livraison des paquets en utilisant deux types de cartes superposées. Une carte statique et une carte dynamique. La carte évaluée statistiquement est un graphique qui affiche les itinéraires d'autobus qui impliquent généralement un volume de trafic stable. A-STAR permet de trouver une connexion de bout en bout en cas de faible densité de trafic. En outre, son taux de livraison de paquets est inférieur à celui de GSR. Néanmoins, l'utilisation des cartes statiques basées sur les lignes d'autobus urbains, peut causer des problèmes de connectivité sur certaines trajets de la rue.

2.4 Comparaison entre les différents protocoles étudiés

Dans le but de connaître les différents facteurs qui caractérisent les protocoles de routage étudiés dans la section précédente, nous trouvons que la comparaison entre toutes les classes de ces protocoles (basés sur la topologie, basés sur la stratégie du routage et basés sur la structure) est nécessaire. Cette comparaison permet de donner une vue globale sur le routage dans les réseaux VANET. Elle sera par rapport à certains métriques à savoir la latence, l'infrastructure virtuelle utilisée, le scénario et la méthode de transmission utilisée. Le tableau 2.1 ci-dessous comporte tous les résultats de cette comparaison.

Protocole	Scénario	Infrastructure virtuelle utilisée	Latence	Méthode de transmission
Proactif	Urbain	Non	Faible	Multi-saut
Réactif	Urbain	Non	Élevé	Multi-saut
Unicast	Urbain / autoroute	Non	-	Multi-saut
Geocast	Autoroute	Non	-	Multi-saut
Broadcast	Autoroute	Non	Faible	Multi-saut
Basé sur position	Urbain	Non	-	Méthode-heuristique
Clustering	Urbain	Oui	Élevé	Multi-saut

TABLE 2.1: Comparaison entre les classes de protocoles étudié

Après avoir analysé et comparé les différents protocoles étudiés, on a pu observer quelques critères qui sont les suivants :

- La plupart des protocoles de routage dans les VANET fonctionnent dans des conditions ou environnements particuliers, à savoir autoroutier ou urbain, utilisent généralement le mode de transmission multi-sauts afin de communiquer les paquets vers la destination.
- La majorité des protocoles de routage dans les VANET utilisent des infrastructure existantes. Cependant, ils ne prennent pas en considération la direction des véhicules sur la route, ce qui explique les valeurs de latence élevées. En outre, la grande mobilité des véhicules et du choix de leur voies, entraînent un acheminement vers des mauvaises directions, ce qui engendre des retards plus élevés et des pertes de paquets.

2.5 Conclusion

Le processus de routage dans les réseaux véhiculaire est un processus important et complexe. Il permet aux véhicules de coopérer entre eux pour assurer l'échange des données. La performance des protocoles de routage VANET dépend de divers paramètres comme l'environnement et les stratégies de transfert.

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents protocoles de routage proposées ou réadapter aux réseaux VANET tout en les classant dans plusieurs familles de routage afin de les distinguer. Pendant cette classification, nous avons fait une analyse d'un certain nombre de protocoles en tant qu'exemples pour chaque classe, et ce tout en tirant les points forts et les points faibles de chaque protocole. Cette étude comparative apportée aux protocoles étudiés nous a permis de balayer les différentes stratégies utilisées pour le routage dans les réseaux VANET. Chaque stratégie peut être adaptée à une situation mais pas pour d'autres. Tout dépend du type de l'application et l'architecture du réseau. Vu la grande mobilité des réseaux VANET, la stratégie du routage basée sur les positions s'est avérée parmi les stratégie les plus performantes et qui prennent en considération les particularités des VANET.

L'objectif du prochain chapitre est d'étudier en détail le routage basé sur la position dans les réseaux VANET.

Les protocoles de routage basés sur la positions

3.1 Introduction

Les protocoles de routages basés sur la position sont des protocoles fondés sur les informations géographiques partagées entre les nœuds afin d'acheminer les paquets de données vers la destination. Plus précisément, dans ce type de routage un nœud source requiert le transfert des paquets de données vers le voisin qui a des coordonnées géographiques plus proches de la destination. Ce processus de routage est répété jusqu'à ce que le paquet de données atteigne sa destination finale.

Cependant, dans ce type de routage il n'est pas nécessaire de créer et de gérer un routage global du nœud source jusqu'au nœud de destination. En d'autres termes, la connaissance de l'ensemble de l'itinéraire n'est pas nécessaire pour acheminer les paquets de données à la destination. Par ailleurs, ce routage géographique a la capacité de minimiser la charge du réseau, et enfin la capacité de s'adapter aux modèles a grandes mobilité.

De ce fait, un nombre important de protocoles de routage basés sur la position a été proposé dans la littérature.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un ensemble de ces approches de routage tout en leur proposant une nouvelle classification. Par la suite, nous tracerons une comparaison entre les différents protocoles étudiés dans chaque classe. Enfin, nous terminerons ce chapitre par une conclusion.

3.2 État de l'art

3.2.1 Classification des approches de routage

Les protocoles de routage basés sur la position dans les réseaux véhiculaires peuvent être classés selon plusieurs critères, et ce afin de faciliter leur évaluation et avoir donc une vue globale sur leur politique de routage. La figure 3.1 illustre notre classification proposé. Cependant, nous avons choisis quatre critères de classification à savoir : la tolérance aux délais (DTN, Not-DTN, Hybride), le type de communication (V2V, I2V, Hybride), les stratégies d'acheminements (stratégie d'acheminement préalable, stratégie de ré-acheminement), et enfin l'utilisation des informations de positions. Au fait, un protocole de routage peut appartenir à plusieurs classes et généralement ceux qui appartiennent à la même classe partagent la plupart de ses caractéristiques. Ainsi, dire qu'un protocole appartient à une classe, cela signifie qu'il est caractérisé par l'ensemble de propriétés de cette dernière.

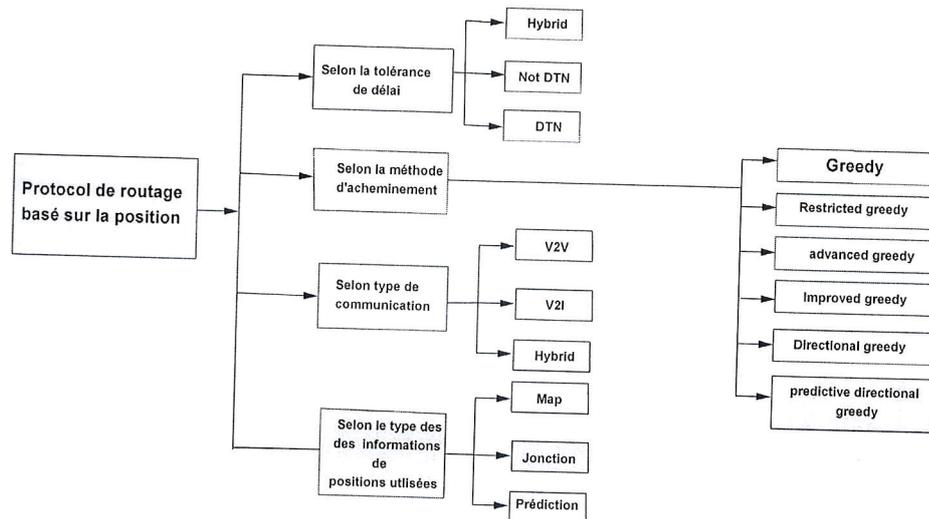


FIGURE 3.1: Classification des protocoles de routages basé position.

3.2.1.1 La tolérance aux délais

Les protocoles géographiques sont considérés plus stables et plus adaptés pour VANET, qu'on peut les classés en trois catégories [27, 37] : protocoles tolérant au retard (DTN), protocoles non tolérant au retard (non DTN) et Hybride.

- ✓ **Les protocoles tolérants aux DTN :** Les protocoles DTN sont basés sur une stratégie de stockage et de transfert, ce qui signifie qu'il n'y a pas de connectivité de bout en bout garantie en permanence. Cela est dû à la grande mobilité et du nombre insuffisant de véhicules qui provoquent des déconnexions fréquentes de communication. En outre, des délais d'exécution longs et à grande échelle sont aussi engendrés. En addition, la bande passante limitée, induit a des taux d'erreur binaires élevés. Ainsi, s'il n'y a pas de nœud approprié pour transférer le paquet vers une autre zone, le paquet sera mis en cache jusqu'à ce qu'il y ait un nœud adéquat pour transférer le paquet.
- ✓ **Les protocoles non tolérants au retard not-DTN :** Cette classe de protocoles ne convient qu'aux environnements à haute densité, et qui ne prennent pas en considération la connectivité intermittente. Cependant, de nombreux protocoles de routage non tolérant aux DTN gèrent cette contrainte par différentes stratégies. Par exemple, en utilisant des bacons.
- ✓ **Hybrid :** Les protocoles de routages hybride fusionnent les caractéristiques de protocoles de routage basés sur la position (DTN et non-DTN), parfois il fusionne plusieurs protocoles de routage basés sur la topologie (réactive, proactive et hybride) avec le routage basé sur la position. Le protocole de routage hybride basé sur la position est un protocole mixte qui bénéficie des stratégies de ces protocoles.

3.2.1.2 Les méthodes d'acheminements

Les protocoles de routage basés sur les stratégies d'acheminement se fondent sur les informations des liens stockées dans les tables de routage pour transmettre les paquets. Deux stratégies peuvent être distingués à savoir une stratégie d'acheminement préalable et une stratégie de ré-acheminement. Dans la littérature on distingue les méthodes d'acheminement[8] suivante :

- ✓ **Greedy :** dans le routage gourmand ou greedy le paquet est envoyé au nœud plus proche de la destination. Ceci est illustré dans la figure 3.2, si la

routage gourmand est utilisé, le nœud S envoie le paquet au nœud A .

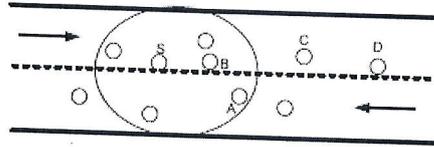


FIGURE 3.2: Routage Greedy.

[8]

- ✓ **Restricted greedy** : avec cette approche l'expéditeur essaie de livrer le paquet aux carrefours les plus proches pour résoudre le problème minimum local.
- ✓ **Advanced greedy** : dans cet algorithme, les nœuds source et destination s'informent mutuellement de leurs vecteurs de vitesse. Le nœud expéditeur ajoute également le temps de traitement de ses paquets dans l'en-tête du paquet pour mettre à jour le temps de parcours des paquets. Après avoir reçu un paquet, le nœud recherche dans la table voisine si la destination figure ou non. Si la destination est présente dans la table voisine, alors le paquet livrera à la destination sinon le nouveau emplacement de destination sera calculé en considérant le vecteur vitesse et le paquet sera transféré vers un nœud voisin, faisant un progrès maximum vers la destination.
- ✓ **Improved greedy** : dans ce cas, le nœud source consulte d'abord sa table voisine et calcule la nouvelle position prévue de tous ses voisins en fonction de direction et de vitesse et choisit donc une position la plus proche de sa destination. Ceci est illustré toujours avec la figure précédente 3.2 mais dans ce cas le improved greedy est utilisé, où S calcule la nouvelle position prévue de ses voisins et suppose qu'au moment t_2 , le véhicule B dépasse le véhicule A , donc S sélectionne B comme saut suivant au lieu de A .
- ✓ **Directional greedy** : l'approche directional greedy ne prend en compte que les nœuds qui se déplacent vers la destination, elle choisit un mode qui se déplace vers la destination et la destination la plus proche.
- ✓ **Predictive directional greedy** : dans cette stratégie le nœud source maintient les informations de ses voisins à 2 sauts. Avant d'expédier le paquet, le nœud source consulte sa table voisine et calcule la position prévue de tous ses voisins (un-seul-saut et deux-saut) et choisit celui d'entre eux qui s'oriente vers la destination et la destination la plus proche.

3.2.1.3 L'utilisation des informations de positions

Les protocoles de routage de cette classe sont divisés en trois catégories.

- ✓ **Map** : [69] La carte numérique permet aux protocoles de routage de prendre des décisions de routage en calculant un chemin directement vers le nœud de destination. Cependant, les paquets de données sont transmis en fonction de ce chemin pour résoudre le problème du maximum local.
- ✓ **Junction** : [40] L'utilisation des endroits spécifiques tels que les jonctions est une solution utilisée par certains protocoles pour résoudre le problème de maximum local. Cela est dans le but de prendre des décisions par rapport au chemin par lequel les paquets doivent être acheminer. Ce type de protocoles s'appuient sur les ces nœuds fixes situés dans les jonctions en routant les paquets de données de jonction en jonction pour atteindre rapidement la destination.
- ✓ **Prédiction** : L'utilisation des statistiques, d'extraction de connaissances à partir de données, réseaux de neurone, filtre de Kalman qui analysent des faits présents et passés pour faire des hypothèses prédictives sur des événements futurs. Par exemple dans notre cas la prédiction de la localisation des véhicules.

3.2.2 Exemples de protocoles de routage basés sur la position

Dans cette section, nous allons donner un aperçu non exhaustif des protocoles de routage dédiés ou adaptés aux réseaux VANET.

3.2.2.1 GPSR

GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [73, 30, 36] 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 connu et le plus déployé dans ce type de réseaux. L'idée de ce protocole est de se rapprocher de la destination pour l'atteindre plus rapidement et à moindre coût. Ses stratégies de routage sont les plus intuitives mais elles ne permettent pas toujours de parvenir à la destination. Il repose sur deux algorithmes différents : le routage gourmand ou le routage

greedy et face routing ou la transmission par périmètre.

Le routage Greedy

est la stratégie de routage principale utilisée dans le protocole GPSR. Un nœud transmet le paquet de donnée à un voisin immédiat qui est géographiquement plus proche du nœud destinataire. Les paquets contiennent les coordonnées géographiques de leurs destinations. Aussi, chaque véhicule connaît les positions géographiques de ses véhicules voisins. Par conséquent, un véhicule transmetteur peut faire un choix localement optimal et gourmand, et ce 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 cherche le candidat optimal à l'intérieur de sa portée radio (situé dans sa liste de voisins). Ce dernier, remplit la condition du nœud le plus proche de la destination. Pour se faire, 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.

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

Un exemple qui illustre clairement le choix greedy du prochain saut apparaît dans la Figure 3.3. x est le nœud source et D est le nœud de destination. Le cercle en pointillé montre l'étendue du nœud x . Dans cette étendue, il y a quatre nœuds voisins de x . Le nœud x transfère le paquet au nœud qui est le plus proche de la destination D . Dans ce scénario, y est le plus proche de D (la distance entre y et D est inférieure à la distance entre tout autre nœud voisin à D). Par conséquent, x transfère le paquet vers y . La transmission "greedy" est puissante et efficace tant qu'il y a un voisin proche de la destination. Cependant, dans les situations où il n'y a pas de voisins adéquats, elle ne peut pas fonctionner. Par exemple, 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. Dans ce cas, la stratégie de transmission "Greedy" ne peut pas être appliquée. Comme le montre la figure 3.4. le nœud x est lui-même le plus proche de D alors que ses voisins w et y sont très éloignés.

Face Routing

Pour remédier aux échecs de la stratégie "greedy", le véhicule passe à un autre processus de routage appelé la transmission par périmètre ou périmétrique. Ce

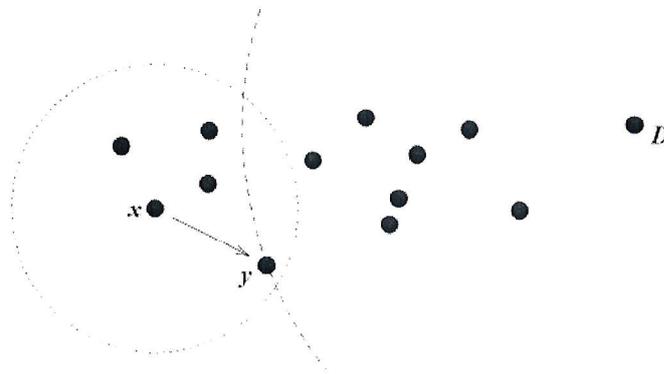


FIGURE 3.3: Greedy Routing
[30].

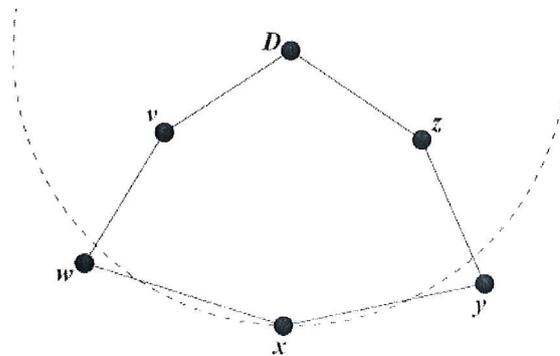


FIGURE 3.4: Échec du relais greedy, x est le plus proche de D
[30].

dernier consiste à tracer un graphe planaire voir figure 3.5. Ce graphe est constitué du véhicule qui possède le paquet et ses voisins. Aussi, il ne contient pas des arrêtes qui se croisent. Par la suite, le paquet traverse le graphe en utilisant la règle de la main droite "Right-Hand Rule". Cela est dans le but de contourner l'impasse et atteindre un voisin dont le chemin est le sens inverse des aiguilles d'une montre. 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 de routage greedy. Ceci est montré dans la figure 3.5, le "void" est la région où aucun nœud n'existe. Il est l'intersection de la plage circulaire de x et du cercle autour de D . Dans ce cas, les paquets vont dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Ainsi, le chemin d'accès à D va de x à w , puis de w à v et enfin de v à D . Ce type de routage fonctionne bien dans les scénarios d'autoroutes, mais dans un scénario de ville, il peut y avoir de nombreux obstacles. GPSR souffre de plusieurs problèmes. Tout d'abord, le routage greedy est souvent

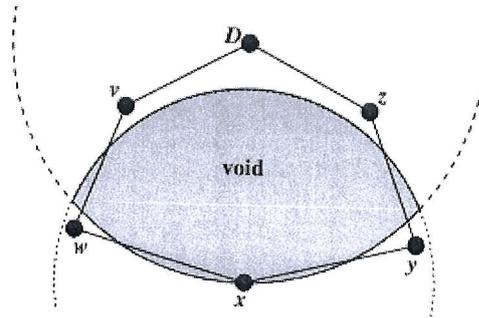


FIGURE 3.5: Application de Face routing [30].

restreint parce que les communications directes entre les nœuds peuvent ne pas exister en raison d'obstacles tels que les bâtiments et les arbres. Deuxièmement, si on applique d'abord le graphe planaire pour construire la topologie du routage et ensuite exécuter un routage greedy ou faces, la performance du routage se dégradera; les paquets doivent parcourir une trajectoire plus longue avec des délais plus longs. La figure 3.6 est un exemple de réseau VANET déconnecté lors de la première phase de planarisation du GPSR. Troisièmement, la mobilité peut également induire des boucles de routage lors d'utilisation de Face routing. Enfin, il arrive parfois que des paquets soient transférés dans la mauvaise direction, ce qui entraîne des retards plus importants ou même des partitions dans le réseau.

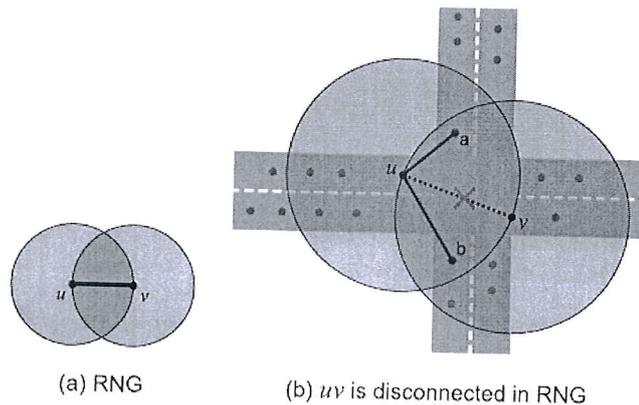


FIGURE 3.6: Graphe RNG [36].

3.2.2.2 GPCR

GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing) [40, 10, 30, 39] est un protocole de routage basé sur la position. C'est une amélioration du protocole GPSR. Il se repose sur le principe que les rues et les carrefours forment naturellement un graphe planaire. Donc, il ne nécessite aucun algorithme de planarisation et n'utilise aucune information globale ou externe comme les cartes géographiques urbaines. Ce protocole combine le routage Restricted Greedy Routing et une stratégie de recouvrement dans son processus de fonctionnement.

Restricted Greedy Routing

Si aucun optimum global n'est rencontré, une stratégie de transmission greedy est utilisée pour acheminer un paquet de données vers la destination. Comme les obstacles, par exemple les bâtiments, bloquent les signaux radio, les paquets de données devraient être acheminés le long des rues. Les jonctions sont les seuls lieux où sont prises les décisions d'acheminement. Par conséquent, les paquets doivent toujours être transférés vers un nœud sur une jonction. Ceci est illustré dans la Figure 3.7 où le nœud u veut transmettre un paquet de données à D . Si le routage régulier greedy est utilisé donc, u transférerait le paquet vers le nœud $1a$. Dans ce cas on tombe dans un optimum local. En utilisant le protocole GPCR le paquet est transféré au nœud $2a$ puis $2b$ et enfin atteindre la destination D . Alors c'est le chemin possible vers le nœud de destination D sans être bloqué dans un optimum local.

On appelle un coordinateur un nœud situé dans une zone de jonction. Son rôle est de diffuser des informations sur sa position pour informer ses voisins. Si le nœud veut acheminer un paquet et ce dernier est situé sur une rue et non sur une jonction, le paquet est acheminé le long de la rue à la jonction la plus proche. Pour ce faire, le nœud sélectionne les voisins dont les positions se rapprochent d'une extension de la ligne entre le prédécesseur du nœud relais et le nœud relais lui-même. Parmi ces voisins qualifiés, l'un d'eux doit être sélectionné comme prochain saut. Tant qu'il n'y a pas de voisins qualifiés qui sont des coordinateurs, le nœud ayant la plus grande distance au nœud relais est choisi. Si plusieurs coordinateurs sont qualifiés, un coordinateur est choisi au hasard comme prochain saut.

Ceci est illustré dans la figure 3.8, le nœud a reçoit un paquet du nœud b . Et comme a est situé sur une rue et non sur une jonction, il doit faire suivre le paquet le long de cette rue. En premier, les voisins qualifiés sont déterminés. Par la suite, il procède à une vérification pour examiner si l'un d'eux au moins est un coordinateur. Comme dans cet exemple, il y a trois nœuds de coordination qui

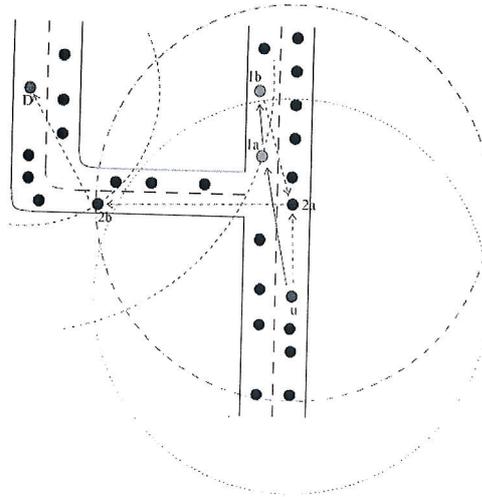


FIGURE 3.7: Routage greedy vs. Routage glacé restreint dans la zone de jonction [40].

se qualifient comme prochain saut. L'un de ces nœuds de coordination est choisi au hasard et le paquet lui sera envoyé. Cela se fait de manière greedy : le nœud voisin qui progresse le plus vers la destination est choisi.

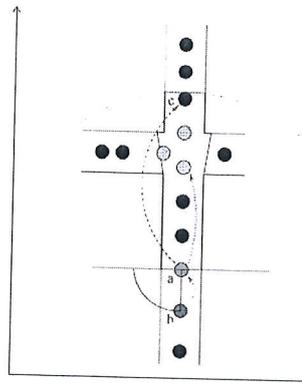


FIGURE 3.8: Montre que les nœuds coordinateurs sont préférés aux nœuds nœudn coordinateur

[40].

Stratégie de recouvrement ou Repair Strategy

Malgré l'amélioration de la stratégie de routage greedy, le risque qu'un paquet reste bloqué dans un optimum local demeure. Par conséquent, une stratégie de recouvrement est nécessaire. Le protocole GPCR utilise une stratégie de recouvrement de sorte à éviter la planarisation des graphes. En d'autres termes, la décision de routage est prise sur la base des rues et des jonctions au lieu des

nœuds individuels et de leur voisins (qui ne forment pas un graphe planaire naturel). Par conséquent, la stratégie de recouvrement du GPCR comprend deux parties. En premier, à chaque jonction, le choix de la rue qu'un paquet doit suivre est pris. En second, le routage greedy entre les jonctions est utilisé. Si le nœud coordinateur pour un paquet en mode recouvrement est situé sur une jonction, le nœud doit déterminer le chemin que le paquet doit suivre. À cette fin, la topologie de la ville est considérée comme un graphe planaire et la règle de la main droite est appliquée.

Le protocole GPCR présume que les nœuds de jonction doivent être déterminés

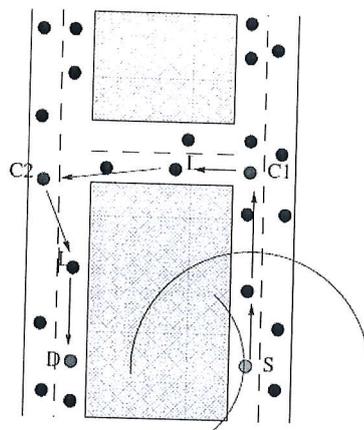


FIGURE 3.9: Application de la règle de la main droite dans le protocole GPCR [40].

et annoncés, ce qui peut entraîner une surcharge des collision et la perte de paquets. Par ailleurs, la reconnaissance d'un nœud de jonction défectueux, est extrêmement cruciale pour éviter les minimums locaux, et la réduction des sauts qui en résulte. Ainsi, le protocole est dépendant totalement des coordinateurs. Vu les inconvénients du protocole GPCR, le protocole GPSRJ+ a été proposé[8]. Ce protocole vise à améliorer les performances du protocole GPCR en contournant les limites susmentionnés. Cependant, une carte électronique est utilisée pour déterminer si un nœud est situé dans une jonction. Cela, réduit la surcharge de calcul et d'annonce. Pour remédier aux autres limites, GpsrJ+ prédit la direction de l'acheminement en acquérant des informations sur le saut suivant après le coordinateur. Si la direction de propagation ne change pas, le paquet traverse la jonction directement plutôt que d'être réexpédié par le coordinateur. Cela peut réduire le nombre de sauts et diminuer la dépendance au coordonnateur. Ainsi, GpsrJ+ améliore le débit de transmission des paquets de données et réduit de 200% la transmission périmétrique par rapport au protocole GPCR.

Néanmoins, GpsrJ+ considère la route comme une ligne droite, et résultant en un maximum de deux nœuds voisins dans le même segment de la route, et au maximum quatre nœuds voisins à un carrefour. Cette hypothèse n'est pas conforme à un environnement routier réaliste. De plus, il est non approprié pour les applications sensibles au retard.

3.2.2.3 GSR

GSR (Geographic Source Routing) [2, 39, 7] se base sur un mécanisme de routage basé sur la position parvenant des informations topologiques. Il est conçu spécialement pour le routage dans les milieux urbain. Il a été proposé afin de combler les faiblesses de certains protocoles de routage basés sur la position conçues pour les MANET mais appliquées aux VANET, telles que la déconnexion du réseau et les erreurs dues à l'utilisation d'Internet, les boucles d'acheminement et les véhicules circulant dans la mauvaise direction. Pour ce faire, il utilise une carte. À l'aide de cette carte de rues statiques, ainsi que les informations de localisation sur chaque nœud source et destination, GSR calcule un itinéraire vers la destination. Il transmet des messages le long des rues de cet itinéraire. En d'autres termes, le nœud expéditeur calcule une séquence de jonctions que le paquet doit traverser pour atteindre la destination, et ce en utilisant l'algorithme Dijkstra du plus court chemin. Cette séquence d'intersections peut être placée dans l'en-tête du paquet ou peut être décidée par chaque nœud relais. La transmission d'un paquet entre deux jonctions successives s'effectue sur la base d'un routage greedy car aucun 'obstacle' ne doit barrer la route. Lors du routage périmètre, le saut suivant est choisi uniquement sur la base de la règle de la main droite, même lorsqu'il existe des itinéraires alternatifs plus courts.

La figure 3.10, illustre la séquence des nœuds (S, A, B, C, C, E, F, D), qui représente le chemin de la source vers la destination choisit par le protocole GSR. Ce derniers utilise la technique store-and-forward pour les paquets qui sont piégés en raison du problème minimum local. L'inconvénient de GSR est que le chemin le plus court n'est pas le chemin optimal puisqu'il ne tient pas compte de la charge du réseau; la circulation des véhicules dans la rue. De plus, il utilise un mécanisme de sélection de jonction fixe où le nœud source calcule simultanément une séquence de jonctions que le paquet doit traverser pour atteindre la destination. Cela peut entraîner une sous-performance dans les réseaux hautement dynamiques, car le mécanisme de sélection de jonction doit

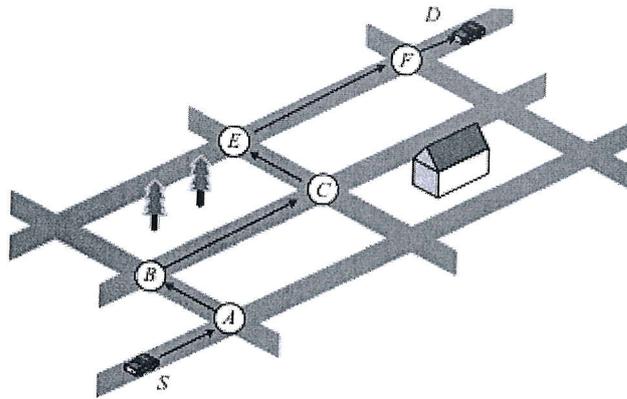


FIGURE 3.10: La séquence de jonction choisit par GSR [39].

être dynamique et baser sur le trafic de véhicules, la largeur de la route, le chemin le plus court et d'autres mesures.

3.2.2.4 CAR

CAR (Connectivity-Aware Routing) [46] est un protocole de routage basé sur la position qui se diffère des autres protocoles de cette famille par sa capacité de trouver la position de la destination et le chemin la connectant à la source. Il peut fonctionner dans un environnement urbain et/ou autoroutier. Ce protocole a été conçu spécifiquement pour la communication entre véhicules. Il comprend quatre phases principales :

1. La localisation de la destination et la découverte du chemin d'accès ;
2. La transmission des paquets de données le long du chemin trouvé ;
3. La maintenance des chemins à l'aide de gardes ;
4. La récupération d'erreur.

Dans le protocole CAR, tous les nœuds incluent dans les message beacons périodiques (HELLO-messages) des informations sur leurs directions et vitesses de déplacement. Lorsqu'un nœud reçoit un message HELLO, il ajoute l'expéditeur de ce message dans sa table des voisins. Par la suite, il évalue ses propres vecteurs de vitesse et ceux de ses voisins en définissant un délai d'expiration pour les entrées de sa table. L'entrée expire après un moment, où les positions estimées du nœud actuel et du voisin sont séparées.

Dans ce protocole, la méthode de diffusion en groupe est utilisée pour la

découverte de l'emplacement de la destination. Pour la découverte d'un chemin, n'importe quel nœud peut s'ajouter comme ancre ou jonction si son vecteur de vitesse est différent du nœud précédent. Après la découverte des chemins, CAR fait suivre les paquets en mode greedy sur le chemin ancré.

Cependant, pour entretenir les chemins, ce protocole introduit le concept de Garde. Le nœud de garde initial est appelé le nœud gardé et les voisins du nœud gardé sont appelés les nœuds de gardiennage. Deux types de garde sont utilisés dans CAR. Le premier est un garde debout qui est une composante du message Hello. Il contient aussi le vecteur de vitesse du nœud gardé et il est lié à une zone géographique. Le second est un garde mobile. Il contient le vecteur de vitesse, la position et le rayon du nœud gardé. Si un nœud final change de direction, il initie une garde permanente. Chaque fois qu'un nœud de garde reçoit un paquet de données pour un nœud gardé, il calcule son emplacement à l'aide du vecteur de vitesse et ajoute cette information dans l'en-tête du paquet. D'autre part, la protection de déplacement est utilisée lorsque le nœud gardé commence à se déplacer dans la direction opposée de la communication.

3.2.2.5 DIR

DIR (diagonal-intersection based routing) [13] est un protocole de routage géographique fondé sur l'intersection diagonale pour les réseaux VANET urbains. Ce protocole, construit un chemin de routage. Ce dernier est construit par une série d'intersections diagonales entre le véhicule source et de destination. Le véhicule source route le paquet de données vers la première intersection diagonale, puis la seconde intersection diagonale, et ce jusqu'à la dernière intersection diagonale pour enfin atteindre la destination. Pour deux intersections diagonales voisines, il existe deux sous-chemins disjoints ou plus.

La propriété du protocole DIR est le réglage automatique. Au fait, un réglage est possible lorsqu'un sous-chemin avec un retard faible, entre deux intersections voisines diagonales, est sélectionné de manière dynamique pour transmettre les paquets de données. Par ailleurs, le délai du routage des paquets peut être réduit car le paquet est automatiquement réacheminée par le sous-chemin sélectionné avec un délai plus court.

Les résultats expérimentaux montrent que le protocole DIR surpasse les solutions comparés en termes de taux de livraison des paquets, de délai de transmission des données et de débit.

3.2.2.6 GyTAR

GyTAR (greedy traffic aware routing protocol) [39, 2] est un protocole de routage géographique basé sur les intersections. Il fonctionne bien en milieu urbain. GyTAR suppose qu'un système de navigation est disponible. Par exemple le système GPS qui est système numérique global de carte routière. Entre autres, il exploite ces informations routières pour relayer les messages. Il suppose également que la position actuelle de la destination est connue à l'avance et que le véhicule a la capacité de maintenir la table de voisins en utilisant des paquets HELLO.

Sa stratégie de routage se compose de trois phases :

1. estimation de la densité du trafic en fonction du réseau ;
2. mécanisme de sélection d'intersection dynamique ;
3. amélioré un transport greedy entre deux carrefours.

Ces trois étapes rendent le protocole GyTAR robuste et avec capacité de s'adapter à un environnement urbain compliqué.

GyTAR divise chaque route en petites cellules fixes définissant un groupe. Il sélectionne le véhicule central de chaque groupe comme chef de ce dernier. Les informations sur la densité du trafic sont ensuite calculées par chaque chef du groupe et diffusées entre les différents groupes au moyen de paquets de densité cellulaire (CDP). Le CDP permet de collecter la densité d'une route donnée, dénommé $g(T_j)$. Cela permet aux véhicules chefs de groupe de collecter la densité du trafic d'une zone adjacente. Contrairement aux protocoles de routage GSR et A-STAR, où le nœud émetteur calcule statiquement une séquence d'intersections que le paquet doit traverser pour atteindre sa destination, les intersections intermédiaires dans GyTAR sont choisies dynamiquement et en séquence, et ce en considérant à la fois la variation de la densité du trafic véhiculaire et la distance à destination. Comme le montre l'exemple de la figure 3.11, il y a trois intersections possibles : J_1 , J_2 et J_3 .

Dans ce scénario, une fois que le véhicule source S reçoit un CDP, il calcule le score de chaque intersection voisine en utilisant la formule $Score(J) = \alpha f(D_j) + \beta g(T_j)$. On constate que l'intersection J_2 aura le score le plus élevé, compte tenu de la métrique de la distance de sa courbe jusqu'à la destination D_2 . Par conséquent, la densité de trafic T_2 . J_2 est alors choisie dynamiquement comme prochain point d'ancrage. Au fait, le premier facteur D_j est une mesure de la distance à la destination. Pour calculer le score de distance, la fonction suivante :

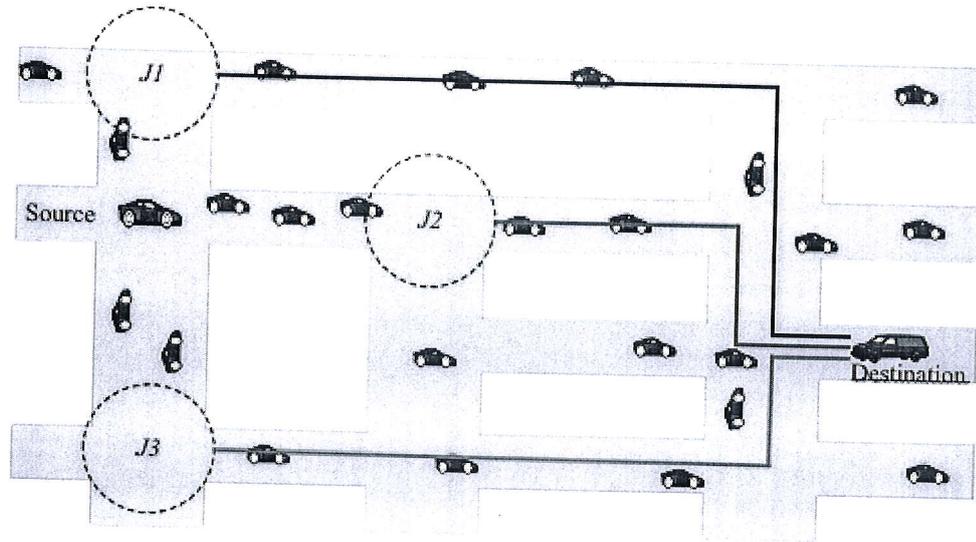


FIGURE 3.11: Les jonction sélectionnés par GyTAR [39].

$f(D_j) = 1 - D_p$ est utilisée, où D_p détermine la proximité de l'intersection candidate à la destination. Par conséquent, plus l'intersection potentielle J est proche, plus le paramètre D_p est important et plus la distance de score est élevée.

GyTAR montre une amélioration significative des performances mais il a aussi ses limites. GyTAR ne tient pas compte de la direction des véhicules dans le mécanisme de sélection des intersections. Or que la direction du véhicule est une considération essentielle puisqu'elle identifie les rues où la circulation automobile est la plus élevée.

3.2.2.7 DGR

DGR (Directional greedy routing) [8] est un protocole de routage basé sur la position pour la communication véhicule-véhicule fonctionnant dans un environnement ouvert. Il suppose la présence d'un service de localisation (GPS). Entre autres, les cartes statiques permettent d'acquérir facilement la position du véhicule de source et destination. Il présume également que chaque véhicule peut acquérir sa vitesse et sa direction grâce aux capteurs embarqués. Au fait, le protocole DGR utilise la direction du véhicule comme stratégie d'avance. Le saut suivant est sélectionné par la formule donnée ci-dessous :

$$w_i = \alpha(1 - D_i/D_c) + \beta \cos(\vec{V}_i, \vec{P}_{i,d})$$

où :

- D_i est la distance la plus courte entre le nœud i et la destination.
- D_c est la distance la plus courte entre la source et la destination.
- \vec{V}_i est le vecteur représentant la vitesse du nœud i - Le vecteur $\vec{P}_{i,d}$ représente la position du nœud i relativement à la destination.

La première partie de la formule $(1 - D_i/D_c)$ représente la proximité du véhicule par rapport à la destination. Tandis que les valeurs cos des deux vecteurs représentent la direction du mouvement du véhicule. Ici α et β sont les poids avec $\alpha + \beta = 1$.

Si on fixe la valeur de $\alpha = 1$ et $\beta = 0$, la méthode utilisée devient le routage greedy. Autrement, si on fixe la valeur de $\alpha = 0$ et $\beta = 1$, la méthode utilisée devient le routage directionnel, mais dans ce cas elle ne sélectionne pas le nœud qui est le plus proche de la destination. Afin de sélectionner le saut suivant approprié (le plus proche de la destination tout en se déplaçant dans la même direction), DGR peut ajuster la valeur de α et β pour satisfaire aux exigences des conditions environnementales ; Par exemple, régler α à 0, 1 et β à 0, 9.

3.2.2.8 PDVR

Le protocole PDVR (Position-based Directional Vehicular Routing) [63], suppose que les véhicules sont équipés de récepteurs GPS, et qu'ils peuvent acquérir une position et une vitesse précises. La grande mobilité des véhicules affectant la communication dans les réseaux VANET. Par conséquent, la stratégie d'expédition de PDVR combine deux stratégies pour sélectionner le saut suivant, et ce afin de s'assurer que les paquets peuvent être acheminés avec succès vers leur destination par des itinéraires efficaces et stables. Tout d'abord, le véhicule du prochain saut doit se déplacer dans la même direction que le véhicule source. Deuxièmement, le véhicule du prochain saut doit se trouver dans la direction générale de la destination. On suppose que le vecteur de direction de route est $R = rx\mathbf{i} + ry\mathbf{j}$, la position source est $S(sx, sy)$ et la position destination est $D(dx, dy)$. On peut obtenir $\vec{SD} = (dx - sx)\mathbf{i} + (dy - sy)\mathbf{j}$, alors on peut calculer l'angle α y compris

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{SD} \cdot \mathbf{R}}{|\vec{SD}| |\mathbf{R}|}$$

Si l'un des voisins du nœud source est $N(nx, ny)$, on peut obtenir, $\vec{SN} = (nx -$

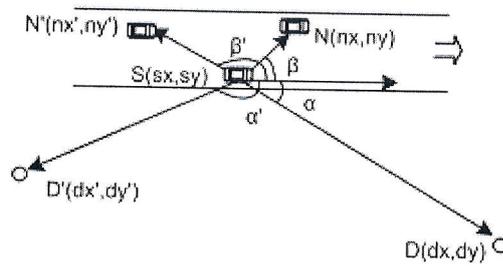


FIGURE 3.12: Sélection de saut prochain par PDVR.

$sx)\mathbf{i} + (ny - sy)\mathbf{j}$, alors on peut calculer l'angle β y compris.

$$\cos(\beta) = \frac{\overrightarrow{SN} \cdot \mathbf{R}}{|\overrightarrow{SN}| |\mathbf{R}|}$$

Le voisin ne sera sélectionné comme saut suivant que lorsque $\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \geq 0$. Par exemple, dans la figure 3.12, le véhicule N , et le nœud N' , est sélectionné comme saut suivant vers la destination D , car $\cos(\beta') \leq 0$ et $\cos(\alpha) \geq 0$; si la destination est D' le saut suivant sera N' , puisque $\cos(\alpha') \leq 0$, $\cos(\beta') \leq 0$, et $\cos(\beta) < 0$.

Par conséquent, selon le protocole PDGR [26], le nœud N est le nœud suivant approprié. Tandis que le nœud N' n'est pas approprié. PDGR essaie de maintenir un itinéraire stable et efficace en sélectionnant le véhicule suivant en fonction de la position de chaque véhicule voisin, de la direction du mouvement et de la position du nœud de destination.

Ainsi, PDGR offre d'excellentes performances sur une route droite. Cependant, bien que $f = |\beta - 90|$ soit pris comme valeur de seuil pour juger si les véhicules circulent dans la même direction ou non; une valeur f proche de zéro indique que les deux véhicules ne circulent pas dans la même direction. Néanmoins, les performances baissent avec des virages serrés, ce qui signifie que PDGR ne convient pas très bien en milieu urbain. En fait, PDVR n'est qu'une version étendue du protocole DGR. Chaque véhicule diffuse non seulement sa position, mais aussi la position de ses voisins à un seul saut. Par la suite, il utilise une stratégie de prédiction de direction ainsi que le routage greedy pour relayer les paquets vers leur destination. Le principal inconvénient du PDGR est la surcharge en termes de calcul et de diffusion des voisins.

3.2.2.9 Infrastructure-assisted geo-routing

Infrastructure-assisted geo-routing [9] est conçu pour bénéficier d'avantage d'infrastructure fixe, où les RSUs sont déployées pour rendre les communications véhiculaires plus fiables. En outre, pour réduire les retards non souhaités dans les différentes applications de véhicules, en particulier dans les applications de sécurité. Ces RSUs sont fixées et connectées les unes aux autres par une large bande et un réseau de base fiable.

Indépendamment de l'emplacement géographique des RSUs, les paquets de données seront envoyés d'une RSU vers d'autres RSU grâce à une bande passante large et à un réseau dorsal fiable (backbone).

Infrastructure-assisted geo-routing utilise le protocole de routage GSR, qui est essentiellement conçu pour les communications V2V, pour analyser les avantages potentiels de V2I par rapport aux communications V2V.

L'algorithme d'acheminement suppose la présence de cartes géographiques numériques et des serveurs de localisation. Il modifie le graphe de GSR de réseau existant en incluant les RSUs. Ainsi, un nœud d'un graphe peut être son point d'ancrage ou RSU. La distance entre deux nœuds consécutifs (poids) est calculée, ce qui permet au véhicule source de trouver le chemin le plus court vers le véhicule de destination en utilisant l'algorithme de Dijkstra. Toutes les unités RSUs peuvent être intégrées dans une unité appelée backbone gateway du fait qu'elles sont connectées au réseau backbone.

Dans le cas du GSR, le chemin le plus court est constitué du nœud 3 et du nœud 1, comme le montre la figure 3.13. Néanmoins, ce chemin n'est pas le chemin le plus court vers la destination, car les RSUs sont interconnectées par un réseau fédérateur fiable et peuvent être considérées comme une unité. En d'autres termes, ce n'est pas le chemin optimal. Un chemin optimal serait de passer par RSU-1 et RSU-2 qui est le chemin le plus court que celui qui traverse les nœuds 3 et 2. Mais le meilleur chemin, est montré dans la figure 3.13.(c) qui présente l'avantage d'une infrastructure fixe dont, les RSUs sont combinées en un seul nœud et le véhicule source envoie les paquets de données.

3.2.2.10 SADV

SADV (Static-Node-Assisted Adaptive Data Dissemination in Vehicular Networks) [17], est un protocole de routage basé sur la position qui vise à

peut mettre à jour sa matrice de retard sur la base de link delay update et, par conséquent, sélectionner le meilleur chemin disponible pour livrer le paquet.

- Diffusion par voies multiples : S'il n'est pas possible de calculer avec précision le délai entre les nœuds statiques, la diffusion de données multivoie est utilisée. Cette technique peut entraîner des frais généraux de réseau. Il est donc suggéré qu'il peut être utilisé si le réseau n'est pas fortement chargé.

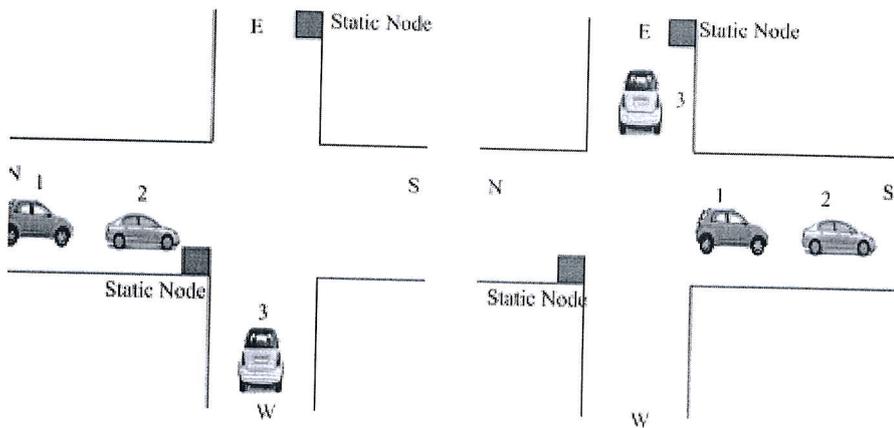


FIGURE 3.14: routage assisté par les nœuds statiques [33].

3.2.2.11 VADD

VADD (Vehicle-Assisted Data Delivery) [72] est fondé sur le principe du carry and forward. Il prend en considération le contexte des réseaux VANET et exploite le mouvement prévisible des véhicules, et ce pour prendre la décision de retransmettre ou non le message. Ce protocole permet de choisir un chemin de transmission avec le plus petit délai de livraison des paquets.

Bien que les approches de transmission géographique telles que le mécanisme greedy perimeter (GPSR), qui choisit toujours le saut le plus proche de la destination, soient très efficaces pour la transmission de données dans des réseaux ad hoc, elles peuvent ne pas convenir aux réseaux de véhicules peu connectés.

Comme le montre la figure 3.15, supposons qu'un conducteur s'approche de l'intersection I_a et envoie une demande au café (pour faire une réservation) à l'angle de l'intersection I_b . Mais si on transmet la demande par $I_a \rightarrow I_c$, $I_c \rightarrow I_d$, et $I_d \rightarrow I_b$ serait plus rapide que par $I_a \rightarrow I_b$, même si ce dernier fournit

géographiquement le chemin le plus court possible. La raison en est qu'en cas de déconnexion, le paquet doit être transporté par le véhicule, dont la vitesse de déplacement est nettement plus lente que la communication sans fil. Dans

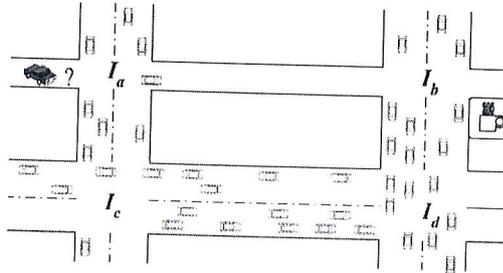


FIGURE 3.15: Trouver un chemin vers le café en utilisant le protocole VADD.

les réseaux peu connectés, les véhicules devraient essayer d'utiliser le canal de communication sans fil ou, sinon, de faire appel à des véhicules qui se déplacent plus vite. Ainsi, VADD suit les principes de base suivants.

1. Transmettre par les canaux sans fil, autant que possible.
2. Si le paquet doit être transporté sur certaines routes, il faut choisir la route la plus rapide.
3. En raison de la nature non prédictive des VANET, le paquet ne peut être routé avec succès le long du chemin optimal pré-calculé, donc la sélection dynamique du chemin doit être exécutée en continu tout au long du processus de transmission des paquets.

Comme le montre la figure 3.16, le protocole VADD a trois modes ; Intersection, StraightWay, et Destination. Ces modes sont basés sur l'emplacement du transporteur du paquet (c'est-à-dire le véhicule qui transporte le paquet). Un transporteur passe d'un mode un autre en prenant le meilleur chemin de transmission de paquets. Parmi les trois modes, le mode Intersection est le plus critique et le plus compliqué puisque les véhicules ont plus de choix à l'intersection.

3.3 Comparaison des protocoles de routage basé sur la position étudié

Après avoir étudié de nombreux protocoles de routage proposés dans la littérature pour les VANET, et dans le but de faire une récapitulation générale

Section 3.3 – Comparaison des protocoles de routage basé sur la position étudiés

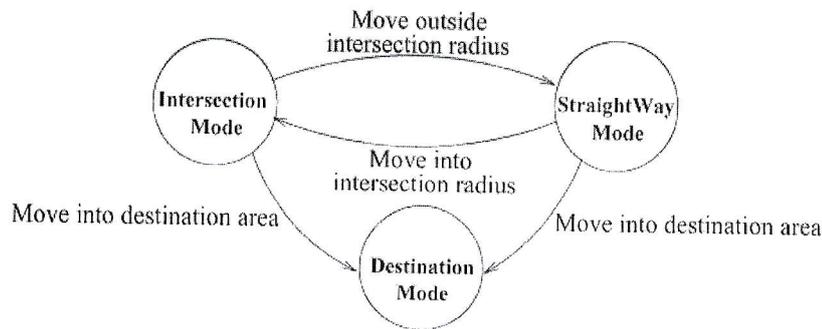


FIGURE 3.16: Trouver un chemin vers le café en utilisant le protocole VADD.

et de connaître les différents facteurs qui caractérisent les différents exemples des protocoles examinés, nous trouvons qu'une comparaison globale entre tous ces protocoles est nécessaire. La comparaison va concerner plusieurs métriques de réseau citées dans la section 3.2.1. Le tableau ci-dessous présente les résultats de cette comparaison.

- La majorité des protocoles utilisant la prédiction appartiennent à la classe Not DTN, et aussi Beacons. Ces les utilise pour acquérir des informations à partir de nœuds voisins comme la position, la densité du trafic, la direction et la vitesse. Cela permet aux protocoles de prédiction de sélectionner le meilleur chemin pour la transmission des paquets, ce qui peut améliorer considérablement la performance du protocole de routage.
- les protocoles qui utilisent les infrastructure pour le routage peuvent attribuer une fiabilité et donne un bon délai de livraison des paquets. Cela est grâce a la minimisation des sauts, qui résulte à une réduction de trafic importante et remarquable, et ce par rapport aux autres protocoles qui n'utilisent pas les infrastructures.
- La majorité des protocoles basés sur la position qui appartient a la classe DTN utilise la stratégie carry-and-Forward contrairement aux protocoles Not DTN qui utilise la stratégies gourmande et ces variantes advanced, improved , directional, predictive directional, sauf restricted qui est utilisé lors d'utilisation des jonctions.
- Certains protocoles de routages ont des stratégies de ré-acheminement qu'ils utilisent lors de l'échec de la stratégie préalable, tel que GPSR, GPCR.

3.4 Conclusion

On distingue dans la littérature plusieurs protocoles de routage basé position. Dans ce chapitre, on a étudié et détaillé quelques type de protocole de routage basé position ou on a remarque que chacun d'eux a des avantages et des inconvénients en terme de métrique de performances qui mesure la robustesse du protocole. D'après cette étude on a pu constater qu'il n'existe pas de protocole meilleur que les autres mais certains sont adaptés que d'autre suivant les situations ainsi que la conception d'un protocole de routage efficace pour toutes les applications VANET, est une tâche très complexe, car il faut prendre en considération plusieurs critères. Parmi les critères les plus considérés dans les VANET sont, le taux de paquets délivré, le débit et le cout de routage, qu'on tente à améliorer par différentes techniques, comme l'algorithme de filtre de Kalman étendu, qu'on va entamer dans le chapitre suivant.

EKF-GPSR : Un protocole de routage basé sur la position pour les VANET

4.1 Introduction

Le routage dans les réseaux véhiculaires nécessite des informations précises de localisation des véhicules voisins. En outre, l'exactitude de la position des voisins peut affecter le rendement des protocoles de routage dans ces réseaux. Cependant, vu la grande dynamique des VANET, les données de localisation deviennent rapidement caduques et fausses. Pour cela nous avons besoin d'un mécanisme pour les maintenir à jour. La solution la plus simple consiste à augmenter la fréquence d'échange des message Hello entre les véhicules. Malheureusement, cette solution occupe considérablement le canal de communication et, par conséquent, peut engendrer un grand nombre de collisions. Ceci nous a amené à proposer un nouveau protocole de routage EKF-GPSR (Extended Kalman Filter Greedy Perimeter Stateless Routing), qui est une amélioration du protocole GPSR. Notre protocole utilise les filtres de Kalman dans son processus de prédiction et exploite aussi les informations de positions des véhicules, tout en essayant de garantir la livraison des paquets et offrir des performances en termes de cout et débit.

Dans la première partie de ce chapitre on va présenter un aperçu sur les filtres

de Kalman. Nous exposerons certaines définitions de base et nous décrirons leur variante, à savoir les filtres de Kalman étendus.

La deuxième partie de ce chapitre sera dédiée à une description détaillée de notre protocole géographique proposé ; EKF-GPSR. Nous commencerons par la définition de son fonctionnement en expliquant les différentes étapes réalisées durant sa conception et l'introduction des filtres de Kalman étendus dans son processus. Par la suite, nous présenterons une analyse des résultats obtenus dans les différents scénarios de simulation pour évaluer ses performances.

4.2 EKF-GPSR : un nouveau protocole de routage basé sur la position pour les VANET

Cette section est composée de deux parties. Dans la première, les filtres de kalman et leur variante seront détaillés. La seconde partie porte sur le principe de fonctionnement du protocole proposé EKF-GPRS. Le détail de chaque partie est donné dans le reste de cette section.

4.2.1 Outils de modélisation

Dans un réseau VANET, il est nécessaire de prédire correctement et rapidement la mobilité et les prochaines positions des véhicules pour assurer une découverte efficace des voisins. Pour cela, la variante des filtres de Kalman est utilisée dans la conception et la modélisation du nouveau protocole proposé EKF-GPRS. Au fait, les filtres de Kalman permettent de décrire la relation entre les états actuels et futurs. Par conséquent, l'algorithme de prédiction de Kalman est développé sur la base du processus d'estimation récursif [25]. En d'autres termes, pour estimer l'état courant d'un système, l'estimation de l'état précédent et des mesures actuelles sont nécessaires. Néanmoins, certains systèmes sont difficilement modélisables et encore moins linéaires. En général, si la modélisation est trop approximative, le filtre de kalman n'est pas assez performant et ne convergera pas assez rapidement, provoquant alors un temps de calcul trop important. Cependant, les filtres de Kalman étendus ont été développés afin de prendre en compte les modélisations non linéaires.

4.2.1.1 Les filtres de Kalman (KF)

Un filtre de Kalman [38] est un modèle stochastique récursif efficace qui estime l'état d'un système dynamique linéaire à partir d'une série de mesures bruyantes. Il est utilisé dans divers domaines liés au traitement du signal, radar et des images. Le filtre est essentiellement un ensemble d'équations mathématiques et des modèles spatiaux pour implémenter un estimateur de type prédicteur-correcteur. Le principal objectif du filtre de Kalman consiste à résoudre un ensemble d'équations mathématiques pour le vecteur d'état inconnu avec une méthode optimale qui minimise la covariance d'erreur estimée. Ce dernier a deux vecteurs importants, le vecteur d'état présenté par l'équation 4.1 et le vecteur de mesure présenté par l'équation 4.2, inclus dans le filtre de Kalman. Soit X_t le vecteur d'état, qui est l'ensemble minimal de données pour décrire le comportement dynamique du système.

$$X_{t+1} = A_t X_t + w_t \quad (4.1)$$

où A_t est la matrice de transition d'état au moment t . Le bruit de processus w_t est une distribution gaussienne avec une moyenne nulle, et la matrice de covariance Q peut être obtenue par analyse empirique.

$$Z_t = H_t X_t + u_t \quad (4.2)$$

où Z_t est le vecteur de mesure au moment t . Le paramètre H_t est la matrice de mesure. Le bruit de mesure u_t est supposé être une distribution gaussienne avec une moyenne nulle et une matrice de covariance R . Comme Q , le paramètre R peut aussi être obtenu par analyse empirique.

4.2.1.2 Les filtres de Kalman étendus (EKF)

Comme décrit dans la section 4.2.1.1, un filtre de Kalman aborde le problème général d'estimation d'un système à temps discret, qui est régi par une équation de différence stochastique linéaire. Mais que se passe-t-il si le système à estimer et (ou) la relation de mesure avec le système est non linéaire. Cependant, EKF est conçu pour fonctionner avec le système non linéaire. Ce dernier peut être utilisé dans le processus de prédiction dans un réseau VANET. Au fait, EKF est conçu sur la base de filtre de Kalman KF pour un système non linéaire. Puis, EKF a

linéarisé le système non linéaire, et ce en utilisant la différenciation partielle qui donne la matrice jacobienne à utiliser dans le calcul pour estimer l'état actuel du système.

Les modèles de processus et de mesure du système non linéaire utilisés avec l'EKF sont définis dans les équations 4.5 et 4.4, qu'on va détailler dans le reste de ce paragraphe.

A. Modèle d'évolution et modèle d'observation

Dans le filtre de Kalman étendu[28], l'état du système est représenté par un vecteur d'état X_t . Ce dernier représente l'ensemble minimal des données décrivant le comportement dynamique du système (la position et le statut de la mobilité). Six états du système sont nécessaires : la position géographique courante du nœud x et y , sa vitesse ainsi que l'accélération projetée sur les axes x et y . Le vecteur d'état X à l'instant t est illustré ci-dessous par l'équation 4.3 :

$$X_t = (x_t, y_t, vx_t, vy_t, ax_t, ay_t)^T \quad (4.3)$$

Où :

- x_t et y_t sont les positions géographiques à l'instant t ;
- vx_t et vy_t sont les vitesses projetées à l'instant t ;
- ax_t et ay_t sont les accélérations projetées à l'instant t .

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

$$z_t^- = f(\hat{x}_{t-1}^-, v_t) \quad (4.4)$$

B. Déroulement du filtre de Kalman étendu

Les étapes de calcul impliquées dans EKF pour la prédiction des positions dans un réseau VANET sont expliquées comme suit :

- **Étape d'initialisation** : Cette étape consiste à initialiser les valeurs initiales du vecteur d'état \hat{X}_0 et la matrice de covariance d'erreur P_0 .
- **Étape de prédiction** : Dans cette étape, on estime l'état futur $t + 1$ en se basant sur la connaissance de processus de mesure. Cette estimation est

appelée l'estimation à priori donnée par les équations 4.6 et 4.5.

$$\hat{x}_t^- = f(\hat{x}_{t-1}^-, u_t, w_t) \quad (4.5)$$

La matrice de covariance à priori qui estime la covariance d'erreur du système, est donnée par la formule suivante :

$$P_t^- = F_t P_{t-1} F_t^T + W_t Q_t W_t^T \quad (4.6)$$

- **Étape de correction :** Le but de cette partie consiste à mettre à jour l'estimation à priori de l'état à l'aide des mesures courantes observées et obtenir l'estimation posteriori. La première étape dans cette phase est de calculer le gain de Kalman K_t à ce moment-là. K_t est variable comprise entre $[0, 1]$, son rôle est très important, il consiste à trouver le niveau de confiance que nous pouvons apporter au modèle. Par exemple, s'il n'y a pas de bruit et que le paramètre $K_t = 0$, le filtre de Kalman aura une grande confiance et il attachera moins d'importance aux mesures du GPS. K_t est donnée par la formule 4.7.

$$K_t = P_t^- H_t^T (H_t P_t^- H_t^T + V_t + R_t V_t^T)^{-1} \quad (4.7)$$

Dès que la nouvelle valeur d'observation (mesure GPS) z_t est connue, l'estimation posteriori est calculée, en utilisant 4.7. La mise à jour de l'état estimé est dérivée selon l'équation 4.8.

$$\hat{x}_t = \hat{x}_t^- + K_t(z_t - h(\hat{x}_t^-, v_t)) \quad (4.8)$$

Dès 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 4.9

$$P_t = (I - K_t H_t) P_t^- \quad (4.9)$$

Comme EKF est une forme étendue de KF, la plupart des termes sont similaire à KF, comme expliqué dans la sect.4.2.1.1 à l'exception de F_t , W_t , H_t et V_t dans les équations 4.6 et 4.7 respectivement qui sont la matrice jacobienne définies comme suit :

$$F_t = \frac{\delta f(\hat{x}_{t-1}^-, 0, 0)}{\delta x} \quad (4.10)$$

$$W_t = \frac{\delta f(\hat{x}_{t-1}^-, 0, 0)}{\delta w} \quad (4.11)$$

$$H_t = \frac{\delta h(\hat{x}_{t-1}^-, v_t)}{\delta x} \quad (4.12)$$

$$V_t = \frac{\delta t(\hat{x}_{t-1}^-, v_t)}{\delta v} \quad (4.13)$$

Où F_t^T , H_t^T , W_t^T , V_t^T sont les transpositions de F_t , H_t , W_t , V_t . La matrice jacobienne F_t est calculée sur la différenciation partielle de $f(\hat{x}_{t-1}^-, 0, 0)$ par rapport à \hat{x}_{t-1}^- comme indiqué à l'équation 4.14.

$$\frac{\delta f}{\delta x} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \frac{\delta f_1}{\delta x_2} & \frac{\delta f_1}{\delta x_3} & \cdots & \frac{\delta f_1}{\delta x_6} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} & \frac{\delta f_2}{\delta x_2} & \frac{\delta f_2}{\delta x_3} & \cdots & \frac{\delta f_2}{\delta x_6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta f_6}{\delta x_1} & \frac{\delta f_6}{\delta x_2} & \frac{\delta f_6}{\delta x_3} & \cdots & \frac{\delta f_6}{\delta x_{6n}} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Cependant, les variables F , H , W , V 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.

Cependant, les variables F , H , W , V 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 Δt secondes, les variables F , H , Q , R et P peuvent être initialisées comme suit :

$$F_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$V_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_t = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$R_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2.2 Fonctionnement du protocole proposé EKF-GPSR

EKF-GPSR est une modification du protocole de routage géographique GPSR en intégrant l'algorithme du filtre de Kalman étendu dans son processus de routage. Notre solution consiste à utiliser les informations qui sont disponibles via GPS mais qui n'ont pas été exploitées par GPSR, telle que la direction et la vitesse des véhicules. Ainsi, notre protocole EKF-GPSR s'exécute sur deux grande phases : la prédiction des positions et le routage des données.

4.2.2.1 La phase de prédiction

Au début tous les véhicules vont échanger des messages Hello qui contiennent l'adresse, la position courante, la vitesse et l'accélération sur les deux axes x et y comme illustré dans le tableau 4.1.

Le tableau de voisinage de chaque véhicule doit contenir l'adresse du véhicule voisin, les coordonnées géographiques x , y , son vecteur d'état de Kalman étendu X_t , et l'instant de réception du dernier message Hello $T_{Reception}$ comme illustré dans le tableau 4.2.

Adresse de véhicule	position de véhicule	vitesse de véhicule	accélération de véhicule
Adresse	X, Y	V_x, V_y	a_x, a_y

TABLE 4.1: Format de message Hello

Les coordonnées géographiques des véhicules sont mis à jour lors de la réception d'un message Hello ou après la fin de la phase de prédiction.

Adresse de voisin	position de voisin	Vecteur d'état de voisin	Temps de récupération du message Hello
Adresse	X, Y	$X = (x, y, v_x, v_y, a_x, a_y)$	$T_{Reception}$

TABLE 4.2: Format de la liste des voisins du protocole EKF-GPSR

A. Initialisation

Dans le protocole EKF-GPSR, au début tous les véhicules échangent les informations courantes du réseau en utilisant des messages Hello qui sont illustrés par le tableau 4.1. Grâce à ces derniers les véhicules informent leurs voisins immédiats de leur position ainsi que leur vitesse courante.

Lors de la réception d'un message HELLO, le véhicule récepteur crée une entrée (le format des entrées est illustré dans la table 4.2) dans sa table de voisinage et initialise l'adresse, la position courante, l'instant de réception de message et initialise le vecteur d'état de Kalman (position, vitesse et accélération).

B. Gestion de la mobilité des véhicules voisins

Vu la forte mobilité des nœuds dans un réseau VANET, où ils changent de position entre chaque intervalle de temps (entre deux messages Hello), donc les informations enregistrées précédemment dans la table de voisinage seront périmées. En utilisant le processus de prédiction du filtre de Kalman étendu dans notre protocole EKF-GPSR, les changements et les déplacements des véhicules voisins sont suivis d'une manière récursive en prédisant leur état courant X_t à chaque période t (tel que t est beaucoup plus inférieur à la durée entre deux messages Hello). Par conséquent, la mobilité des voisins est suivie et les listes des voisins sont mises à jour régulièrement (chaque instant t).

Par ailleurs, l'état courant est prédit en se basant sur l'état précédent X_{t-1} qui a été prédit de la même façon à $(t - 1)$, et ce en utilisant l'équation 4.5.

Par la suite, la matrice de covariance d'erreur est prédite en utilisant l'équation 4.6.

Grâce à ces prédictions, chaque véhicule peut suivre et reconstruire une vue en temps réel de la topologie de son voisinage.

En d'autres termes, à chaque itération de prédiction t , le véhicule expéditeur estime l'état courant de ses voisins en utilisant l'état précédent estimé. Quand il veut transmettre des paquets de données dans la phase de routage, il utilise les positions prédites (les plus récentes) au lieu d'utiliser les informations précédentes des derniers messages Hello qui sont fort probablement caduques, par conséquent, le problème des informations périmées des voisins est traité.

C. Correction et mise à jour de l'estimation

- ✓ Après chaque réception de message Hello, donc les prochaines mesures réelles des véhicules voisins sont collectées, il prédit l'état courant de ces voisins (à t) en utilisant l'équation 4.5 comme il est déjà expliqué dans la section précédente.
- ✓ Comme 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 4.7, chaque véhicule calcule le gain de Kalman K pour chacun de ses voisins.
- ✓ Enfin, en exploitant les mesures des données, l'état courant prédit et le gain de Kalman, nous mettons à jour la prédiction de l'état et la covariance d'erreur en utilisant respectivement les équations 4.8 et 4.9.

Comme on a mentionné précédemment, les mesures des données et le gain de Kalman sont utilisés pour la quantité d'information à apporter lors de la correction de l'estimation d'état. Ce qui signifie que ces valeurs corrigent de façon optimale la prédiction.

4.2.2.2 La phase de routage des données

L'acheminement des paquets par notre nouveau protocole EKF-GPSR se fait selon deux modes de routage, et en fonction de la densité du réseau. Ces modes sont le mode greedy (utilisé par défaut), et le mode périmètre (utilisé lorsque le mode par défaut échoue) comme dans le protocole GPSR (voir section 3.2.2.1). Néanmoins, lors du mode greedy notre protocole fait intervenir les nouvelles



Algorithm 4.1 Présentation d’algorithme des deux phases adaptées du filtre de Kalman étendu

Entrée : Les informations reçues des messages HELLO

Sortie : L’estimation de l’état courant

Phase de prédiction

- 1: Début de prédiction
- 2: Réception des premiers messages HELLO de la part du voisinage
- 3: Initialisation de X_t
- 4: **for** Chaque cycle $t < T_{simulation}$ **do**
- 5: Estimer le vecteur d’état futur X_{t+1} en se basant sur l’état courant X_t
- 6: Estimer la matrice de covariance d’erreur futur P_{t+1}^- en se basant sur la matrice de covariance d’erreur courante.
- 7: Mettre à jour les anciennes informations par les nouvelles valeurs estimées dans la table de voisinage.
- 8: **end for**
- 9: Fin de prédiction

Phase de correction

Début de correction

for Chaque Message Hello reçu et $t < T_{simulation}$ **do**

Recevoir les mesures $(X, Y, V_x, v_y, A_x, A_y)t$

Utiliser les valeurs des étapes 6 pour calculer le gain de Kalman.

Utiliser les valeurs des étapes 5 et 13 pour mettre à jour le vecteur d’état X_{t+1}

Utiliser les valeurs des étapes 6 et 13 pour mettre à jour l’erreur de covariance P

Mettre à jour la table de voisinage.

end for

Fin de correction

valeurs obtenues dans la phase de prédiction, lors du processus de choix du prochain saut le plus proche de la destination. Ainsi, notre protocole EKF-GPSR, à l'instar du protocole GPSR, utilise les positions prédites (les plus récentes) au lieu d'utiliser les informations précédentes des messages Hello et qui ne sont pas mis à jour dans son processus greedy. Entre autres, ces informations de positions prédites sont aussi utilisées dans le mode primètre de notre protocole EKF-GPSR.

4.3 Évaluation des performances par simulation

La simulation est la méthode d'évaluation des performances la plus utilisée dans le domaine des réseaux sans fil et VANET particulièrement. Elle est largement utilisée pour évaluer les nouvelles architectures et protocoles de communication, car elle permet de tester à moindre coût ces nouveaux protocoles et d'anticiper les problèmes qui pourront surgir durant leur implémentation réelle.

4.3.1 Environnements de simulation

Plusieurs simulateurs de réseaux ont été développés tel que : NS2, OMNET++, OPNET, JSIM, etc. Dans ce qui suit, nous allons les décrire.

NS-2

NS-2 [48] est un simulateur gratuit et open-source à événements discrets 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 pour inclure :

- (a) la mobilité des nœuds,
- (b) une couche physique réaliste avec un modèle de propagation radio,
- (c) des interfaces de réseau radio,
- (d) le Protocole MAC (IEEE802.11).

En raison de son modèle libre qui nous permet l'ajout rapide des modèles correspondants à des technologies émergentes, ce dernier est considéré par beaucoup de spécialistes des télécommunications permis les meilleurs logiciels de simulation par événements discrets. C'est un outil destiné à la recherche

académique et dans l'industrie et aux simulation des protocoles TCP, de routage et de multidiffusion sur les réseaux câblés et sans fil (locaux et satellite). 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.

OPNET

OPNET (Optimized Network Engineering Tools) [44], est un simulateur de réseau à événement discret proposé pour la première fois par le MIT en 1986. C'est un outil permettant de simuler le comportement et les performances de tout type de réseau. La principale différence entre Opnet Network Simulator et les autres simulateurs réside dans sa puissance et sa polyvalence. OPNET dispose d'un environnement de développement interactif permettant la conception et l'étude des réseaux, leurs protocoles et leurs applications. Le développement s'effectue en C++, au travers de l'interface du logiciel.

J-SIM

J-SIM [4] est un environnement de simulation à événements discrets, open source. Il est basé sur une architecture de composants autonomes et développé en Java. Il utilise TCL pour la mise en place des scénarios de simulation.

OMNET

OMNET++ [1] est un simulateur open source dont son développement a commencé en 1992 par Andras Vargas à l'université de Budapest. Il est utilisé pour la simulation des événements discrets. OMNET++ représente une bibliothèque écrite en C++ permettant de faire des simulation non seulement des réseaux filaires et sans fils mais aussi la modélisation des protocoles de de communication

et des systèmes réparties, les architectures hardware, etc. En général il peut être utilisé pour n'importe quel système à événement discrets avec des entités communiquant par envoi de messages. Parmi ses fonctionnalités le soutien pour les réseaux de capteurs, les réseaux ad-hoc sans fil, des protocoles internet, la modélisation des performances.

Un modèle OMNET++ se compose de modules hiérarchiquement imbriqués communiquant par envoi de messages à travers des ports (gates). Il ya deux types de modules : simples et composés.

- **Modules Simples** : ce sont les modules au niveau le plus bas de la hiérarchie du module, ils sont écrits en C++.
- **Modules Composés** : ils sont composés de simples modules ou d'autres modules composés connectés entre eux. Le modèle entier, appelé réseau OMNET++, est lui même un module composé.

Cependant, la conception d'un réseau se fait dans un fichier *.ned*, les différents paramètres de chaque module sont spécifiés dans un fichier *.ini*. OMNET++ génère à la fin de chaque simulation deux nouveaux fichiers *omnet.vec* et *omnet.sca* qui permettent de tracer des courbes et calculer des statistiques.

4.4 Métriques d'évaluation d'un protocole de routage

Afin de concevoir et d'évaluer les performances d'un protocole de routage, plusieurs paramètres sont à prendre en compte. Ce sont les métriques d'environnement et de performances, ainsi que le modèle de propagation et le modèle de trafic. Cette section va les détailler.

4.4.1 Les métriques d'environnement

Les métriques d'environnement sont les paramètres qui définissent le contexte dans lequel les véhicules circulent, ainsi que les éléments qui caractérisent leurs déplacements [65]. Cela prend en compte :

1. Le type de route (ville, autoroute, campagne);
2. Les obstacles au déplacement des véhicules (par exemple les arrêts ou les feux de circulation);

3. Les différents obstacles présents dans l'environnement de simulation (par exemple les bâtiments ou le paysage);
4. Les paramètres de déplacement des véhicules (comme leur vitesse, leur accélération et décélération, les limitations de vitesse, ou encore la densité de véhicules);
5. Les distances entre les véhicules;
6. Les paramètres de sécurité (par exemple la décélération maximum et la distance d'arrêt d'un véhicule en cas d'urgence);
7. Les obstacles mobiles : un véhicule peut faire obstruction à la communication entre deux autres véhicules. Ces différentes métriques d'environnement sont des paramètres dont certains peuvent être fixés pour toutes les simulations (comme le type de route ou les obstacles fixes) ou choisis pour chaque simulation (le nombre de véhicules et la vitesse de déplacement des véhicules par exemple). Le point 7, lui, ne peut pas être fixé. C'est un paramètre à prendre en compte lors des simulations.

4.4.2 Les métriques de performance

1. **Le taux de livraison des paquets avec succès, ou Packet Delivery Ratio (PDR) :**

Le PDR [56] est le rapport entre le nombre de paquets reçus par le nœud destinataire et le nombre de paquets envoyés par le nœud source. Il est toujours compris entre 0 et 1.

$$PDR = \frac{1}{C} \sum_{i=0}^C \frac{\text{nombre de paquets reçu}}{\text{nombre de paquets envoyés}} \quad (4.15)$$

où C : nombre de paires Source-Destination ayant communiqué.

2. **Le débit (Throughput) ou la bande passante :**

Le débit [56] est la quantité d'informations transmises via un canal de communication selon un intervalle de temps donné. En d'autres mots, c'est le rapport entre la quantité d'information transmise et le temps nécessaire à leur transmission

$$\text{Débit} = \frac{\text{Taille du paquet}}{t_{\text{reception}} - t_{\text{émission}}} \quad (4.16)$$

3. Le cout de routage normalisé ou Normalized Routing Overhead (NRO) :

Le NRO [56] permet d'évaluer la bande passante. C'est le ratio entre le nombre de paquets de contrôle transmis par rapport au nombre de paquets de données reçues :

$$\rho = \frac{\sum_{i=0}^c C_i}{\sum_{i=0}^c C_i + \sum_{i=0}^c D_i} \quad (4.17)$$

où C_i (resp. D_i) est le $i^{\text{ème}}$ paquet de contrôle (resp. de données).

4.5 Paramètres de simulation

Ci-dessous un tableau résumant les paramètres de simulation utilisés dans nos différents scénarios afin de comparer notre protocole EKF-GPSR par rapport au protocole GPSR.

Paramètre	Valeur
Dimension de la zone simulée	5000*4000
Nombre de nœuds	2,50,100,150,200
Taille des paquets	1000 bit
Protocoles de routage	GPSR et EKF-GPSR
Durée de simulation	100 s
Nombre de simulations	10 exécutions
Nombre de connexion	1 à 16 connexions
Modèle de propagation	Free space model
Modèle de mobilité	VeinsInetMobility, LinearMobility
Vitesse	10,20,...,80 mps

4.6 Les résultats de simulation

Dans cette section nous allons présenter et analyser les résultats de simulation obtenus suivant les métriques de performances décrites précédemment :

4.6.1 Scénario 1 : Évaluer de la Densité

Dans cette série de simulation on va varier le nombre de véhicules dans le réseau de 2 jusqu'à 200 véhicules, tout en gardant la même portée et vitesse.

- Taux de paquets reçus avec succès (PDR)

Dans cette partie, nous étudions le PDR qui est défini par le rapport entre le nombre de données reçues et celui des données envoyées (voir l'équation 4.15). Grâce à cette métrique, il est possible de révéler la fiabilité du protocole.

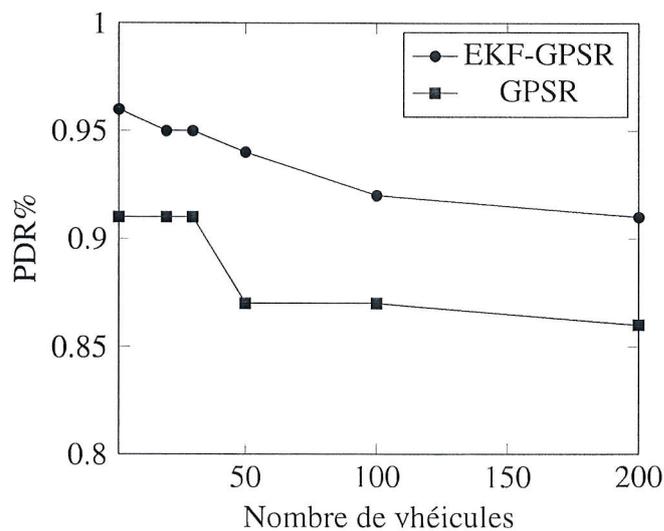


FIGURE 4.1: PDR

Dans le graphique 4.1, nous remarquons que le taux de paquets reçus diminue avec l'augmentation de la densité du réseau. Cependant, celui de EKF-GPSR est bien meilleur que le taux marqué par le protocole GPSR (une amélioration de 10%). Ceci peut se justifier par l'efficacité du filtre de Kalman étendu utilisé par notre protocole EKF-GPSR qui offre une prédiction permettant de réduire considérablement le nombre de messages HELLO échangés, par rapport à ceux communiqués dans le protocole GPSR.

- Débit

Comme le débit est défini par le flux ou la quantité de données traversant un canal de communication par unité de temps (voir l'équation 4.16). Ce paramètre repose sur trois contraintes qui sont la taille des paquets de données, le nombre de sources de trafic et l'efficacité du protocole en termes de PDR. Donc le débit est proportionnel au PDR, c'est à dire que les protocoles qui ont un PDR élevé ont automatiquement un débit élevé. Contrairement, aux protocoles à faible PDR qui auront un faible débit.

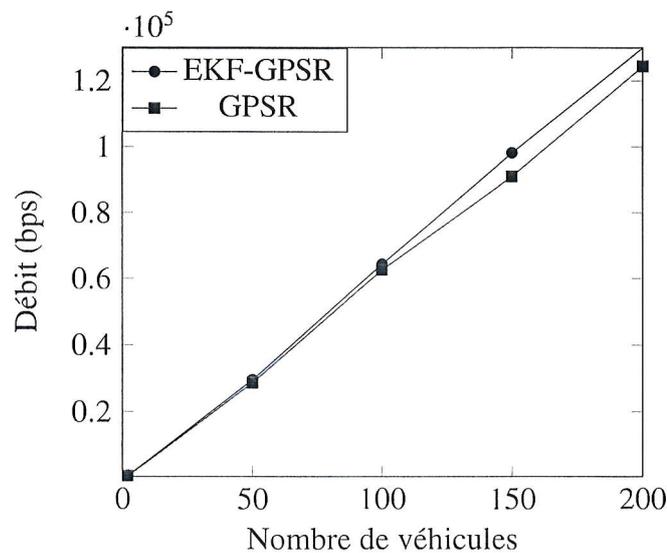


FIGURE 4.2: Débit

En fait, on constate d'après le graphe 4.2 que notre protocole EKF-GPSR permet d'améliorer le débit d'environ $0.07 \cdot 10^5$ bits par rapport au protocole GPSR, et ce malgré l'accroissement de nombre de véhicules dans le réseau. Ces résultats confirment l'hypothèse mentionnée précédemment concernant l'efficacité du mécanisme de prédiction basé sur les EKF pour minimiser la quantité des messages Hello échangés entre les véhicules.

- Cout

Dans la figure 4.3, nous notons que le cout de routage augmente dans les deux protocoles EKF-GPSR et GPSR en augmentant le nombre de véhicules de le réseau. Cela s'explique par le fait que, l'accroissement du nombre de véhicules

engendre une augmentation dans le nombre de messages Hello et par conséquent un accroissement dans les valeurs du coût.

Cependant, nous remarquons que le coût de routage est bien meilleur dans

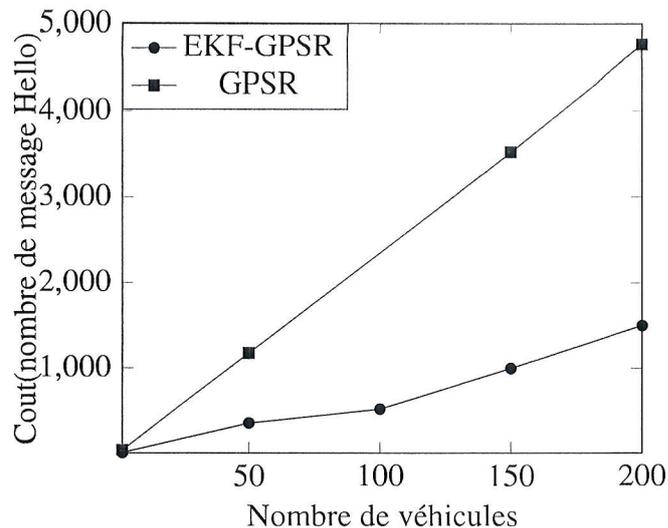


FIGURE 4.3: Coût

notre protocole EKF-GPSR par rapport au protocole GPSR. Cela est grâce au mécanisme de prédiction introduit dans notre protocole où les prédictions sont réalisées entre deux messages Hello consécutives. Ainsi, un allongement de cette durée est offert, à l'inverse du protocole GPSR qui échange des messages Hello d'une manière plus fréquente.

4.6.2 Scénario 2 : Évaluation de la Vitesse des véhicules

Dans cette série de simulation on va varier la vitesse des véhicules dans le réseau de 10 jusqu'à 80 mais en gardant la même portée et densité. On a fixé le nombre de véhicules dans le réseau à 100 véhicules.

- Taux de paquets reçus avec succès (PDR)

En observant la figure 4.4, nous remarquons que le PDR diminue avec l'augmentation de la vitesse dans les deux protocoles EKF-GPSR et GPSR. Cela

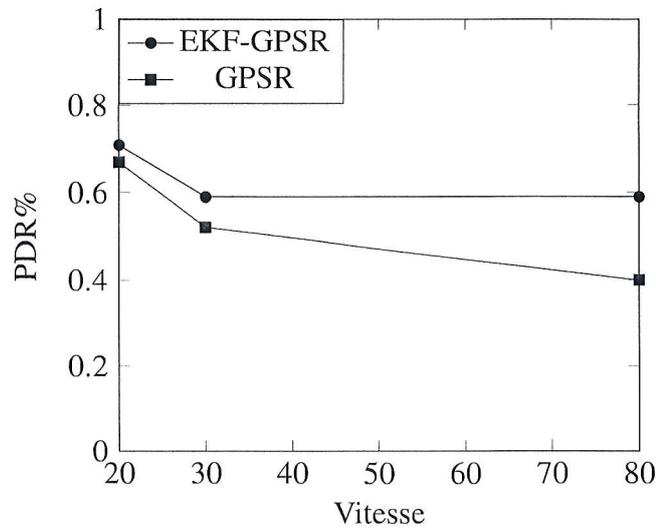


FIGURE 4.4: PDR

est justifié par la connectivité entre les véhicules qui se dégrade avec la vitesse, engendrant ainsi des coupures de liaisons entre ces derniers. Or, les résultats obtenus par notre protocole EKF-GPSR sont nettement meilleurs que ceux du protocole GPSR. Ces résultats s'expliquent par la robustesse assurée par le filtre de Kalman étendu utilisé dans notre protocole.

- Débit

Les graphes de la figure 4.5 illustrent la variation du débit dépendamment de la variation de la vitesse. Cette dernière a induit à un décroissement dans les valeurs du débit obtenues. Néanmoins, notre protocole EKF-GPSR surpasse le protocole GPSR. Cette amélioration de débit est jusqu'à 15Kbps. Au fait, cela prouve les résultats de PDR obtenus dans le graphique 4.4, vu la relation directe entre le PDR et le débit.

4.6.3 Scénario 3 : Le nombre de connexion

Dans cette série de simulation on va varier le nombre de connexion (le nombre de destination) dans le réseau de 1 jusqu'à 16. On gardera la même portée et en fixant la densité du réseau à 100 .

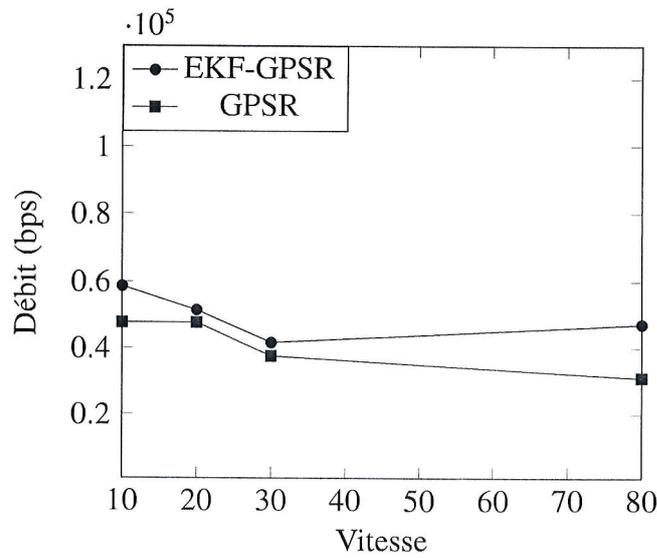


FIGURE 4.5: Débit

- Taux de paquets reçus avec succès

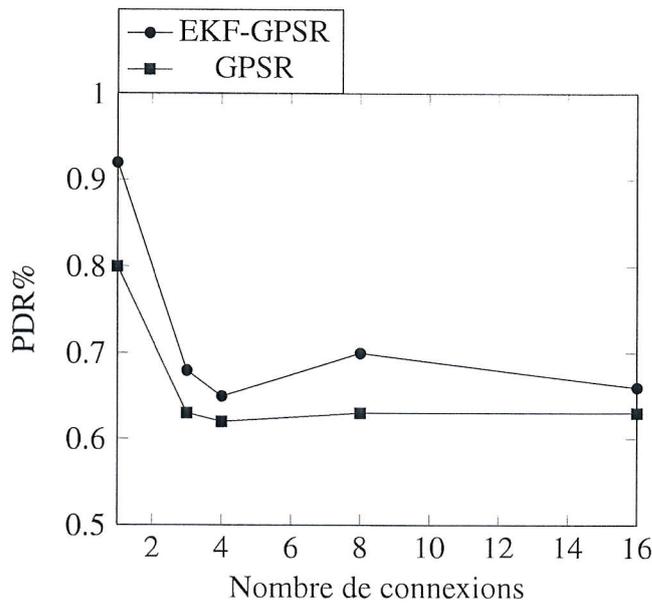


FIGURE 4.6: PDR

En observant le graphe de la figure 4.6, nous remarquons que les deux courbes des deux protocoles EKF-GPSR et GPSR diminuent considérablement en variant les connexions de 1 à 3. Cela se justifie par l'augmentation des

collisions qui se produisent lors de la transmission des paquets. En effet, ce nombre de collisions grandit avec l'accroissement du nombre de connexions. Par conséquent, moins de paquets seront délivrés ; comme illustré dans la figure. Toutefois, notre protocole marque une meilleure performance par rapport à GPSR.

- Débit

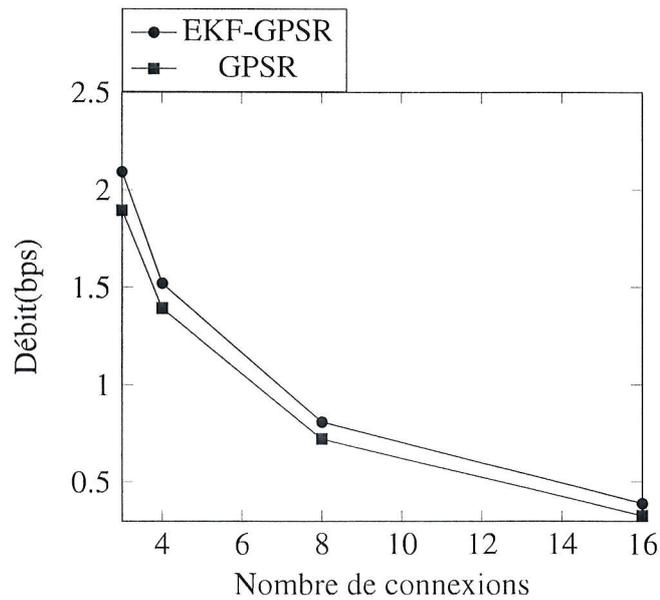


FIGURE 4.7: Débit

En analysant la figure 4.7, nous remarquons que le débit diminue avec l'augmentation de nombre de connexion. Cela confirme l'hypothèse établie dans la sous-section 4.16. Effectivement, le débit obtenu pour chaque protocole est proportionnel au PDR. 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. Cependant, le débit du protocole EKF-GPSR est bien meilleur que celui du protocole GPSR.

4.6.4 Scénario 4 : Environnement réel (Veins)

Dans ce scénario nous avons utilisé un modèle de mobilité réel permettant de simuler un environnement VANET. Pour ce faire, on a utilisé la carte

géographique de la Wilaya de Jijel illustrée par la figure 4.8. Aussi, dans la figure 4.9 quelques captures qui illustrent la simulation. Cette dernière est réalisée en utilisant SUMO. Au fait, SUMO est un logiciel de simulation de circulation continu, portable, à code source ouvert, conçu pour les grands réseaux routiers. Il est principalement développé par les employés de l'entreprise Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center. Pour qu'on puisse l'utiliser dans un scénario VANET, on a fait appel au framework Open Source de simulation de réseaux de véhicules Veins, car ce dernier relie SUMO et OMNET++.

Il est à noter que dans la série de simulation de ce scénario, on va varier le nombre de véhicules dans le réseau de 2 jusqu'à 200 véhicules, tout en gardant la même portée et vitesse.

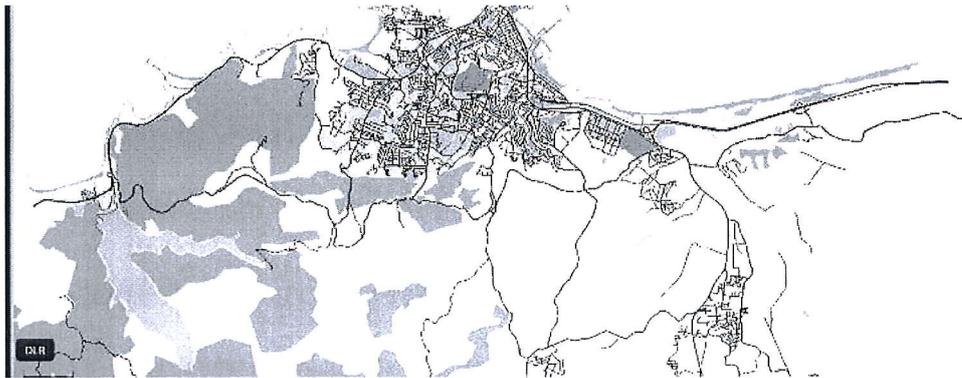


FIGURE 4.8: Carte de la Wilaya de Jijel.

- Taux de paquets délivré avec succès

En observant les graphes de la figure 4.6, nous remarquons que le taux de paquets délivré diminue en augmentant le nombre de véhicules, avec une meilleure performance de notre protocole. Ceci prouve les résultats de simulation obtenus dans le premier scénario. par les collisions qui se produisent,

- Débit

Dans la figure 4.11, nous constatons que le débit diminue avec l'augmentation de nombre de véhicules. Néanmoins, le débit marqué par EKF-GPSR est meilleur



FIGURE 4.9: captures d'exécution.

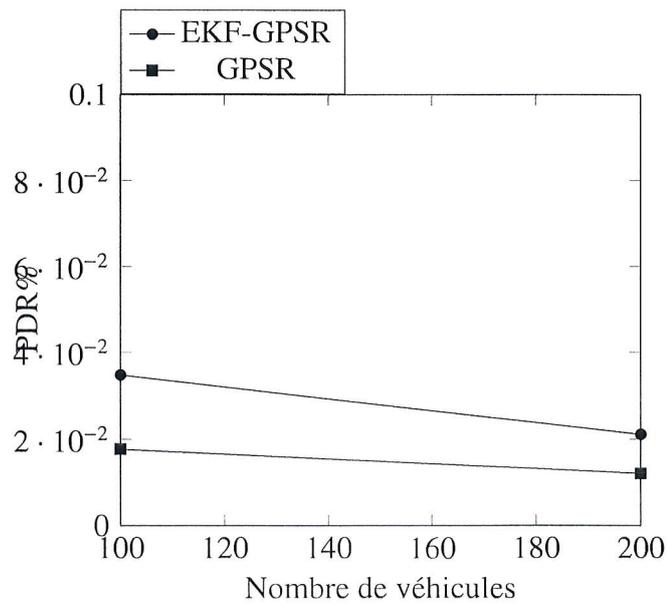


FIGURE 4.10: PDR

par rapport à GPSR. Ces résultats prouvent l'efficacité de notre mécanisme de prédiction utilisé dans le protocole EKF-GPSR. Aussi, ils sont conformes avec les résultats obtenus précédemment dans le scénario 1.

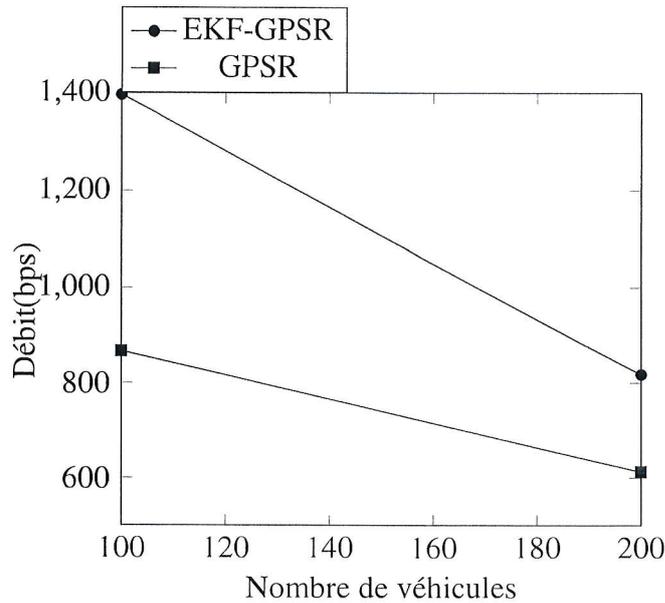


FIGURE 4.11: Débit

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit notre amélioration du protocole GPSR destinée aux VANETs, qui est intitulée EKF-GPSR. Cependant, une description détaillée de notre protocole EKF-GPSR a été donnée et ce en exposant son principe de fonctionnement et les méthodes qu'il a fait intervenir dans son processus de routage de données vers la destination. Enfin, nous avons comparés entre notre proposition EKF-GPSR et le protocole GPSR. Vu les résultats obtenues à travers les différents scénarios de simulation, nous avons prouvé que l'utilisation du processus de prédiction avec les filtres de Kalman étendus dans notre protocole EKF-GPSR, améliore les mesures de performances telles que le taux de livraison de paquets et le débit, etc. Ces résultats sont grâce au modèle de prédiction qui permet un suivi des changements et des déplacements des véhicules voisins d'une manière récursive, en prédisant leur état courant à chaque période.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux VANET sont issus des réseaux ad hoc mobiles (MANET), et qui ont émergés grâce aux avancées des technologies sans fil et de l'industrie automobile. Ils se composent de véhicules circulant sur des routes, capables de communiquer entre eux sans une infrastructure fixe. Au cours de la dernière décennie, de nombreux projets VANET ont été entrepris dans le monde. Ainsi, plusieurs normes VANET ont été élaborées pour améliorer les communications entre les véhicules de voisinage immédiat ou entre les véhicules et les équipements d'infrastructures. Néanmoins, assurer une communication fiable dans un réseau sans fil, en particulier les réseaux VANET, est un véritable défi, vu leurs caractéristiques et leurs spécificités du à leur grande mobilité.

Dans ce mémoire, nous avons passé en revue le routage dans les réseaux VANET. Plusieurs travaux ont été amenés par les chercheurs dans ce domaine, ce qui explique, l'existence de plusieurs protocoles approches de routage destinés à bien gérer la communication dans les VANET. La performance de ces protocoles dépend de divers paramètres comme l'environnement et les stratégies de transfert. Vu la grande mobilité des réseaux VANET, la stratégie du routage basée sur les positions s'est avérée parmi les stratégie les plus performantes et qui prennent en considération les particularités de ces réseaux. Dans notre travail, nous avons donné un aperçu sur les différents protocoles de routage basés sur la position qui ont été proposés ou réadapter aux réseaux VANET, et ce tout en leur proposant une nouvelle classification et menant une étude comparative. Cette étude apportée aux protocoles analysés nous a permis de balayer et cerner notre propre vision sur l'optimisation du protocole de routage géographique GPSR. Cependant,

nous avons proposé une modification à ce protocole en utilisant la prédiction par l'algorithme de filtre de Kalman étendu. En effet, l'utilisation de filtre de Kalman s'est présentée comme étant une solution robuste pour minimiser le cout de routage et améliorer les performances du protocole en termes de débit et taux de livraison de paquets.

L'évaluation des performances de notre protocole à été réalisée par simulation, en utilisant le simulateur open source OMNET++. L'ensemble des scénario de simulation menés sur notre protocole nous a permis de prouver son efficacité dans la réduction de perte de paquets ainsi que l'augmentation de débit et enfin une réduction importante de cout de routage par rapport au protocole GPSR.

En guise de perspectives de recherches :

- ✓ Il serait intéressant d'étendre la simulation à d'autres protocoles de routage basés position afin de comparer les performances de notre protocoles avec ces protocoles.
- ✓ Ils restent beaucoup de travaux à mener sur les réseaux VANET à savoir les solutions pour gérer le canal de communication afin d'offrir de meilleures performances en termes de cout de routage par conséquent maximiser le débit.
- ✓ Plusieurs autres perspectives semblent se dessiner pour le problème de localisation dans les VANET. Ainsi, l'amélioration de la précision en introduisant des techniques de localisation dans le processus de prédiction serait intéressant.
- ✓ Le routage avec sécurité de données peut être intégré au niveau de notre protocole en incluant d'autres mécanismes dans son fonctionnement afin de palier aux problèmes de vulnérabilité. En effet, la première vulnérabilité des réseaux ad-hoc est liée à la technologie sans fil utilisée. Quiconque possédant le récepteur adéquat peut écouter ou perturber les messages échangés ; et ceci, même s'il se trouve dans un lieu public à l'extérieur du bâtiment où se déroulent les échanges.

Références bibliographiques

- [1] *OMNET simulator*.
- [2] Shahzad Ali and Sardar M Bilal. An intelligent routing protocol for vanets in city environments. In *2009 2nd International Conference on Computer, Control and Communication*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [3] Salim Allal. Optimisation des échanges dans le routage géocast pour les réseaux de véhicules ad hoc vanets. Master’s thesis, Paris 13, 2014.
- [4] Boudjaadar Amina. Plateforme basée agents pour l’aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil. 2010.
- [5] R. Meraihi B. Senouci and M. Djebri. *Réseau mobile Ad Hoc et réseaux de capteurs sans fil, thèse de doctorat*. PhD thesis, université de Bordeaux, 2006.
- [6] Abdelmalik Bachir and Abderrahim Benslimane. A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast. In *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring.*, volume 4, pages 2456–2460. IEEE, 2003.
- [7] James Bernsen and D Manivannan. Greedy routing protocols for vehicular ad hoc networks. In *2008 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pages 632–637. IEEE, 2008.
- [8] Sardar Muhammad Bilal, Carlos Jesus Bernardos, and Carmen Guerrero. Position-based routing in vehicular networks : A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(2) :685–697, 2013.

- [9] Diego Borsetti and Javier Gozávez. Infrastructure-assisted geo-routing for cooperative vehicular networks. In *2010 IEEE Vehicular Networking Conference*, pages 255–262. IEEE, 2010.
- [10] Prosenjit Bose, Pat Morin, Ivan Stojmenović, and Jorge Urrutia. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. *Wireless networks*, 7(6) :609–616, 2001.
- [11] Mohamed Bouarir. *Protocole de routage intelligent pour les réseaux Ad Hoc de véhicules*. PhD thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2012.
- [12] Hadjer BOUZEBIBA and Yasmina BOUIZEM. Impact des modèles de mobilités sur les performances des protocoles de routage en milieu urbain réaliste dans les réseaux vanet (v2v). Master’s thesis, 2015.
- [13] 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.
- [14] IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee et al. Ieee standard for information technology-telecommunication and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements part11 : Radio resource measurement of wireless lans. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>, 2009.
- [15] Felipe Cunha, Leandro Villas, Azzedine Boukerche, Guilherme Maia, Aline Viana, Raquel AF Mini, and Antonio AF Loureiro. Data communication in vanets : Protocols, applications and challenges. *Ad Hoc Networks*, 44 :90–103, 2016.
- [16] Hamidouche Deflaoui, Sofiane Djebbari, Nadia Tassoult, et al. Implémentation d’une nouvelle approche pour la révocation des certificats dans les vanet. Master’s thesis, Université de Bejaia, 2016.
- [17] Yong Ding and Li Xiao. Sadv : Static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [18] Allal et al. Geocast routing protocols for vanets : Survey and guidelines. In *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, pages 323–328. IEEE, 2012.

- [19] Dinesh et al. Adaptive hybrid routing protocol for vanets. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 5(5) :1085–1091, 2017.
- [20] Kakarla et al. A survey on routing protocols and its issues in vanet. 2011.
- [21] Kumar et al. A comparative study of various routing protocols in vanet. *arXiv preprint arXiv :1108.2094*, 2011.
- [22] Nayak et al. *High Speed Vehicle Detection in Vehicular Ad-hoc Network*. PhD thesis, 2013.
- [23] Paul et al. Vanet routing protocols : Pros and cons. *arXiv preprint arXiv :1204.1201*, 2012.
- [24] Rivaton et al. Le routage de l'information dans les réseaux véhiculaires mobiles. Master's thesis, 2016.
- [25] 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.
- [26] Jiayu Gong, Cheng-Zhong Xu, and James Holle. Predictive directional greedy routing in vehicular ad hoc networks. In *27th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'07)*, pages 2–2. IEEE, 2007.
- [27] Zineb Squalli Houssaini, Imane Zaimi, Mohammed Oumsis, and Saïd El Alaoui Ouatik. Comparative study of routing protocols performance for vehicular ad-hoc networks. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017.
- [28] Raj K Jaiswal and CD Jaidhar. Location prediction algorithm for a nonlinear vehicular movement in vanet using extended kalman filter. *Wireless Networks*, 23(7) :2021–2036, 2017.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Maria Kihl, Mihail Sichitiu, Ted Ekeroth, and Michael Rozenberg. Reliable geographical multicast routing in vehicular ad-hoc networks. In *International Conference on Wired/Wireless Internet Communications*, pages 315–325. Springer, 2007.
- [32] Gokhan Korkmaz, Eylem Ekici, and Fusun Ozguner. An efficient fully ad-hoc multi-hop broadcast protocol for inter-vehicular communication systems. In *2006 IEEE international conference on communications*, volume 1, pages 423–428. IEEE, 2006.
- [33] Sushil Kumar and Anil Kumar Verma. Position based routing protocols in vanet : a survey. *Wireless Personal Communications*, 2015.
- [34] Vishal Kumar, Shailendra Mishra, and Narottam Chand. Applications of vanets : present & future. *communications and network*, 5(01) :12, 2013.
- [35] Tayeb Lemlouma and Dr N BADACHE. Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Master’s thesis, 2000.
- [36] Fan Li and Yu Wang. Routing in vehicular ad hoc networks : A survey. *IEEE Vehicular technology magazine*, 2(2) :12–22, 2007.
- [37] 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.
- [38] Chunfeng Liu, Gang Zhang, Weisi Guo, and Ran He. Kalman prediction-based neighbor discovery and its effect on routing protocol in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019.
- [39] 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.
- [40] 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.

- [41] Xiaomin Ma, Jinsong Zhang, and Tong Wu. Reliability analysis of one-hop safety-critical broadcast services in vanets. *IEEE transactions on vehicular technology*, 60(8) :3933–3946, 2011.
- [42] Joseph Macker. Mobile ad hoc networking (manet) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations. 1999.
- [43] Christian Maihofer. A survey of geocast routing protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2004.
- [44] Abdallah Makhoul. *Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données*. PhD thesis, Besançon, 2008.
- [45] David A Maltz, J Broch, D Johnson, Yin-Chun Hu, and J Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of ACM MobiCom*, volume 114, page 119, 1998.
- [46] Valery Naumov and Thomas R Gross. Connectivity-aware routing (car) in vehicular ad-hoc networks. In *IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1919–1927. IEEE, 2007.
- [47] Pavan Kumar Pagadala and NM Saravana Kumar. Routing protocols in vehicular ad hoc networks : A survey. *GLOBAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND RESEARCHES*, 201.
- [48] Laurent Paquereau and Bjarne E Helvik. Simulation of wireless multi-* networks in ns-2. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, page 73. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and . . . , 2008.
- [49] Vincent Douglas Park and M Scott Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *Proceedings of INFOCOM'97*, volume 3, pages 1405–1413. IEEE, 1997.
- [50] et al Paul. Survey over vanet routing protocols for vehicle to vehicle communication. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE)*, 2012.
- [51] Guangyu Pei, Mario Gerla, and Tsu-Wei Chen. Fisheye state routing : A routing scheme for ad hoc wireless networks. In *2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record*, 2000.

- [52] Charles Perkins, Elizabeth Belding-Royer, and Samir Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical report, 2003.
- [53] Charles E Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. In *ACM SIGCOMM computer communication review*, volume 24, pages 234–244. ACM, 1994.
- [54] Jonathan Petit. *Surcoût de l'authentification et du consensus dans la sécurité des réseaux sans fil véhiculaires*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [55] Dipankar Raychaudhuri and Mario Gerla. *Emerging wireless technologies and the future mobile internet*. Cambridge University Press, 2011.
- [56] Olivier Rivaton. Le routage de l'information dans les réseaux véhiculaires mobiles. Master's thesis, 2016.
- [57] 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.
- [58] Abdessamad Saidi and Wafa Mamem. *Amélioration des performances du protocole de routage EGyTAR dans les réseaux VANETs*. PhD thesis, 15-01-2018.
- [59] 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.
- [60] HATEM Manel.SALMI Siham. Routage basé sur le clustering dans les réseaux vanets. Master's thesis, Université de Béjaia, 2017.
- [61] Tarik Taleb, Ehssan Sakhac, Abbas Jamalipour, Kazuo Hashimoto, Nei Kato, and Yoshiaki Nemoto. A stable routing protocol to support its services in vanet networks. *IEEE Transactions on Vehicular technology*, 2007.
- [62] RB Thompson. Global positioning system (gps) : The mathematics of satellite navigation. *MathCAD library*, <http://www.mathsoft.com/appsindex.html>, 1998.

- [63] Daxin Tian, Kaveh Shafiee, and Victor CM Leung. Position-based directional vehicular routing. In *GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [64] Alexey Vinel, Marion Berbineau, MM Manohara Pai, Yevgeni Koucheryavy, Oleg Gusikhin, Danil Prokhorov, Joel Rodrigues, and Yan Zhang. 2011 11th international conference on its telecommunications. In *11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2011), Saint-Petersburg, Russia, 23-25 Aug 2011*. IEEE conference proceedings, 2011.
- [65] Xin Wang. *Mobile Ad-Hoc Networks : Applications*. PhD thesis, INTECH, January 2011.
- [66] www.its.dot.gov/aeris. www.its.dot.gov/aeris.
- [67] www.scania.com. www.scania.com.
- [68] Yang Xia, Chai Kiat Yeo, and Bu Sung Lee. Hierarchical cluster based routing for highly mobile heterogeneous manet. In *2009 International Conference on Network and Service Security*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [69] Yong Xiang, Zheng Liu, Ruilin Liu, Weizhen Sun, and Wei Wang. Geosvr : A map-based stateless vanet routing. *Ad Hoc Networks*, 11(7) :2125–2135, 2013.
- [70] Xue Yang, Leibo Liu, Nitin H Vaidya, and Feng Zhao. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. In *The First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004.*, pages 114–123. IEEE, 2004.
- [71] Sherali Zeadally, Ray Hunt, Yuh-Shyan Chen, Angela Irwin, and Aamir Hassan. Vehicular ad hoc networks (vanets) : status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4) :217–241, 2012.
- [72] 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.
- [73] Squalli Houssaini Zineb. Etude, évaluation et amélioration des performances du protocole de routage gpsr dans les réseaux véhiculaires ad-hoc. 2018.

Résumé

Les réseaux VANET existent depuis les années 80, mais ils sont de plus en plus développés ces dernières années à travers le monde, en raison de la grande variété des services qu'ils fournissent. Ils enrichissent le réseau routier en y apportant des communications entre ses composants. Principalement entre les véhicules, ainsi qu'avec les infrastructures qui sont directement en relation avec le réseau routier. L'objectif principal de ce type de réseaux est d'améliorer la sécurité et la circulation routière, ainsi que de fournir aux conducteurs et aux passagers des applications publicitaires et de divertissement. Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel d'assurer un bon routage d'informations dans ces réseaux.

Dans ce mémoire, nous proposons EKF-GPSR ; une solution pour améliorer le processus de routage dans le protocole GPSR. Nous choisissons d'utiliser les informations de positionnements du véhicule qui ne sont jamais utilisés par GPRS pour prédire sa position dans le future proche. La solution proposée repose sur une approche de prévision stochastique robuste utilisant le filtre de Kalman étendu. Grâce à cette solution, chaque véhicule peut actualiser régulièrement la position des véhicules dans son voisinage et suivre ainsi leur déplacements. Plusieurs simulations ont été réalisées pour valider et prouver l'efficacité du protocole proposé EKF-GPSR. Les résultats de simulations ont montré une amélioration dans les performance de notre protocole de routage en termes de coût de routage, de taux de livraison des paquets et du débit par rapport au protocole GPSR.

Abstract

VANETs have existed since the 1980, but they have been increasingly developed in recent years around the world, due to the wide variety of services they can provide. In fact, they improve the road network by providing communications between its components. Mainly between vehicles, as well as with infrastructures that are directly related to the road network. The main objective of such networks is to improve safety and road traffic, as well as to provide the drivers and passengers advertising and entertainment applications. To achieve these objectives, it is important to ensure proper information routing in these networks. In this thesis, we propose EKF-GPSR ; a solution that improves the routing process in the GPSR protocol. We choose to use the position information of vehicles that is never used by GPRS to predict their position in the near future. The proposed solution is based on a robust stochastic forecasting approach using the Kalman filter. Thanks to this solution, each vehicle can regularly update the position of the vehicles in its neighboring and track their movements. Several simulations were carried out to validate and prove the effectiveness of the proposed EKF-GPSR protocol. The simulation results showed an improvement in the performance of our routing protocol in terms of routing cost, packet delivery ratio and throughput, compared to GPSR protocol.