

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Seddik Ben Yahia de Jijel
Faculté des Sciences Exactes et Informatique
Département d'Informatique



*Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de
master en informatique*

Option : Réseaux et sécurité

Thème

Routage basé sur le clustering dans les
réseaux VANETs

Réalisé par :

- Ahlam Boussadia.
- Meryem Bouderkha.

Encadré par :

- Dr. Manel Khelifi.

Promotion : 2020

** Remerciements **

*Nous tenons à remercier en premier lieu **Allah** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Nos plus vifs et profonds remerciements vont au M^{me} **KHELIFI Manel** qui fut pour nous un encadreur attentif et disponible malgré ses responsabilités nombreuses. Sa compétence, sa claire voyance, son suivi continu, sa rigueur et ses précieux conseils avec beaucoup de patience et d'encouragements tout au long de ce travail. Nous avons eu un grand plaisir à travailler avec lui. Nous désirons lui exprimer toute notre gratitude et notre sincère connaissance.*

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury d'avoir accepté de examiner notre travail et de nous faire part de leurs remarques pertinentes.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les enseignants du département d'informatique qui de près ou de loin ont contribué à notre formation.

Enfin, c'est avec beaucoup de plaisir que nous pouvons remercier profondément nos familles pour leurs conseils et encouragements durant toutes les années de nos études.

** Dédicaces**

Nulle œuvre n'est plus exaltante que celle réalisée avec le soutien des personnes qui nous sont proches. Pour cela ; je tiens à leur exprimer toute ma gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance. Je dédie ce mémoire de fin de cycle de master 2 à :

** Mon très cher **Père Salah** : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour ma formation le long de ces années.*

** Ma tendre **Mère Noura** : vous représentez pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Vous avez fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

** Madame **Khelifi Manel** qui ne cesse pas à m'encourager et me conseiller. Cette humble dédicace ne saurait exprime mon grand respect et ma profonde estime.*

** Mes très chers **frères** : **Saad Eddine, Ilyas, Amir et Yahia** pour leur appui et leur encouragement.*

** Mes très chères **sœurs** : **Meryem, Amani et Selssabil** pour leur amour, leur tendresse et leurs encouragements permanents.*

** Mes très chères **amies** : **Meryem, Noussaiba, Amina et Sara.***

** Tous ceux que me sens chers et que j'ai omis de citer.*

Ahlam Bsd

** Dédicaces**

Nulle œn'est plus exaltante que cette réalisée avec le soutien des personnes qui nous sont proches. Pour cela, je tiens à leur exprimer toute ma gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance. Je dédie ce mémoire de fin de cycle de master 2 à :

** Mon très cher **Père Abdel azziz** : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour ma formation le long de ces années.*

** Ma tendre **Mère Salima** : vous représentez pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Vous avez fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

** Madame **Khelifi Manel** qui ne cesse pas à m'encourager et me conseiller. Cette humble dédicace ne saurait exprime mon grand respect et ma profonde estime.*

** Mon très cher **frère : Aymen** pour son appui et son encouragement.*

** Mes très chères **sœurs : Asma, Sara, Rokia et Insaf** pour leur amour, leur tendresse et leurs encouragements permanents.*

** Mes très chères **amies : Ahlam, Soundous, Chaima et Hadil.***

** Tous ceux que me sens chers et que j'ai omis de citer.*

Meryem Bdr

Résumé

Les réseaux véhiculaires ad hoc (Vehicular Ad-Hoc Networks ; VANETs) constituent un paradigme émergent des systèmes de transport intelligent (STI), et qui ont connu un attrait considérable auprès des chercheurs ces dernières années. Ces réseaux sont composés de véhicules intelligents formant des réseaux décentralisés et auto-organisés. Cela est dans le but d'assurer une meilleure sécurité routière, ainsi que d'améliorer le confort de déplacement des conducteurs et des passagers. Au fait, ces véhicules mobiles ne cessent de changer de positions géographiques, ce qui peut causer un grand défi pour acheminer les informations vers les destinations. C'est pourquoi, il est d'une grande importance de disposer de bon processus de routage afin de livrer les données demandés aux véhicules correspondants. Par ailleurs, les protocoles de routage conventionnels sont employés dans la plupart des réseaux ad hoc. Cependant, leur utilisation notamment dans les réseaux VANETs ouvrent la voie à de nombreux problèmes. Par exemple, une consommation élevée de la bande passante et qui impose, par conséquent, des frais généraux excessifs.

A cet effet, ce travail a mis l'accent sur la technique de clustering, qui est une approche de routage prometteuse pour les réseaux VANETs. Ainsi, une étude comparative a été menée sur les protocoles de routage basés clustering pour analyser leur efficacité tout en leur proposant une nouvelle classification. D'autres part, nous avons réalisé des évaluations de performances, par simulation avec OMNET, entre le protocole de routage hiérarchique CBR (Cluster Based Routing), que nous avons implémenté, et les deux protocoles de routage conventionnels GPSR et DSDV. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité du CBR qui surpasse GPSR et DSDV en termes de taux de livraison des paquets et débit.

En outre, nous avons proposé deux améliorations au protocole CBR ; nommées WeCBR (Weighted Cluster Based Routing) et Q-WeCBR (Q-learning Weighted Cluster Based Routing). Ces deux propositions visent à assurer une meilleure sélection de CHs et stabilité de routage d'une part, et de fournir un routage plus intelligent d'autre part, et ce en faisant appel au Q-learning. Les résultats de simulation obtenus ont montré que nos améliorations permettent un meilleur taux de livraison de paquets, et débit par rapport aux protocoles CBR, DSDV et GPSR.

Abstract

Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs) are an emerging paradigm of Intelligent Transportation Systems (ITS), which have gained considerable interest among researchers over the last few years. These networks are composed of intelligent vehicles forming decentralized and self-organized networks. This is in order to provide better road safety, as well as to improve the travel comfort of drivers and passengers. In fact, these mobile vehicles are constantly changing their geographical positions, which can cause a great challenge in getting information to destinations. Therefore, it is of great importance to have a good routing process to deliver the requested data to the corresponding vehicles. Furthermore, conventional routing protocols are commonly employed in most ad hoc networks. However, their use, especially in VANETs networks, opens the way to many problems. For example, high bandwidth consumption and consequently excessive overhead costs.

For this purpose, this work has focused on the clustering technique, which is a promising routing approach for these networks. Thus, a comparative study was conducted on clustering-based routing protocols to analyze their efficiency while proposing them a new classification. On the other hand, we carried out performance evaluations, using simulation with OMNET, between the hierarchical routing protocol CBR (Cluster Based Routing), which we have implemented, and the two conventional routing protocols GPSR and DSDV. The obtained results showed the effectiveness of CBR which outperforms GPSR and DSDV in terms of packet delivery rate and throughput.

In addition, we have proposed two enhancements to CBR protocol; called Weighted Cluster Based Routing (WeCBR) and Q-WeCBR (Q-learning Weighted Cluster Based Routing). These two proposals aim to achieve a better CH selection and routing stability on one hand, and to provide more intelligent routing on the other hand, through Q-learning. The obtained simulation results have shown that our improvements allow a better packet delivery rate and throughput compared to CBR, DSDV and GPSR protocols.

Table des matières

Table des matières	1
Liste des tableaux	5
Table des figures	7
Liste des abréviations	8
Introduction générale	10
1 Généralités sur les VANETs	12
1.1 Introduction	12
1.2 Les réseaux sans fil	12
1.3 Les réseaux véhiculaires Ad-hoc (VANETs)	13
1.3.1 Composants des VANETs	14
1.3.1.1 TA (Trusted Authority)	14
1.3.1.2 RSU (Road Side Unit)	14
1.3.1.3 OBU (On Bord Unit)	14
1.3.2 Les modes de communication dans les VANETs	15
1.3.2.1 Mode de communication véhicule à véhicule (V2V)	16
1.3.2.2 Mode de communication véhicule à infrastructure(V2I)	16
1.3.2.3 Mode de communication hybride	17
1.3.3 Les technologies de communication	18
1.3.3.1 Réseaux cellulaires	18
1.3.3.2 Wi-Fi et WiMax	19
1.3.4 Caractéristiques des réseaux VANETs	20
1.3.4.1 Forte mobilité	20
1.3.4.2 Connectivité intermittente	20
1.3.4.3 Variation des environnements	20
1.3.4.4 Capacité énergétique	20
1.3.5 Domaines d'application des VANETs	21
1.3.5.1 Applications de sécurité routière	21
1.3.5.2 Applications de gestion du trafic	21

1.3.5.3	Applications liées au confort	22
1.3.6	Challenges et les contraintes des VANETs	22
1.3.6.1	Qualité de service	22
1.3.6.2	Accès au canal	23
1.3.6.3	Sécurité	23
1.3.6.4	Routage	23
1.4	Conclusion	24
2	Routage dans les VANETs	25
2.1	Introduction	25
2.2	Métriques de choix des routes dans les VANETs	25
2.3	Classification des protocoles de routage dans les VANETs	26
2.3.1	Selon la stratégie du routage	27
2.3.1.1	Protocoles de routage proactifs	27
2.3.1.2	Les protocoles de routage réactifs (on-demand driven)	28
2.3.1.3	Les protocoles de routage hybrid	29
2.3.2	Selon le type du routage	30
2.3.2.1	Protocoles unicast	30
2.3.2.2	Protocoles multicast/géocast	31
2.3.2.3	Protocoles broadcast	32
2.3.3	Selon la structure du réseau	33
2.3.3.1	Protocoles basés sur la position	33
2.3.3.2	Protocoles basés clustering	34
2.4	Comparaison entre les différents protocoles étudiés	35
2.5	Conclusion	37
3	Etat de l'art et étude des protocoles de routage basés clustering dans les VANETs	38
3.1	Introduction	38
3.2	Généralités sur le Clustering dans les VANETs	39
3.2.1	Concepts et composants de clustering	39
3.2.2	Procédure générale d'un protocole basé clustering	40
3.2.2.1	Découverte de voisinage	40
3.2.2.2	Sélection du chef de cluster	40
3.2.2.3	Annonce	41
3.2.2.4	Affiliation	41
3.2.2.5	Maintenance	41
3.2.3	Critères de conception d'un protocole basé clustering	42
3.3	Classification des protocoles de routage basés Clustering dans les réseaux VANETs	43

3.3.1	Selon le paradigme de fonctionnement	44
3.3.1.1	Protocoles basés sur la qualité de service (QoS)	44
3.3.1.2	Protocoles basés position	44
3.3.1.3	Protocoles basés sur la voie	44
3.3.2	Selon les paramètres de décision	46
3.3.2.1	Protocoles basés sur les heuristiques	46
3.3.2.2	Protocoles basés sur le poids	46
3.3.2.3	Protocoles basés sur l'intelligence artificielle (IA)	47
3.4	Etude de quelques protocoles du routage basés Clustering dans les réseaux VANETs	47
3.4.1	Le protocole CDS	47
3.4.2	Le protocole DWCM	48
3.4.3	Le protocole CBR	49
3.4.4	Le protocole MC-DRIVE	49
3.4.5	Le protocole CBLR	50
3.4.6	Le protocole LORA-CBF	50
3.4.7	Le protocole CBMAC	51
3.4.8	Le protocole CBMMAC	52
3.4.9	Le protocole APROVE	53
3.4.10	Le protocole EWCA	54
3.4.11	Le protocole FUZZY	55
3.4.12	Le protocole ACO-PSO	55
3.4.13	Le protocole CBDRP	56
3.4.14	Le protocole PMC	57
3.4.15	Le protocole RLRC	57
3.5	Comparaison entre les protocoles étudiés	58
3.6	Conclusion	60
4	Les protocoles de clustering implémentés : Description et Evaluation de performances	61
4.1	Introduction	61
4.2	Préliminaires	61
4.2.1	L'apprentissage artificiel	62
4.2.1.1	Les méthodes d'apprentissage	62
4.2.1.2	Apprentissage par renforcement	62
4.3	Protocoles de clustering implémentés	65
4.3.1	Le protocole CBR : Principe et fonctionnement	65
4.3.1.1	La formation des clusters et l'élection des CHs	66
4.3.1.2	Le routage de données	68
4.3.2	Améliorations proposées au protocole CBR	70

4.3.2.1	Le Protocole WeCBR	70
4.3.2.2	Protocole Q-WeCBR	73
4.4	Evaluation des performances par simulation	75
4.4.1	Les environnements de simulation	76
4.4.1.1	NS-2 (Network Simulator-2)	76
4.4.1.2	OPNET (Optimized Network Engineering Tools)	76
4.4.1.3	J-Sim (Java- based Simulation)	76
4.4.1.4	OMNET++ (Objective Modular Network Tested in C++)	76
4.4.2	Métriques d'évaluation de performances	77
4.4.3	Les paramètres de simulation	78
4.4.4	Résultats de simulation obtenus	79
4.4.4.1	Scénario1 : variation de la densité	80
4.4.4.2	Scénario2 : variation de la vitesse	81
4.5	Conclusion	83
	Conclusion générale et perspectives	85
	Bibliographie	87

Liste des tableaux

- 2.1 Comparaison entre les protocoles du routage. 36
- 3.1 Comparaison entre les protocoles étudiés. 59
- 4.1 Format de message Hello. 66
- 4.2 Paramètres de simulation 78

Table des figures

1.1	Réseau véhiculaire	13
1.2	Composants d'un réseau véhiculaire.	14
1.3	Véhicule intelligent.	15
1.4	Mode de communication véhicule à véhicule.	16
1.5	Mode de communication Véhicule à Infrastructure.	17
1.6	Mode de communication hybride (V2VetV2I).	17
1.7	Mode de communication hybride (V2X).	18
1.8	Technologies de communication dans les VANETs.	19
1.9	Alerte de situation d'urgence.	21
1.10	Péage électronique en Chine.	22
2.1	Classification des protocoles de routage dans les VANETs.	26
2.2	Sélection des MPRs dans OLSR.	28
2.3	Un exemple de zone dans le protocole ZRP.	30
2.4	Routage unicast.	31
2.5	Routage géocast.	32
2.6	Sélection de relais dans IVG.	32
2.7	Routage broadcast.	33
2.8	VANETs basé clustering.	35
3.1	Exemple de composants structurant un cluster.	39
3.2	Procédure générale d'un protocole basé clustering.	42
3.3	Classification des protocoles de routage basés clustering dans les VANETs.	43
3.4	Structure de trame TDMA.	51
3.5	Trames TDMA dans le canal CRC.	53
3.6	Schéma d'affectation des canaux et protocoles MAC utilisés par CBMMAC.	53
3.7	Protocole de clustering APROVE.	54
4.1	Agent en interaction avec son environnement.	63
4.2	Changement d'état, d'action et de récompense.	63
4.3	Protocole CBR dans les VANETs.	65
4.4	Division du réseau en grilles.	66
4.5	Sélection CH optimal.	69

4.6	Architecture du programme du simulateur OMNET++	77
4.7	La carte géographique d'une région appartenant à la wilaya de Jijel.	79
4.8	Captures d'exécution.	79
4.9	PDR.	80
4.10	Débit.	81
4.11	PDR.	82
4.12	PDR.	82
4.13	Débit.	83
4.14	Débit.	83

Liste des abréviations

ACO	Ant Colony Optimization
AODV	Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing
APROVE	Affinity PROpagation for VEhicular network
CBDRP	Cluster-Based Directional Routing Protocol
CBLR	Cluster Based Location Routing
CBMAC	Cluster Based Medium Access Control
CBMMAC	Clustering-Based Multichannel MAC
CBR	Cluster Based Routing
CDS	Connected Dominating Set
CH	Cluster Head
CM	Cluster Member
COIN	Clustering for Open Inter vehicle communication Network
DSDV	Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Source Routing
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DWCM	Distributed and Weighted Clustering based on Mobility Metrics
EDR	Event Data Recorder
EWCA	Enhanced Weight-based Clustering Algorithm
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GW	Gateway node
IA	Intelligence Artificielle
ITS	Intelligent Transport System
IVG	Inter-Vehicular Geocast
LORA-CBF	Location Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access control
MANET	Mobile Adhoc NETwork
MC-DRIVE	Modified Clustering based on Direction in Vehicular Environment
NRL	Normalized Routing Load
OBU	On Bord Unit
OLSR	Optimized Link State Routing
PDR	Packet Delivery Ratio
PMC	Passive Multi-hop clustering
PSO	Particle Swarm Optimization
QoS	Quality of Service
Q-WeCBR	Q-learning Weighted Cluster Based Routing

RLRC	Reinforcement Learning-based Routing protocol for Clustered EV-VANET
RSU	Road Side Unit
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SUMO	Simulation Of Urbany MObility
TA	Trusted Authority
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VANET	Vehicular Adhoc NETwork
Veins	Vehicles in network simulation
V2N	Vehicle to Network
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to object
WAVE	Wireless Access in the Vehicular Environment
WeCBR	Weighted Cluster Based Routing
WIFI	Wireless Fidelity
WiMax	World wide Interoperability for Microwave Access
ZRP	Zone Routing Protocol

Introduction générale

Dans nos jours, se déplacer est un aspect nécessaire dans notre vie quotidienne. Chaque jour, des millions de véhicules personnels ou en commun transportent des personnes et des marchandises sur les réseaux routiers. Malheureusement, cette activité présente de sérieux problèmes comme les embouteillages interminables et les accidents mortels. A cet effet, l'amélioration de la sécurité routière est devenue une préoccupation principale de tous les gouvernements du monde. Dans ce contexte, un nouveau type de réseau, appelé réseau Ad hoc véhiculaire (Vehicular Ad hoc NETWORK, VANETs), a été émergé. Ce dernier constitue le cœur des systèmes de transport intelligent (Intelligent Transportation System, ITS). Les VANETs sont développés dans le but d'offrir une large variété de services, allant du renforcement de la prévention routière et l'optimisation du trafic, au divertissement du conducteur et des passagers. Cela est grâce à des équipements informatiques embarqués et intégrés dans des stations au bord des routes exploitant les technologies sans fil ; généralement celles appartenant à la famille 802.11 afin de permettre aux véhicules de réagir aux événements inattendus. Toutefois, malgré le développement et la rapide émergence des réseaux véhiculaires, de nombreux défis restent à relever comme : le routage de données, le problème de collision et de localisation, la qualité de service (QoS) et la sécurité, etc.

Dans le cadre de notre étude, nous mettons l'accent sur le processus du routage dans les VANETs. Ce dernier, continue de poser des questions et challenges pour les chercheurs du domaine. Entre autres, la forte mobilité de ces réseaux provoque des changements fréquents de leur topologie. A cet égard, plusieurs recherches se sont orientées vers des techniques permettant de garantir un bon acheminement de données dans ces réseaux. Ainsi, le clustering se présente comme une technique prometteuse apportant des solutions intéressantes en termes de performances. En effet, le clustering est bien adapté aux VANETs du fait que la dynamique du trafic véhiculaire entraîne une formation facile de clusters. De plus, les applications orientées transport sont souvent liées à une région donnée équivalente à un cluster géographique. En divisant l'espace en un ensemble de groupes, le réseau devient plus facile à gérer et les messages de coordination ne sont plus échangés entre tous les nœuds mais juste dans/entre les clusters.

L'objectif principal de ce mémoire, dans un premier temps, est d'étudier et analyser les protocoles de routage basés sur le clustering utilisés dans les réseaux VANETs. Afin de pouvoir, dans un second temps, implémenter le protocole hiérarchique CBR (Cluster Based Routing) et lui proposer deux améliorations appelés WeCBR et Q-WeCBR.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre sera consacré pour présenter des généralités sur les VANETs, leurs caractéristiques, leur architecture de communication, leurs technologies de transmission, ainsi que leurs domaines d'application. En outre, nous exposerons à la fin les contraintes et les challenges les plus cruciaux à considérer dans ce type de réseaux.

Le deuxième chapitre sera axé sur le processus de routage. Une classification et une étude de principaux protocoles et approches de routage seront présentés. Par ailleurs, une comparaison entre les différents protocoles étudiés sera introduite.

Le troisième chapitre va synthétiser les plus importance protocoles de routage hiérarchiques publiés dans la littérature pour les VANETs. Cette synthèse est réalisée en présentant d'abord une nouvelle classification de ces protocoles. Puis, en les comparants selon un certain nombre de critères que nous avons jugé importants.

Le quatrième chapitre est dédié à la description détaillée du protocole CBR(Cluster Based Routing); un protocole de routage basé clustering pour les VANETs. Aussi, les deux améliorations proposées WeCBR(Weighted Cluster Based Routing) et Q-WeCBR(Q-learning Weighted Cluster Based Routing) sont implémentées. Des résultats de simulation seront présentés, comparant le protocole CBR implémenté à des protocoles de références existants, ainsi qu'à nos propositions implémentées.

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

Généralités sur les VANETs

1.1 Introduction

Le marché de l'automobile a connu une énorme évolution ces dernières années afin de faciliter le quotidien des utilisateurs. Cependant, cette évolution spectaculaire des véhicules sur les routes a favorisé les recherches qui visent non seulement à réduire le nombre d'accidents et améliorer les conditions de la circulation, mais aussi à diminuer les embouteillages interminables. Entre autres, assurer le confort et la détente aux conducteurs et même aux passagers. Ainsi, les réseaux véhiculaires, mieux connus sous le nom de VANETs, visent à répondre à ces objectifs.

Dans ce chapitre, nous allons commencer en premier par une brève présentation des réseaux sans fil. Par la suite, nous abordons les réseaux véhiculaires mobiles en décrivant leurs composants, leurs différents modes de communication, leurs technologies de transmission et aussi leurs caractéristiques. En outre, les domaines d'application ainsi que les défis et les contraintes seront présentés. Enfin, nous terminons par une conclusion.

1.2 Les réseaux sans fil

Un réseau sans fil (Wireless network) [1, 2] est un réseau informatique qui permet aux terminaux de communiquer entre eux sans aucune liaison filaire. Cette communication est uniquement avec des ondes radioélectriques (radio ou infrarouge, etc), de sorte que ces derniers peuvent se déplacer dans un certain périmètre de couverture géographique sans perdre le signal. En général, les réseaux sans fil peuvent être organisés en deux principales classes à savoir : les réseaux sans fil avec infrastructure (Cellulaires) et les réseaux sans fil sans infrastructure (Ad-hoc).

Les réseaux cellulaires sans fil se constituent d'un ensemble de points d'accès (sites fixes ou stations de base) et des unités mobiles. Chaque station de base lui correspond une cellule contenant les unités mobiles connectées via une liaison sans fil pour émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux via un réseau de communication filaire.

Cependant, dans les réseaux sans fil sans infrastructure la notion de sites fixes ou points d'accès n'existe pas. Par conséquent, toutes les unités du réseau communiquent d'une manière directe. Cette communication est en utilisant leurs interfaces de communication sans fil, et ce afin de construire un réseau point à point. Ainsi chaque unité joue en même temps le rôle de client et celui du point d'accès.

1.3 Les réseaux véhiculaires Ad-hoc (VANETs)

Les réseaux véhiculaires (Vehicular Ad-hoc Network)[3, 4] est une classe particulière des réseaux mobiles Ad-hoc (MANET). Ils permettent d'établir des communications au sein d'un groupe de véhicules intelligents (nœuds). Ces communications sont entre les véhicules (V2V), et entre ces derniers et les sites fixes (infrastructures) situés aux bords des routes (V2I); voir la figure 1.1. Cette communication est réalisée en exploitant les technologies sans fil; généralement celles appartenant à la famille 802.11. Les VANETs sont considérés comme des systèmes de transport intelligent (ITS, Intelligent Transport System) dont l'objectif principal est de réduire l'embouteillage et d'améliorer la sécurité et l'efficacité routière, en fournissant des informations propices aux conducteurs.

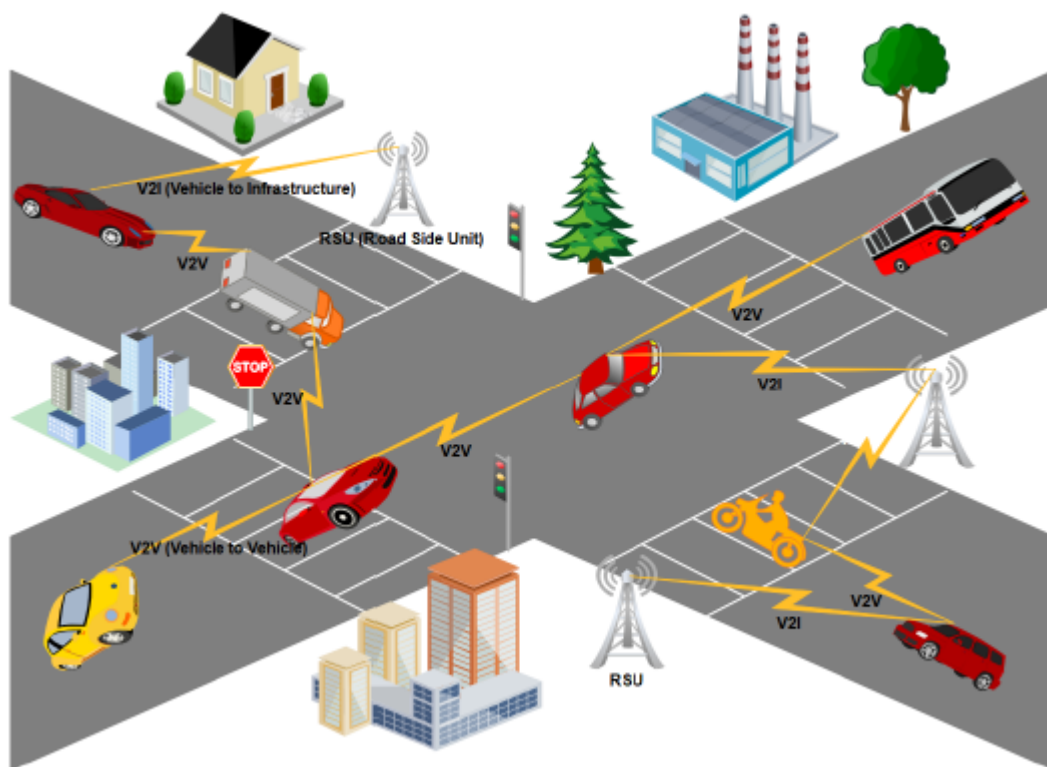


FIGURE 1.1 – Réseau véhiculaire

1.3.1 Composants des VANETs

Un réseau VANET se constitue principalement de trois entités communicantes ; voir la figure 1.2.

1.3.1.1 TA (Trusted Authority)

C'est l'autorité de confiance [5] qui pourra être un serveur de transaction ou de stockage. Elle se charge de la gestion ou de l'enregistrement de toutes les entités du réseau (OBU et RSU). Aussi, elle gère la délivrance et l'attribution des certificats numériques et des pseudonymes de communication des véhicules.

1.3.1.2 RSU (Road Side Unit)

Les Road Side Units [5] sont les subordonnées de la TA. Elles sont installées au bord de la route. L'objectif principal de ces infrastructures est de diffuser des messages aux véhicules qui se trouvent dans ses zones radio. Ces messages contiennent des informations sur les conditions météorologiques, ainsi que sur l'état de la route (vitesse maximale, autorisation de dépassement, etc.).

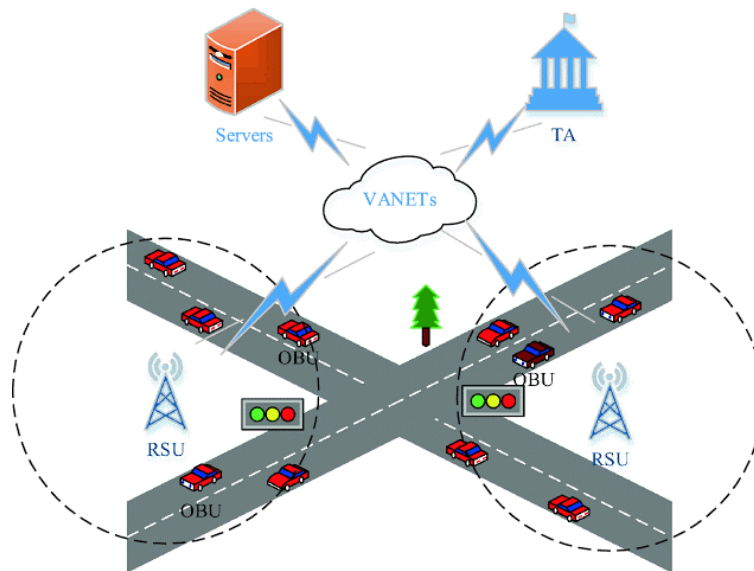


FIGURE 1.2 – Composants d'un réseau véhiculaire.

1.3.1.3 OBU (On Bord Unit)

L'On Board Unit (OBU) [5] est une unité embarquée dans les véhicules intelligents, composée des unités suivantes (voir la figure 1.3) :

- ☛ Un 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 accidents. Au fait, les données collectées peuvent être utilisées pour la reconstruction des événements.

- ☞ Un radar avant et arrière : permet de détecter les obstacles.
- ☞ Un système de localisation (GPS) : afin de localiser et déterminer la position du véhicule.
- ☞ Une plateforme de traitement : pour traiter les données provenant de différentes composantes utilisées.
- ☞ Une interface homme machine(IHM).

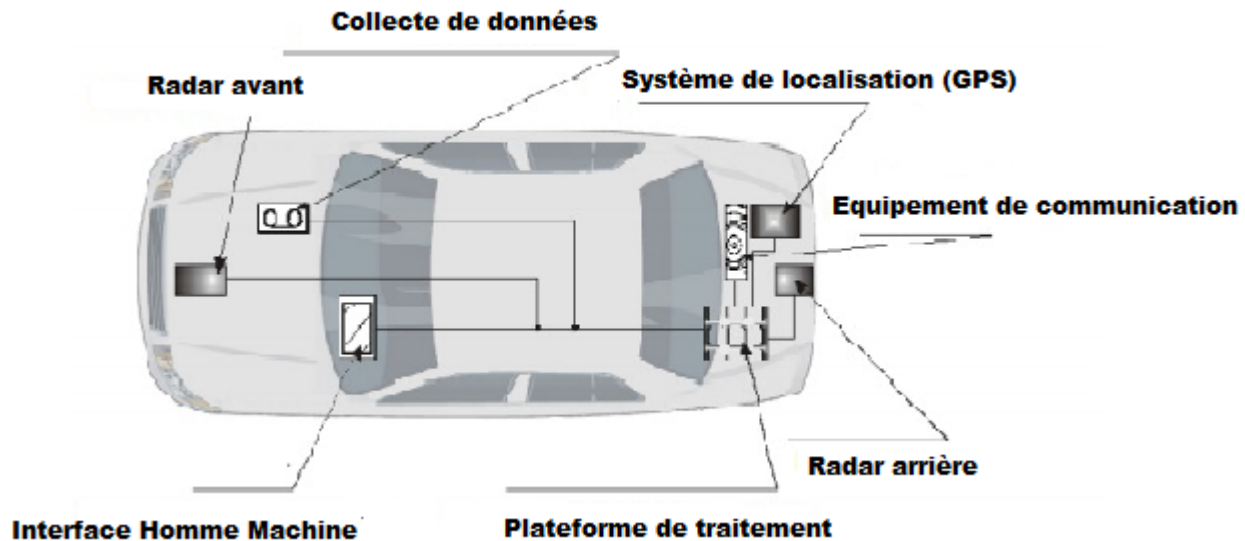


FIGURE 1.3 – Véhicule intelligent.

1.3.2 Les modes de communication dans les VANETs

Dans les réseaux VANETs, on peut distinguer trois modes de communication : les communications Véhicule à Véhicule (V2V), les communications Véhicule à Infrastructure (V2I) et les communications de type hybride.

Avant de détailler les différents modes de communication, nous allons d'abord présenter ci-dessous les différents types de messages [6] qui peuvent être échangés entre les unités communicantes.

- a. **Message de contrôle** : chaque véhicule émet régulièrement (chaque unité de temps) un message de contrôle (beacon) qui contient la position, la vitesse, la direction et l'itinéraire. Ces messages s'affichent aux autres véhicules et donnent ainsi une vision locale des véhicules voisins (de chaque véhicule), afin de prédire des situations de congestion ou accidentelles.
- b. **Message d'alerte** : le message d'alerte ou de sécurité est créé lorsqu'un événement est détecté (accident, obstacle ou la réception d'un autre message d'alerte). Ce type de messages contient les coordonnées du lieu de l'accident et les paramètres de la zone de retransmission. Il est transféré en urgence grâce à sa taille très réduite.

c. **Autres messages** : ce type de messages contient tous les messages qui ne sont pas des messages d'alerte ou de contrôle. En d'autres termes, cela peut être par exemple un message de transaction financière ou l'envoi de courrier électronique. En général, ces messages ne sont pas générés d'une façon régulière.

1.3.2.1 Mode de communication véhicule à véhicule (V2V)

Dans l'architecture de communication inter-véhicules [3, 6] aucune infrastructure n'est nécessaire sur les routes (voir la figure 1.4). C'est une communication purement ad hoc entre les véhicules à un saut ou à plusieurs sauts. Par ailleurs, même si certains équipements RSUs deviennent indisponibles (en panne ou hors de portée), le réseau continue à fonctionner. Pour ce faire, chaque OBU communique directement avec un autre s'il est situé dans sa zone radio. Autrement, la communication se fait par le biais d'un protocole multi-saut en utilisant les nœuds voisins qui les séparent comme des relais.

La communication V2V n'est pas coûteuse et offre un débit de transmission important, mais elle ne garantit pas une connectivité permanente entre les véhicules. Cependant, c'est une architecture très utilisée en cas d'alertes (freinage d'urgence, collision, ralentissement, etc) ou pour la conduite collaborative.

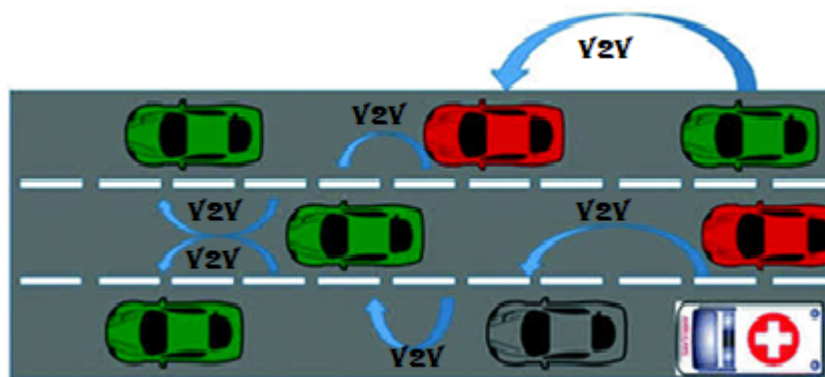


FIGURE 1.4 – Mode de communication véhicule à véhicule.

1.3.2.2 Mode de communication véhicule à infrastructure (V2I)

C'est une communication [7] 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 stops. Cela est afin d'améliorer l'expérience de la conduite et la rendre plus sûre. Cependant, 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. Ce mode est illustré dans la figure 1.5.

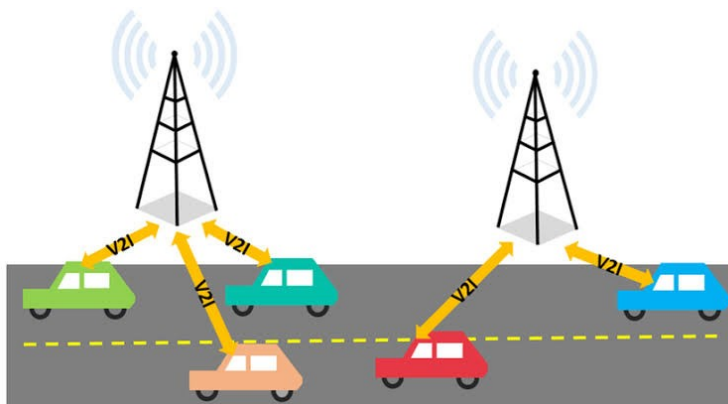


FIGURE 1.5 – Mode de communication Véhicule à Infrastructure.

1.3.2.3 Mode de communication hybride

Ce mode de communication est une approche permettant à un véhicule de communiquer avec un autre véhicule et/ou avec une infrastructure à un-saut ou à multi-saut, incluant ainsi les V2V et V2I (voir figure 1.6). Ce mode a un grand intérêt économique car il permet de diminuer les coûts de déploiement des unités tout au long des routes.

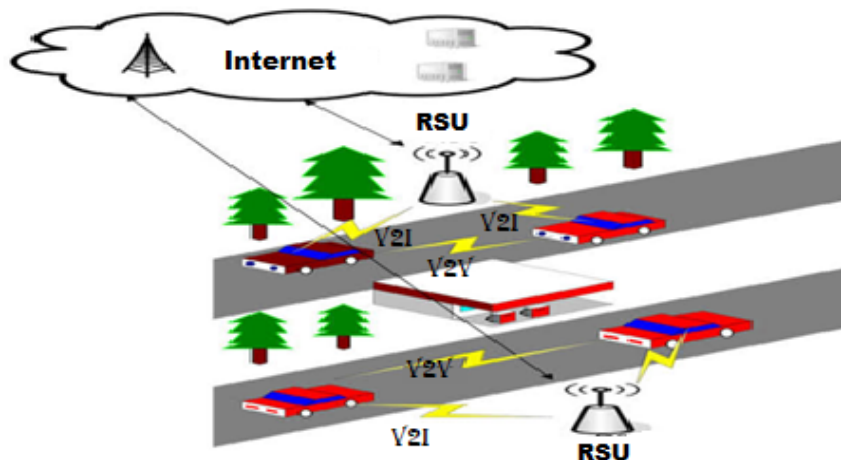


FIGURE 1.6 – Mode de communication hybride (V2VetV2I).

Il est à noter qu'il existe une autre approche d'hybridation de communication véhiculaire dans la littérature [8, 9, 10], appelée Vehicle to Everything ou bien Vehicle to Object (V2X) (voir figure 1.7). Ce dernier comprend les modes V2V (Vehicle to Vehicle), V2I (Vehicle to Infrastructure) déjà présentée précédemment ainsi que V2N (Vehicle to Network) et V2P (Vehicle to Pedestrian). Au fait, le mode de communication V2N consiste à connecter les véhicules à l'infrastructure cellulaire et au Cloud afin que les conducteurs puissent profiter des services embarqués ; comme les fonctions de navigation intégrées (Google Maps, Waze). Alors

que le mode V2P englobe un large éventail d'utilisateurs de la route (piéton), notamment les passagers, les cyclistes, etc.

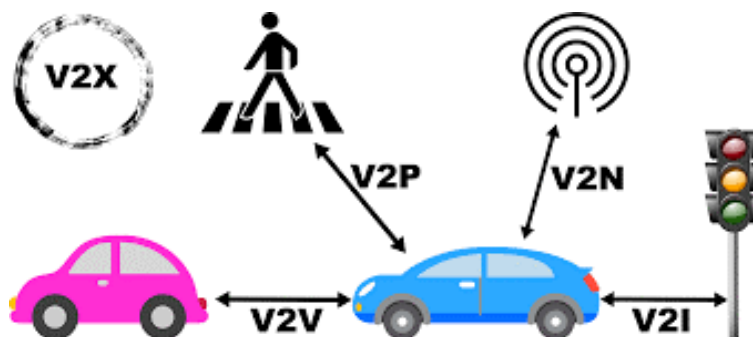


FIGURE 1.7 – Mode de communication hybride (V2X).

1.3.3 Les technologies de communication

Actuellement, les réseaux véhiculaires peuvent utiliser de nombreuses technologies de transmission. Par exemple, celles de la 3^{ème} génération (3G) et 4^{ème} génération (4G) de la téléphonie mobile, le Wifi, le WiMax, et le DSRC/WAVE [11]; voir la figure 1.8. Dans ce qui suit, on va décrire le principe de quelques technologies.

1.3.3.1 Réseaux cellulaires

Le réseau cellulaire [12] utilise des ondes radio pour transmettre les données sur de longues distances. Il est utilisé pour fournir des services mobiles, et ceci est depuis les années 1970. Il utilise une technique de « réutilisation de fréquences » pour augmenter la zone de couverture et également pour assurer plusieurs transmissions simultanément.

Au fait, le réseau sans fil cellulaire intelligent comprend les technologies : (3G, Universal Mobile Telecommunications System; UMTS) et (4G, Long Term Evolution; LTE).

La technologie 3G actuelle atteint un débit de 384 Kbps pour les véhicules en mouvement à vitesse de 3km/h à 100 km/h et peut aller jusqu'à 2 Mbps pour les nœuds fixes ou les infrastructures. Ces systèmes 3G offrent ainsi une fluidité des transferts. D'autre part, la technologie 4G a été conçue pour fournir des services mobiles élevés, à haut débit et moins chers sur internet. De plus, le système 4G peut fournir un transfert élevé à 129 Mbps pour une fréquence qui se varie entre 1700 MHz et 2100 MHz.

Néanmoins, ces technologies de transmission sont peu adaptées parce que leurs débits théoriques dépendent fortement de la mobilité des utilisateurs. Cependant, chaque élément du réseau VANET doit se doter d'un abonnement (un forfait via une carte SIM) chez un opérateur de la téléphonie mobile.

1.3.3.2 Wi-Fi et WiMax

Le Wi-Fi (Wireless Fidelity) [13] est un ensemble de protocoles de communication sans fil connu par le standard 802.11. Il permet de relier par les ondes radio plusieurs véhicules et RSUs afin de transmettre les données entre eux. Ce standard permet aussi de créer des liaisons à haut débit avec une portée peut atteindre des dizaines de mètres (plus précisément entre une vingtaine et une cinquantaine de m). Ainsi, pour satisfaire les exigences des applications véhiculaires, de nombreuses normes ont été développées telles que la technologie DSRC (Dedicated Short Range Communication) et le standard WAVE (Wireless Access in the Vehicular Environment).

Le standard Wi-Fi 802.11p (WAVE) a été établi spécialement pour les VANETs en fonction de leurs caractéristiques (vitesse du véhicule, jusqu'à 160 km/h, temps de latence faible, moins de 50 ms, etc.). Entre autres, une nouvelle technologie est développée nommé DSRC pour transmettre les informations à courte distance avec un débit théorique allant jusqu'à 6 Mbps. Elle est utilisée pour certaines applications liées à l'automobile comme le paiement électronique des péages sans s'arrêter.

De son côté, le réseau sans fil métropolitain WiMax (World wide Interoperability for Microwave Access) [11], qui est basé sur la norme IEEE 802.16 permet une transmission point à point portant sur une zone géographique étendue. 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, il est adapté pour les véhicules à vitesse modérée mais, il n'est pas plus idéal dans les situations de très grande mobilité. C'est pour cela on pourra l'utiliser juste pour les communications I2I.

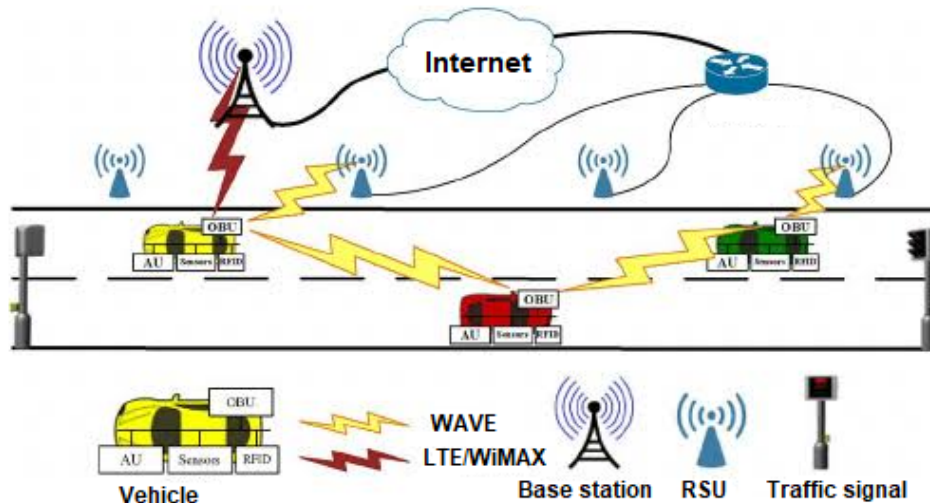


FIGURE 1.8 – Technologies de communication dans les VANETs.

1.3.4 Caractéristiques des réseaux VANETs

Les réseaux véhiculaires ont des caractéristiques spécifiques [13, 14, 36] qui les distinguent des autres types de réseaux sans fil traditionnels (réseaux ad hoc, réseaux de capteurs). Parmi les caractéristiques les plus importantes nous citons :

1.3.4.1 Forte mobilité

Les VANETs sont caractérisés par une forte mobilité, liée à la vitesse des véhicules. Cette vitesse permet aux véhicules de rejoindre ou quitter le réseau rapidement, ce qui rend la topologie fréquemment modifiable et changeable (topologie hautement dynamique). Toutefois, vu que la mobilité des véhicules peut être prédite et modélisée, la circulation sur une route ou une autoroute est facilement prévisible. Ainsi, connaissant la position actuelle du véhicule et sa vitesse, il est possible de prédire la direction, et ce à condition de connaître la carte routière.

1.3.4.2 Connectivité intermittente

La forte mobilité des véhicules et les obstacles de l'environnement provoquent des déconnexions fréquentes dans le réseau. Les liens de connexion entre deux véhicules peuvent être interrompus à cause de la mobilité qui éloigne les deux entités communicantes ; des obstacles qui empêchent la propagation du signal.

1.3.4.3 Variation des environnements

Les réseaux véhiculaires imposent la prise en compte d'une grande diversité environnementale. Cet environnement peut être une route, une autoroute ou une ville urbaine. Par exemple, dans un environnement urbain un embouteillage peut mener à l'encombrement du réseau.

1.3.4.4 Capacité énergétique

La contrainte d'énergie représente un facteur limitant aux réseaux sans fil traditionnels (Ad-hoc ou capteurs), et ce contrairement aux réseaux VANETs dont les entités communicantes disposent d'une capacité énergétique largement suffisante. Cela est possible car les OBUs utilisent les batteries des véhicules et les RSUs (feu tricolores, éclairage publique) sont alimentés par une source d'énergie illimitée.

1.3.5 Domaines d'application des VANETs

Dans les réseaux véhiculaires trois grands types d'application [6, 36] peuvent être distingués à savoir : les applications de sécurité routière, de gestion du trafic et les applications de confort.

1.3.5.1 Applications de sécurité routière

Les applications de sécurité routière visent à améliorer la sécurité des usagers sur les routes, en informant les véhicules de tout danger potentiel. Ces applications se basent en général sur la détection de l'environnement en utilisant des capteurs (radar, camera), ainsi qu'une diffusion de messages informatifs périodiques. Ces messages permettent aux conducteurs d'avoir une connaissance de l'état de la route (travaux, météo), et des véhicules voisins (alerte en cas d'accident), voir la figure 1.9.

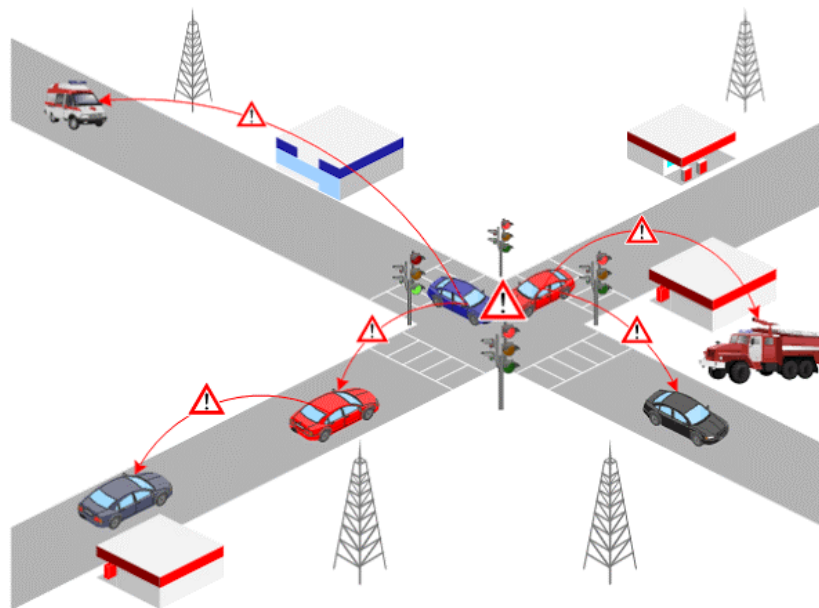


FIGURE 1.9 – Alerte de situation d'urgence.

1.3.5.2 Applications de gestion du trafic

Les applications de gestion de trafic, permettent d'améliorer les conditions de circulation afin de réduire le nombre d'accidents et les embouteillages. Elles consistent à fournir aux conducteurs des informations du trafic. Ces applications visent à équilibrer la circulation des véhicules sur les routes afin d'utiliser efficacement la capacité de ces routes et des carrefours. Par conséquent, réduire les pertes humaines et la durée des voyages.

1.3.5.3 Applications liées au confort

Les réseaux VANETs permettent d'assurer le confort aux conducteurs durant leurs voyages. Comme services de confort et commodité on peut citer les services comprenant les panneaux d'annonces :

- ☞ services locaux comme les offres de restaurants, la présence de stations-service proximité.
- ☞ Services culturels comme les informations touristiques relatives à la localisation du véhicule.
- ☞ Services télématiques comme le péage à distance sur autoroute (voir figure 1.10), le paiement automatique dans les stations-service (ce qui peut faciliter la vie des handicapés).

En outre, de nouveaux services à vocation de divertissement sont aussi offerts aux usagers. Une connexion internet à bord avec vidéo à la demande ou des jeux, sont un parfait exemple.

À toutes ces applications s'ajoutent aussi le contrôle à distance de véhicules de manière électronique (vérification du permis de conduire, contrôle technique, plaque d'immatriculation) pour les services compétents (police, douane, gendarmerie).



FIGURE 1.10 – Péage électronique en Chine.

1.3.6 Challenges et les contraintes des VANETs

Malgré le développement rapide des réseaux VANETs, plusieurs lacunes et contraintes doivent être soulevées et étudiées.

1.3.6.1 Qualité de service

La qualité de service dans un réseau VANET [17] représente un enjeu majeur, qui se mesure en fonction de l'application supportée. Ainsi, diverses contraintes strictes sont liées

aux VANETs comme la latence et le délai de transmission, (les messages doivent parvenir à destination dans des délais courts), la fiabilité de transmission, la bande passante, la gigue et la congestion.

1.3.6.2 Accès au canal

Le rôle des mécanismes de gestion du canal radio est d'offrir des transmissions fiables et robustes et un partage équitable du médium de communication [18]. Pour atteindre cet objectif dans le cas des réseaux véhiculaires, il est nécessaire de définir des protocoles permettant de gérer les priorités en résolvant les problèmes d'interférences radio, des irrégularités électromagnétiques, de l'allocation de ressources distribuées dans une topologie dynamique, etc.

1.3.6.3 Sécurité

La sécurité [15, 16] est un défi majeur ayant un grand impact sur le futur déploiement des réseaux véhiculaires, vue qu'elle affecte la vie des gens. Au fait, les informations échangées dans le réseau ne puisse pas être altérées ou supprimées par un attaquant. Cependant, 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. Par exemple, les communications échangées entre les véhicules du réseau, ou bien les informations sur ces véhicules et leurs conducteurs doivent être garanties et protégées de façon à assurer le bon fonctionnement du système.

1.3.6.4 Routage

Afin que les véhicules puissent communiquer entre eux correctement et rapidement, un protocole de routage efficace est nécessaire. Ainsi, si les véhicules ne sont pas à une portée de transmission radio directe, le routage est exigé pour établir la communication entre ces nœuds ; une transmission de paquets de données de sorte que les messages multi-saut envoyés dans un chemin entre la source et la destination selon un protocole de routage. Plus précisément, les protocoles de routage [19] sont chargés de déterminer la manière de relayer le paquet à sa destination, de calculer la route et aussi d'ajuster la trajectoire en cas d'échec. Cela est tout en assurant un délai d'acheminement réduit, une grande fiabilité et une meilleure utilisation des ressources. Cependant, beaucoup de problèmes auxquels doivent répondre les protocoles de routage. Par exemple, la topologie très dynamique des réseaux VANETs qui rend les routes déjà établies obsolètes, ainsi que le partitionnement du réseau qui empêche la propagation des paquets. Dans ce qui suit nous allons donner un aperçu sur l'état de l'art des protocoles de routage proposés ou réadaptés aux réseaux de véhicules.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les réseaux VANETs; en présentant leurs différents modes de communication, leurs technologies de transmission, leurs domaines d'application et aussi leurs principales caractéristiques. En outre, nous avons repéré les challenges et les contraintes les plus cruciaux dans ce type de réseaux.

Parmi ces challenges, le routage de données qui se présente comme une tâche assez importante et critique. Il consiste à acheminer les données de la source vers la destination d'une manière optimale et efficace. Ce transfert de données est assuré par différents protocoles de routage.

Le chapitre suivant sera consacré à étudier le processus du routage dans les réseaux VANETs, tout en passant en revue les protocoles de routage proposés ou réadaptés à ces réseaux.

Routage dans les VANETs

2.1 Introduction

Le routage des données permet d'assurer un relayage efficace des paquets vers la destination. Ainsi, déterminer le meilleur chemin et le maintenir se présente comme un processus assez complexe dans les réseaux VANETs. Cela est dû à la mobilité élevée des véhicules et les changements rapides de la topologie. Par conséquent, le choix d'un chemin devient crucial pour la conception des protocoles de routage de ces réseaux à forte dynamique. Cependant, le routage reste l'un des principaux défis auquel il faut faire face.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier, les métriques de performance utilisées dans la sélection des routes dans les réseaux VANETs. Par la suite, nous exposerons une classification des protocoles de routage conçus ou réadaptés aux VANETs, tout en présentant certains protocoles de chaque classe. Enfin, nous allons comparer les protocoles examinés selon les métriques définies précédemment.

2.2 Métriques de choix des routes dans les VANETs

L'acheminement des paquets d'une source vers une destination peut se faire de deux façons distinctes ; directement avec un seul saut si la source et la destination sont connectées directement l'une avec l'autre. Sinon, par étapes avec plusieurs sauts (multi-saut). Dans ce cas, la communication se fait via des nœuds intermédiaires positionnés entre la source et la destination. Lors d'une communication multi-saut, le chemin est choisi en fonction de divers facteurs [48] tels que :

- **Le taux de livraison des paquets (Packet Delivery Ratio, PDR)** : c'est le rapport entre le nombre total des paquets de données reçus par les nœuds destinations et le nombre total de paquets de données émis par les nœuds sources.
- **Le cout du routage normalisé (Normalized Routing Load, NRL)** : c'est le rapport entre le nombre total de tous les paquets de contrôle de routage envoyés par tous les nœuds sur le nombre de paquets de données reçus aux nœuds de destination.
- **La latence** : c'est le temps écoulé entre le moment où un paquet de donnée est envoyé et celui où il est reçu par le destinataire correspondant.

- **La bande passante** : c'est le volume des paquets de données qui peut être transféré d'un nœud émetteur à un autre récepteur. Généralement, elle s'exprime sous la forme d'un débit binaire mesuré en bits par seconde (bps).
- **La gigue** : c'est la différence du délai de deux paquets successivement reçus.

2.3 Classification des protocoles de routage dans les VANETs

le routage dans les VANETs a fait l'objet de plusieurs travaux dans la littérature [45, 46, 47]. Dans le reste de cette section nous présentons une classification des protocoles proposées pour les réseaux VANETs tirée de [45], tout en examinant les caractéristiques principales de chaque classe.

Cependant, les protocoles de routage peuvent être classés en trois grandes familles (voir la figure 2.1).

- ☞ Selon la stratégie du routage (proactif, réactif, hybrid).
- ☞ Selon le type du routage (Unicast, multicast (géocast), broadcast).
- ☞ Selon la structure du réseau (protocoles basés position, protocoles basés clustering).

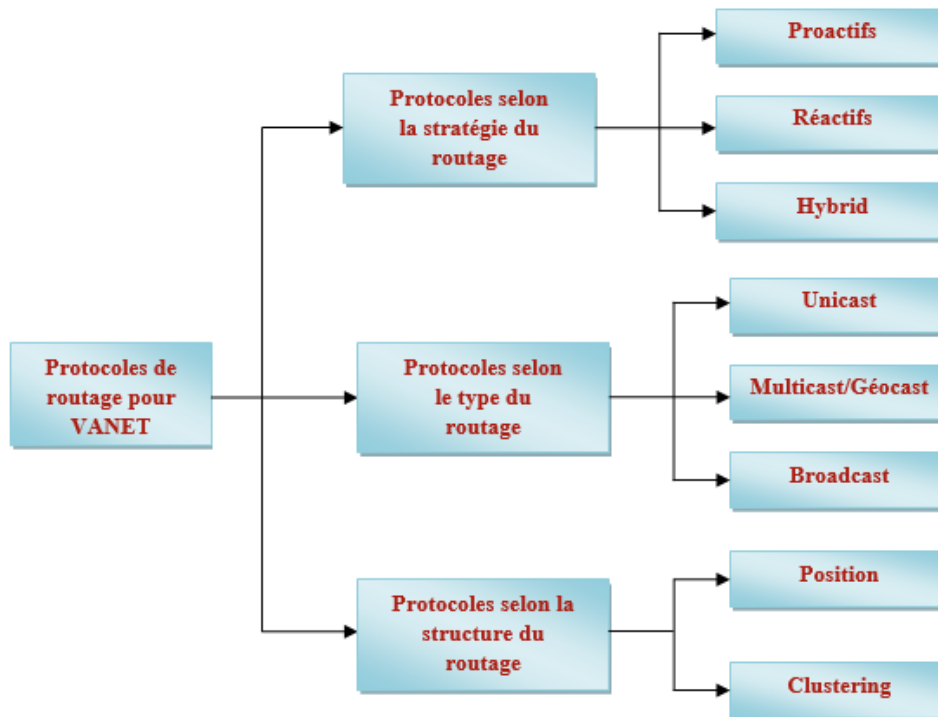


FIGURE 2.1 – Classification des protocoles de routage dans les VANETs.

2.3.1 Selon la stratégie du routage

Les protocoles de routage de cette famille utilisent les informations sur les liens qui existent entre les nœuds pour l'acheminement des paquets. Cette famille de protocoles peut être divisée en trois classes : proactifs, réactifs et hybrid.

2.3.1.1 Protocoles de routage proactifs

Les protocoles proactifs [21] sont similaires aux protocoles utilisés dans les réseaux filaires, qui utilisent les deux principales méthodes (état de lien et vecteur de distance). Chaque nœud garde une image globale de la topologie de tout le réseau dans une forme de tableaux. Ces derniers contiennent des informations concernant toutes les destinataires. Un nœud fait un échange périodique de messages de contrôles avec les autres nœuds pour maintenir ces tables de routage à jour. À base de ces tables il détermine le meilleur chemin ou route pour acheminer les données.

Dans ce type de protocoles, la disponibilité immédiate de route lors du besoin est un gain de temps ; chaque nœud dispose à tout instant d'un chemin vers n'importe quel autre nœud du réseau. Cependant, la bande passante se diminue à cause du trafic généré par l'échange de paquets de contrôles. Parmi les protocoles basés sur ce principe : OLSR, FSR et GSRP [24]. Nous allons décrire dans ce qui suit l'un des protocoles les plus cités de cette classe :

☞ Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR [23] est un protocole de routage proactif à état de lien. Il offre des routes optimales en termes de nombre de sauts dans le réseau.

Dans un protocole à état de lien chaque nœud déclare ses liens directs avec ses voisins à tout le réseau. Cependant, dans le protocole OLSR, les nœuds ne déclarent qu'une sous partie de leur voisinage.

L'ensemble des voisins s'appelle l'ensemble de relais multipoint ou MPRs (Multi Point Relaying). Les routes sont construites à base de ces relais qui sont utilisés pour minimiser le trafic dû à la diffusion des messages de contrôle dans le réseau.

Au fait, le protocole OLSR effectue deux actions principales :

- Envoyer le message HELLO et déterminer les MPRs pour la détection de voisinage (voir la figure 2.2).
- L'intervention des messages TC (diffuser les informations de topologie), MID (pour publier la liste des interfaces de chaque nœud) et HNA (pour déclarer les sous-réseaux et hôtes joignables par un nœud jouant le rôle de passerelle) pour la gestion de topologie.

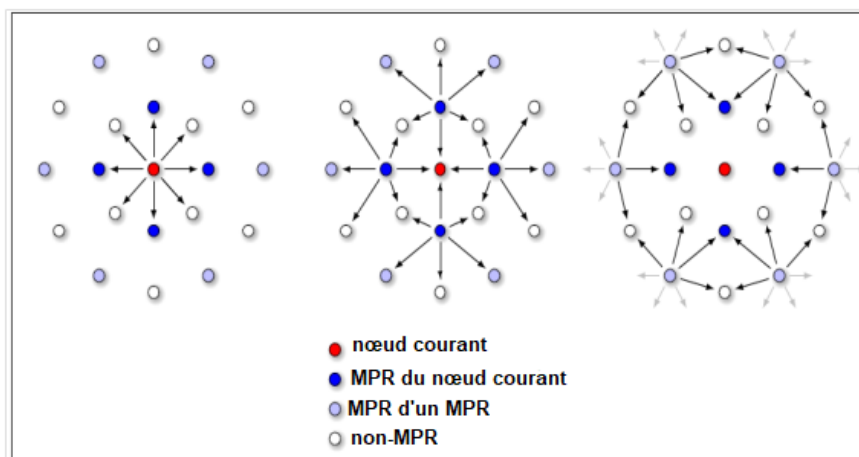


FIGURE 2.2 – Sélection des MPRs dans OLSR.

2.3.1.2 Les protocoles de routage réactifs (on-demand driven)

Dans les protocoles réactifs, le chemin n'est calculé que sur demande. L'opération de routage dans ce protocole comporte deux phases principales :

- La découverte de route pour l'acheminement de données vers une destination ; cette étape est assurée par la diffusion d'un message de recherche de route.
- La maintenance des routes existantes dans le cas de changement de la topologie du réseau.

Le routage réactif minimise l'échange de messages de contrôle ce qui libère la bande passante. A l'instar les protocoles proactifs, la latence de recherche d'itinéraire est élevée dans ce type de routage. Parmi les protocoles les plus connus, on peut citer : DSR, AODV et TORA [28]. Dans le reste de ce paragraphe, nous allons décrire les protocoles AODV et DSR.

☞ Le protocole AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing)

Le protocole AODV [27] est l'un des plus célèbres protocoles de routage réactifs. Les chemins sont découverts et maintenus à la demande. Lorsqu'un nœud émetteur souhaite envoyer des données à un nœud destinataire, la première étape consiste à diffuser à tous les nœuds du réseau un message RREQ (Route REQuest) de découverte de route. Par conséquent, lors de la réception d'un message RREQ, chaque nœud agit en fonction des cas de figure suivants :

- Si il n'est pas le destinataire, alors le nœud retransmet le message RREQ en ajoutant sa propre adresse dans le chemin de routage.
- Si il n'est pas le destinataire et si le message RREQ contient déjà sa propre adresse dans le chemin de routage, alors le nœud élimine le message sans le transmettre.
- Si il est le destinataire, alors le nœud renvoie un message RREP (route reply) en suivant le chemin de routage contenu dans le message RREQ.
- Au fait , le message RREP est le message de confirmation d'établissement d'une connexion entre émetteur et récepteur. Dès que l'émetteur reçoit ce message, la

communication peut commencer.

- Ne reçoit aucune réponse dans une période de temps donné, il supposera que le chemin n'est pas disponible.

☞ Le protocole DSR (Dynamic Source Routing)

Le protocole DSR [26] reprend le principe du protocole DSDV. Ce protocole construit les tables de routages de façon réactive en se basant sur l'état des liens. En effet, la modification de la table se fait seulement lorsque l'état des liens varie. De plus, il copie les IDs (identités) des nœuds traversés dans l'en-tête du message pour permettre au message de retrouver son chemin vers la source.

De ce fait, le protocole DSR peut ainsi choisir des routes alternatives s'il les considère comme meilleures. Il possède ainsi une réactivité plus rapide que celle du protocole AODV en cas de perte de liaison avec un nœud. Toutefois, DSR ne fonctionne pas bien si la mobilité est très élevée, et l'augmentation des nœuds à traverser causera l'augmentation de la taille des paquets.

2.3.1.3 Les protocoles de routage hybrid

Il s'agit d'une combinaison des protocoles proactifs et réactifs [26] tels que ZRP, HARP [30] et HLAR [31]. Cette famille de protocoles utilise le mécanisme des protocoles proactifs pour garder la connaissance de la topologie pour un nombre prédéfini de sauts. Au-delà de cette zone prédéfinie les routes vers des nœuds plus lointains sont obtenues par les techniques des protocoles réactifs, c'est à dire l'envoi des requêtes en diffusion. Ces protocoles s'adaptent bien aux réseaux plus ou moins denses. Néanmoins, les protocoles de cette classe cumulent les inconvénients hérités de deux approches à savoir les paquets de contrôle périodiques et le délai de découverte de routes.

Nous allons décrire dans ce qui suit le protocole ZRP l'un des plus importants protocole de cette classe.

☞ Le protocole ZRP (Zone Routing Protocol)

Le protocole du routage ZRP [29] est un protocole hybrid qui combine les deux approches proactive et réactive à la fois. Ce protocole divise le réseau en plusieurs zones. Pour chaque nœud, il définit une zone de routage exprimée en nombre de sauts maximal. Ainsi, la zone de routage d'un nœud inclut tous les nœuds qui ne dépassent pas cette distance maximale de sauts. Les nœuds qui sont exactement à cette distance, sont appelés nœuds périphériques. Le routage au sein d'une zone se fait de manière proactive, alors que le routage vers les nœuds extérieurs de la zone se fait de façon réactive. En plus, le ZRP utilise un protocole BRP (Bordercast Routing Protocol), dont le but est de construire la liste des nœuds périphériques d'une zone et les routes permettant de les atteindre. Cependant, la procédure de recherche des chemins s'effectue comme suit :

- Si le nœud destinataire se trouve dans la zone du nœud source, le chemin est supposé déjà connu.
- Sinon, une demande d'établissement de route RREQ est initiée vers tous les nœuds périphériques. Ces derniers vérifient si la destination existe dans leurs zones. Dans ce cas la source recevra un paquet RREP (route reply) contenant le chemin menant à la destination. Dans le cas contraire, les nœuds périphériques diffusent la requête à leurs propres nœuds périphériques qui, à leur tour, effectuent le même traitement. Un exemple de zone dans le protocole ZRP est donné à la figure 2.3.

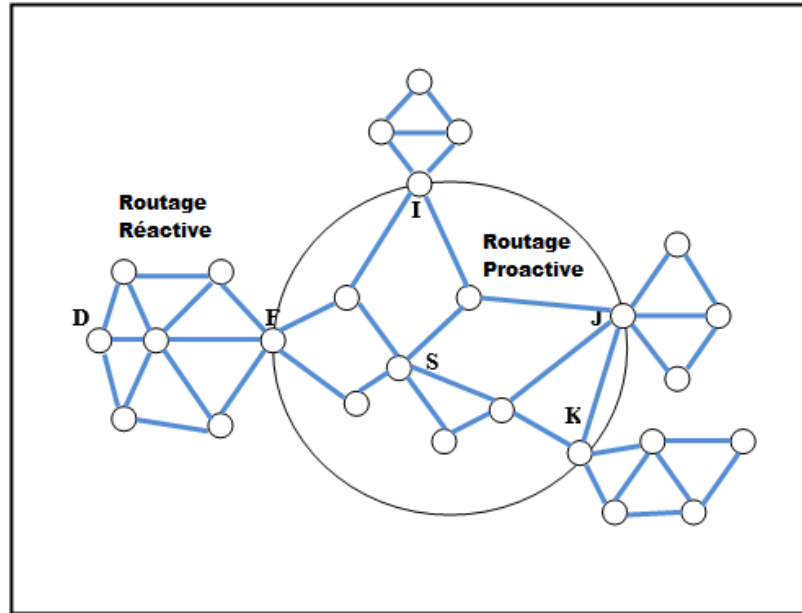


FIGURE 2.3 – Un exemple de zone dans le protocole ZRP.

2.3.2 Selon le type du routage

La transmission de l'information à partir d'une source vers une destination peut être classée en trois types distincts : unicast, multicast/géocast et broadcast.

2.3.2.1 Protocoles unicast

Le routage unicast [26] se réfère à la transmission de l'information à partir d'une source unique vers une destination unique en utilisant une communication multi-saut, où les nœuds intermédiaires ont comme rôle la transmission des données de la source à la destination (ceci est montré dans la figure 2.4). Pour ce faire, la stratégie de stockage et transmission utilisée.

Il existe de nombreux protocoles de routage unicast comme par exemple le protocole DSDV [22].

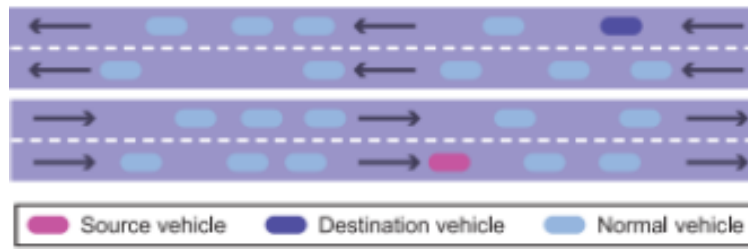


FIGURE 2.4 – Routage unicast.

☞ Protocole DSDV (Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector)

Le protocole de routage DSDV [22] est basé sur l'idée classique de l'algorithme distribué de Bellman-Ford en ajoutant quelques améliorations. Dans ce protocole, chaque nœud maintient une table de routage contenant :

- Toutes les destinations possibles.
- Le nombre de sauts nécessaire pour atteindre la destination.
- Le numéro de séquence qui est utilisé pour faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes ; ce qui évite les boucles dans le routage.

En effet, chaque nœud du réseau envoie sa table de routage d'une façon périodique à ses voisins directs s'il y a des mises à jour significatives par rapport au dernier contenu envoyé. La mise à jour dépend de deux paramètres : le temps, c'est à dire la période de transmission, et les événements (apparition d'un nœud, détection d'un nouveau voisin, etc.).

Quand un nœud reçoit un paquet de mise à jour, il le compare avec les informations existantes dans sa table de routage. Toute entrée dans la table est mise à jour si l'information reçue est plus récente (ayant un numéro de séquence plus grand), ou si elle est une distance plus courte [26].

2.3.2.2 Protocoles multicast/géocast

Le routage géocast est habituellement un type spécial du routage multicast basé sur la localisation géographique. Cette technique de routage consiste à transmettre des paquets à l'ensemble des nœuds situés dans une zone géographique donnée. Cette zone est appelée zone de pertinence (ZOR, Zone Of Relevance). Par conséquent, un nœud doit juste rentrer dans cette zone pour pouvoir recevoir les paquets ; la figure 2.5 illustre ce type de routage.

Par ailleurs, les VANETs bénéficient largement de ce type de routage car les capteurs des véhicules détectent les événements survenus. Ainsi, ces derniers peuvent les signaler immédiatement aux véhicules voisins. Or, les véhicules à l'extérieur de la zone de pertinence ne sont pas alertés pour éviter les réactions inutiles. Un exemple de protocoles de cette classe nommé IVG est décrit ci-dessous.

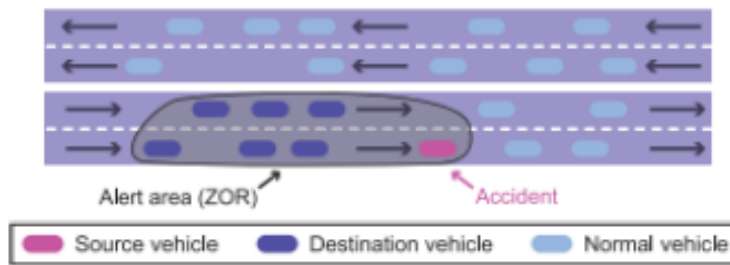


FIGURE 2.5 – Routage géocast.

☞ Protocole IVG (Inter-Vehicular Geocast)

C'est un protocole [43] qui optimise la dissémination d'information. En outre, il limite le nombre de sauts qu'un message peut effectuer en sélectionnant dynamiquement les nœuds relais pour rediffuser périodiquement les messages d'alerte. Ainsi le protocole IVG informe les véhicules situés dans une zone à risque à propos d'un danger survenu sur une autoroute. Cependant, selon leur localisation par rapport à la zone à risque, les véhicules voisins recevant ce message calculent un intervalle de différence de temps de réception d'une réponse de ses voisins à un saut. Cet intervalle permettra au voisin le plus loin d'être un relais pour la transmission tout en favorisant le plus loin. X est le voisin le plus loin de Z par rapport à Y, il permet d'atteindre W. La figure 2.6 illustre la sélection de relais dans IVG.

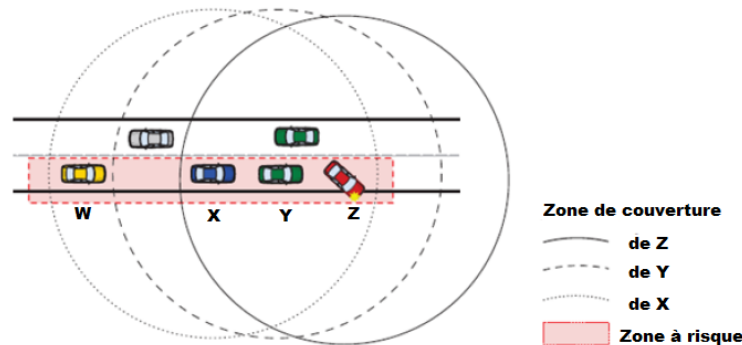


FIGURE 2.6 – Sélection de relais dans IVG.

2.3.2.3 Protocoles broadcast

☞ Dans les protocoles de routage broadcast [6], la transmission des paquets consiste à envoyer l'information à tous les nœuds disponibles qui sont à portée de communication, utilisant la méthode d'inondation. Ainsi, un message envoyé par un véhicule émetteur par diffusion est transmis à tous ses voisins directs. Par la suite, il est retransmis encore une fois par chacun de ces récepteurs et ce jusqu'à atteindre le nœud destinataire ; (voir la figure 2.7). Certes, l'inondation est efficace dans des réseaux de petite taille, mais

elle mène rapidement à une surcharge du réseau lorsque celui-ci est grand. Un exemple de protocoles de cette classe est le protocole **BROADCOMM** [44].

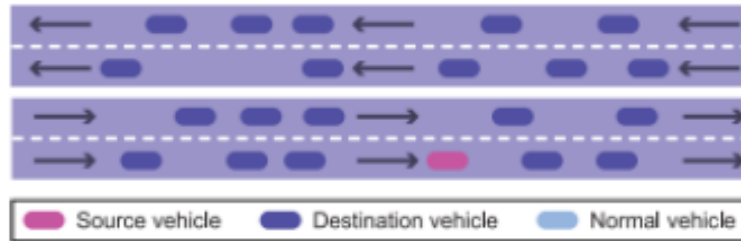


FIGURE 2.7 – Routage broadcast.

☞ Protocole BROADCOMM (BROADcast COMMunication)

Dans le protocole BROADCOMM [44], l'autoroute est divisée en cellules virtuelles qui se déplacent comme des véhicules. Tandis ce que les véhicules sont organisés en deux niveaux d'hierarchie. Le premier niveau comprend tous les nœuds d'une cellule. Alors que le deuxième niveau est représenté par des réflecteurs de cellules. Au fait, ces réflecteurs sont quelques nœuds situés à proximité du centre géographique de la cellule. Ils se comportent comme étant des têtes de cellules pendant un intervalle de temps. De plus, ils traitent les messages d'urgence provenant de même membres de la cellule ou des voisins proches.

2.3.3 Selon la structure du réseau

Les protocoles de cette famille peuvent être classés en deux principales classes : protocoles basés sur la position et protocoles basés clustering.

2.3.3.1 Protocoles basés sur la position

Les protocoles de routage basés sur la position utilisent les coordonnées géographiques du véhicule fournies par un système de géolocalisation (GPS) afin de sélectionner les prochains-sauts. Dans ce type de protocoles, chaque nœud source inclut l'identifiant et la position de la destination dans l'entête de tout paquet à envoyer. Les nœuds recevant ce paquet utilisent les informations de localisation incluses dans ce dernier et celles disponibles dans leurs tables de routage pour retransmettre le paquet. Le même mécanisme est répété jusqu'à ce que celui-ci atteigne la destination. Différents protocoles basés sur la position sont proposés dans la littérature à savoir GPSR [32], DMHMH [33], GPCR [34], CBF [35], A-STAR [36], GYTAR [37] et MURU [38].

Nous allons décrire dans ce qui suit le protocole GPSR qui est l'un des protocoles de référence de cette famille.

☞ Protocole GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

GPSR [32] est un protocole de routage proposé pour les réseaux mobiles ad-hoc.

Ce protocole permet au nœud d'encapsuler sa position dans les paquets de données qu'il envoie. Chaque nœud transmet d'une façon périodique des messages de contrôle contenant sa position et son identifiant (son adresse IP). Ces informations permettent autres nœuds savoir sa position et sa direction, et donc construire leurs tables de position.

Au fait, un des avantages de ces messages de contrôle est que chaque nœud n'a besoin que des informations sur ses voisins directs, ce qui nécessite que peu de mémoire.

En général, l'acheminement des paquets par le protocole GPSR se fait selon deux modes suivant la densité du réseau.

- **Le mode Greedy** : dans ce mode un chemin parcourant les nœuds de la source à la destination est construit. Chaque nœud qui recevant un paquet l'achemine en faisant un saut vers le nœud intermédiaire le plus proche de la destination, et qui se trouve dans sa zone de couverture. Lorsqu'un paquet de données atteint une région où le mode Greedy échoue, le mode périmètre sera utilisé.
- **Le mode périmètre** : ce mode utilise la règle de la main droite. Lorsqu'un paquet arrive à un nœud x du nœud y , le chemin à suivre est le prochain qui se trouve dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en partant de x et par rapport au segment $[xy]$ tout en évitant les routes déjà parcourues.

2.3.3.2 Protocoles basés clustering

Dans les protocoles basés clustering, les véhicules qui sont à proximité des autres véhicules forment un groupe (cluster). Dans chaque cluster un CH (Cluster Head) est désigné comme un chef de cluster pour assurer les fonctions de gestion intra et inter-cluster. Les véhicules intra-cluster communiquent entre eux en utilisant des liens directs. Tandis que la communication entre les clusters s'effectue par le biais des CHs, (voir la figure 2.8). La formation des clusters est une solution efficace aux réseaux VANETs [26] qui sont connus par leur forte mobilité, afin de maintenir les liens entre les véhicules d'un côté, et optimiser les coûts de livraison des paquets de données lors du transport d'un autre côté.

Cependant, la sélection du CH de cluster est un défi important. De même les retards engendrés lors de la livraison des paquets de données selon sa gestion.

Beaucoup de protocoles basés clustering ont été proposés pour les VANETs. Le chapitre suivant sera axé sur ce type de protocoles où on va étudier ce mécanisme en détail. Cependant, nous présentons brièvement dans ce qui suit le protocole COIN [39], l'un des protocoles de cette classe.

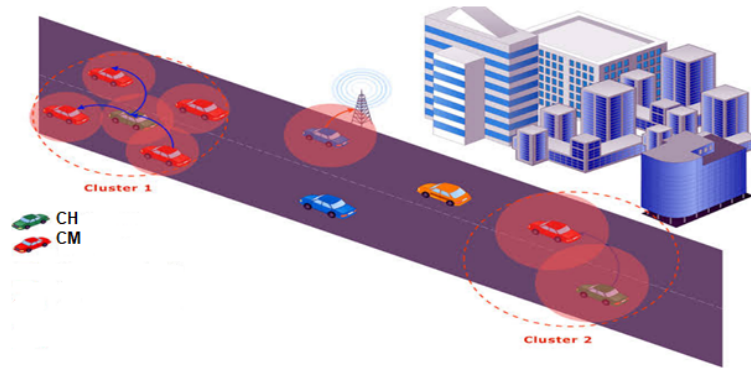


FIGURE 2.8 – VANETs basé clustering.

☞ Protocole COIN (Clustering for Open Inter vehicle communication Network)

COIN [42] est un protocole de routage assurant l'interconnexion des véhicules. Dans ce protocole, la sélection du chef de cluster se base sur la dynamique des véhicules et les intentions du conducteur. Par contre, la communication inter-véhicules répond à la nature des distances inter-véhicules. De même, la mobilité relative entre un chef de cluster et un nœud membre doit être inférieure à un seuil. Ce seuil est choisi de sorte qu'ils restent en contact aussi longtemps que possible. Malgré que COIN améliore la stabilité du cluster, en sélectionnant les véhicules qui ont un mouvement relativement similaire et de faible mobilité, ce dernier induit un coût de communication important en essayant de réaliser la stabilité des clusters.

2.4 Comparaison entre les différents protocoles étudiés

Dans le but de donner une vue globale sur le routage dans les réseaux VANETs, on trouve que l'établissement d'une table comparative entre les protocoles étudiés précédemment est nécessaire. Cette table comportera certaines métriques de performances à savoir le PDR, la latence, l'overhead et la bande passante, ainsi l'environnement et la stratégie de transfert utilisée.

Le tableau ci-dessous illustre cette comparaison.

	Sous classe	Protocole	Stratégie de transfert	L'environnement	PDR	Latence	Overhead	Bande Passante
Stratégie de routage	Proactifs	OLSR	Multi-saut	Urbain	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé
	Réactifs	AODV	Unicast, Multi-saut	Lieu libre	Faible	Elevé	Elevé	Elevé
		DSR	Unicast, Multi-saut	Urbain	Elevé	Elevé	Faible	Faible
	Hybrid	ZRP	Inondation	Urbain	Non-déterminé	Non-déterminé	Faible	Faible
Type du routage	Unicast	DSDV	Unicast, Multi-saut	Urbain	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé
	Multicast (géocast)	IVG	Position, délai basé Greedy	Autoroute	Moyen	Elevé	Elevé	Faible
	Broadcast	BROAD-COMM	Multi-saut, Inondation	Autoroute	Elevé	Faible	Faible	-
Structure du réseau	Position	GPSR	Greedy	Autoroute	Elevé	Moyen	-	Faible
	Clustering	COIN	Multi-saut, Unicast	Autoroute	Moyen	Faible	Faible	Faible

TABLE 2.1 – Comparaison entre les protocoles du routage.

D'après ce tableau on peut tirer les remarques suivantes :

- ☞ Le mode de transmission des données le plus utilisé dans les protocoles de routage des VANETS est le multi-saut. Au fait, ce choix se justifie par le fait que ce type de routage est plus efficace en termes de gestion de ressources et adaptation à la forte mobilité des véhicules.

- ☞ La majorité des protocoles de routage examinés fonctionnent dépendamment du scénario du routage et cela selon les conditions particulières des environnements urbains ou autoroutiers.
- ☞ Beaucoup de protocoles ne considèrent pas la direction des véhicules sur la route où les paquets peuvent parfois être acheminés vers la mauvaise direction. Ceci explique les valeurs de latence élevées.
- ☞ Quelques protocoles de routage étudiés souffrent d'un haut overhead. Ce dernier est engendré par une maintenance considérable au niveau des itinéraires pour chaque véhicule sur le réseau. Par conséquent, cela induit à une large exploitation de la bande passante.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un bref aperçu sur le processus de routage dans les réseaux VANETs. Plus précisément, nous avons examiné une classification de ces protocoles de routage tout en détaillant certains correspondants à chaque classe. Par la suite, nous avons comparé les protocoles examinés précédemment. Au fait, cela nous a permis de constater à quel point la conception et la mise en œuvre d'un protocole de routage performant est une tâche compliquée.

Cependant, plusieurs techniques sont utilisées afin d'améliorer ces protocoles en termes de performance. Par exemple, la technique émergente de clustering qui se présente aujourd'hui comme une solution intéressante répondants aux caractéristiques des VANETs.

Dans le prochain chapitre nous nous intéresserons à cette technique du routage et nous dresserons un panorama de protocoles de routage conçus selon ce mécanisme.

Etat de l'art et étude des protocoles de routage basés clustering dans les VANETs

3.1 Introduction

Les réseaux véhiculaires sont caractérisés par une connectivité discontinue due principalement à la forte mobilité des véhicules et leur densité irrégulière. En effet, si la densité du trafic est faible dans une zone géographique quelconque, le réseau ne sera plus connexe. Ce dernier se fragmente en groupes de véhicules isolés et déconnectés les uns des autres. Or, si sa densité est élevée comme dans une zone urbaine de circulation, ses performances diminueront forcément. Ils s'écoulent considérablement en fonction de la distance, particulièrement s'il s'étend sur plusieurs kilomètres. Cependant, pour répondre aux problèmes de performance, des nouveaux schémas dynamiques sont développés pour les VANETs, et ce en tenant compte de leurs caractéristiques. Ces schémas sont axés sur le clustering vu que les techniques traditionnelles basées sur une configuration statique sont moins efficaces.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un aperçu général de l'approche de clustering dans les réseaux VANETs. Plus précisément, nous fournissons des connaissances de base de ce processus à savoir sa structure, sa procédure générale, ainsi que les critères de conception des protocoles basés sur ce mécanisme. Par la suite, nous proposons une nouvelle classification pour ces protocoles de routage conçus ou réadaptés aux VANETs, tout en étudiant certains protocoles correspondants à chaque classe. En outre, nous dressons une table comparative des protocoles examinés précédemment selon des paramètres sélectionnés. Enfin, nous terminons par une conclusion qui sera donnée dans la section 3.6.

3.2 Généralités sur le Clustering dans les VANETs

3.2.1 Concepts et composants de clustering

a) Définition

Le clustering [51, 20] est le processus qui vise à regrouper les véhicules (nœuds) du réseau en groupes appelés "clusters", en donnant au réseau une structure hiérarchique. Ce mécanisme est assez important car lorsque le réseau est partitionné en groupes ce dernier devient plus facile à gérer ; les messages de coordination ne sont plus échangés entre tous les nœuds mais juste au sein du groupe. Cependant, l'utilisation de la technique de clustering [52] dans les VANETs permet d'assurer certaines exigences. Par exemple, elle réduit considérablement la charge inutile du routage dans le réseau. Elle améliore la livraison des messages et ainsi offrir une utilisation propice de la bande passante.

b) Structure et composants

Trois types d'entités composent un cluster [50], et qui sont la tête de cluster, les membres et les nœuds passerelles. La tête du cluster ou chef du cluster (Cluster Head ; CH) est un nœud leader. Les membres de cluster (Cluster Member ; CM) sont des nœuds ordinaires. Les nœuds passerelles (Gateway node ; GW) assurent la communication entre les clusters. Ces entités sont illustrées dans la figure 3.1 et seront définies dans la suite de ce paragraphe.

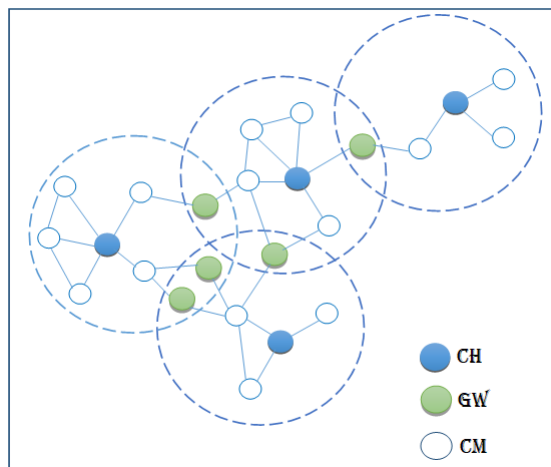


FIGURE 3.1 – Exemple de composants structurant un cluster.

- 1) **Chef de cluster (CH) :** Chaque cluster possède un nœud spécifique élu en tant que tête de cluster. Ce nœud peut être sélectionné en fonction d'une métrique spécifique ou d'une combinaison de métriques. Certains paramètres peuvent inclure l'emplacement géographique, la densité, le degré, la mobilité d'un nœud, etc. Le CH joue le rôle d'un coordinateur au sein de sa sous-structure ; relayer les informations entre les nœuds dans le même cluster (communications intra-cluster). Comme il assure aussi la gestion des communications avec d'autres clusters (communications inter-cluster).

- 2) **Membres de cluster (CM)** : les CMs sont des nœuds ordinaires qui rejoignent un cluster en fonction de ses propriétés. Ils sont responsables d'émettre leurs données au CH dans des intervalles de temps particuliers. Par ailleurs, les CMs d'un cluster ne sont pas susceptibles d'interagir et communiquer directement avec d'autres CMs ou CHs de d'autres clusters.
- 3) **Nœuds passerelles (GW)** : Ce sont des nœuds partagés entre deux clusters, assurant le rôle d'un relais afin de transférer les données entre eux. Généralement, ils sont positionnés aux extrémités du cluster. La sélection des GW est une tâche importante du CH vu qu'ils doivent avoir une mobilité très faible.

3.2.2 Procédure générale d'un protocole basé clustering

Une série de procédures ou phases basiques est impliquée afin de concevoir un protocole de routage basé clustering aux VANETs. Un nœud adhérant ou cherche à adhérer un cluster doit passer par quelques/toutes les phases [53, 54] comme montré dans la figure 3.2. Ces phases sont : la phase de la découverte du voisinage, sélection du chef de cluster, l'annonce, l'affiliation, et enfin la phase de maintenance.

3.2.2.1 Découverte de voisinage

La première phase du processus de clustering est la découverte des nœuds voisins. Initialement, lorsqu'un véhicule joint la route et décide de participer à un réseau véhiculaire, son système de communication s'active. Cependant, pour annoncer son existence, chaque véhicule diffuse d'une façon périodique un message HELLO à ses voisins, tout en recevant des messages similaires de nœuds à proximité. Ces messages incluent un certain nombre d'informations, telles que l'identifiant, la position, la vitesse et la plage de transmission. Toutes les informations rassemblées sont échangées entre les nœuds (véhicules) qui sont stockées dans des tables de routage afin de les utiliser par des protocoles de clustering par la suite. À la fin de cette étape, le nœud passera à la phase de sélection du chef de cluster.

3.2.2.2 Sélection du chef de cluster

Après avoir collecté les informations partagées entre les véhicules voisins. Chaque véhicule examine les informations obtenues pour trouver le nœud compétent et le plus approprié qui mérite de devenir un nœud leader (CH). Au fait, les règles de choix du CH varient selon certaines métriques déterminées. Lorsqu'un nœud se déclare candidat pour présider un cluster, il peut être élu par ses nœuds voisins ou s'auto-élire, en mettant à jour son état à CH. Une fois que ce dernier est élu car il est le mieux adapté pour être le responsable, il passe à la phase d'annonce.

3.2.2.3 Annonce

Dans cette étape, chaque nouveau CH commence à diffuser un message d'invitation (annonce) pour que tous les nœuds à proximité se joignent et participent au processus de formation et d'affiliation au cluster. Lorsque ce nœud accumule tous les membres de son cluster, il procède à l'étape de maintenance.

3.2.2.4 Affiliation

Lorsqu'un nœud reçoit le message d'annonce d'un nouveau CH, il le compare avec celui du CH élu à l'étape précédente. Par la suite, il envoie un accusé de réception positif ou négatif de la demande d'affiliation. Aussi, il met à jour son état en CM, et rejoint donc le cluster choisi. Au fait, ce nœud soit il traite le message d'annonce, ou bien il l'ignore et attend un autre message en passant directement à l'étape de maintenance pour rejoindre un cluster approprié.

3.2.2.5 Maintenance

Cette phase se constitue de deux étapes distinctes selon le rôle du nœud ; CH ou un CM.

- a) **En tant que CH** : afin d'assurer le rôle du nœud leader, chaque CH évalue l'état de son cluster en interrogeant ses CMs par des messages périodiquement échangés afin d'enregistrer la présence des membres dans le cluster. Ainsi, quand un nœud CM sort de la portée de son cluster, le CH détecte cet événement et élimine immédiatement ce nœud de sa liste de membres. Si un CH perd tous ses membres, le cluster n'existera plus et ce nœud revient à la première phase. De plus, lorsqu'un CH reçoit une demande d'un nœud ordinaire de joindre son cluster, il doit examiner sa demande. S'il est apte, le CH l'ajoute à sa liste de membres, puis il l'informe par message. Entre autres, un cluster peut fusionner avec un autre cluster voisin lorsqu'ils ont un grand taux de chevauchement. Dans ce cas, le CH du plus petit cluster peut devenir un CM du plus grand cluster.
- b) **En tant que CM** : un nœud ordinaire examinera le lien de communication vers son CH d'une façon périodique ; soit en attendant le message d'un CH, ou bien en envoyant activement des messages «vivants ». Si la liaison du nœud à son CH échoue, il doit changer son état en non-cluster et essayer de rejoindre un autre cluster. Dans le cas où le nœud reçoit une requête d'affiliation d'un nœud non appartenant à aucun cluster, il peut se retirer de son cluster, pour devenir un CH et continuer la phase de maintenance.

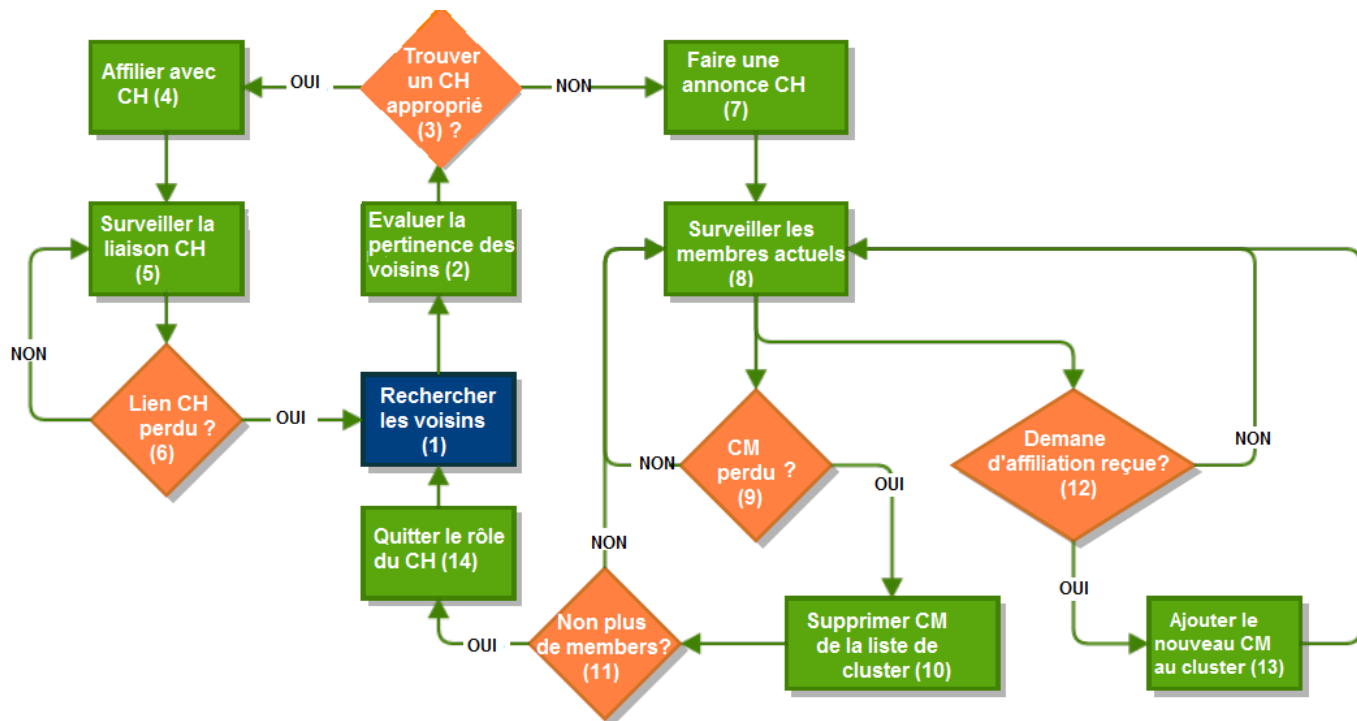


FIGURE 3.2 – Procédure générale d'un protocole basé clustering.

3.2.3 Critères de conception d'un protocole basé clustering

Pour choisir le protocole de routage le mieux répondant aux besoins des différentes applications, les performances de ce protocole doivent être évaluées. Cela peut être selon une liste de critères entre lesquelles on doit toujours faire un compromis en privilégiant quelques uns au détriment des autres. Ainsi, la conception des protocoles basé clustering est guidée par plusieurs facteurs et contraintes conceptuelles [20] à savoir :

- **Equilibrage de charge (load balancing)** : désigne le processus de répartition d'un ensemble de tâches exhaustives dans le réseau sur un ensemble de nœuds afin d'éviter les points de congestion. Cela permet d'optimiser la charge totale du réseau d'une manière significative.
- **Passage à l'échelle** : désigne la capacité du réseau à s'adapter à l'extension du réseau en termes de nombre élevé de nœuds, ou zone d'intérêt plus grande sans affecter les performances du réseau.
- **Structure stable** : former des structures (clusters) plus stables dans un environnement très dynamique parce que les clusters sont formés en tenant compte de certaines métriques liées aux nœuds tels que la vitesse, la position, la mobilité, etc.
- **Exploitation optimale de la bande passante** : une exploitation efficace de la bande passante évite l'échange inutile des messages dans le réseau. Cela permet de diminuer le taux de collisions. Par exemple, lors du processus de clustering, les membres n'agissent qu'avec leurs CHs.

- **Qualité de service (QoS)** : la forte mobilité des nœuds dans le réseau peut provoquer des déconnexions fréquentes dans les liens de communication. Ceci peut engendrer un arrêt temporaire du service fourni par le réseau. Il est donc nécessaire de garantir et de fournir une qualité de service élevée, même en présence de rupture dans les liens de communication afin d'assurer le service requis.
- **Tolérance des pannes** : c'est un critère essentiel des systèmes répartis qui assurent la fiabilité et la maintenance. Dans ce type de systèmes, les nœuds et les liaisons de communication peuvent échouer à tout moment, de sorte que la récupération des pannes peut être effectuée par des mécanismes de contrôle ou de redondance.

3.3 Classification des protocoles de routage basés Clustering dans les réseaux VANETs

Afin d'assurer une communication efficace au sein des réseaux véhiculaires, de nombreuses recherches ont fourni des techniques différentes pour créer une hiérarchisation du réseau. Certaines de ces techniques consistent à utiliser : la position du nœud par rapport à son CH, la densité, la mobilité, la destination du nœud, etc. Nous avons proposé une nouvelle classification aux protocoles de clustering proposés ou réadaptés aux réseaux VANETs (voir figure 3.3) selon leur paradigme de fonctionnement et selon les paramètres de prises de décision. Nous détaillerons dans la suite de ce paragraphe chacune de ces catégories.

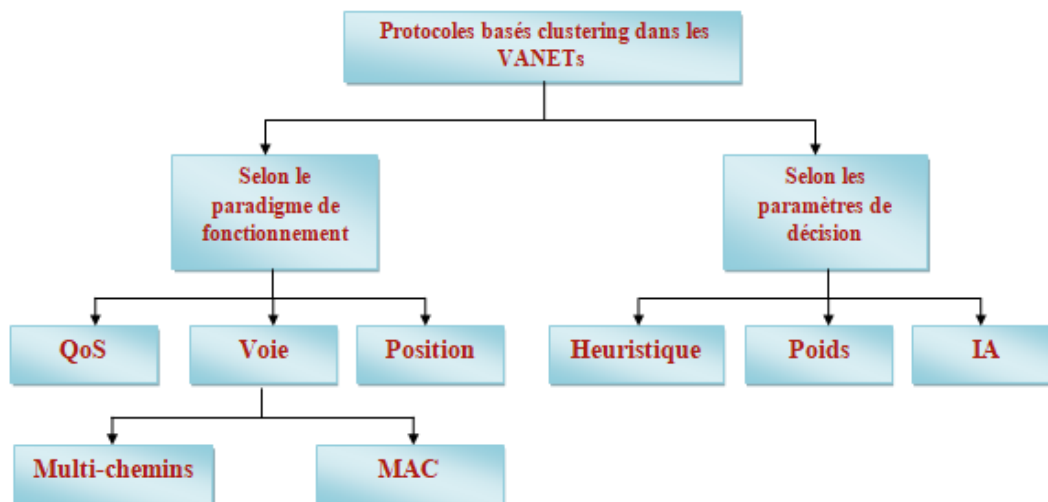


FIGURE 3.3 – Classification des protocoles de routage basés clustering dans les VANETs.

3.3.1 Selon le paradigme de fonctionnement

Les protocoles de routage hiérarchiques peuvent être classés selon leur mode opérationnel en trois catégories principales : protocoles basés sur la qualité de service, protocoles basés sur la position et protocoles basés sur la voie. Il est à noter que certains protocoles de clustering proposés dans la littérature peuvent appartenir à une ou plusieurs catégories.

3.3.1.1 Protocoles basés sur la qualité de service (QoS)

Dans cette classe de protocoles, la notion de QoS a été introduite dans le processus de clustering. En fait, les protocoles de cette famille visent à satisfaire certains paramètres de qualité de service lors de la formation des clusters comme les délais de transmission, la largeur de bande, la qualité des données, la stabilité des clusters, etc. Entre autres, minimiser la mobilité relative ainsi que la distance de chaque CH à ses membres améliore la convergence et la dynamique des clusters. Cependant, la densité et la vitesse des véhicules affectent leur mobilité et doivent être prises en considération.

3.3.1.2 Protocoles basés position

Dans le clustering basé position [58], la structure du cluster repose principalement sur les valeurs de localisation géographique des véhicules et de leur variation spatiales et comportements. Ainsi, les positions courantes, les futures positions des véhicules et leur destination contribuent dans la formation des clusters. Généralement, un système de navigation peut être utilisé dans le processus de clustering afin de connaître la destination. Cependant, pour garder le processus de clustering stable, la fréquence des changements du cluster doit être minimisée. Par ailleurs, l'exploitation du comportement des véhicules en prenant en compte les positions et les destinations finales des véhicules améliore la stabilité du cluster et aussi l'efficacité de transmission lors de l'échange des messages. Il en résulte également un temps de connexion de cluster plus élevé car la probabilité qu'un véhicule sorte d'un cluster est généralement faible en raison de la similitude de ses destinations. Toutefois, si le nombre de véhicules dans un cluster devient grand, la diffusion des messages dans ce cas entraînera des frais généraux élevés de transmission.

3.3.1.3 Protocoles basés sur la voie

Dans ce type de protocoles, la formation de clusters dépend de certains paramètres de disponibilité des informations de la voie [55, 56]. Ces informations sont utilisées dans la sélection des clusters et des chemins efficaces vers la destination. Deux catégories de protocoles de cette famille peuvent être distinguées : les protocoles multi-chemins et les protocoles basés MAC.

1. Protocoles Multi-chemins

Un protocole de clustering doit être en mesure à trouver des chemins entre la source et la destination. Ces chemins peuvent passer par un/plusieurs CHs pour atteindre la destination. Comme ils peuvent être utilisés à l'intérieur d'un même cluster entre les CMs pour atteindre le CH. En outre, ils peuvent jouer le rôle de chemins alternatifs en cas de défaillance du chemin primaire, tout en passant par un/plusieurs CHs de la source vers la destination. Pour ce faire, plusieurs chemins alternatifs peuvent être maintenus tout en les laissant actifs par l'envoi de messages périodiques. Cependant, cette famille de protocole permet d'assurer une certaine résistance aux pannes en prévoyant des chemins alternatifs entre la source et la destination.

2. Protocoles basés MAC

Plusieurs techniques de clustering basées sur le contrôle d'accès moyen au support (Several Medium Access Control; MAC) ont été proposées pour les réseaux VANETs. On distingue trois catégories de protocoles de clustering basés MAC : protocoles basés sur IEEE 802.11, protocoles basés sur TDMA et les protocoles basés sur SDMA. Toutefois, ces protocoles basés MAC [70] présentent un pourcentage accru de collisions et un délai moyen de livraison des messages, ce qui se traduit par une efficacité de transmission inférieure et des frais généraux de transmission élevés en raison d'une contention des canaux qui augmente à cause de nombre de véhicules ou de la vitesse du véhicule.

a) Clustering MAC basé sur IEEE 802.11

Les protocoles basés sur IEEE 802.11 identifient la distance de livraison des messages et la densité des véhicules comme deux facteurs principaux pour les collisions fréquentes sur le canal. Un tel comportement est traduit sur la base d'un modèle de trafic bidirectionnel des véhicules. La prise en compte du trafic bidirectionnel affecte également le temps de connexion au cluster et entraîne une convergence plus faible de ce dernier. Cependant, dans ces protocoles, le pourcentage de collisions et des frais généraux encourus pour la livraison des messages de sécurité sont réduits suite à la réduction des contentions de canaux. Cela permet d'obtenir une livraison rapide et fiable des messages de sécurité.

b) Clustering MAC basé sur TDMA

L'accès au support dans un cluster qui se base sur la technique TDMA (Time Division Multiple Access) [70] consiste à attribuer des intervalles de temps qui peuvent être planifiés pour chaque CM afin d'assurer la transmission de données. Cette technique est principalement utilisée pour optimiser la communication et réduire les collisions intra-cluster, ainsi que la perte de paquets en assurant l'équité dans le partage du support sans fil. Au fait, les protocoles TDMA ont un retard relativement faible en termes de messages multi-saut par rapport à d'autres schémas de clustering. Cependant, ils offrent une meilleure efficacité de transmission pour la maintenance des clusters, ce qui améliore le débit global des communications inter-

clusters et intra-cluster. Bien que le temps de connexion dans un cluster soit relativement raisonnable, une convergence élevée est à signaler due à la détermination de la tranche de temps TDMA (slot) adéquate. Cela est un sérieux problème car ça peut engendrer des goulots d'étranglement dans la mise en œuvre de ces protocoles dans les VANETs.

c) Clustering MAC basé sur SDMA

Dans les protocoles basés sur SDMA (Spatial Division Multiple Access) [58] la route est subdivisée en segments de longueur fixe. Un segment est à nouveau divisé en un nombre fixe de blocs. Chaque bloc se voit attribuer un intervalle de temps représentant le temps alloué à un véhicule pour transmettre des données.

En effet, SDMA est connu pour avoir de meilleures performances dans un réseau dense où pratiquement tous les emplacements sont utilisés. Toutefois, les performances diminuent proportionnellement avec la densité et conduit à une performance insuffisante dans les réseaux où les nœuds sont éloignés les uns des autres. Le mécanisme SDMA affecte également les frais généraux de clustering en termes de taux de livraison de paquets. En addition, les véhicules aussi influencent le temps de transmission des messages, ce qui réduit la stabilité des clusters.

3.3.2 Selon les paramètres de décision

Les protocoles de routage hiérarchiques peuvent être divisés selon leur mode décisionnel en trois catégories : basés heuristiques, basés poids (pondérés) et basés IA (intelligence artificielle).

3.3.2.1 Protocoles basés sur les heuristiques

L'heuristique [20, 50] est l'aspect d'optimisation mathématique utilisé par les protocoles qui tentent de trouver une solution pour un problème donné, mais ils ne garantissent pas que ça soit la meilleure. Les solutions trouvées peuvent être considérées comme des solutions approximatives parce que ce type de protocoles obtient généralement une solution proche de la meilleure rapidement. De plus, ces protocoles ne sont pas basés sur des métriques particulières. A cet égard, de nombreuses recherches ont porté sur la conception des solutions de clustering heuristique afin de trouver des solutions optimales dans un délai raisonnable. En effet, la plupart des solutions de clustering heuristique existantes ne garantissent pas un niveau élevé de performance. Néanmoins, certain nombre de problèmes de théorie de graphe, tels que la construction de l'arbre couvrant et les ensembles dominants sont l'un des problèmes pour lesquels les protocoles heuristiques sont efficaces.

3.3.2.2 Protocoles basés sur le poids

Plutôt que d'utiliser une seule métrique pour élire un CH, les protocoles de clustering pondérés [20] utilisent une fonction qui combine plusieurs mesures représentant le poids

d'un nœud. La formule générale du poids $P(i)$ pour un nœud donné, selon les métriques $A(i)$, $B(i)$ et $C(i)$ est donnée comme suit :

$$P(i) = \alpha \times A(i) + \beta \times B(i) + \dots + \gamma \times C(i).$$

Avec α , β et γ sont des coefficients, tels que : $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

Cette catégorie de protocoles vise à élire un ensemble de CHs qui est mieux adapté à des circonstances de l'environnement pour répondre aux exigences du réseau. Les protocoles basés sur le poids présentent une solution efficace pour améliorer les performances des réseaux VANETs.

3.3.2.3 Protocoles basés sur l'intelligence artificielle (IA)

Diverses techniques émergentes basées IA (intelligence artificielle) sont introduites dans la conception des protocoles de routage hiérarchiques [70]. Par exemple, la logique floue, les méthode bio-inspirés ou les techniques d'apprentissage (supervisé, non supervisé, renforcement) afin de sélectionner un CH en fonction de certains critères. Par exemple, les agents peuvent apprendre de l'environnement dans lequel ils opèrent et ainsi, effectuer la tâche de sélection du CH. Cependant, la direction de la mobilité des nœuds est calculée par l'agent de manière interactive. Aussi, des agents sont déployés à différents carrefours routiers pour surveiller les activités des véhicules. La densité de ces derniers et leur vitesse moyenne sont utilisées pour diviser l'espace en différentes zones. Ces zones sont ensuite utilisées pour collecter les informations sur les véhicules, et qui seront utilisés en entrée des agents de clustering. Le taux d'inclinaison est également défini pour que les agents prennent des décisions adaptatives. Pour chaque action effectuée par les agents, l'action correspondante est récompensée ou pénalisée, et la valeur du paramètre d'apprentissage est incrémentée ou décrémente. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la valeur maximale soit atteinte. Ainsi, ces protocoles peuvent être une bonne alternative pour les futurs VANETs ou pour les réseaux qui mettent en œuvre une application spécifique comme celle de la sécurité des données.

3.4 Etude de quelques protocoles du routage basés Clustering dans les réseaux VANETs

Dans cette section, nous allons donner un aperçu non exhaustif des protocoles du routage basés clustering dédiés et réadaptés aux réseaux VANETs.

3.4.1 Le protocole CDS

Le clustering basé sur CDS (Connected Dominating Set) [66, 80] dans les VANETs est une approche utilisée pour partitionner le réseau en un certain nombre de clusters. L'idée principale de cette approche est de construire un Backbone virtuel en cherchant des CDS

dans le graphe réseau afin de limiter le processus de diffusion à un sous-graphe ; d'où chaque nœud envoie à ses voisins une liste comportant des informations (identités) sur ses voisins. L'échange de ces informations avec les voisins permet à chaque nœud de connaître les identités de tous les nœuds dans son voisinage à deux sauts, ainsi que les connexions entre ses voisins à un seul saut. Sur la base de ces informations, chaque nœud décide de rejoindre ou non l'ensemble dominant CDS (sachant que le CDS initialement est vide). Par la suite, il informe ses voisins de cette décision. Au fait, un nœud rejoint le CDS s'il a au moins deux voisins qui ne sont pas directement connectés l'un à l'autre. Après avoir reçu les décisions de tous ses voisins, un nœud membre du CDS, prend sa décision finale quant au maintien ou non du CDS et informe ses voisins de cette décision. Cependant, pour maintenir le CDS face aux changements de la topologie, les nœuds, échangent les informations de voisinage à un seul saut avec leurs voisins à chaque changement.

* **Avantages**

- Le CDS est une technique de diffusion d'information typique et convient à diverses applications telles que les notifications d'urgence.
- La construction de Backbone virtuel simplifie la décision de retransmission et peut éviter le problème de diffusion dans les VANETs.

* **Inconvénient**

- Trouver le minimum CDS est un vrai problème NP-complet.

3.4.2 Le protocole DWCM

Le protocole DWCM (Distributed and Weighted Clustering based on Mobility Metrics) [68] a été proposé pour la formation de clusters et la sélection de CH. DWCM est un protocole distribué qui considère le problème de l'ensemble dominant dans la théorie de graphes. Chaque véhicule échange ses informations de mobilité entre ses voisins de k-saut et calcule sa priorité en fonction de la vitesse et de l'accélération relative avec ses véhicules voisins. Ainsi, il maintient deux listes ; une pour conserver les informations de mobilité de ses voisins afin de calculer sa priorité et l'autre pour garder l'identifiant du véhicule à priorité maximale parmi ses voisins (k-saut). Le véhicule possédant la priorité la plus élevée parmi ses k-saut voisins agira comme un chef de cluster (CH). Autrement, il agira comme une passerelle (GW) de cluster s'il peut entendre plus d'un CH. De plus, les changements de topologie provoqués par la mobilité élevée des véhicules sont traités dans la phase de maintenance du cluster.

* **Avantage**

- Construire et maintenir des clusters k-saut stables sans encourir la surcharge du réseau.

* **Inconvénient**

- Dans les réseaux denses, le nombre élevé de nœuds passerelles et de clusters entraînera des rediffusions inutiles.

3.4.3 Le protocole CBR

CBR [41] est un protocole de routage basé clustering et position où la zone géographique est divisée en séries de grilles logiques quadruplées. Chacune a un identifiant unique (adresse IP ou adresse MAC) et possède son propre CH. Chaque nœud transmet des données vers le nœud voisin en utilisant des informations géographiques. Par conséquent, il n'a pas besoin de découvrir la route et l'enregistrer dans la table de routage. Il minimise ainsi le coût de routage. S'il ya un véhicule dans la grille élu comme CH, ce dernier diffuse un message LEAD à ses voisins avec les coordonnées de sa grille et son emplacement. Quand, le CH quitte la grille, il diffusera le message LEAVE contenant sa position de grille. Cependant, un nœud intermédiaire stocke cet information jusqu'à ce qu'un nouvel CH soit sélectionné. Par ailleurs, ces informations sont utilisées par le nouvel CH pour le routage des données.

* **Avantages**

- CBR réduit considérablement les frais généraux du routage car il n'a pas besoin de découvrir les routes.
- Il augmente la scalabilité du réseau.

* **Inconvénients**

- Ne pas tenir compte de certains paramètres comme la vitesse qui est un paramètre important dans les VANETs.
- Ne pas prévoir une phase de maintenance.

3.4.4 Le protocole MC-DRIVE

Une nouvelle politique de sélection de CH pour une approche de clustering basée sur la direction dans l'environnement véhiculaire, appelée MC-DRIVE (Modified Clustering based on Direction in Vehicular Environment) a été introduite dans [63]. L'approche MC-DRIVE construit des clusters qui sont composés de nœuds proches des intersections, et ce selon leurs futures directions (gauche, droite, demi-tours) auprès de la prochaine intersection. De plus, la taille du cluster est limitée à une certaine distance de l'intersection. Cette distance permet de donner la valeur optimale de la taille du cluster. Elle dépend de la vitesse et de la portée radio des véhicules approchant l'intersection ce qui offre une meilleure précision dans l'estimation de la densité. Il est également observé qu'en réduisant la portée radio jusqu'à une valeur de seuil prédéfinie, la précision peut être encore améliorée. A cette distance, chaque nœud diffuse un message HELLO comprenant son identifiant, sa voie de circulation et sa future direction.

* **Avantage**

- Augmenter la stabilité des clusters en évitant le regroupement des véhicules lorsque ces derniers se déplacent dans des directions différentes.

* **Inconvénient**

- Toute nouvelle réduction de la portée radio entraîne une augmentation du nombre de CHs, ce qui engendre une augmentation de la charge inutile dans le réseau.

3.4.5 Le protocole CBLR

CBLR (Cluster Based Location Routing)[62] n'est pas seulement un protocole basé sur le clustering mais également un protocole de routage réactif (à la demande). Dans l'état d'initialisation, chaque nœud diffuse un message HELLO et se coordonne avec les autres nœuds pour définir les CHs. Une table de routage est utilisée par chaque CH d'un cluster. Cette table contient les adresses et les emplacements des membres du cluster et de ses nœuds passerelles. Le CH suit également les informations sur tous les clusters voisins à l'aide d'une table de voisins. La transmission de paquets se fait lorsqu'un nœud source veut envoyer un paquet à une destination. Pour ce faire, il envoie le paquet au voisin le plus proche de la destination s'il est dans le même cluster. Sinon, il communique avec le CH qui demande aux GWs de coordonner avec l'autre cluster afin de trouver l'emplacement de la destination. Les informations de localisation sont mises à jour à chaque fois qu'un paquet doit être retransmis.

* **Avantages**

- La surcharge des paquets de contrôle est faible.
- Il convient aux réseaux à haute mobilité.
- Comme c'est un protocole de routage réactif donc il économise l'énergie des CHs.

* **Inconvénient**

- Le taux de retransmission de paquets de données est élevé.

3.4.6 Le protocole LORA-CBF

LORA-CBF [60] (LORation Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding) est formé d'un CH avec zéro ou plusieurs membres dans chaque cluster et une ou plusieurs GW pour communiquer avec d'autres CHs. Chaque CH maintient une table de clusters qui contient les adresses et les locations géographiques des nœuds membres et passerelles. Lorsqu'une source tente d'envoyer des données à une destination, elle vérifie d'abord sa table de routage pour déterminer si elle connaît la location de la destination ou pas. Si c'est le cas, elle envoie le paquet au voisin le plus proche de la destination. Sinon, la source stocke le paquet de données dans sa mémoire tampon et démarre un temporisateur. Par la suite, elle diffuse les paquets de demande de localisation LREQ (Location REQuest) de sorte que seules les GWs et CHs peuvent le retransmettre. Au fait, les GWs transmettent un paquet uniquement d'une passerelle à une autre afin de minimiser les retransmissions inutiles. Dès réception d'un paquet LREQ, chaque CH vérifie si la destination est membre de son cluster. Par conséquent, si elle fait partie du cluster, un paquet LREP (Location REPLY) est retourné à l'expéditeur à l'aide du routage géographique. Cela est possible grâce à la connaissance de chaque nœud de la position de la source et du voisin le plus ancien via les informations provenant du LREQ reçu et un service de localisation simple. Autrement, des retransmissions par le CH aux CHs adjacents (Reactive Location Service, RLS) sont déclenchées. L'adresse de destination est enregistrée dans le paquet.

* **Avantages**

- Acquérir les informations de routage uniquement lorsqu'une route est nécessaire dans le processus.
- En utilisant les informations de localisation fournies par le GPS, ce protocole améliore le routage traditionnel basé généralement sur un routage non positionnel.
- Utiliser un mécanisme de sélection de GWs pour réduire les contentions dans les réseaux denses.

* **Inconvénient**

- Les résultats de performance sont hétérogènes.

3.4.7 Le protocole CBMAC

Dans le protocole CBMAC (Cluster Based Medium Access Control) [64], le CH de chaque cluster est responsable de l'attribution de la bande passante aux membres de son cluster. Dans CBMAC, le temps d'accès est divisé en tranches de temps (slots) qui sont regroupées en intervalles de temps. La structure de la trame TDMA utilisée par CBMAC est illustrée dans la figure 3.4. Le premier slot est toujours utilisé par le CH pour diffuser d'une façon périodique un message HELLO (CH-HELLO) à ses membres afin d'indiquer le début d'une trame. Tandis que, le second slot est utilisé pour annoncer un message de contrôle par le CH. Ce dernier est un vecteur spécifiant l'état de chaque emplacement et l'identifiant du véhicule autorisé à émettre dans cet emplacement. Ainsi, chaque véhicule peut utiliser son emplacement pour envoyer des messages de données.

CBMAC s'exécute sur deux phases : la liaison de donnée et l'accès aléatoire. Dans la première phase, les véhicules peuvent envoyer leurs informations à n'importe quel voisin à un seul saut. Dans la deuxième phase, lorsqu'un véhicule a besoin d'accéder au réseau, il envoie une requête de réservation d'un créneau horaire périodique au CH. La figure 3.4 montre que la longueur de cette phase n'est pas uniforme et dépend du nombre de créneaux qui ont été réservés pour cette phase. En effet, chaque CH peut ajuster dynamiquement sa longueur en fonction du nombre de ses membres. Cependant, afin d'éviter les collisions durant cette deuxième phase et garantir la stabilité du protocole, les auteurs proposent une valeur de longueur minimale qui est fixée à 10% de la trame.

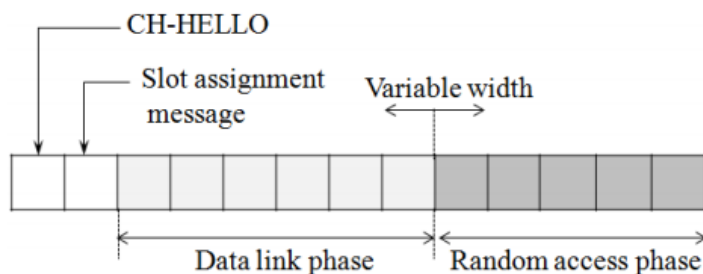


FIGURE 3.4 – Structure de trame TDMA.

* **Avantages**

- Faciliter l'identification de la zone dans laquelle un message sera diffusé.
- Affecter la bande passante de manière centrale pour minimiser les collisions
- Réduire le problème des nœuds cachés en réduisant le nombre de nœuds interférant par l'introduction des clusters afin de fournir une meilleure évolutivité.

* **Inconvénients**

- CBMAC utilise un protocole monocanal qui n'est pas adapté à une architecture DSRC.
- Le concept de réutilisation spatiale n'est pas claire et ce protocole n'a été évalué que pour les communications V2V avec un seul saut, donc il ne couvre pas le type de communication V2I.
- Le problème de la fusion des collisions n'est pas géré, ce qui pourrait rendre CBMAC inadapté aux scénarios dans lesquels les véhicules se déplacent dans des directions opposées.

3.4.8 Le protocole CBMMAC

CBMMAC (Clustering-Based Multichannel MAC) [64] est un protocole qui combine les algorithmes de contrôle d'accès moyen sans contention. Il redéfinit les fonctions des sept canaux DSRC, où Ch178 et Ch174 sont respectivement le canal Inter-Cluster Control (ICC) et le canal Inter-Cluster Data (ICD). Ch172 est le canal Cluster Range Control (CRC) et les canaux restants (Ch176, 180, 182 et 184) sont les canaux Cluster Range Data (CRD). Il utilise trois algorithmes principaux : configuration de cluster, communication de coordination intra-cluster et inter-cluster. Le premier algorithme organise les véhicules se déplaçant dans la même direction en clusters, puis élu un véhicule comme coordinateur dans chaque cluster. À tout moment, chaque véhicule peut agir en tant que CH, ou quasi-CH si le véhicule n'est ni CH ni un membre de cluster, ou bien un quasi-membre si le véhicule perd temporairement le contact avec son CH. L'algorithme de coordination et de communication intra-cluster est basé sur le protocole MMAC [65]. En premier, chaque CH crée et gère le calendrier de réservation de créneaux TDMA sur le canal CRC. Par la suite, chaque membre du cluster utilise son créneau horaire attribué pour envoyer des messages de sécurité et des demandes de réservation du canal de données à son CH. Ce dernier, collecte les messages de sécurité et en fonction des demandes de réservation du canal, il attribue les canaux ICD et CRD (voir la figure 3.5). Les messages de sécurité collectés sont diffusés par le CH ainsi que le calendrier du canal de ses membres. Finalement, chaque membre règle ses deux émetteur-récepteur sur le canal affecté à la transmission/réception de données non liées à la sécurité. Dans l'algorithme de communication inter-cluster, une fois que le CH a collecté les messages de sécurité de ses membres, il utilise une technique de fusion de données pour combiner les messages de sécurité, puis se syntonise sur le canal ICC pour transmettre les messages à ses CHs voisins. Cependant, CBMMAC n'a été évalué que pour des scénarios routiers simples

où tous les véhicules se déplacent dans la même direction. La figure 3.6 présente le schéma d'affectation des canaux et les protocoles MAC utilisés par CBMMAC.

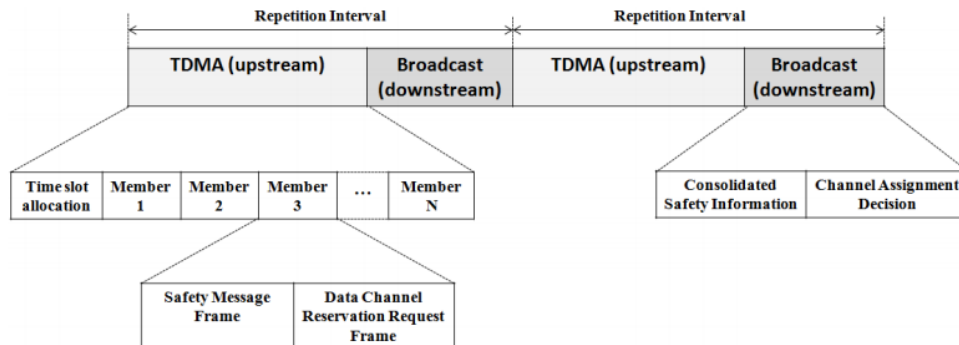


FIGURE 3.5 – Trames TDMA dans le canal CRC.

Vehicle State	Transceiver Channel	MAC Protocol	Message Type
Cluster Head CH	1	CRC	TDMA-based MAC
	2	ICC	IEEE 802.11 MAC
Cluster Member CM	1	CRC	TDMA-based MAC
	2	CRD	Centralized Multichannel
	2	ICD	IEEE 802.11 MAC
Quasi-Cluster HEAD QCD	1	ICC	IEEE 802.11 MAC
	2 (off)	—	—
Quasi-Cluster Member QCM	1	ICC	IEEE 802.11 MAC
	2	CRC	TDMA-based MAC

FIGURE 3.6 – Schéma d'affectation des canaux et protocoles MAC utilisés par CBMMAC.

* **Avantage**

- CBMMAC prend en charge à la fois les applications de sécurité routière et une large gamme d'applications non liées à la sécurité.

* **Inconvénients**

- Dans CBMMAC, aucun message n'est échangé avant la transmission des messages de diffusion, ni envoyer comme accusé de réception pour vérifier la réussite de la transmission.
- L'utilisation de deux émetteurs-récepteurs et d'un système GPS pour chaque véhicule rend ce système très coûteux.
- Il est difficile de répondre au retard des messages de sécurité.

3.4.9 Le protocole APROVE

APROVE (Affinity PROpagation for VEhicular network) [61] est une approche de clustering distribuée qui utilise les concepts de la propagation pour former les clusters et élire les CHs appropriés. Dans ce protocole, chaque nœud du réseau calcule et transmet les messages de responsabilité et de disponibilité à chacun de ses voisins. Cependant, un nœud ne possède

que les messages qui lui sont adressés par ses voisins à un seul saut. Par conséquent, il est obligé de prendre une décision de clustering indépendante avec uniquement les informations locales. Une illustration simplifiée du protocole APROVE est présentée dans la figure 3.7. Un nœud communique ses messages de disponibilité et de responsabilité à chacun des voisins de sa portée. En fonction de ces messages certains véhicules émergeront progressivement en CH.

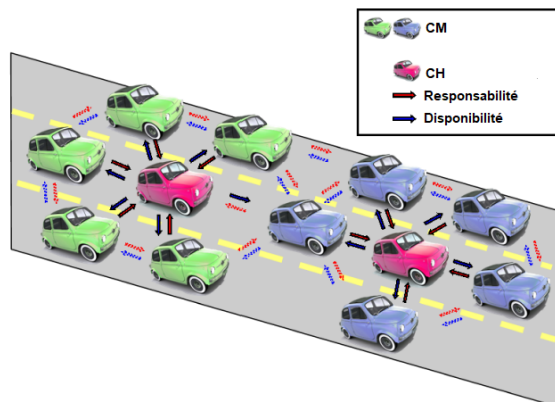


FIGURE 3.7 – Protocole de clustering APROVE.

* **Avantage**

- La formation de clusters avec des nœuds qui ont une grande proximité et une faible mobilité, relative les uns par rapport aux autres, leur assure une stabilité élevée.

* **Inconvénients**

- Les décisions de regroupement indépendantes et locales prises dans APROVE induisent à des problèmes de convergence.
- Les coûts de transmission sont très élevés.

3.4.10 Le protocole EWCA

Dans le protocole EWCA (Enhanced Weight-based Clustering Algorithm) [67], chaque véhicule rejoint un réseau et partage ses informations avec ses voisins dans son rayon d'action. De même, il reçoit les mêmes informations de ses voisins proches. Sur la base de ces informations reçues, si un véhicule trouve un seul PCH (Principal CH), il s'y affine et change son statut en CM. Dans la situation où il trouve plus d'un PCH dans sa zone de transmission, une décision doit être prise par le véhicule pour déterminer le PCH le plus approprié, tout en comparant sa position et sa vitesse par rapport à celles des PCHs disponibles. En outre, si un CM perd la connectivité avec son PCH, il recherchera les voisins proches par l'échange des messages jusqu'à un nouveau cluster peut être détecté. En revanche, s'il n'y a pas de PCH à proximité, le processus de formation de cluster sera lancé. Pour élire ce PCH, chaque véhicule est associé à une valeur de poids prédéfinie en fonction de sa pertinence. Celui qui possède la valeur de poids la plus élevée est choisi comme chef de cluster principal (PCH). Toutefois,

si deux ou plusieurs véhicules ont la même valeur de poids que la valeur la plus élevée, alors le véhicule ayant le numéro d'identification le plus bas et ayant le plus de voisins sera élu comme CH. D'où chaque véhicule qui rejoint le réseau se verra attribuer un identifiant sur la base de l'arrivée des véhicules en commençant par zéro.

* **Avantages**

- Fournir une livraison efficace des messages et une stabilité aux clusters.
- Minimiser les interférences dans les clusters adjacents.
- Réduire les frais généraux et la maintenance des clusters.

* **Inconvénient**

- Un message des véhicules voisins se déplaçant dans une direction différente n'est pas pris en compte à cause de la fusion entre les clusters adjacents.

3.4.11 Le protocole FUZZY

Lorsqu'un nœud reçoit un message Hello d'un voisin, il l'évalue en fonction de ces paramètres : la distance inter-véhicules, la mobilité du véhicule et la force du signal. Cette évaluation est en utilisant une approche basée sur la logique floue (fuzzy logique) [71]. Grâce à l'échange de messages hello, chaque nœud conserve un résultat d'évaluation pour chaque voisin pour l'utiliser lors de la sélection d'un nœud relais. De plus, ce protocole renforce la stabilité des clusters grâce à l'élection de CH secondaire ou relais. Ce dernier est utilisé comme nœud CH lorsque le primaire devient indisponible. En plus, à la base d'un système d'inférence à logique flou, l'étape de maintenance est adaptable au comportement des conducteurs sur la route. Par conséquent, ce protocole peut être appliqué dans des environnements à forte mobilité. La technique de logique floue fournit une approche simple et flexible qui permet de régler les fonctions et les règles d'appartenance floue, pour rendre le protocole plus adapté à certains scénarios.

* **Avantages**

- Ce protocole dispose d'un mécanisme d'apprentissage pour prédire la vitesse et les futures positions de tous les membres du cluster.
- Il possède une meilleure stabilité pour les clusters et une meilleure durée de vie.
- Il offre de bonnes solutions pour le problème de sélection de CHs.

* **Inconvénient**

- Lorsque la mobilité augmente ou diminue, la durée de vie du réseau reste constante sans prendre en considération ces changements.

3.4.12 Le protocole ACO-PSO

Le protocole de routage ACO-PSO [73] est une hybridation des deux protocoles ACO (Ant Colony Optimization) et PSO (particle Swarm Optimization). Le protocole d'optimisation des colonies de fourmi ACO est une intelligence s'inspirant des comportements de la fourmi. Il inclut la coopération et l'adaptation pour produire une solution optimale. En revanche, le

protocole d'optimisation des essaims de particules PSO se base sur la population. Il dépend du mouvement et de l'intelligence de l'essaim. Ainsi, la combinaison de ces deux solutions optimales offre le meilleur chemin qui peut être utilisé par les véhicules, afin qu'ils puissent atteindre la destination le plus rapidement possible. En outre, une valeur de phéromone est utilisée dans le protocole hybrid (ACO-PSO) pour des fins décisionnelles. Cependant, le chemin qui possède un niveau de phéromone maximum sera indiqué le meilleur à suivre par les fourmis. Par ailleurs, ce protocole utilise deux éléments : Gbest (Global best solution) et Pbest (Personal best solution) pour trouver la solution optimale. Comme première étape d'ACO-PSO, chaque particule est initialisée par une position aléatoire. Par la suite, les valeurs de Gbest et Pbest des particules sont initialisées. Au fait, la solution partielle sera obtenue tout en poursuivant la mise à jour du niveau de phéromone. Ces étapes sont effectuées par tous les nœuds du réseau. Pour renforcer le résultat obtenu, les techniques d'optimisation de l'essaim de particules sont appliquées. Trouver donc la forme physique des particules. Si le résultat obtenu est Gbest, alors c'est le résultat final. Autrement, continuer à chercher jusqu'à trouver la particule appropriée.

* **Avantages**

- Combiner un protocole hybride pour avoir une solution optimale à un réseau de multidiffusion et ainsi, il aide au clustering.
- La mise à jour de la vitesse des particules permet de trouver la position appropriée.
- Réduire la complexité temporelle.

* **Inconvénients**

- Il existe une probabilité de changement dans chaque itération.
- Le temps de convergence est incertain.

3.4.13 Le protocole CBDRP

Le protocole CBDRP (Cluster-Based Directional Routing Protocol) [69] possède un comportement similaire au protocole CBR. Toutefois, juste la direction est prise en compte lors du transfert des paquets. Ce protocole est conçu pour le scénario de l'autoroute où les clusters sont formés selon la direction du déplacement. Aussi, la sélection du CH se fait par rapport au centre du cluster. Pendant la phase de transmission des données, la source envoie le paquet au CH de son propre cluster. Qui par la suite, renvoie ce paquet au CH où se trouve la destination. Cependant, le CH final transmet le paquet reçu vers la destination. Dans ce mécanisme, le lien ne sera maintenu que s'il existe un CH dans un cluster intermédiaire.

* **Avantages**

- Résoudre les problèmes de stabilité des liens dans les VANETs.
- Assurer un transfert de données fiable et rapide.

* **Inconvénients**

- Le délai augmente lorsque le nombre de clusters augmente.
- Le nombre de retransmissions est élevé ce qui conclut à une perte de paquets élevé.

3.4.14 Le protocole PMC

Dans le protocole PMC (Passive multi-hop clustering) [81], chaque véhicule envoie un paquet HELLO à son voisin à un seul saut. Le nœud voisin met à jour sa propre table en analysant le paquet HELLO reçu. Cette table contient les champs suivants : ID du nœud, vitesse, direction, identifiant du CH et nombre de sauts vers le nœud CH. Lorsque cette table n'est pas vide, un véhicule est dans l'état SE (State Election) qui tente d'abord de se connecter à un cluster existant. Un véhicule peut se connecter à un nœud CH et/ou un autre nœud CM. Si le degré de connexion maximal de CH n'atteint pas le maximum, le véhicule envisagera de se connecter au nœud CH. Cependant, il lui envoie un paquet JOIN_REQ. Si le CH lui répond par un JOIN_RESP dans un intervalle de temps donné appelé JOIN_TIMER, cela indique que le véhicule est autorisé à rejoindre le cluster et à changer son état en CM. Autrement, le véhicule n'est pas autorisé à se connecter au CH. Dans ce cas, il tente de se connecter au CH via le CM par plusieurs sauts. Il est à noter que deux facteurs importants sont pris en compte dans la phase de sélection du CH ; à savoir sa mobilité et son nombre des nœuds CM.

* **Avantages**

- Assurer la couverture et la stabilité d'un cluster en améliorant efficacement la fiabilité des clusters.
- Réduire les interférences entre les clusters.

* **Inconvénient**

- Installer une grande complexité en termes de temps et de messages échangés dans le réseau.

3.4.15 Le protocole RLRC

Les auteurs dans [82] ont proposé le protocole RLRC (Reinforcement Learning-based Routing protocol for Clustered EV-VANET). Dans ce protocole, un nœud est un EV (Electric Vehicular) qui est équipé d'un dispositif de positionnement par satellite. Ainsi, il peut déterminer ses propres informations de position, de vitesse et de direction en temps réel. Il peut également échanger ses informations avec d'autres véhicules, et calculer la distance par rapport aux VE voisins et qui possède la distance minimale. Le CH est responsable de la collecte et de la gestion des informations sur les membres du cluster. Les CMs envoient les paquets à leur CH. Ensuite, le CH transmet les paquets au CH adjacent via l'algorithme de routage basé sur l'apprentissage par renforcement. Enfin, le CH transmet les paquets à la destination ou au dispositif d'accès dans la station de charge. Plus précisément, chaque EV peut découvrir dynamiquement ses voisins et maintenir les relations de voisinage. Les

CHs échangent périodiquement leurs paquets Hello pour mettre à jour leurs Q-tables afin de terminer la tâche d'apprentissage. Le paquet Hello contient Q-value maximale qui atteint un nœud de destination via un CH voisin. La méthode distribuée Sarsa-Lambda est utilisée pour trouver la route optimale du nœud d'envoi source au nœud de destination. Ainsi, le saut suivant est sélectionné comme relais pour transmettre le paquet avec la Q-value maximale. La sélection du chemin de routage est basée sur la mise à jour de Q-value. Il est donc garanti que les sauts suivants sélectionnés sont toujours les plus optimaux pour atteindre la destination.

* **Avantages**

- Accélérer le processus d'apprentissage en assurant la stabilité des clusters.
- Réduire le temps de convergence grâce à la méthode Sarsa-Lambda.

* **Inconvénient**

- Ce protocole est conçu exclusivement pour les véhicules électriques et il n'a pas pris en considération l'hétérogénéité en termes de véhicules caractérisant un réseau VANET.

3.5 Comparaison entre les protocoles étudiés

Une analyse comparative est réalisée dans cette section (voir le tableau 3.1) afin de comparer les différentes techniques de clustering utilisées dans les protocoles examinés et étudiés dans la section précédente. Cette analyse est basée sur certains paramètres à considérer lors de la conception d'un protocole de clustering pour les réseaux VANETs. Ces paramètres sont les métriques de sélection du CH, la scalabilité (Passage à l'échelle), l'équilibrage de charge, la complexité (complexité temporelle et de message) et aussi la stratégie de transfert de données.

Protocole	Année	CH sélection	Scalabilité	Equilibrage de charge	Complexité	Stratégie de transfert
CDS	2013	heuristique	faible	modéré	modérée	diffusion multi-saut
DWCM	2016	heuristique	modérée	bon	haute	diffusion multi-saut
MC-DRIVE	2011	position	modérée	bon	modérée	diffusion multi-saut
CBR	2010	position	bonne	bon	faible	diffusion multi-saut
CBLR	2003	destination	bonne	bon	modérée	diffusion multi-saut
LORA-CBF	2005	voisinage	bonne	haut	haute	diffusion multi-saut
APROVE	2009	disponibilité et mobilité	faible	modéré	haute	diffusion 1-saut
FUZZY	2012	IA, mobilité	faible	modéré	haute	diffusion 1-saut
CBMAC	2007	MAC (TDMA)	haute	modéré	haute	TDMA-diffusion 1-saut
CBMMAC	2007	MAC (IEEE802.11)	faible	modéré	faible	TDMA-diffusion 1-saut
CBDRP	2010	direction	bonne	haut	modéré	Store&forward multi-saut
EWCA	2019	poids	modéré	bon	haute	diffusion
ACO-PSO	2015	IA	modéré	bon	modéré	diffusion 1-saut
PMC	2018	voisinage	modéré	bon	haute	diffusion multi-saut
RLRC	2020	IA	bonne	bon	modéré	diffusion multi-saut

TABLE 3.1 – Comparaison entre les protocoles étudiés.

D'après le tableau ci-dessus établi depuis l'étude des protocoles exposés dans la section 3.4, on a pu constater que :

- ☞ La majorité des protocoles de clustering existants, utilise une combinaison de paramètres qui décrit le comportement des véhicules associés à d'autres paramètres clés estimé, afin de générer les clusters et sélectionner les CHs appropriés.
- ☞ La maintenance d'un cluster par le CH est un facteur important à étudier vu que certains CMs peuvent être situés aux coins du cluster. Cependant, ils ont une mauvaise

connectivité avec leur CHs ; ils peuvent ne pas être en mesure de communiquer avec leurs CHs respectifs. Ceci justifie les frais généraux (complexité) élevés.

- ☞ La plupart des protocoles hiérarchiques utilisent le mode de transmission (multi-sauts), ce qui permet de fournir une bonne scalabilité et équilibrage de charge dans le réseau.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu approfondi sur la technique de clustering dans les réseaux VANETs. A cet effet, nous avons présenté un fond de connaissances sur le processus de clustering ; définition, structure des clusters, procédure générale et critères de conception d'un protocole de clustering. Par la suite, nous avons proposé une nouvelle classification aux protocoles basés clustering utilisés dans les VANETs tout en décrivant chaque classe. Une liste de protocoles correspondants aux différentes classe a été analysée et étudiée. En outre, nous avons effectué une comparaison de ces protocoles étudiés selon des paramètres que nous avons jugé pertinents.

D'après cette étude on a pu constater qu'il n'existe pas un protocole meilleur d'un autre, mais plutôt il existe des critères qui ont été pris en considération durant sa conception. Aussi, la technique de clustering est une solution qui se révèle intéressante pour confronter les différents défis du routage des réseaux VANETs.

Cependant, dans le prochain chapitre, nous étudierons en détails le protocole CBR comme exemple de protocole basé clustering et qui sera implémenté et ses performances évaluées ainsi, que nos deux améliorations proposées à ce dernier ; WeCBR (Weighted Cluster Based Routing) et Q-WeCBR(Q-learning Weighted Cluster Based Routing).

Les protocoles de clustering implémentés : Description et Evaluation de performances

4.1 Introduction

Le routage basé clustering est considéré comme l'une des solutions les plus importantes pour maintenir les liens entre les nœuds communicants, et rendre ainsi le réseau plus stable. Dans le chapitre précédent, nous avons étudié un ensemble de protocoles de routage basés sur le clustering, dont le protocole CBR [41] qui a été brièvement exposé. Etant donné que, nous avons analysé certains inconvénients dans le fonctionnement de ce dernier, par conséquent, nous lui avons proposés deux améliorations appelées WeCBR et Q-WeCBR.

Ce chapitre sera globalement organisé en trois grandes parties. La première sera consacrée à la présentation des préliminaires composant l'outil utilisé dans l'implémentation de notre amélioration. Cependant, la deuxième partie du chapitre sera dédiée à la description détaillée du fonctionnement du protocole CBR. Aussi, aux améliorations apportées à ce dernier ; en utilisant une fonction pondérée pour la sélection du CH, et en introduisant une phase de maintenance dans la première version, ainsi qu'une méthode d'apprentissage par renforcement dans la seconde. La dernière partie du chapitre sera consacrée à son évaluation de performance, en le comparant ainsi que ses deux améliorations, avec les deux protocoles DSDV et GPSR.

Enfin, nous terminons ce chapitre avec une analyse des résultats obtenus et une conclusion.

4.2 Préliminaires

Dans le but de proposer un routage sensible et adaptatif aux réseaux véhiculaires, notre intérêt s'est porté sur les approches issues de l'intelligence artificielle (IA). Nous nous sommes intéressés à l'apprentissage par renforcement, en particulier le Q-learning. Dans cette section, nous présenterons les notions fondamentales de cette technique.

4.2.1 L'apprentissage artificiel

L'apprentissage artificiel [83] est une approche fondée sur un ensemble d'agents intelligents qui adaptent leurs comportements à leur environnement en mémorisant leurs expériences. Ils se comportent comme un sous-système capable d'apprendre en enrichissant le système qu'ils utilisent en ajoutant, au cours du temps, des fonctions automatiques de traitement, de contrôle, de mémorisation ou de transfert d'information.

4.2.1.1 Les méthodes d'apprentissage

L'objectif principal de l'apprentissage [83] est l'augmentation des performances de l'agent intelligent sur la base des expériences déjà vues. Cette augmentation concerne la capacité d'extraction des informations à partir de ses expériences. Il existe trois types d'apprentissage en fonction de la nature des informations disponibles et du but recherché : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement. Cependant, l'apprentissage supervisé [86] s'effectue à partir des échantillons d'une connaissance appelée base d'exemples, afin que l'agent construise une connaissance générale. La base d'exemples est composée de paires entrées/sorties désirées. Le but de l'algorithme de ce type d'apprentissage est de généraliser pour des entrées inconnues ce qu'il a pu apprendre grâce aux données déjà traitées dans la base d'exemples. Dans l'apprentissage non supervisé [86], seules les informations en entrée sont fournies à l'agent. Ce dernier doit déterminer ses sorties en fonction des similarités détectées entre les différentes entrées. Or, dans l'apprentissage par renforcement [84, 85], il s'agit de trouver, par un processus d'essais et d'erreurs, l'action optimale à effectuer pour chacune des situations que l'agent va rencontrer afin de maximiser ses récompenses. C'est une approche d'apprentissage orientée objectif qui conduit à un contrôle optimal pour la tâche spécifiée par des récompenses.

4.2.1.2 Apprentissage par renforcement

Dans l'apprentissage par renforcement (AR) [85], un agent interagit avec son environnement via des perceptions et des actions (voir figure 4.1).

À chaque interaction, l'agent reçoit une entrée i (informations relatives à l'état courant x de l'environnement). Il choisit une action a qui influe, dans une certaine mesure, sur l'environnement (le faisant passer dans un état y). Cette influence est communiquée à l'agent au moyen d'un signal de renforcement r . L'objectif, pour l'agent est de maximiser la somme des renforcements reçus. Son apprentissage s'effectue par de nombreuses expériences où il est guidé par divers algorithmes. D'une façon générale, l'objectif est de faire correspondre des situations à des actions afin de maximiser un rendement (la somme des récompenses reçues au cours du temps). Dans les cas les plus intéressants, une action peut affecter aussi bien une récompense immédiate que des récompenses ultérieures.

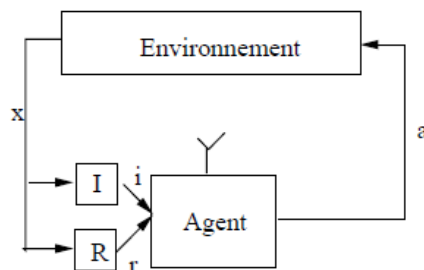


FIGURE 4.1 – Agent en interaction avec son environnement.

Au fait, le choix de l'action [85, 87] doit garantir un équilibre entre l'exploration et l'exploitation de l'apprentissage déjà réalisé. L'exploitation consiste à faire confiance à l'estimation courante des récompenses pour choisir la meilleure action à effectuer dans l'état courant. Tandis que, dans l'exploration l'agent choisit une action a priori sous-optimale pour observer ses conséquences.

Le dilemme exploration/exploitation fait que si on n'utilise exclusivement que l'un des deux aspects de l'alternative, on ne pourra pas atteindre le but fixé. Ci-dessous, nous détaillerons les éléments et le formalisme, ainsi que les objectifs d'un AR.

1. Les éléments de l'AR

Plusieurs composants intervenants dans un processus d'AR peuvent être identifiés [86] :

- **La politique** : C'est la façon dont un agent se comporte à un instant donné.
- **La fonction de renforcement** : Elle définit le but (la tâche) à atteindre (exécuter). Elle fait correspondre à chaque état (ou couple état-action) de l'environnement une récompense. Cette dernière, indique la valeur intrinsèque de l'adéquation de l'état. Elle doit être fixée a priori pour aider l'agent à remplir sa tâche.
- **La fonction valeur** : C'est un indicateur de la qualité d'une action à long terme.

2. La formalisation de l'AR

Soit :

- X : l'ensemble des états du système, et x_t l'état du système à l'instant t .
- A_x : l'ensemble des actions possibles en se plaçant dans l'état x .
- $A = A_x$: l'ensemble de toutes les actions.
- $a_t \in A_t$: l'action appliquée à l'instant t pendant l'état x_t .
- Quand on effectue une action $a_t \in A$ au temps t (initialement, $t=0$), on modifie l'environnement et on passe d'un état x_t à un état x_{t+1} en recevant une récompense r_t .

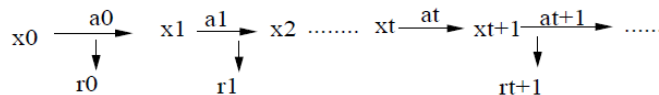


FIGURE 4.2 – Changement d'état, d'action et de récompense.

Dans l'exemple de la figure 4.2, l'évolution des états est déterministe en fonction des actions. A tout instant t , la probabilité de passer de x à y en effectuant une action a dépend uniquement de x et de a , et non des états précédents.

3. Objectif

L'objectif est que l'agent se comporte de manière optimale de sorte à définir comment il doit prendre en compte le futur dans ses décisions pour optimiser son comportement courant.

Soit une séquence $\iota = (r_0, r_1, r_2, \dots)$ de récompenses reçues en suivant une politique donnée. La fonction de ces récompenses R' appelée retour de ι est donnée par :

$$R' = r_0 + \gamma r_1 + \gamma^2 r_2 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_k$$

Où $\gamma \in [0,1]$ est le paramètre de rabais (discount factor) qui va modifier l'impact des récompenses au cours du temps (une récompense reçue k unités de temps plus tard vaut seulement γ^{k-1} ce qu'elle vaudrait au temps courant).

4.2.1.2.1 Q-learning

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la politique optimale d'un algorithme d'AR : la programmation dynamique, les différences temporelles (TD-Learning) et le Q-learning. Dans ce qui suit, nous allons détailler seulement le Q-learning, compte tenu de sa simplicité et son efficacité.

Cette méthode a été développée par Watkins [88] afin de déterminer une politique optimale π^* en temps réel, sans disposer ni d'une base de donnée et ni d'un modèle. Au fil du temps, l'agent sélectionne et exécute des actions, puis reçoit la récompense de l'environnement en réponse à ses actions. En fonction de l'action qu'il prend dans un état donné, il met régulièrement à jour et calcule les Q-valeurs (la future récompense totale ou à long terme). Des Q-valeurs sont attribuées à chaque action possible afin d'indiquer la pertinence d'une action sélectionnée, où chaque agent cherche à choisir les actions qui sont censées maximiser sa Q-valeur. L'algorithme du Q-learning est défini comme suit :

Algorithme 4.1 : Présentation de Q-learning

Initialiser $Q(x, a)$

Initialiser x_t

1. Choisir $Q(x, a)$ pour l'état x et l'action a selon une politique.
2. Extraire l'état courant x_t .
3. Choisir une action a_t (exploration vs exploitation) ; Par exemple, choisir l'action qui renvoie la plus forte *Q-valeur* ou essayer d'explorer de nouvelles actions tout en continuant à appliquer le paramètre *Q-valeur*.
4. Effectuer a_t puis observer la nouvelle perception x_{t+1} et le renforcement r_t .
5. Mettre à jour $Q(x_t, a_t)$.

$$Q(x_t, a_t) \leftarrow Q(x_t, a_t) + a_t [r_t + \gamma \max_{a'} Q(x_{t+1}, a') - Q(x_t, a_t)].$$

6. Recommencer à l'étape 2.

Où $Q(x, a)$ est la récompense estimée pour avoir pris une action a à l'état x_t , α est le taux d'apprentissage, et il est compris entre 0 et 1. D'autre part, γ est le taux d'actualisation ou le paramètre de rabais et il détermine le poids accordé aux récompenses à court terme par rapport aux récompenses à long terme. Par conséquent, $\gamma = 0$ signifie que les récompenses à court terme, données par r_{t+1} , seront les seules récompenses utilisées pour mettre à jour la fonction de valeur, alors que $\gamma = 1$ signifie que le système s'efforcera d'obtenir des récompenses à long terme

Il est à noter que l'algorithme Q-learning converge asymptotiquement vers une politique optimale à condition que :

- Chaque paire (état, action) soit visitée une infinité de fois ;
- Un taux d'apprentissage doit être pris pour chaque état que l'on notera $\alpha_t(x)$ à l'itération t comme suit :

$$\sum_t \alpha_t(x) = +\infty \text{ et } \sum_t \alpha_t^2(x) < +\infty, \forall x \in X.$$

Au fait, il peut y avoir plusieurs stratégies de sélection de l'action comme par exemple l'action qui a été la moins utilisée, ou celle qui renvoie la plus forte Q-valeur.

4.3 Protocoles de clustering implémentés

4.3.1 Le protocole CBR : Principe et fonctionnement

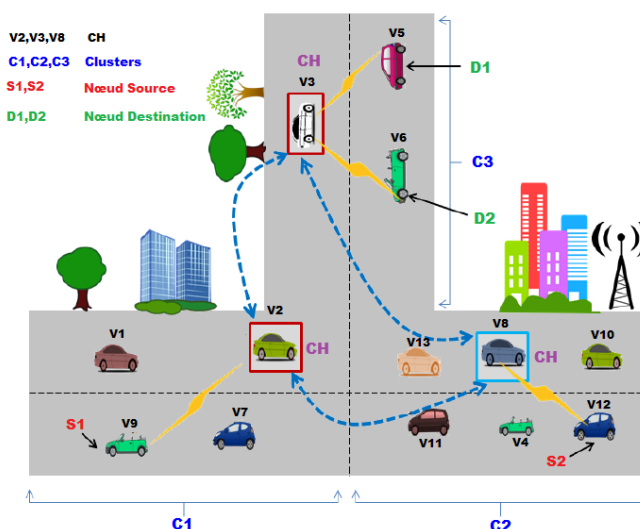


FIGURE 4.3 – Protocole CBR dans les VANETs.

Le protocole CBR [74, 41] vise à éliminer le processus de découverte de route en divisant le réseau en clusters. Ce dernier s'exécute en deux phases principales. La première porte sur la formation des clusters et l'élection des cluster-heads (CHs). La deuxième phase est

consacrée pour le routage de données. Le détail de chaque phase sera donné dans le reste de cette section.

4.3.1.1 La formation des clusters et l'élection des CHs

a) La formation des clusters

Dans cette sous-phase un partitionnement dynamique du réseau en cellules (grilles) virtuelles carrées de taille $r \times r$ est réalisé ; (voir la figure 4.4). Les cellules représentent les clusters. Chaque nœud u peut savoir à quel cluster il appartient en utilisant une attribution d'identité (id_Grid) à chaque cluster. Cette dernière est calculée par la formule mathématique suivante :

$$\text{id_Grid} = \sqrt{NC} \times \left\lfloor \frac{y}{r} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{x}{r} \right\rfloor + 1.$$

Où NC représente le nombre de clusters, ainsi (x, y) sont les coordonnées cartésiennes du nœud u et r est la longueur latérale d'une grille.

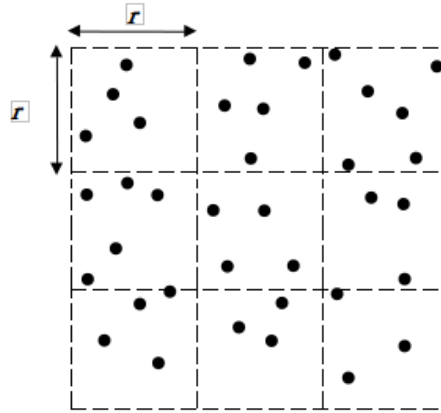


FIGURE 4.4 – Division du réseau en grilles.

Au début, tous les véhicules vont échanger des messages Hello qui contiennent l'adresse, la position courante, la vitesse et l'identité de la grille comme illustré dans le tableau 4.1.

Adresse de véhicule	Position de véhicule	Vitesse de véhicule	Grille de véhicule
adresse IP	(x, y)	V_x, V_y	id-Grid

TABLE 4.1 – Format de message Hello.

b) L'élection des cluster-heads (CHs)

- L'élection d'un CH pour chaque cluster se fait d'une manière concurrente entre les nœuds appartenant au même cluster (ayant le même id_Grid). Le nœud qui est plus proche au centre du cluster a la plus grande possibilité d'être sélectionné comme CH. Chaque nœud calcule les coordonnées du point centre de son cluster et la distance qui le sépare à ce centre. Par la suite, le nœud qui possède la distance minimale sera identifié comme CH. Ce CH diffuse un message Lead (adresse, loc), où adresse et loc désignent respectivement l'adresse IP du CH et son emplacement géographique. Ce message est envoyé à ses CMs et même à tous ses CHs voisins qu'ils vont le répondre par un message acquittement(Ack).
- Lorsqu'un nœud entre dans une nouvelle grille, ce dernier va diffuser le message NewAccessGrid et va exécuter la série des étapes suivantes :
 - Si la grille est vide (aucun nœud existe), il s'impose comme CH.
 - S'il y a un CH dans la grille, ce dernier va lui envoyer un message Lead juste pour l'informer de son existence.
 - S'il n'y a aucun CH dans la grille, les CMs commencent une nouvelle sélection de CH par l'envoi du message Hello.
- Lorsqu'un CM sort du son cluster, il envoie à son CH un message Leave_CM pour le supprimer de sa liste des membres. Or, lorsqu'un CH sort : il diffuse aux membres de sa grille un message Leave_CH pour élire un nouvel CH au cluster.

Algorithme 4.2 : Présentation d'algorithme de la sélection des CHs des clusters

1. **Notations**

$C_{Grid(j)}$: centre de $Grid_j$ où $Grid_j$ est la grille numéro j ;

V_i : véhicule $_i$;

2. **Début ; Pour** chaque $(V_i)_{\in Grid(j)}$ **faire**

distance = distance($(V_i)_{\in Grid(j)}$, $C_{Grid(j)}$) ;

FinPour

Si (distance(V_i) == minDistance) **alors**

$CH_j \leftarrow V_i$;

Fsi

3. Envoyer_Paquet ($CH_j(V_i)$, Lead) ;4. **Si** (V_i) reçoit un paquet Lead qui est envoyé par CH_j **alors**5. **Si** (id-Grid(V_i) == id-Grid(CH_j)) ou (état(V_i) == CH) **alors**6. Envoyer_Paquet (V_i , Ack) ;7. **FSi**8. **FSi**

9. **Si** $\text{id-Grid}(V_i) \neq \text{Update}(\text{id-Grid}(V_i))$ **alors** /* V_i quitte son cluster */
10. **Si** $(\text{état}(V_i) == \text{CM})$ **alors**
11. Envoyer_Paquet $((V_i), \text{Leave_CM})$;
12. **Sinon**
13. **Si** $(\text{état}(V_i) == \text{CH})$ **alors**
14. Envoyer_Paquet $((V_i), \text{Leave_CH})$;
15. Sélectionner un nouveau CH;
16. **FSi**
17. **FSi**
18. **FSI**
19. **Si** $\text{id-Grid}(V_i) \neq \text{Update}(\text{id-Grid}(V_i))$ **alors** /* V_i accède un cluster */
20. Envoyer_Paquet $((V_i), \text{NewAccessGrid})$;
21. **Si** $(\text{existe}(\text{CH}_j) == \text{vrai})$ **alors**
22. Envoyer_Paquet $(\text{CH}_j, \text{Lead})$;
23. **Sinon**
24. **Si** $(\text{alone}(V_i))$ **alors**
25. S'imposer comme CH;
26. **Sinon**
27. Sélectionner un nouveau CH;
28. **FSi**
29. **FSi**
30. **FSi**
31. **Fin** ;

4.3.1.2 Le routage de données

Dans cette phase, les clusters utilisent deux méthodes de routage [74]. Une méthode intra-cluster pour la communication entre les membres du même cluster. Et une méthode inter-clusters pour la communication des CHs se situant dans des clusters différents. Les étapes de cette phase sont expliquées ci-dessous.

a) Intra-cluster

Si un nœud source " S " veut envoyer des paquets de données au nœud destination " D " situé dans le même cluster, l'envoi se fait directement. Pour le faire, il utilise le canal de transmission intra-cluster sans demander aux CHs la localisation de D , puisque les informations de chaque membre de cluster sont déjà stockées.

b) **Inter-clusters**

Si le nœud destination ne se situe pas dans le même cluster que le nœud source, ce dernier démarre la procédure de demande de routage. Il envoie le paquet Data au CH de son cluster. D'où la sélection du CH optimal qui se fait selon le critère d'angle minimum afin de transférer efficacement les paquets de la source vers la destination. Selon l'exemple présenté dans la figure 4.5, le CH A est le CH délégué pour transférer les paquets du nœud source S. Cependant, afin de sélectionner le CH voisin optimal, l'emplacement du nœud de destination est analysé à partir du nœud source en mesurant les angles entourés par deux rayons vers la destination et les clusters voisins du CH source. Ainsi, un CH optimal est alors choisi sous le critère d'angle minimum pour transférer le paquet.

Dans l'exemple, le CH A constate que CH1, CH2, CH3, CH4 et CH5 sont les CHs des clusters voisins. Parmi les angles formés entre le rayon A-D et les rayons A-CH1, A-CH2, A-CH3, A-CH4 et A-CH5 respectivement, le CH A détermine le chemin de routage optimal vers CH2 sous le critère d'angle minimum. Ce CH, à son tour, applique la procédure ci-dessus pour sélectionner le CH voisin optimal. La procédure est exécutée à plusieurs reprises jusqu'à ce que les paquets transférés atteignent la destination.

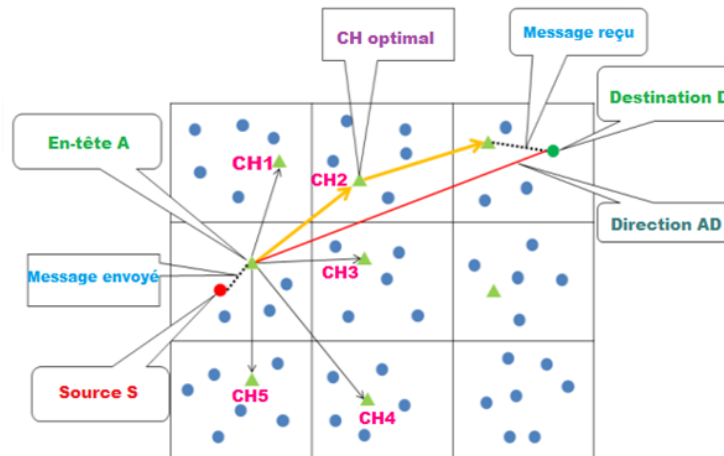


FIGURE 4.5 – Sélection CH optimal.

Algorithme 4.3 : Présentation d'algorithme de sélection du CH optimal et du routage1. **Notations**

- V_{sender} : c'est le nœud émetteur ;
- $V_{destination}$: Le nœud récepteur ;
- id-Grid : c'est l'identité de la grille ;
- listeAngle : c'est la liste contenant les angles ;
- liste_voisinage : c'est la liste des voisins ;

2. **Début** ;3. **Tant que** ($V_{sender} \neq V_{destination}$) **Faire**4. Update position ($V_{destination}$) ;

5. **Si** (id-Grid (V_{sender}) == id-Grid($V_{destination}$)) **alors**
 6. Envoyer_Data(V_{sender} , $V_{destination}$, Data);
 7. **Sinon**
 8. **Si** état (V_{sender}) != CH **alors**
 9. Envoyer_Data (V_{sender} , CH(V_{sender}), Data);
 10. **Pour** chaque CH \in listeVoisinage **faire**
 11. listeAngle.ajouter(calculerAngle(CH(V_{sender}), $V_{destination}$, CH));
 12. min (CH_j)= listeAngle();
 13. **FinPour**
 14. prochain_CH= CH_j ;
 15. Envoyer_Data (CH(V_{sender}), Prochain_CH, Data);
 16. V_{sender} = prochain_CH;
 17. CH (V_{sender}) = prochain_CH;
 18. **Sinon**
 19. **Pour** chaque CH \in listeVoisinage **faire**
 20. listeAngle.ajouter(calculerAngle(V_{sender} , $V_{destination}$, CH));
 21. min (CH_j)= listeAngle();
 22. **FinPour**
 23. prochain_CH= CH_j ;
 24. Envoyer_Data (CH(V_{sender}), Prochain_CH ,DATA);
 25. V_{sender} = prochain_CH;
 26. **FinSi**
 27. **FinSi**
 28. **Fin Tant que**
 29. **Fin**;
-

4.3.2 Améliorations proposées au protocole CBR

4.3.2.1 Le Protocole WeCBR

La première amélioration que nous avons proposé au protocole CBR est nommée Weighted Cluster Based Routing (WeCBR). WeCBR permet d'assurer plus de stabilité dans le réseau en réduisant le nombre d'invocation du processus de sélection des CHs. Entre autres, une meilleure sélection de ces derniers est offerte. A cet égard, nous avons apporté deux améliorations au protocole CBR basique.

- a) Nous avons utilisé une fonction pondérée qui combine deux paramètres assez importants représentant le poids $P(i)$ d'un nœud donné. Cependant, le poids $P(i)$ est mesuré selon les deux métriques $D(i)$ et $V(i)$ qui représentent la distance par rapport au centre de cluster, et sa vitesse respectivement.

Au fait, nous avons essayé de mettre l'accent sur la mobilité (Vitesse) du nœud lors de la sélection du CH, afin de permettre une meilleure stabilité des clusters en la considérant dans la fonction de sélection. La formule générale du poids $P(i)$ pour un nœud est donnée comme suit :

$$P(i) = \alpha \times D(i) + \beta \times V(i).$$

Avec α et β sont des coefficients, tels que : $\alpha + \beta = 1$.

NB : il est à noter que : $\alpha = 1/4$; $\beta = 3/4$.

- b) Nous avons introduit une phase de maintenance dans WeCBR pour garantir une meilleure utilisation du médium de communication et diminuer les collisions et les interférences dans le réseau. Au fait, cette phase permet d'assurer un nœud relais lorsque le CH principal quitte son cluster. Pour ce faire, on a ajouté un CH temporaire (CH back up) qui jouera le rôle du CH. Le choix du CH temporaire est effectué lors de la phase de sélection des CHs ; on a choisi celui qui possède la deuxième meilleure valeur poids après celle du CH. Grâce à cette proposition, un cluster ne pourrait pas rester sans CH et donc on aura pas besoin de déclencher la phase de sélection de CH une nouvelle fois. Cela va faciliter la gestion du cluster et celle du réseau en l'occurrence. En plus, ça va se refléter sur le taux de paquets échangés et la surcharge du réseau, en offrant un taux de perte des paquets considérablement réduit.

Le mécanisme de sélection des CHs et maintenance est présenté en pseudo-code suivant :

Algorithme 4.4 : Présentation d'algorithme de la sélection et maintenance des CHs

1. Notation

$C_{Grid(j)}$: centre de Grid_j où Grid_j est la grille numéro j ;

V_i : véhicule_i ;

double poids, vitesse ;

2. Début ;

Pour chaque $(V_i)_{i \in Grid(j)}$ **faire**

distance = distance($(V_i)_{i \in Grid(j)}$, $C_{Grid(j)}$) ;

vitesse = trouver_vitesse_courante (V_i) ;

poids = $\frac{1}{4}$ x distance + $\frac{3}{4}$ x vitesse ;

FinPour

Si (poids(V_i) == minPoids) **alors**

CH_j ← V_i ;

Trier la liste voisinage ascendant ;

Fsi

3. Envoyer_Paquet ($CH_j(V_i)$, Lead);
 4. **Si** (V_i) reçoit un paquet Lead qui est envoyé par CH_j **alors**
 5. **Si** ($id-Grid(V_i) == id-Grid(CH_j)$) ou ($état(V_i) == CH$) **alors**
 6. Envoyer_Paquet (V_i , Ack);
 7. **FSi**
 8. **FSi**
 9. **Si** $id-Grid(V_i) \neq Update(id-Grid(V_i))$ **alors** /* V_i quitte son cluster */
 10. **Si** ($état(V_i) == CM$) **alors**
 11. Envoyer_Paquet ((V_i) , Leave_CM);
 12. **Sinon**
 13. **Si** ($état(V_i) == CH$) **alors**
 /* V_1 est le premier élément dans la liste voisinage*/
 14. Envoyer_Paquet ((V_1) , CH_Tempo);
 15. Envoyer_Paquet ((V_i) , Leave_CH);
 16. Sélectionner un nouveau CH;
 17. **FSi**
 18. **FSi**
 19. **FSi**
 20. **Si** $id-Grid(V_i) \neq Update(id-Grid(V_i))$ **alors** /* V_i accède un cluster */
 21. Envoyer_Paquet ((V_i) , NewAccessGrid);
 22. **Si** ($existe(CH_j) == vrai$) **alors**
 23. Envoyer_Paquet (CH_j , Lead);
 24. **Sinon**
 25. **Si** ($alone(V_i)$) **alors**
 26. S'imposer comme CH;
 27. **Sinon**
 28. Sélectionner un nouveau CH;
 29. **FSi**
 30. **FSi**
 31. **FSi**
 32. **Fin**;
-

4.3.2.2 Protocole Q-WeCBR

Comme deuxième version d'amélioration au protocole CBR, nous avons proposé Q-learning Weighted Cluster Based Routing (Q-WeCBR). Notre proposition utilise une approche de l'apprentissage par renforcement, plus exactement la méthode Q-learning. Au fait, nous avons introduit Q-learning dans le processus du routage de notre première amélioration WeCBR afin d'optimiser le routage en sélectionnant le plus court chemin vers la destination.

Dans la suite de ce paragraphe, nous allons définir le modèle Q-learning que nous avons utilisé, ainsi que le pseudo-code des algorithmes appliqués.

- **Modèle de Q-learning**

Afin d'appliquer l'approche de Q-learning dans notre processus du routage nous avons modélisé le problème de choix du meilleur prochain saut afin d'atteindre la destination selon le le plus court chemin comme suit :

Environnement	l'ensemble de clusters dans le réseau.	
Agent	chaque cluster head (CH)	
Espace des états	l'ensemble des CHs du réseau	
Espace d'actions	Sélectionner un CH voisin selon quatre directions (Haut, Bas, Droite, Gauche)	
Récompense	la valeur obtenue par un agent pour une action	

- **Les paramètres de Q-learning**

Nous avons résumé les valeurs des paramètres utilisé dans notre modèle Q-WeCBR dans le tableau ci-dessous :

Epsilon	0.9	le pourcentage d'exploration
Discount factor (γ)	0.9	le taux d'erreur du décalage horaire
Learning rate (α)	0.9	le taux d'apprentissage dynamique

- **L'entraînement de l'agent**

Le processus d'apprentissage d'un agent IA dans son environnement s'exécute en passant par les étapes ci-après :

1. Choisir un état aléatoire et non terminal pour que l'agent commence ce nouvel épisode.
2. Choisir une action (se déplacer vers le haut, la droite, le bas ou la gauche) pour l'état actuel. Les actions seront choisies à l'aide d'un algorithme **epsilon greedy** pour sélectionner une action ; ce dernier choisit généralement l'action la plus prometteuse pour tous les agents, mais il choisit parfois une option moins prometteuse afin d'encourager l'agent à explorer l'environnement.
3. Effectuer l'action choisie, et passer à l'état suivant (par exemple, déplacer à l'emplacement suivant).

4. Recevoir la récompense pour le passage au nouvel état et calculer la différence temporelle.
 5. Mettre à jour la Q-valeur pour l'état précédent et la paire d'actions.
 6. Si le nouvel état (actuel) est un état terminal, passer à 1. Sinon, passer au 2.
- L'ensemble de ce processus sera répété sur 20000 épisodes. Cela fournira à l'agent une opportunité suffisante pour apprendre les chemins courts entre le cluster de destination et tous les autres endroits de grilles.

• **L'algorithme d'entraînement d'un agent**

Algorithme 4.5 : Présentation de l'algorithme d'entraînement d'un agent

1. **Notations**
int location_actuelle, action_index, ancien_location, recompense ;
double ancien_q_val, nouvelle_q_valeur, difference_tempo ; location_actuelle : la position courante
action_index : l'identité de l'action suivante
ancien_location : c'est la position précédente
 2. **Début ;**
 3. episode = 0 ;
 4. **Tant que** (episode < 20000) **Faire**
 5. location_actuelle = trouver_depart_location() ;
 6. **Tant que** (étatFinal (location_actuelle) == faux)
 7. action_index = trouver_action_suivant (location_actuelle, epsilon) ;
 8. ancien_location = location_actuelle ;
 9. location_actuelle = trouver_action_suivant (location_actuelle, action_index) ;
 10. recompense = Recompense[ancien_location][location_actuelle] ;
 11. ancien_q_val = Q_Valeur[ancien_location][action_index] ;
 12. difference_tempo = recompense + (discount_factor x max_Qvaleur(location_actuelle)) - ancien_q_val ;
 13. nouvelle_q_value = ancien_q_val + (learning_rate x difference_tempo) ;
 14. Q_Valeur [ancien_location][action_index] = nouvelle_q_valeur ;
 15. **Fin Tant que**
 16. episode++ ;
 17. **Fin Tant que**
 18. **Fin ;**
-

- **L'algorithme de sélection du plus court chemin**

Ci-dessous, le pseudo-code de l'algorithme appliqué pour la sélection du plus court chemin.

Algorithme 4.6 : Présentation d'algorithme de la sélection le plus court chemin

1. **Notations**

list<int>court_chemin : contient la liste des nœuds parcourus ;

int location_actuelle, action_index ;

Action_index : l'identité de l'action suivante

location_actuelle : la position courante

2. **Début** ;

3. **Si** (étatFinal(depart_location) == vrai)**alors**

4. court_chemin.ajouter(depart_location) ;

5. **Sinon**

6. location_actuelle = depart_location ;

7. court_chemin.ajouter(location_actuelle) ;

8. **Tant que**(étatFinal(location_actuelle) == faux) **faire**

9. action_index = trouver_action_suivant(location_actuelle, epsilon) ;

10. location_actuelle = trouver_action_suivant(location_actuelle, action_index) ;

11. court_chemin.ajouter(location_actuelle) ;

12. **Fin Tant que**

13. **FinSi** ;

14. **Fin** ;

4.4 Evaluation des performances par simulation

La simulation des réseaux véhiculaires est une technique par laquelle un logiciel (simulateur) réalisera la modélisation d'un réseau complexe, afin de prévoir son comportement dans le monde réel. Elle constitue actuellement l'outil le plus pratique pour évaluer les performances des nouvelles architectures et protocoles de communication. De plus, elle est plus proche du système réel et donc offre plus de crédibilité.

Après avoir présenté les grandes lignes du protocole CBR et de ses deux améliorations, nous allons à présent effectuer une évaluation comparative de leurs performances à travers des scénarios de simulation. Nous décrirons dans ce qui suit : certains environnements de simulation disponibles dans la littérature, les métriques de performances mesurées, les paramètres choisis et les résultats obtenus.

4.4.1 Les environnements de simulation

Plusieurs simulateurs de réseaux ont été développés tel que : NS2, OPNET, JSIM, OMNET++ etc. Dans la suite, nous allons les décrire brièvement.

4.4.1.1 NS-2 (Network Simulator-2)

NS-2 [75, 79] est un logiciel de simulation gratuit à code source ouvert et à évènements discrets. Il permet l'étude, la conception et la gestion des protocoles pour les réseaux informatiques (câblés et sans fil). Il est très largement utilisé dans la recherche académique et dans l'industrie, pour la simulation du routage et des protocoles d'émission/réception et surtout pour la recherche dans les réseaux ad-hoc. NS-2 a été développé à partir de méthodes de conception orientées objets dans le projet VINT (Virtual Inter Network Testbed) à l'Université de Californie à Berkeley. Ce simulateur a été écrit en C++ avec une interface qui utilise le langage OTcl (Object Tool command langage). L'utilisateur décrit une topologie de réseau en écrivant des scripts OTcl, et puis le programme principal NS simule cette topologie avec des paramètres spécifiés.

4.4.1.2 OPNET (Optimized Network Engineering Tools)

Ce simulateur [76, 79] est développé par l'institut de technologie de Massachusetts (MIT) et depuis 1987 est devenu un logiciel commercial. OPNET est un outil de simulation de réseau à événement discret. Il permet de simuler le comportement et les performances de tout type de réseau. OPNET est un simulateur puissant et polyvalent. Il fournit un environnement de développement interactif permettant la conception et l'étude des réseaux, leurs protocoles et leurs applications. Ce simulateur est composé d'interface utilisateur haut niveau construite à partir de blocs de code source C et C++ avec une grande bibliothèque de fonctions spécifiques.

4.4.1.3 J-Sim (Java- based Simulation)

J-Sim [77, 79] a été créé par le DCSE (Department of Computer Science and Engineering) de l'université West Bohemia de Pilsen, en République Tchèque. Il est entièrement gratuit. Ce logiciel est une bibliothèque orientée objet pour la simulation en temps discret axée sur les processus. Il utilise quasi indifféremment deux langages : Java et TCL (Tool Command Language). L'architecture et le code sont suffisamment bien structurés pour permettre une prise en main relativement rapide. L'analyse des résultats est aisée et son architecture très modulable. De plus il permet d'utiliser n'importe quelle application Java comme générateur de trafic.

4.4.1.4 OMNET++ (Objective Modular Network Tested in C++)

OMNET++ [78, 79] est un environnement de simulation open source orienté objet modulaire à évènements discrets basé sur le langage C++ destiné principalement à simuler les

protocoles de communication et les réseaux de file d'attente, les protocoles internet, les réseaux filaires et sans fils, les systèmes distribués et les architectures matérielles.

Un modèle OMNET++ est une collection hiérarchique de modules communiquant par l'envoi de messages à travers des ports (gates). Le module de plus haut niveau est appelé le module système ou le module réseau qui est décrit par le langage NED.

Les fichiers relatifs au simulateur OMNET++ sont :

- Fichier .ned (langage NED) : ces fichiers représentent la structure de modèle du système étudié.
- Fichier .cc .h (langage C++) : chaque fichier décrit le fonctionnement d'un module simple.
- Fichier .msg : ces fichiers représentent la structure des messages utilisés dans le système (OMNET ensuite génère automatiquement leurs codes C++ correspondants).
- Fichier .ini : pour initialiser les paramètres de simulation.

Cependant, cet outil permet la visualisation de l'état du réseau et les messages échangés à tout instant. De plus, il offre deux interfaces graphiques pour la visualisation des statistiques (Plove and Scalar). Le diagramme de composants d'OMNet++ est donné dans la figure 4.6.

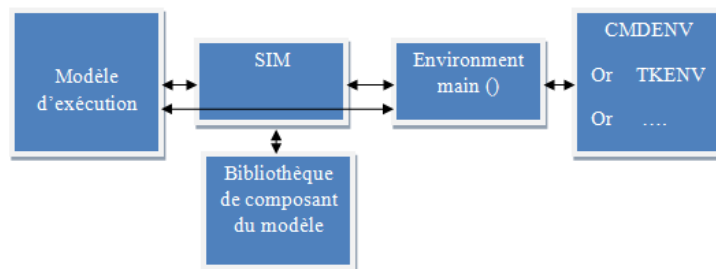


FIGURE 4.6 – Architecture du programme du simulateur OMNET++.

4.4.2 Métriques d'évaluation de performances

Afin de valider l'efficacité du protocole implémenté CBR et nos améliorations apportées à ce protocole du routage à savoir WeCBR et Q-WeCBR, une évaluation de performance est requise. Pour ce faire, nous avons considéré les deux paramètres : taux de livraison de paquets (PDR) et le débit (Throughput).

- **Le taux de livraison des paquets (PDR)**

le PDR est le rapport entre le nombre de paquets de données reçus par les nœuds destinations et le nombre total de données émis par les nœuds sources.

$$\text{PDR} = \frac{1}{c} \sum_{i=0}^c \frac{\text{nombre de paquets reçu}}{\text{nombre de paquets envoyés}}$$

Où c : nombre de paires Source-Destination ayant communiqué.

- **Le débit (Throughput) ou la bande passante**

le débit est la quantité d'information transmise via un canal de communication selon

un intervalle de temps donné.

$$\text{Throughput} = (N_r \times S_p) / T_d$$

Où N_r est le nombre total de paquets reçus, S_p est la taille de paquet et T_d est le temps total(en seconds).

4.4.3 Les paramètres de simulation

Dans cette partie, nous allons présenter et aussi analyser les résultats de simulation obtenus dans différents scénarios et selon les métriques de performances mentionnées précédemment. Le simulateur OMNET++ a été utilisé. Notre choix du simulateur OMNET++ se justifie par le fait que cet outil est open source et sous licence GNU. Il est totalement programmable, paramétrable et modulaire. Ainsi grâce à son architecture flexible et générique qui permet l'intégration de nouveaux modèles, scénarios et protocoles. De plus, cela fournit une très grande performance pour effectuer des simulations à grande échelle. Dans notre travail on a utilisé la plateforme INET sous OMNET++. INET est une bibliothèque open source qui fournit des protocoles, des agents et d'autres modèles aux chercheurs et aux étudiants qui travaillent avec les réseaux de communication. Elle est particulièrement utile lors de la conception et la validation de nouveaux protocoles ou lors de l'exploration de nouveaux scénarios. En effet, plusieurs autres cadres de simulation prennent INET comme base et l'étendent dans des directions spécifiques, telles que les réseaux véhiculaires, les réseaux cellulaires LTE, 5G, etc.

Ci-dessous un tableau résumant les paramètres de simulation utilisés dans nos différents scénarios d'évaluation de performances par OMNET++.

Paramètre	Valeur
OMNET++	5.4.1
INET	4.1.0
Veins	5.0
Sumo	1.6.0
Dimensions de zone simulée	3000*3000 pour la densité 900*900 pour la vitesse
Nombre de nœuds	10,20,30,40,50,60 pour la densité 25 pour la vitesse
Nombre de clusters	9
Taille de paquets	1000 bits
Durée de simulation	100 seconds pour la densité 60 seconds pour la vitesse
Modèle de propagation	Free space model
Modèle de mobilité	VeinsInetMobility
vitesse moyenne	22mps (80 km/h) pour la densité AVG(10,20,30,40,50) mps pour la vitesse

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation

4.4.4 Résultats de simulation obtenus

Dans notre scénario, nous avons utilisé un modèle de mobilité réel (Veins) permettant de simuler un environnement VANET. Pour ce faire, on a utilisé une carte géographique d'une région appartenant à la Wilaya de Jijel. Cette dernière est illustrée dans la figure 4.7.

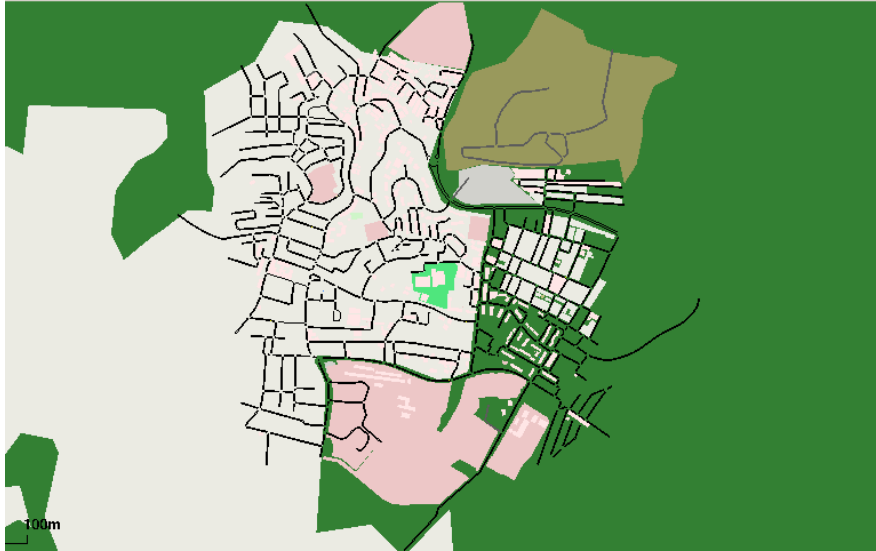


FIGURE 4.7 – La carte géographique d'une région appartenant à la wilaya de Jijel.

Aussi, dans la figure 4.8 des captures qui illustrent la simulation. Cette dernière est réalisée en utilisant SUMO (Simulation Of Urbany MObility). 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 (Vehicles in network simulation), car ce dernier relie SUMO et OMNET++.



FIGURE 4.8 – Captures d'exécution.

4.4.4.1 Scénario1 : variation de la densité

Dans la série de simulation de ce scénario, on va varier le nombre de véhicules dans le réseau de 10 jusqu'à 60 véhicules, tout en gardant la même portée et vitesse. On va évaluer et comparer le protocole CBR par rapport aux deux protocoles standards DSDV et GPSR.

– Taux de paquets reçus avec succès (PDR)

En observant le graphe de la figure 4.9, nous remarquons que le taux de paquets délivré diminue en augmentant le nombre de véhicules, avec une meilleure performance du protocole implémenté CBR. Ceci prouve l'efficacité de la technique du clustering utilisée par le protocole CBR en offrant des chemins plus adaptatifs pour atteindre la destination et acheminer les paquets de données par rapport aux deux autres protocoles DSDV et GPSR.

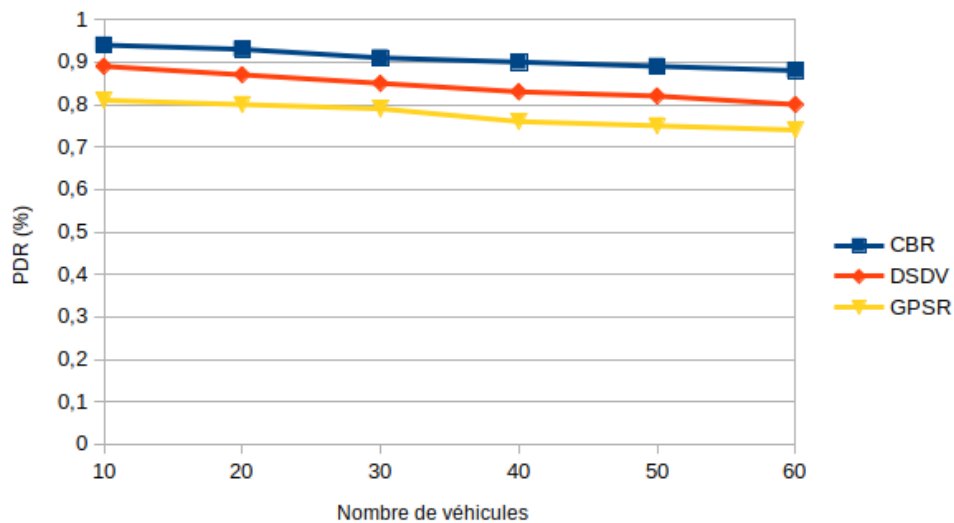


FIGURE 4.9 – PDR.

– Débit (Throughput)

Dans la figure 4.10, nous constatons que le débit augmente avec l'augmentation du nombre de véhicules. Néanmoins, le débit marqué par CBR est meilleur par rapport aux GPSR et DSDV. Ces résultats s'expliquent aisément par la réduction de la charge du réseau (le nombre de messages échangés au sein du réseau), en utilisant l'approche de clustering.

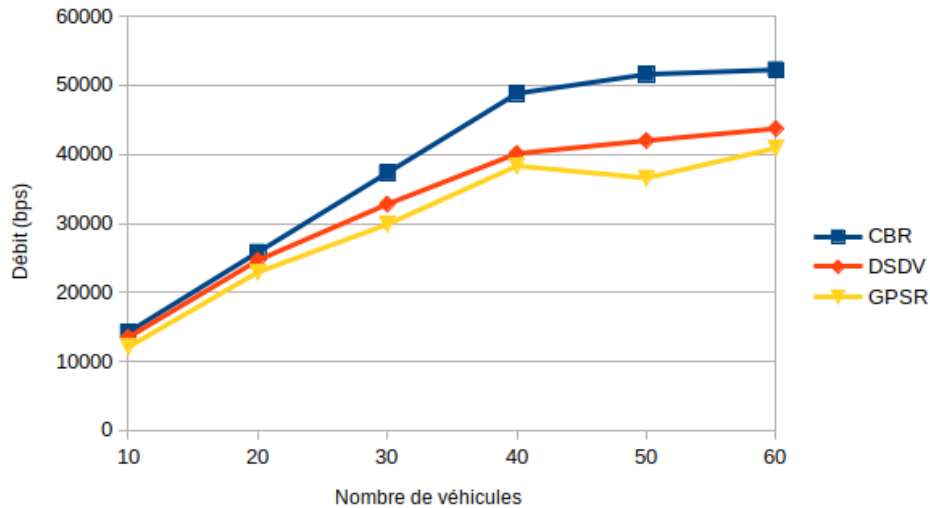


FIGURE 4.10 – Débit.

4.4.4.2 Scénario2 : variation de la vitesse

Dans ce scénario, nous exposerons les résultats obtenus tout en donnant leurs interprétations en variant la vitesse moyenne des véhicules dans le réseau de 10 mps jusqu'à 50 mps , mais en gardant la même densité. On a fixé le nombre de véhicules dans le réseau à 25 véhicules. En outre, dans cette série de simulation nous avons comparé le protocole CBR avec nos deux améliorations WeCBR et Q-WeCBR. Par la suite, on a les comparé tous les trois avec les deux protocoles GPSR et DSDV, et ce suivant les métriques de performance décrites précédemment.

– Taux de paquets reçus avec succès (PDR)

Dans les figures 4.11 et 4.12 nous remarquons que le taux de paquets reçus du protocole Q-WeCBR est bien meilleur que le taux marqué par les protocoles CBR et WeCBR d'une part et aussi par rapport aux deux protocoles standards DSDV et GPSR d'autre part. Ceci peut se justifier par la robustesse de Q-WeCBR devant l'augmentation de la vitesse en utilisant la méthode Q-learning dans son processus de routage. Au fait, Q-learning offre une souplesse et une très bonne adaptation aux variations de l'environnement en choisissant la meilleure action afin de construire le meilleur chemin vers la destination. Par ailleurs, notre deuxième amélioration aussi WeCBR montre son efficacité par rapport au CBR, en marquant un PDR plus élevé. Enfin, l'efficacité du processus de clustering est bien démontrée vu que les protocoles basés sur cette approche ont de meilleurs PDR par rapport aux GPSR et DSDV.

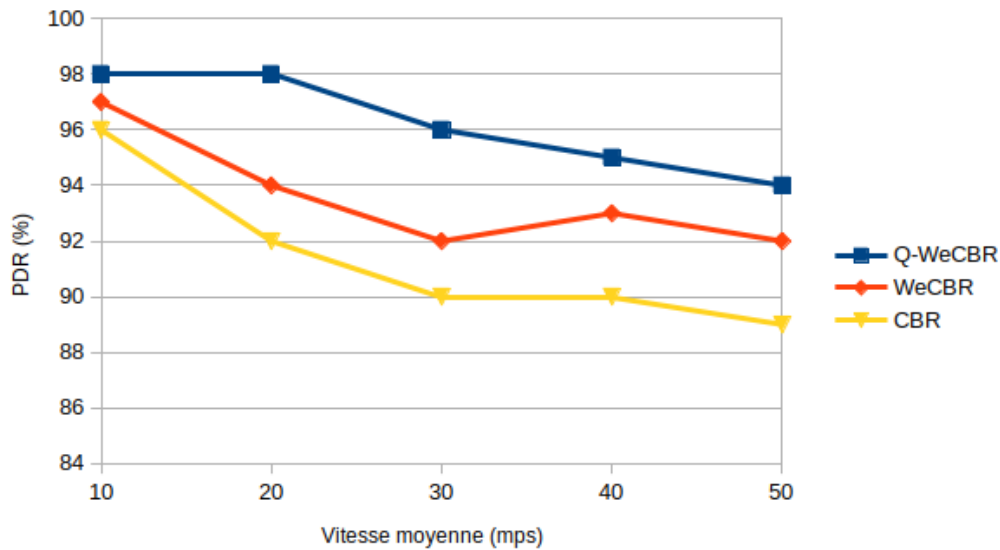


FIGURE 4.11 – PDR.

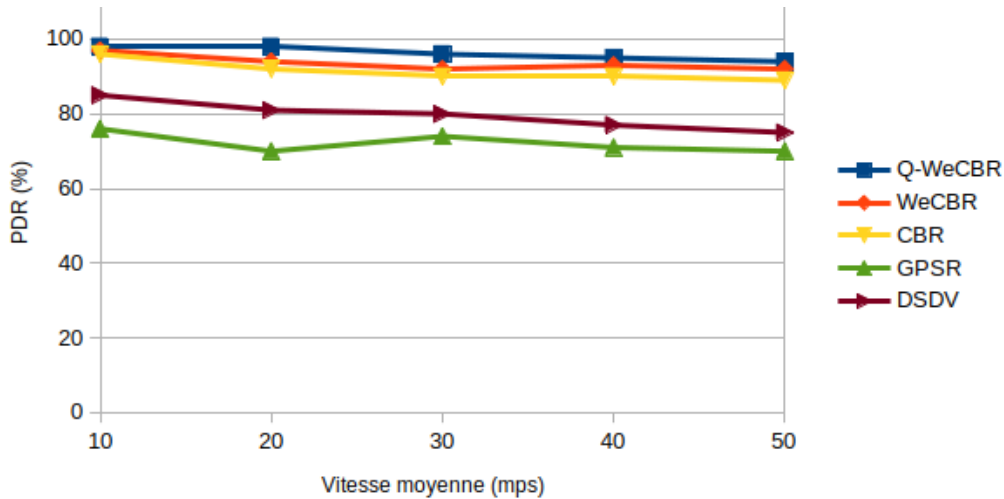


FIGURE 4.12 – PDR.

– Débit (Throughput)

Les figures 4.13 et 4.14 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 Q-WeCBR surpasse les protocoles CBR, WeCBR, DSDV et GPSR. Ceci confirme les résultats de PDR obtenues précédemment car le débit est proportionnel au PDR. En d'autres termes, les protocoles qui ont un PDR élevé auront automatiquement un débit élevé. Dans ce cas, nos améliorations Q-WeCBR et CBR ont de meilleurs débit par rapport aux protocoles de faible PDR qui ont marqué aussi un faible débit, à savoir CBR, GPSR et DSDV.

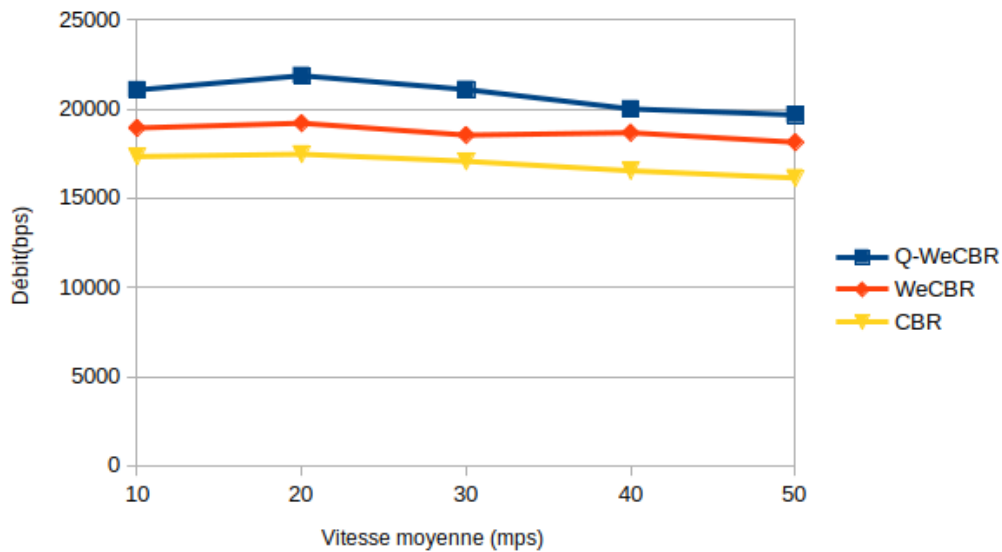


FIGURE 4.13 – Débit.

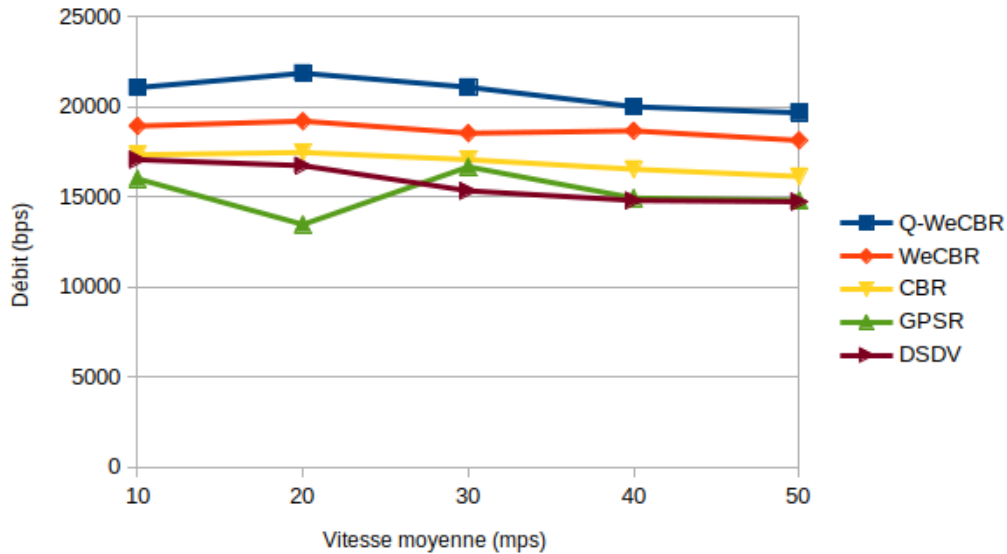


FIGURE 4.14 – Débit.

4.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté en détail le fonctionnement du protocole CBR que nous avons implémenté, ainsi que nos deux améliorations WeCBR et Q-WeCBR. Plus précisément, nous avons donné une description détaillée en exposant leur principe de fonctionnement et les méthodes qu'ils ont fait intervenir dans leur mise en œuvre. L'étude comparative menée pour l'évaluation des performances des protocoles CBR, WeCBR et Q-WeCBR a été réalisée par simulation via l'outil OMNet++. Nous avons évalué les protocoles en termes de taux de perte de paquets transmis et du débit offert. Les résultats de simulation obtenus donnent un avantage à nos deux améliorations par rapport au protocole CBR et aussi, par rapport aux deux autres protocoles conventionnels GPSR et DSDV. Au fait, le taux de livraison de paquet offert par CBR est bien supérieur que celui obtenu par DSDV

et GPSR. Aussi, nous avons remarqué que nos deux améliorations WeCBR et Q-WeCBR assurent de meilleurs résultats par rapport à CBR, GPSR et DSDV, en termes de débit aussi.

Conclusion générale et perspectives

Les réseaux véhiculaires ad hoc (VANETs) forment un nouveau type de réseaux issu des réseaux ad hoc mobiles (MANETs). Ils sont composés d'un nombre important de véhicules circulant sur les routes, et capables de communiquer entre eux sans une infrastructure fixe. Le fait que la topologie du réseau soit très dynamique rend difficile la conservation et la communication des informations dans le réseau. De ce fait, le routage des données s'impose comme un défi important à relever afin d'acheminer efficacement les informations vers la destination.

Dans les VANETs, il existe plusieurs approches de routage. Nous avons essayé à travers ce mémoire de faire le tour sur l'approche de clustering. Pour ce faire, nous avons commencé par introduire les généralités qui entourent le paradigme du routage dans ces réseaux. Par la suite, nous avons exposé la technique de clustering, son principe ainsi que ses différentes caractéristiques. Notre étude s'est ensuite focalisée sur les principaux protocoles de routage basés clustering proposés dans la littérature. Nous leur avons apporté une nouvelle classification, et ce par rapport à leur mode de fonctionnement et selon les paramètres de prise de décision. Aussi, nous avons présenté les différentes caractéristiques de ces protocoles et leurs principes de fonctionnement. L'étude critique des protocoles de cette approche nous a permis de tracer la ligne directrice de notre objectif, qui est l'implémentation du protocole hiérarchique CBR dans un premier temps, puis son amélioration dans un second. Les deux améliorations du protocole CBR, ont été baptisée WeCBR et Q-WeCBR respectivement.

Afin de montrer l'efficacité de l'approche de clustering en face à d'autres approches conventionnelles, nous avons étudié les performances du protocole CBR par rapport aux protocoles GPSR et DSDV, et ce en termes de taux de perte de paquets transmis et du débit offert. Entre autres, une deuxième série de simulation a été réalisée pour valider les améliorations apportées par nous deux propositions WeCBR et Q-WeCBR en termes des mêmes critères devant le protocoles CBR, GPSR et DSDV aussi.

En guise de perspectives nous envisageons :

- Étudier l'application de d'autres techniques issues de l'intelligence artificielle et de machine learning dans le processus de routage, comme les réseaux de neurones, Deep-learning, PSO, ACO, AG, etc.
- Vu que le mécanisme de sélection de CHs a été modifié, choisir plus/autres métriques dans les critères de choix, et aussi étudier d'autres stratégies de sélection.
- L'ajout des mécanismes d'agrégation de données et de caching exécuter par/au sein chaque CH pour éliminer les redondances et améliorer la qualité de service, en minimisant le temps d'acheminement des paquets.
- L'intégration des mécanismes de sécurité au niveau de nos améliorations proposées, plus exactement dans leur fonctionnement afin de protéger les communications et contrer les vulnérabilités du système.

- Ils serait intéressant aussi de tester et implémenter les différents protocoles sous les nouvelles variantes des technologies de communication réseau à savoir les communications quantiques et 5G, 6G, etc.
- Les nouvelles techniques de récupération d'énergie, l'énergie verte, et leur utilisation dans le processus de routage dans les véhicules intelligents et ceux électriques se dessinent comme un axe intéressant de recherche.

Bibliographie

- [1] J. Defaye. Les différents types de réseaux sans fil. *Conservatoire des arts et métiers Rhône -Alpes- Centre de Lyon*, 2007.
- [2] S Rimour. Généralités sur les réseaux : chapitre 1. *IUT, C. F département informatique*, 2002.
- [3] Nouredine Chaib. *La sécurité des communications dans les réseaux VANET*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2011.
- [4] A.Amara Korba. *Détection d’Intrusion et Sécurisation du Routage dans les Réseaux Ad hoc*. PhD thesis, université de Annaba, 2016.
- [5] Stefano Busanelli, Gianluigi Ferrari, and Luca Veltri. Short-lived key management for secure communications in vanets. In *2011 11th International Conference on ITS Telecommunications*, pages 613–618. IEEE, 2011.
- [6] 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.
- [7] Hassnaa Moustafa and Gilles Bourdon. Vehicular networks deployment view : applications, deployment architectures and security means. *Ubiquitous Computing and Communication Journal*, 2008.
- [8] Jerome Harri, Fethi Filali, and Christian Bonnet. Mobility models for vehicular ad hoc networks : a survey and taxonomy. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(4) :19–41, 2009.
- [9] MPIRICAL. *V2N - Vehicle-to-Network*, <https://www.mpirical.com/glossary/v2n-vehicle-to-network>. PhD thesis, 2020.
- [10] United States Department of Transportation. *Vehicle-to-Pedestrian (V2P) Communications for Safety*, https://www.its.dot.gov/research_archives/safety/v2p_comm_safety.htm. PhD thesis, 2020.
- [11] Dipankar Raychaudhuri and Mario Gerla. *Emerging wireless technologies and the future mobile internet*. Cambridge University Press, 2011.
- [12] Hassnaa Moustafa and Yan Zhang. *Vehicular networks : techniques, standards, and applications*. Auerbach publications, 2009.
- [13] 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.
- [14] B. Senouci. *Réseau mobile Ad Hoc et réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Bordeaux, 2006.

- [15] 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.
- [16] Halabi Hasbullah, Irshad Ahmed Soomro, et al. Denial of service (dos) attack and its possible solutions in vanet. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 4(5) :813–817, 2010.
- [17] 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.
- [18] Marc Torrent-Moreno, Daniel Jiang, and Hannes Hartenstein. Broadcast reception rates and effects of priority access in 802.11-based vehicular ad-hoc networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pages 10–18, 2004.
- [19] Ozan K Tonguz, Nawaporn Wisitpongphan, Jayendra S Parikh, Fan Bai, Priyantha Mudalige, and Varsha K Sadekar. On the broadcast storm problem in ad hoc wireless networks. In *2006 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems*, pages 1–11. IEEE, 2006.
- [20] Oussama Senouci. *Application de l’Approche Clustering dans le Contexte de l’IoV*. PhD thesis, 2019.
- [21] Tarik Taleb, Ehssan Sakhaee, 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*, 56(6) :3337–3347, 2007.
- [22] Charles E Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. *ACM SIGCOMM computer communication review*, 24(4) :234–244, 1994.
- [23] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Cédric Adjih, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Amir Qayyum, and Laurent Viennot. Optimized link state routing protocol (olsr). 2003.
- [24] Tsu-Wei Chen and Mario Gerla. Global state routing : A new routing scheme for ad-hoc wireless networks. In *ICC’98. 1998 IEEE International Conference on Communications. Conference Record. Affiliated with SUPERCOMM’98 (Cat. No. 98CH36220)*, volume 1, pages 171–175. IEEE, 1998.
- [25] 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*, volume 1, pages 70–74. IEEE, 2000.
- [26] David B Johnson and David A Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Mobile computing*, pages 153–181. Springer, 1996.
- [27] 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.
- [28] Elizabeth M Royer and Charles E Perkins. Multicast operation of the ad-hoc on-demand distance vector routing protocol. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 207–218, 1999.

- [29] Zygmunt J Haas. A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks. In *Proceedings of ICUPC 97-6th International Conference on Universal Personal Communications*, volume 2, pages 562–566. IEEE, 1997.
- [30] Navid Nikaein, Christian Bonnet, and Neda Nikaein. Harp-hybrid ad hoc routing protocol. In *Proceedings of international symposium on telecommunications (IST)*, pages 56–67, 2001.
- [31] Mohammad Al-Rabayah and Robert Malaney. A new scalable hybrid routing protocol for vanets. *IEEE transactions on vehicular technology*, 61(6) :2625–2635, 2012.
- [32] 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, 2000.
- [33] Linda Briesemeister, Lorenz Schafers, and Günter Hommel. Disseminating messages among highly mobile hosts based on inter-vehicle communication. In *Proceedings of the IEEE intelligent vehicles symposium 2000 (Cat. NO. 00TH8511)*, pages 522–527. IEEE, 2000.
- [34] Christian Lochert, Hannes Hartenstein, Jing Tian, Holger Fussler, Dagmar Hermann, and Martin Mauve. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In *IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No. 03TH8683)*, pages 156–161. IEEE, 2003.
- [35] Holger Füßler, Jörg Widmer, Michael Käsemann, Martin Mauve, and Hannes Hartenstein. Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 1(4) :351–369, 2003.
- [36] 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.
- [37] Moez Jerbi, Rabah Meraihi, Sidi-Mohammed Senouci, and Yacine Ghamri-Doudane. Gytar : improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular ad hoc networks in city environments. *Vehicular Ad Hoc Networks*, 6, 2006.
- [38] Zhaomin Mo, Hao Zhu, Kia Makki, and Niki Pissinou. Muru : A multi-hop routing protocol for urban vehicular ad hoc networks. In *2006 Third Annual International Conference on Mobile And Ubiquitous Systems : Networking & Services*, pages 1–8. IEEE, 2006.
- [39] Jeremy Blum, Azim Eskandarian, and Lance Hoffman. Mobility management in iver networks. In *IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No. 03TH8683)*, pages 150–155. IEEE, 2003.
- [40] Sheng-Shih Wang and Yi-Shiun Lin. Passcar : A passive clustering aided routing protocol for vehicular ad hoc networks. *Computer communications*, 36(2) :170–179, 2013.
- [41] Yuyi Luo, Wei Zhang, and Yangqing Hu. A new cluster based routing protocol for vanet. In *2010 second international conference on networks security, wireless communications and trusted computing*, volume 1, pages 176–180. IEEE, 2010.
- [42] Farhan Ahammed, Javid Taheri, and Albert Zomaya. Lica : robust localization using cluster analysis to improve gps coordinates. In *Proceedings of the first ACM international symposium on Design and analysis of intelligent vehicular networks and applications*, pages 39–46, 2011.

- [43] Salim Allal. *Optimisation des échanges dans le routage géocast pour les réseaux de Véhicules Ad Hoc VANETs*. PhD thesis, Paris 13, 2014.
- [44] Fan Li and Yu Wang. Routing in vehicular ad hoc networks : A survey. *IEEE Vehicular technology magazine*, 2(2) :12–22, 2007.
- [45] AIndra Venkatesh and R Murali. Routing protocols for vehicular adhoc networks (vanets) : A review. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 5(1) :25–43, 2014.
- [46] Vijay Kumar Banga Sandeep Kad. Survey over vanet routing protocols for vehicle to vehicle communication. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSRJCE)*, pages 25–43, 2012.
- [47] Poonam Kumari and Ms Ruchi Sanduja. A survey on various vanet routing protocols.
- [48] Manel Hatem, Siham Salmi, Samra Boulfekhar, et al. *Routage basé sur le clustering dans les réseaux VANETs*. PhD thesis, Université de bejaia, 2017.
- [49] A systematic classification of routing in vehicular ad hoc networks.
- [50] Oussama Senouci, Saad Harous, and Zibouda Aliouat. Survey on vehicular ad hoc networks clustering algorithms : Overview, taxonomy, challenges, and open research issues. *International Journal of Communication Systems*, page e4402, 2020.
- [51] Véronique Vèque and Colette Johnen. Hiérarchisation dans les réseaux ad hoc de véhicules. 2012.
- [52] Sonal Sharma Jayant Vats, Gaurav Tejpal. A review on various clustering protocols in vehicular adhoc network (vanets). *International journal of advance research in science and Engineering*.
- [53] Craig Cooper, Daniel Franklin, Montserrat Ros, Farzad Safaei, and Mehran Abolhasan. A comparative survey of vanet clustering techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1) :657–681, 2016.
- [54] KV Rop, PK Langat, and HA Ouma. Enhanced cluster stability in vehicular ad hoc network. 2019.
- [55] Rasmeet Singh Bali and Neeraj Guide Kumar. *Efficient Secure Data Clustering In Vehicular Ad Hoc Networks*. PhD thesis, 2016.
- [56] Reza Purtoosi, Hassan Taheri, Abbas Mohammadi, and Foroohar Foroozan. A light-weight contention-based clustering algorithm for wireless ad hoc networks. In *The Fourth International Conference on Computer and Information Technology, 2004. CIT'04.*, pages 627–632. IEEE, 2004.
- [57] Sheng-Shih Wang and Yi-Shiun Lin. Performance evaluation of passive clustering based techniques for inter-vehicle communications. In *The 19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC 2010)*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [58] Jyotsna Rao Dawande, Sanjay Silakari, and Anjna Deen. A survey of all existing clustering protocols in vanets but main emphasis of survey laid on currently using protocol ie tcdgp. *International Journal of Computer Applications*, 118(6) :22–31, 2015.
- [59] Xueqin Yang, Qiangwei Chen, Chaobo Chen, and Jianhua Zhao. Improved zrp routing protocol based on clustering. *Procedia computer science*, 131 :992–1000, 2018.
- [60] A.V Luis A Edwards R.A Santos, A.G Potes. A novel routing algorithm for vehicular ad hoc networks. In *Rev. Fac. Ing. Univ*, pages 120–131. IEEE, 2008.

- [61] Christine Shea, Behnam Hassanabadi, and Shahrokh Valaee. Mobility-based clustering in vanets using affinity propagation. In *GLOBECOM 2009-2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [62] A. Edwards R. A. Santns, R. M. Edwards and D. Belis. A novel cluster-based location routing algorithm for intervehicular communication. In *Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2004.
- [63] Nitin Maslekar, Joseph Mouzna, Houda Labiod, Manoj Devisetty, and Manohara Pai. Modified c-drive : Clustering based on direction in vehicular environment. In *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 845–850. IEEE, 2011.
- [64] Mohamed Hadded, Paul Muhlethaler, Anis Laouiti, Rachid Zagrouba, and Leila Azouz Saidane. Tdma-based mac protocols for vehicular ad hoc networks : a survey, qualitative analysis, and open research issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4) :2461–2492, 2015.
- [65] Jungmin So and Nitin H Vaidya. Multi-channel mac for ad hoc networks : handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 222–233, 2004.
- [66] Khalid Ateyia M Almahorg, Sagar Naik, and Xuemin Shen. Efficient localized protocols to compute connected dominating sets for ad hoc networks. In *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [67] Abubakar Bello Tambawal, Rafidah Md Noor, Rosli Salleh, Christopher Chembe, and Michael Oche. Enhanced weight-based clustering algorithm to provide reliable delivery for vanet safety applications. *PLoS one*, 14(4) :e0214664, 2019.
- [68] S Kamakshi and VS Shankar Sriram. Plummeting broadcast storm problem in highways by clustering vehicles using dominating set and set cover. *Sensors*, 19(9) :2191, 2019.
- [69] S Almalag Mohammad and C Weigle Michele. Using traffic flow for cluster formation in vehicular ad-hoc networks. In *IEEE Local Computer Network Conference*, pages 631–636. IEEE, 2010.
- [70] Venkatamangarao Nampally and Dr M Raghavender Sharma. Increasing information shareability by using ntbs clustering issn : 2278-0181 <http://www.ijert.org> vol. 8 issue 11, november-2019 approach for vanet. *IPASJ International Journal of Computer Science (IJCS)*, 5(10) :1–17, 2017.
- [71] GJ KLIR, UH St CLAIR, and B Yuan. Fuzzy set theory, foundations-and applications, 1997.
- [72] khalid Abdel Hafeez, Lian zahao, Zaiyi Liao, and Boddy Ngokwah Ma. A fuzzy-logic-based cluster head selection algorithm in vanets. In *2012 IEEE international conference on communication (ICC)*, pages 203–207. IEEE, 2012.
- [73] J Amudhavel, K Prem Kumar, A Monica, B Bhuvaneshwari, S Jaiganesh, and S Sampath Kumar. A hybrid aco-pso based clustering protocol in vanet. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Advanced Research in Computer Science Engineering & Technology (ICARCSET 2015)*, pages 1–5, 2015.
- [74] Yoshiaki Shiraishi Mazen Alowish, Yasuhiro Takano and Masakatu Morii. Performance evaluation of a cluster based routing protocol for vanets. *Journal of Communications*, 12(2), 2017.

- [75] 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*, pages 1–10, 2008.
- [76] Abdallah Makhoul. *Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données*. PhD thesis, Besançon, 2008.
- [77] Amina Boudjaadar. Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de capteurs sans fil. 2010.
- [78] Mohamed Bouarir. *Protocole de routage intelligent pour les réseaux ad hoc de véhicules*. PhD thesis, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2012.
- [79] T Arvind. A comparative study of various network simulation tools. *International Journal of Computer Science & Engineering Technology*, 7(8) :374–378, 2016.
- [80] Si-Ho Cha, Min-Woo Ryo, Kyu-Ho Kim, and Byoung Chan Jeon. Applying connected dominating set to broadcasting in vehicular ad hoc networks. In *2013 International Conference on Information Science and Applications (ICISA)*, pages 1–2. IEEE, 2013.
- [81] Degan Zhang, Hui Ge, Ting Zhang, Yu-Ya Gui, Xiahuan Liu, and Guoqiang Mao. New multi-hop clustering algorithm for vehicular ad hoc networks. volume 20, pages 1517–1530. IEEE, 2018.
- [82] D Gao X Bi and M Yang. A reinforcement learning-based routing protocol for clustered ev-vanet. In *Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, pages 1769–1773. IEEE, 2020.
- [83] Said Hoceini. *Techniques d'Apprentissage par Renforcement pour le Routage Adaptatif dans les Réseaux de Télécommunication à Trafic Irrégulier*. PhD thesis, Université Paris XII Val de Marne, 2004.
- [84] Leslie Pack Kaelbling, Michael L Littman, and Andrew W Moore. Reinforcement learning : A survey. *Journal of artificial intelligence research*, 4 :237–285, 1996.
- [85] Charles Chevalier. Mémoire. présenté pour l'obtention du diplôme de magister spécialité : Géologie. option : Géologie de réservoirs. présenté par : Ameur zaimeche ouafi.
- [86] Foudil MIR. *Le routage à basse consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Béjaïa-Abderrahmane Mira.
- [87] Sebastian B Thrun. The role of exploration in learning control. 1992.
- [88] C. Watkins and P. Dayan. Q-learning. machine learning. 1992.