

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمار تليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE
Mémoire de Master

Domaine : Mathématiques et Informatique

Filière : Informatique

Option : Réseaux, Systèmes et Applications Réparties

Présenté par :

Boudelaâ Imane

Naouai Nacira

Thème

Apport des protocoles de routage geocast au confort des passagers dans les réseaux de véhicules

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

<i>Mr</i>	Lagraa Nasreddine	Professeur	(Université de Laghouat)	Président
<i>M^{lle}</i>	Benkouider Sarah	M.A.(A)	(Université de Laghouat)	Examinatrice
<i>Mr</i>	Brik bouziane	M.A.(A)	(Université de Laghouat)	Examineur
<i>M^{lle}</i>	Bousbaa Fatima Zohra	M.A.(A)	(Université de Laghouat)	Encadreur

Année Universitaire 2015/2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail ...

A ma très chère mère

Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé d'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A mes très chères soeurs et ses enfants En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

A tous les membres de ma famille, petits et grands.

A mes chères amies Zohra, Sabrina et Bouchra.

A mes chers collègues.

Et à tous ceux qui m'aiment.

Imane

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ...

Mes parents :

Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et mes soeurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité. Je vous dédie ce travail avec mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mes chères amis :Sabrine, Zohra, Bouchra.

A tous ceux et toutes celles qui m'ont accompagné et soutenu durant cette année.

Nacira

Remerciement

Merci Allah de nous avoir donné la force pour finir ce modeste travail.

Tout d'abord et du fond du coeur, nous remercions vivement notre encadreur M^{lle} Fatima Zohra Bousbaa d'avoir dirigé notre mémoire, s'est toujours montré à l'écoute, et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans elle ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous adressons nos remerciements aux membres du Jury, particulièrement Mr Nasreddine Lagraa, pour leurs remarques et suggestions qui nous ont été très utiles et fructueuses, pour la finalisation de ce mémoire. Nous profitons de l'occasion pour leur adresser nos sincères respects pour leurs compétences, leurs conseils avisés, et leurs aides durant nos études.

L'examinatrice M^{lle} Benkouider Sarah, d'avoir accepté d'évaluer notre travail, sans oublier qu'elle est parmi nos enseignants qu'ils nous ont permis d'acquérir plus de connaissances au cours de nos études.

L'examineur Mr Brik bouziane d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Sans oublier de remercier également tous les enseignants du Département de mathématiques et informatique qui nous ont enseigné sans hésiter à nous faire passer leurs informations.

Nous remercions aussi nos parents pour leur soutien et leur amour, ainsi que nos frères, nos soeurs, nos camarades, nos amis et toutes les personnes qui nous ont aidé durant nos études universitaires. Et pour finir, un grand merci aux personnes qui nous ont soutenus pour réaliser ce modeste travail.

Résumé

Le routage dans les réseaux VANETs (Vehicular Ad Hoc NETWORK) est considéré comme un problème complexe. Le degré de difficulté du problème augmente lorsqu'on veut acheminer des messages à un ensemble spécifique des nœuds mobiles. Les protocoles de routage geocast permettent d'acheminer un message d'un véhicule source vers plusieurs véhicules destinations situés dans une zone géographique spécifique. De nombreux protocoles de routage geocast ont été proposés pour les réseaux ad Hoc, mais rares sont ceux qui s'adaptent aux applications des réseaux VANETs et qui supportent les contraintes inhérentes aux communications sans fil spécialement aux réseaux de véhicules. La nature dynamique (mobilité) des nœuds complique l'acheminement des paquets. Des mécanismes et des protocoles spécifiques doivent donc être utilisés. Dans ce contexte, nous proposons une nouvelle solution de routage geocast, adaptée aux applications de confort dans les réseaux VANETs, répondant à la fois aux exigences et besoins technologiques des applications de confort, et surtout aux contraintes des communications inter-véhiculaires tel que, les fragmentations fréquentes interne et externe du réseau. Les résultats de simulation obtenus à l'aide du simulateur NS-2 et du modèle de mobilité Freeway, ont montré les bonnes performances du nouveau protocole par rapport à d'autres solutions de routage geocast.

Mots clés : *VANETs, Routage geocast, Applications de confort, Mobilité, Fragmentation fréquente interne, Fragmentation fréquente externe, Freeway, NS-2.*

Abstract

Routing in vehicular networks or VANET (Vehicular Ad Hoc NETWORK) is considered as a complex problem. The degree of the problem difficulty increases when we want to route messages to a specific set of mobile vehicles. Geocast routing protocols used to route a message from a source vehicle to multiple destination vehicles in a specific geographic area. Many geocast routing protocols have been proposed for ad hoc networks, but few of them are suitable for VANET applications which support the specification of the vehicular network. The Dynamic nature (mobility) of vehicles presents a big challenge for routing protocols therefore specific mechanisms must be used. In this context, we propose a new geocast routing solution, adapted to the comfort applications in VANET, trying to overcome one of the most difficult challenges in inter-vehicle communications which is the internal and external network frequent fragmentations. The simulation results obtained using the simulator NS-2 and Freeway mobility model demonstrate clearly the good performance of the new protocol compared to other geocast routing solutions.

Keywords : *VANET, Geocast routing, Comfort applications, Mobility, Internal frequent fragmentation, External frequent fragmentation, NS-2, Freeway model.*

Table des matières

Introduction générale	1
1 Réseaux de véhicules : Vue générale	3
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation des réseaux de véhicules : Technologie	4
1.3 Architectures de communication dans les réseaux de véhicules	6
1.3.1 Communications de véhicule à infrastructure (V2I) : Architecture centralisée	7
1.3.2 Communications de véhicule à véhicule (V2V) : Architecture distribuée	7
1.3.3 Communications hybrides	7
1.4 Caractéristiques et problématiques des réseaux de véhicules	8
1.5 Applications des réseaux de véhicules [2] [7]	9
1.5.1 Applications de sécurité routière	9
1.5.2 Applications de gestion du trafic routier	10
1.5.3 Applications de confort du conducteur et des passagers	10
1.6 Thèmes de recherche dans le domaine des réseaux de véhicules	11
1.6.1 Sécurité	11
1.6.2 Localisation des véhicules	11
1.6.3 Problèmes de congestion	12
1.6.4 Mobilité	12
1.6.5 Routage	12
1.7 Conclusion	12

2	Le routage geocast dans les réseaux VANETs	13
2.1	Introduction	13
2.2	Le routage dans les réseaux VANETs	14
2.3	Le routage geocast dans les VANETs	14
2.3.1	Problème de routage geocast dans les réseaux VANETs	16
2.3.2	Description de quelques protocoles de routage geocast dans les VANETs	16
2.3.2.1	TRADE (TRAck DEtection) et DDT (Distance Defer Time) [16]	16
2.3.2.2	IVG (Inter-Vehicle Geocast) [17]	18
2.3.2.3	Mobicast [18]	19
2.3.2.4	Robust Geocast Routing Protocol (RGRP-SA et RGRP-CA) [3]	21
2.4	Synthèse de l'étude théorique des protocoles de routage geocast dans les réseaux VANETs	24
2.5	Discussion	26
2.6	Conclusion	27
3	Conception d'un nouveau protocole de routage geocast pour les VANETs	28
3.1	Introduction	28
3.2	Défis et objectifs de conception d'une nouvelle version du protocole RGRP-CA (version améliorée)	29
3.2.1	Les caractéristiques des applications ciblées	29
3.2.2	L'environnement de déplacement [22]	29
3.2.3	Les spécificités des réseaux de véhicules	30
3.3	Notre nouvelle approche ERGRP-CA (Efficient RGRP-CA)	30
3.3.1	Hypothèses	30
3.3.2	Principe	30
3.3.3	Description détaillée du protocole	31
3.3.4	Exemple de déroulement du protocole	37
3.4	Synthèse	38

3.5	Conclusion	38
4	Résultats et interprétations des simulations	39
4.1	Introduction	39
4.2	Présentation du simulateur réseaux NS2 :	40
4.2.1	L'architecture de simulation avec NS-2 :	40
4.3	Modèle de mobilité	41
4.3.1	Modèle de mobilité Freeway	42
4.4	Evaluation des performances de notre approche	43
4.4.1	Scénarios et paramètres de simulations	43
4.4.2	Métriques de performances	44
4.4.3	Résultats de simulation et analyse des performances	45
4.4.3.1	Nombre de paquets envoyés (NSP)	45
4.4.3.2	Taux de délivrance des paquets (PDR)	47
4.4.3.3	Délai moyen de bout en bout (EED)	48
4.4.3.4	Throughput (Th)	49
4.4.3.5	Protocol Overhead (PO)	50
4.5	Conclusion :	51
	Conclusion générale	52
	Bibliographie	54
	Annexe	57

Table des figures

1.1	Voiture intelligente [4]	4
1.2	Types de communication véhiculaire	6
2.1	Types d'acheminement des données dans les VANETs	14
2.2	Geocast dans les réseaux VANETs	15
2.3	Exemple de protocole IVG	18
2.4	Exemple de protocole Mobicast	20
2.5	(A) Dissémination de paquet dans $ZT(t)$, (B) Dissémination de paquet pour résoudre le problème de la fragmentation interne du réseau (cas d'isolement des véhicules : V_G , V_I et V_H).	22
2.6	(A) Dissémination de paquet dans $ZT(t)$, (B) Agrandissement de $ZT(t)$ pour résoudre le problème de la fragmentation externe du réseau.	23
3.1	Exemple de protocole E-RGRP-CA	37
4.1	L'architecture de simulation avec NS-2	41
4.2	Déplacements dans le modèle Freeway [22]	43
4.3	Nombre de paquets envoyés en fonction de densité du réseau	46
4.4	Taux de délivrance de paquets en fonction de densité du réseau	47
4.5	Délai moyen de bout en bout en fonction de densité du réseau	48
4.6	Throughput en fonction de densité du réseau	49
4.7	Protocol overhead en fonction de densité du réseau	50

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des technologies de communication [2]	6
2.1	Principales caractéristiques des protocoles de routage geocast dans les réseaux VANETs.	25
3.1	Le format de paquet geocast G_p	32
4.1	Paramètres de simulation	44

Glossaire

VANET	Vehicular Ad Hoc NETwork
MANET	Mobile Ad Hoc NETwork
ITS	Intelligent Transportation System
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
RDS	Radio Data System
TMC	Traffic Message Channel
DAB	Digital Audio Broadcasting
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
DVB-T	DVB-Terrestrial
DVB-H	DVB-Handheld
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution UMTS
LTE	Long Term Evolutionet
DSRC	Dedicated Short-Range Communications
RSU	Road Side Units
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
IVC	Inter Vehicule Communication
QoS	Quality of Service (qualité de service)
RGRP-SA	Robust Geocast Routing Protocol for Safety Application
RGRP-CA	Robust Geocast Routing Protocol for Comfort Application
ERGRP-CA	Efficient RGRP-CA
GPS	Global Positioning System
NS-2	Network Simulator 2
TCL	Tool Command Language
OTCL	Object Tool Command Language

Introduction générale

Contexte et problématiques

Au cours de cette dernière décennie, le développement des nouvelles technologies (ITS, Intelligent Transportation System) a favorisé une formidable évolution du système de transports. Cette évolution vise à rendre les réseaux plus sûrs, plus efficaces, et plus fiables [1].

Dans ce contexte, les réseaux véhiculaires (VANET, Vehicular Ad Hoc NETWORK) ont émergé en tant que nouvelle technologie prometteuse permettant aux véhicules de communiquer les uns avec les autres ainsi qu'avec les infrastructures installées au bord de la route. Les réseaux véhiculaires sont apparus en premier avec le besoin de développer des applications permettant de renforcer la sécurité routière afin de réduire le nombre d'accidents de la route et ainsi d'améliorer la gestion du trafic routier qui continue à croître. Par ailleurs, il existe également des applications d'information et de divertissement visant à offrir plus de confort et de convivialité aux conducteurs et aux passagers pendant leurs trajets [2]. Ces types d'applications attirent de plus en plus l'attention des chercheurs afin de développer des nouvelles solutions dans différents domaines de recherche, tels que la sécurité, le routage, la dissémination des données, localisation des véhicules, ou encore la mobilité.

La mobilité des noeuds dans les VANETs provoque des fragmentations fréquentes du réseau, liée à la vitesse des véhicules qui est très importante dans les autoroutes, par conséquent, le problème de routage est loin d'être évident dans les réseaux véhiculaires. Le degré de difficulté du problème augmente dans le cas où la dissémination de données concerne un groupe de noeuds (routage geocast) et tous ces derniers peuvent se déplacer

avec une variation de vitesse. Le nombre très réduit des solutions de routage geocast proposées dans les applications de confort [3], nous a motivé pour ne pas se limiter à une étude comparative et à proposer une amélioration au protocole RGRP-CA (Robust Geocast Routing Protocol for Comfort Applications) [3].

Objectif et contributions

Dans ce mémoire, nous avons consacré à l'étude du problème de routage geocast dans les réseaux Ad Hoc de véhicules. Notre objectif est de proposer une solution de routage geocast adaptée aux applications de confort prenant en considération les paramètres clés du fonctionnement des VANETs, à savoir la mobilité des noeuds et les fragmentations fréquentes du réseau. Dans ce contexte, nous avons proposé une amélioration au protocole RGRP-CA, en se basant sur des nouvelles techniques afin d'assurer la communication inter-véhiculaires le long de l'application.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans **le premier chapitre**, nous introduisons les concepts de bases des réseaux de véhicules. Nous décrivons les architectures, les caractéristiques, les applications diverses de ces réseaux et les thèmes de recherche dans ce domaine.

Le deuxième chapitre, s'intéresse à la problématique du routage geocast dans les VANETs, nous présentons un ensemble de protocoles de routage geocast, ainsi qu'une étude comparative permettant de montrer les avantages et les inconvénients de chacun.

Dans **le troisième chapitre**, nous présentons un nouveau protocole geocast qu'on a proposé, et qui englobe certains avantages des techniques existantes et utilise de nouvelles techniques lui permettant de s'adapter aux spécificités des applications de confort dans les VANETs.

Le quatrième chapitre, présente les simulations et les résultats qui démontrent les performances de notre nouvelle approche.

Finalement, on termine le mémoire par une conclusion qui résume notre travail et donne quelques perspectives futures de recherche.

Chapitre 1

Réseaux de véhicules : Vue générale

1.1 Introduction

Au cours de ces dernières années, les réseaux véhiculaires (VANETs) constituent un domaine de recherche prometteur qui intéresse de plus en plus la communauté scientifique, les constructeurs automobiles et les opérateurs des télécommunications. Ces réseaux rendent possible la communication entre les véhicules qu'ils permettront de réduire le temps passé sur les routes, de le rendre plus convivial et plus encore d'améliorer la sécurité routière. Les VANETs ont des caractéristiques semblables à celles des réseaux Ad Hoc mobiles (MANETs), avec des changements de topologie qui se produisent fréquemment en raison de la haute mobilité des noeuds. La nature décentralisée de ces réseaux menés au besoin de développer de nouveaux systèmes et protocoles de diffusion de l'information pour satisfaire les besoins spécifiques du réseau et garantir des services fiables [1].

Dans ce chapitre, nous présentons une description détaillée des concepts, des architectures, des caractéristiques, des applications diverses des communications véhiculaires et des thèmes de recherche dans ce domaine. Nous terminons ce chapitre par une conclusion.

1.2 Présentation des réseaux de véhicules : Technologie

Un réseau VANET est une particularité des réseaux MANETs où les noeuds mobiles sont des véhicules intelligents équipés de nouvelles technologies : (calculateurs, capteurs, cartes réseaux sans fils, ... etc.) (cf. Fig 1.1).

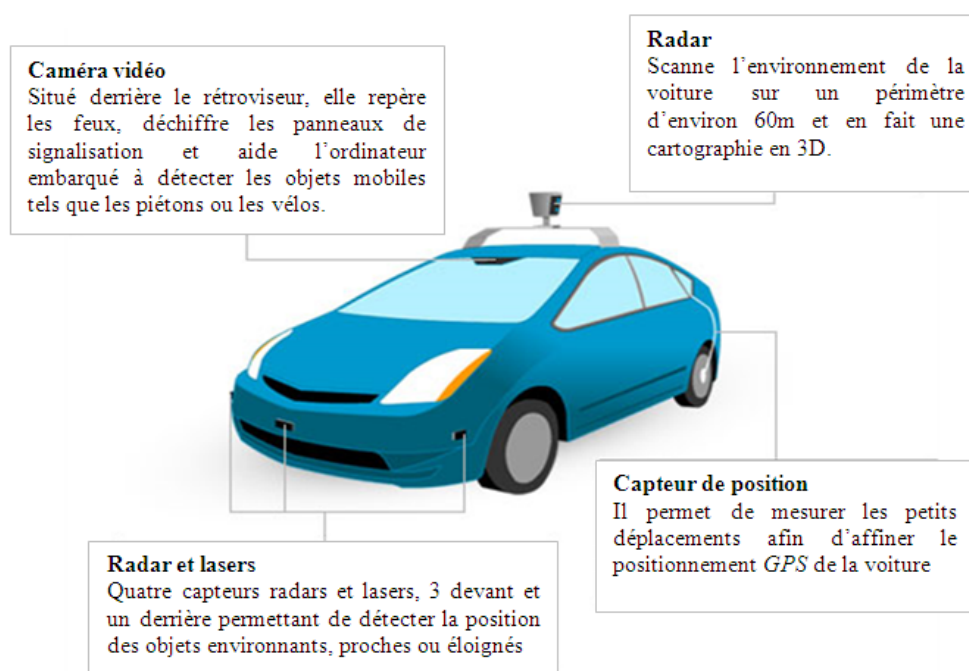


FIGURE 1.1 – Voiture intelligente [4]

Les technologies installées dans un véhicule assurent [1] :

- **La collecte d'information et perception de l'environnement proche** : en utilisant différents capteurs (conditions météorologiques, état de la route, état de la voiture, pollution, ... etc.) et des caméras, le conducteur peut à bord de son véhicule disposer d'un certain nombre d'informations et d'une meilleure visibilité lui permettant ainsi de réagir d'une manière adéquate aux changements de son environnement proche.
- **Le traitement** : avec une grande capacité de traitement à bord, les véhicules de

nos jours sont dotés d'intelligence et sont capables d'interpréter les informations collectées pour ensuite aider le conducteur à prendre une décision (particulièrement dans les systèmes d'aide à la conduite).

- **Le stockage** : un grand espace de stockage est nécessaire dans ce contexte afin de disposer des différentes classes et types d'information. Ces structures de données seront alimentées et mises à jour en fonction des événements et décisions du système de communication.

Plusieurs technologies peuvent être mises en oeuvre pour l'établissement des communications véhiculaires, ces technologies sont divisées principalement en trois catégories [2] :

- **Radio diffusion numérique** : telles que Radio Data System (RDS), Traffic Message Channel (TMC), Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Multimedia Broadcasting (DMB) et DVB-Terrestrial (DVB-T), DVB-Handheld (DVB-H), dans laquelle les informations sont fournies aux utilisateurs d'une manière unidirectionnelle.
- **Réseaux cellulaires** : on peut citer comme exemple l'Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), UMTS, Long Term Evolution (LTE) et WiMax qui dominent le domaine des communications mobiles et offrent des couvertures très larges mais nécessitent en revanche une infrastructure.
- **Device-to-Device** : cette catégorie permet une communication directe entre les véhicules en utilisant des technologies telles que le WiFi et Dedicated Short-Range Communications (DSRC). Le tableau 1.1 présente une variété de caractéristiques pour des technologies de communications utilisées dans les réseaux véhiculaires.

Technologies	Couverture	Débit	Mode de transmission
WiMax	≈ 50 km	70 Mbit/s	V2I
WiFi	≈ 100m-200m	11 Mbit/s-300Mbit/s	V2V, V2I
DSRC	≈ 100m-1Km	3-27 Mbit/s	V2V, V2I
3G/4G	≈ milliers de km	200 Kbit/s-100 Mbit/s	V2I

TABLE 1.1 – Récapitulatif des technologies de communication [2]

1.3 Architectures de communication dans les réseaux de véhicules

Dans les réseaux véhiculaires, les services proposés permettent de distinguer trois modes de communications possibles, Dans cette section, nous présentons le principe et l'utilité de chaque mode (cf. Fig 1.2) :

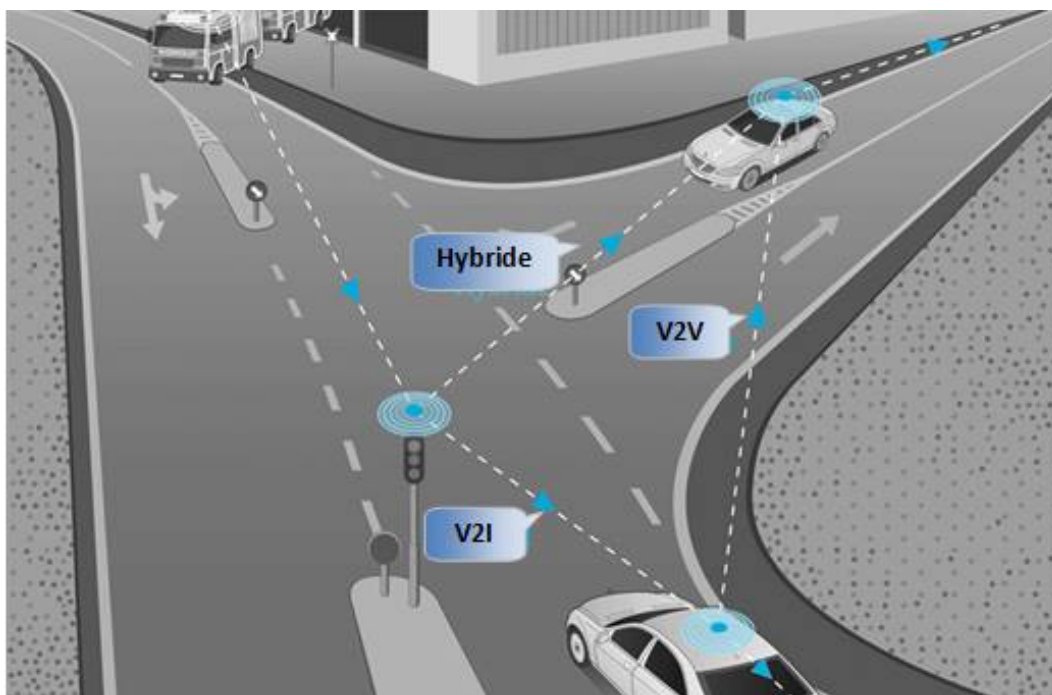


FIGURE 1.2 – Types de communication véhiculaire

1.3.1 Communications de véhicule à infrastructure (V2I) : Architecture centralisée

Cette approche repose sur le modèle client/serveur où les véhicules sont les clients et les stations installées le long de la route sont les serveurs. Ces serveurs sont connectés entre eux via une interface filaire ou sans fil. Toute communication doit passer par eux, ils peuvent aussi offrir aux utilisateurs plusieurs services concernant le trafic, accès à internet, échange de données de voiture-à-domicile et même la communication de voiture-à-garage pour le diagnostic distant.

L'inconvénient majeur de cette approche est que l'installation des stations le long des routes est une tâche coûteuse et prend beaucoup de temps, sans oublier les coûts relatifs à la maintenance des stations [2]. Pour cela la majorité des travaux repose sur les deux autres modes de communication décrits ci-dessous [5].

1.3.2 Communications de véhicule à véhicule (V2V) : Architecture distribuée

Ce mode d'architecture comprend uniquement des communications opportunistes entre les véhicules, aucune infrastructure n'est utilisée, aucune installation n'est nécessaire sur les routes et tous les véhicules sont équipés pour communiquer directement entre eux n'importe où, que ce soit sur des autoroutes, des routes de montagnes ou des routes urbaines, ce qui donne une communication moins coûteuse et plus flexible.

La communication de véhicule à véhicule semble la mieux adaptée pour la mise en œuvre d'un réseau véhiculaire, mais elle souffre de certains inconvénients dont nous citons, les délais de communication qui sont élevés [6]. Les déconnexions fréquentes dues au fait que les véhicules sont mobiles et la sécurité réseau est très limitée [2].

1.3.3 Communications hybrides

La combinaison des communications véhicule à infrastructure avec les communications de véhicule à véhicule, permet d'obtenir une communication hybride très intéressante. En effet, les portées des infrastructures (stations de bases) étant limitées, l'utilisation des véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Dans un but économique et afin

d'éviter la multiplication des stations de bases à chaque coin de rue, l'utilisation des sauts par véhicules intermédiaires prend tout son importance [6].

En plus, ce mode permet de répondre à la problématique de connectivité de longue distance dans les réseaux V2V. Les infrastructures, n'ayant pas des contraintes de mobilité, servent à leur tour de relais fixes afin d'étendre la distance de communication inter-véhicules. Les deux premiers modes se montrent complémentaires, leur combinaison est donc très intéressante. Elle est très utile dans beaucoup d'applications telles que l'état du trafic [2].

1.4 Caractéristiques et problématiques des réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires ont des caractéristiques spécifiques qui les distinguent des réseaux Ad Hoc, à savoir [1] :

– Capacité de traitement, d'énergie et de communication

Contrairement au contexte des réseaux Ad Hoc mobiles où la contrainte d'énergie représente une des problématiques traitées dans la littérature, les éléments du réseau VANET n'ont pas de limite en terme d'énergie et disposent d'une grande capacité de traitement et peuvent avoir plusieurs technologies. Grâce aux Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC), le conducteur peut prendre une décision à l'aide des traitements et des interprétations des informations collectées.

– Environnement de déplacement et modèle de mobilité

Les environnements pris en compte dans les réseaux Ad Hoc sont souvent limités à des espaces ouverts. Les déplacements des véhicules quant à eux sont liés aux structures des routes (intersections, panneaux de signalisation,... etc.) et aux environnements routières que ce soit dans les autoroutes, les environnements urbains ou ruraux. Les contraintes imposées par ce type d'environnement, à savoir les obstacles radio et les effets de la propagation à trajets multiples, affectent considérablement le modèle de mobilité et la qualité des transmissions radio à

prendre en compte dans les protocoles de routage.

– Topologie du réseau et connectivité

A la différence des réseaux Ad Hoc, les réseaux VANETs sont caractérisés par la forte mobilité des véhicules, liée à la vitesse qui est très importante dans les autoroutes. Par conséquent, un noeud peut rejoindre ou quitter le réseau en un temps très court, ce qui rend les changements de topologie très fréquent. De plus, des problèmes peuvent apparaître quand le système IVC (Inter Vehicle Communication) n'est pas équipé dans la majorité des véhicules.

1.5 Applications des réseaux de véhicules [2] [7]

Les applications conçues pour les réseaux véhiculaires peuvent être principalement classifiées sur trois catégories : (i) les applications de sécurité routière, (ii) les applications de gestion du trafic routier et (iii) les applications de confort du conducteur et des passagers. Dans la suite, nous allons détailler chacun de ces types en précisant leurs objectifs et leurs contraintes.

1.5.1 Applications de sécurité routière

La diminution du nombre de personnes blessées ou tuées sur les routes est une des principales motivations du développement et de l'étude des communications véhiculaires. Cette catégorie contient tous les services qui visent à améliorer la sécurité routière. Il s'agit d'améliorer le champ de vision du conducteur en lui proposant une aide à la conduite. Le conducteur pourra ainsi anticiper et agir pour rendre la conduite plus sûre. Le conducteur pourra être informé qu'un véhicule vient de passer un feu rouge ou qu'un piéton est en train de traverser la route. Une application, qui est déjà déployée dans les véhicules haut de gamme, est le service SOS. En cas d'accident, lors du déclenchement de l'airbag (c'est-à-dire dans les dix millisecondes qui suivent la collision), un message est émis afin de prévenir le centre de secours le plus proche. Ce service permet d'économiser de précieuses minutes dans le processus d'arrivée des secours. Dans cette catégorie, on retrouve les applications qui utilisent les informations des autres véhicules : l'alerte d'état de la route

(verglas, obstacle), l'aide au dépassement, l'alerte de freinage ou de collision en amont du trajet. On remarque donc que les applications de sécurité du trafic routier ont un rôle majeur dans la réduction du nombre d'accidents. On remarque aussi que cette catégorie d'applications a des contraintes temporelles fortes. En effet, si l'alerte de danger arrive trop tard, alors le conducteur ne pourra pas anticiper. Nous perdons ainsi les bénéfices de telles applications.

1.5.2 Applications de gestion du trafic routier

Les applications de cette catégorie utilisent les communications entre véhicules afin de partager des informations de trafic et ainsi d'améliorer le trafic routier en fournissant des informations sur l'état des routes telles que des travaux, des obstacles ou des embouteillages potentiels. Cela permet la réduction du temps de trajet et une répartition efficace du trafic routier. Ces applications sont moins exigeantes en termes de délai de délivrance que les applications de sécurité. Comme exemple d'application, nous pouvons citer l'application qui aide les conducteurs à choisir les meilleurs itinéraires. Par exemple, les incidents survenus ou les travaux de construction causent généralement des embouteillages et des encombrements de la circulation. Du contenu des messages échangés par les différentes entités du réseau, un véhicule peut être informé préalablement (avant que les véhicules empruntent la route où l'incident a eu lieu) de la circulation sur son trajet actuel ou futur. Le conducteur peut donc décider de suivre une autre route lorsque le trafic est dense sur son trajet et éviter ainsi de la congestion. Les services de gestion du trafic routier permettent de créer le passage pour les voitures d'urgence, ou de proposer des itinéraires aux véhicules qui se dirigent dans une zone de congestion.

1.5.3 Applications de confort du conducteur et des passagers

Cette catégorie comporte toutes les applications qui participent au confort du conducteur et des passagers et qui ne relèvent pas de la gestion du trafic ni de la sécurité routière. Ces applications se présentent donc en tant que services fournis au conducteur et aux passagers. Parmi ces applications, citons les panneaux d'annonces locales : d'ordre commercial comme les offres de restaurants, la présence de stations-service à proximité, ou culturel comme des informations touristiques relatives à la localisation du véhicule. Il y

a aussi des services télématiques comme le paiement automatique dans les stations-service (ce qui peut faciliter la vie des handicapés). Un autre type d'application de confort est la communication à vocation de divertissement. Une offre de connexion internet à bord avec vidéo à la demande. À toutes ces applications s'ajoutent aussi les communications entre les passagers qui voyagent ensemble. Ils peuvent ainsi s'échanger des messages ou partager des données (vidéo, musique, jeux en réseau). La vie des usagers pourra aussi être facilitée par le contrôle à distance de véhicule de manière électronique (vérification du permis de conduire, contrôle technique, plaque d'immatriculation) pour les services compétents (police, douane, gendarmerie).

1.6 Thèmes de recherche dans le domaine des réseaux de véhicules

Les propriétés des réseaux véhiculaires offrent des challenges importants, ce qui rend les VANETs s'ouvrent à plusieurs domaines de recherche dont nous citons les plus importants [8], [9] :

1.6.1 Sécurité

Vu la sensibilité des domaines d'utilisation des VANETs, une intrusion d'un véhicule malicieux aurait des conséquences graves sur l'ensemble des véhicules interconnectés, c'est justement pour cette raison que la majorité des recherches lui sont consacrés.

1.6.2 Localisation des véhicules

Si l'un des véhicules du réseau doit être localisé (dans le cas d'un accident par exemple), les autres doivent être informés de sa position. Le problème est que tous les véhicules ne sont pas équipés d'un système de repérage par satellite (GPS), c'est pour cette raison qu'un mécanisme de localisation sans utiliser le GPS est nécessaire.

1.6.3 Problèmes de congestion

L'un des problèmes des VANETs est que chaque véhicule communique avec tous ceux qui sont dans sa zone de couverture, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de service (QoS) avec l'augmentation du nombre de véhicules. Ce problème a été l'objet de plusieurs études.

1.6.4 Mobilité

La mobilité est un paramètre primordial dans les VANETs, pour cette raison de plus en plus d'équipes de recherche s'intéressent à l'étude de la mobilité dans les VANETs.

1.6.5 Routage

La principale particularité des VANETs est qu'ils changent rapidement de topologie à cause de leur mobilité élevée, ce qui fait du routage un problème très difficile à gérer et un axe de recherche pour beaucoup de chercheurs.

Un des axes de recherche de ce mode de communication est le routage geocast qui permet de distribuer des données à grande échelle en offrant un mécanisme de transport efficace pour les communications un-à-plusieurs et plusieurs-à-plusieurs. Au cours des dernières années, le routage geocast a été le sujet de beaucoup de travaux de recherche.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu les réseaux VANETs qui représentent l'un des axes de recherche prometteurs, les caractéristiques et les applications de ces systèmes ainsi que les thèmes de recherche qui se rapportent à ce domaine. Vu son importance, de plus en plus d'équipes de recherche s'intéressent à un aspect très important qui est le routage geocast. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter brièvement quelques solutions de routage geocast dans les réseaux véhiculaires.

Chapitre 2

Le routage geocast dans les réseaux VANETs

2.1 Introduction

Les VANETs représentent un cas très spécifique de MANETs, ils sont caractérisés par de nombreux aspects tels que : la grande mobilité des véhicules, les changements fréquents de topologie, la haute densité, la capacité limitée des liaisons radio, ... etc. Quelques protocoles qui ont été précédemment conçus pour garantir l'acheminement des messages dans les réseaux MANETs ont été testés sur VANETs. Cependant, ces protocoles deviennent inadaptés à cause de la forte mobilité des véhicules, Le défi reste cependant que la façon de réduire les délais associés à la transmission d'information d'un noeud à un autre [10]. Des nouveaux protocoles et des mécanismes spécifiques doivent donc être utilisés afin d'effectuer un routage efficace dans les réseaux de véhicules.

Dans ce chapitre, nous présentons le mécanisme d'acheminement de données dans les réseaux véhiculaires, puis, nous décrivons les différentes solutions pour le routage geocast dans les VANETs, ensuite nous examinons plusieurs solutions proposées, afin de montrer les points forts et les points faibles de chacun de ces protocoles. Nous clôturons ce chapitre par un tableau comparatif qui résume les principales caractéristiques des protocoles étudiés.

2.2 Le routage dans les réseaux VANETs

Le routage consiste à acheminer une information d'une source vers une destination (unicast routing) (cf. Fig 2.1.a), ou plusieurs destinations (broadcast routing) (cf. Fig 2.1.b), en assurant un délai d'acheminement réduit, une grande fiabilité et une meilleure utilisation des ressources [11] .

Cependant le broadcast cause un problème connu sous le nom ("the broadcast storm problem" [12]), il se produit de la rediffusion systématique des messages inutiles qui causent une consommation excessive de la bande passante vu que chaque noeud va recevoir plusieurs fois la même information via le canal sans fil. De plus, dans le cas des réseaux Ad Hoc denses, le fait que chaque noeud rediffuse systématiquement génère un nombre important de collisions qui ne seront pas corrigés par la couche MAC (l'absence d'ACK lors de la diffusion). Ce qui réduit donc l'efficacité et la fiabilité de la diffusion. Pour éviter ce phénomène, la solution la plus souvent retenue est la géo diffusion (geocast) (cf. Fig 2.1.c).

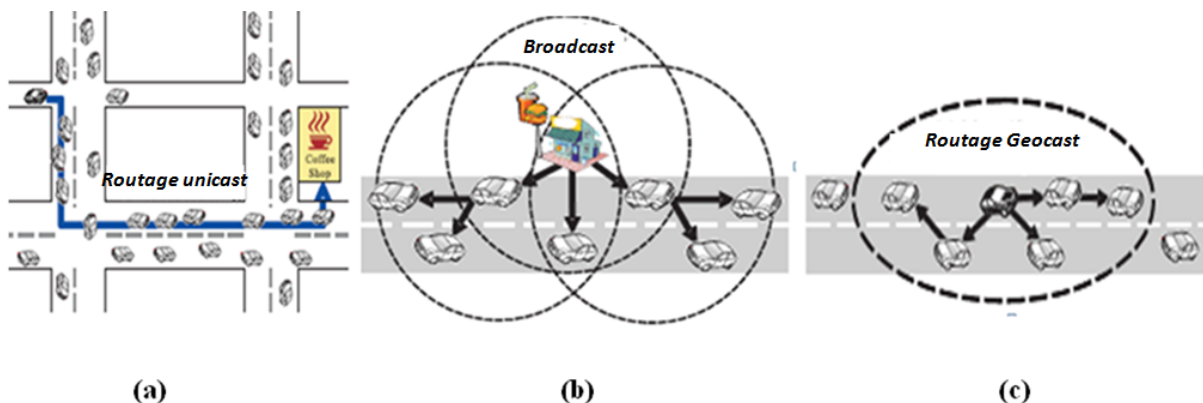


FIGURE 2.1 – Types d'acheminement des données dans les VANETs

Le routage geocast est une technique d'acheminement de paquets, se base sur des communications multi-saut pour transmettre des données à l'ensemble des noeuds situés dans une zone géographique donnée.

2.3 Le routage geocast dans les VANETs

Le routage geocast consiste à délivrer le paquet à partir d'un noeud source vers tous les autres noeuds dans une zone géographique déterminée dénommée ZOR (Zone Of Re-

levance) [13].

Dans ce type de routage, les terminologies suivantes sont utilisées : [6]

- (i) Groupe geocast : désigne les membres d'un groupe défini par leur localisation géographique.
- (ii) Zone geocast (Zone Of Relevance, ZOR) : désigne l'espace géographique où l'ensemble des membres d'un groupe geocast sont localisés, pour rejoindre/quitter le groupe, il suffit d'entrer/sortir de la zone.
- (iii) Zone de relayage (Forwarding Zone) : désigne la zone où les paquets de données sont relayés. Chaque groupe geocast dispose d'une zone de relayage, et seuls les noeuds se trouvant à l'intérieur peuvent relayer les paquets. Une zone geocast peut être incluse dans une zone de relayage.

Remarque : une zone geocast peut être incluse dans une zone de relayage (Fig 2.2.a) ou l'inverse (Fig 2.2.b) [14].

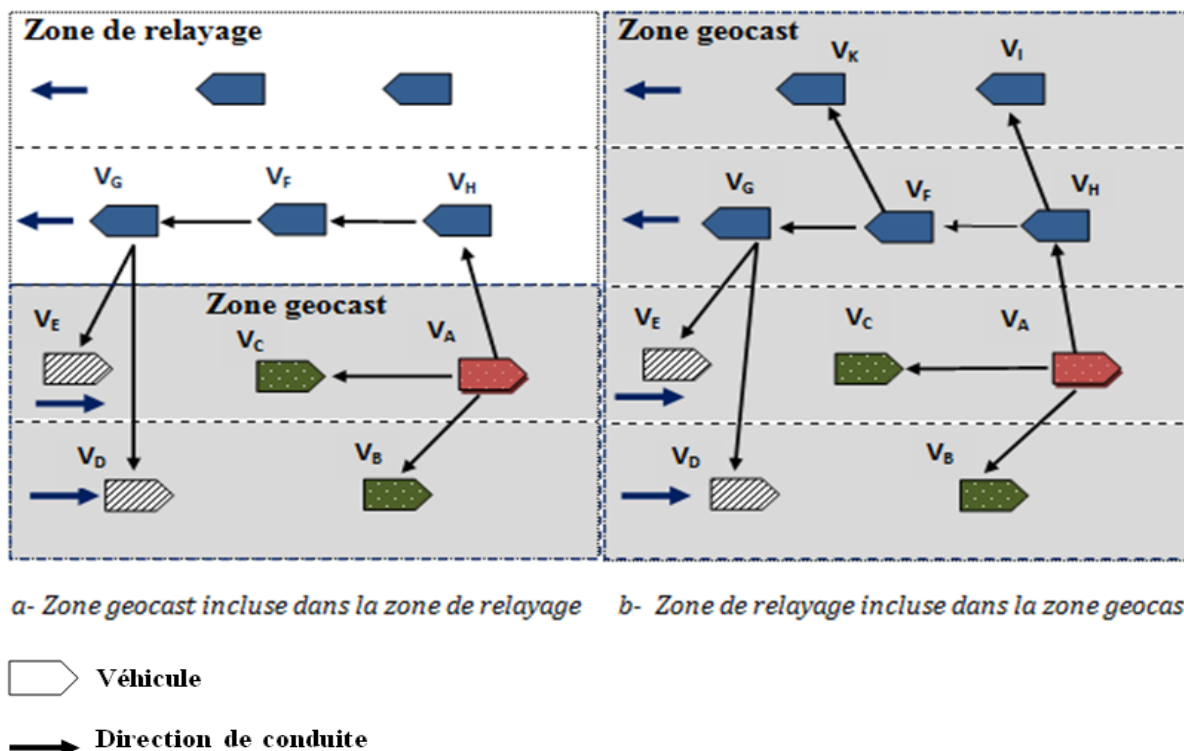


FIGURE 2.2 – Geocast dans les réseaux VANETs

2.3.1 Problème de routage geocast dans les réseaux VANETs

Le problème de routage dans les réseaux de véhicules est loin d'être évident. La difficulté réside essentiellement dans l'instabilité des chemins causée par la forte mobilité des noeuds et les fragmentations fréquentes du réseau [6]. Le degré de difficulté du problème augmente lorsqu'on veut acheminer des messages à un ensemble spécifique des véhicules (geocast group), le fait que le réseau soit à connectivité partielle ou intermittente, souligne le problème de **la fragmentation interne du réseau**, elle se pose quand un noeud dans la zone de transmission ne peut pas recevoir le message à partir du noeud source (isolement de véhicule) [3].

Bien que les mouvements des véhicules soient relativement prédictibles, l'impact de la mobilité sur la connectivité et la topologie du réseau reste l'une des difficultés majeures des réseaux véhiculaires [15]. Par exemple, un véhicule peut rejoindre ou quitter le groupe geocast en un temps très court, cela rend les fragmentations externes très fréquentes. **La fragmentation externe** se pose lorsque un véhicule se déplace hors de la zone de transmission après une accélération ou décélération [3]. Des nouveaux protocoles doivent donc être utilisés tenant compte ces problèmes, afin d'effectuer un routage efficace dans les réseaux de véhicules.

2.3.2 Description de quelques protocoles de routage geocast dans les VANETs

Plusieurs solutions geocast sont présentées pour les réseaux VANETs . Nous allons présenter brièvement quelques protocoles, que nous avons identifiés dans la littérature.

2.3.2.1 TRADE (TRAck DEtection) et DDT (Distance Defer Time) [16]

Deux protocoles ont été proposées pour les applications de sécurité routière, TRADE (TRAck DEtection) et DDT (Distance Defer Time), afin d'améliorer la performance et la fiabilité de la diffusion dans les communications inter-véhicules. L'objectif de TRADE est de garantir une meilleure fiabilité avec un nombre de rediffusions limité, pour cela, chaque noeud possède deux listes qui sont mises à jour périodiquement (N : la liste des noeuds voisins ; S : la liste des émetteurs). La source détermine les véhicules les plus éloignées

(avant, arrière) dans les deux sens, et diffuse le message vers eux. A la réception d'un message, le noeud vérifie si son identité est incluse dans ce message. Dans le cas positif, il est considéré comme source et utilise la même méthode pour la rediffusion. Cette solution requiert la connaissance et la maintenance de la liste des voisins et la liste des émetteurs par tous les véhicules.

Avantage :

- ✓ TRADE est facile à mettre en oeuvre.

Inconvénients :

- Le maintien des deux listes génère une surcharge importante dans le réseau qui peut retarder l'envoi de message d'alerte et provoque des collisions dans les réseaux denses.

Pour résoudre les problèmes rencontrés dans TRADE, un autre algorithme appelé DDT a été proposé, à la différence du TRADE, DDT utilise un temps d'attente (defer time) avant la rediffusion d'un message reçu, et si pendant ce temps il reçoit le même message provenant d'un autre véhicule il ne le rediffuse plus.

Le (defer time) est calculé selon la formule suivante :

$$\text{defer time } (x) = \text{Max Defer Time} * \frac{(R^2 - D_{sx}^2)}{R^2}$$

Max Defer Time : le temps maximal d'attente; R est la portée de transmission, et D_{sx} est la distance entre le noeud source (s) et le noeud (x).

Le (defer time) du noeud (x) qui reçoit un message d'un autre noeud (s) est inversement proportionnelle à la distance qui les sépare, ce qui favorise le noeud le plus éloigné à rediffuser le message plus rapidement.

Avantage :

- ✓ DDT montre des performances meilleures par rapport à TRADE en termes de nombre de messages rediffusés [17].

Inconvénient :

- DDT ne peut pas remédier le problème de la fragmentation interne du réseau qui pourrait exister dans les réseaux VANETs.

2.3.2.2 IVG (Inter-Vehicle Geocast) [17]

Pour faire face aux problèmes rencontrés précédemment, Abdelmalik, et al. proposent une nouvelle méthode de diffusion des messages d'alerte qui généralise les méthodes précédentes (TRADE et DDT) appelée IVG (Inter-Vehicle Geocast). IVG consiste à diffuser un message d'alerte de manière efficace à tous les véhicules qui sont situés dans la zone de risque. Tous ces véhicules représentent un groupe geocast qui est défini temporairement par : l'emplacement, la vitesse et la direction de conduite des véhicules à l'aide des messages Hello. Un véhicule faisant ou détectant un accident (ou il tombe en panne) commence à diffuser un message d'alerte pour informer les autres véhicules de la situation. Le véhicule qui reçoit ce message ne devrait pas le rediffuser immédiatement mais il doit attendre un certain temps (defer time de DDT) pour prendre une décision. Une fois le defer time expire, si le véhicule n'a pas reçu le même message à partir des noeuds d'arrière, il déduit qu'il est le relai le plus loin, Donc, il doit s'auto-désigner comme relai, et rediffuse le message.

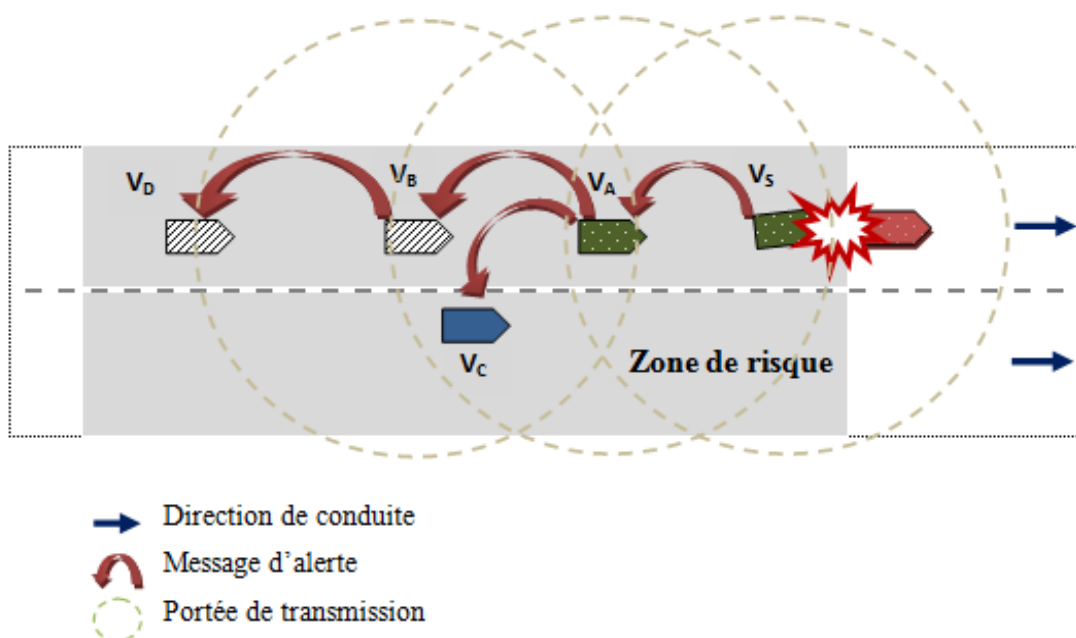


FIGURE 2.3 – Exemple de protocole IVG

La figure 2.3 montre un exemple d'un véhicule (V_S) qui fait un accident, il envoie une notification indiquant son état à tous les véhicules dans la zone de risque. Les véhicules V_A , V_B , V_C et V_D forment un groupe geocast, car ils sont situés dans la zone de risque. V_S envoie le message à V_A , V_A envoie le message à V_B et V_C , et étant donné que V_B est le plus éloigné, donc, il renvoie le message à V_D .

Avantage :

- ✓ IVG réduit le nombre de messages inutiles par rapport à TRADE et DDT par la maintenance dynamique de relais dans chaque direction de conduite [17].
- ✓ IVG permet de surmonter les problèmes de fragmentation interne du réseau par des relais dynamiques pour rediffuser périodiquement les messages d'alerte.

Inconvénients :

- La surcharge dans le réseau, à cause de la rediffusion périodique des messages d'alerte qui génère un nombre important de messages.

2.3.2.3 Mobicast [18]

Chen, et al. proposent un nouveau protocole de routage geocast pour les communications inter-véhicules appelé Mobicast. Contrairement aux protocoles de routage geocast ordinaires, Mobicast supporte les applications de confort dans les VANETs, tels que les jeux en ligne, les flux multimédia, ... etc. L'objectif principal de cette méthode est de transmettre un message aux véhicules situés dans une zone géographique spécifique ZOR_t (Zone Of Relevance) à un moment donné t . Ces véhicules doivent conserver la connectivité pour maintenir la communication en temps réel. La connectivité dans ZOR_t est perdue si un véhicule accélère ou décélère brusquement. Donc, la fragmentation fréquente interne du réseau est survenue. Pour résoudre ce problème, ils ont défini la zone de relayage ZOF_t (Zone Of Forwarding) par la création de la zone d'approche ZOA_t^{vi} (Zone Of Approaching ou Z_t^{vi}) pour assurer la transmission du message à tous les véhicules dans ZOR_t .

ZOA_t^{vi} est une zone elliptique, qui est déterminée par le véhicule source V_e à l'instant t , tout véhicule dans ZOA_t^{vi} est responsable de transmettre le message envoyé à partir d'un véhicule V_e . Si un véhicule n'a pas réussi à transmettre le message à tous les véhicules

dans ZOR_t , une nouvelle zone d'approche est créée, plusieurs ZOA_t^{vi} peuvent être créés pour transmettre le message geocast, la zone ZOF_t est déterminée par l'ensemble de ZOA_t^{vi} . La figure 2.4 illustre un exemple de ce protocole. A l'instant t , V_1, V_2, V_3 , et V_4 situés dans ZOR_t et reçoivent le message Mobicast d'un véhicule V_e .

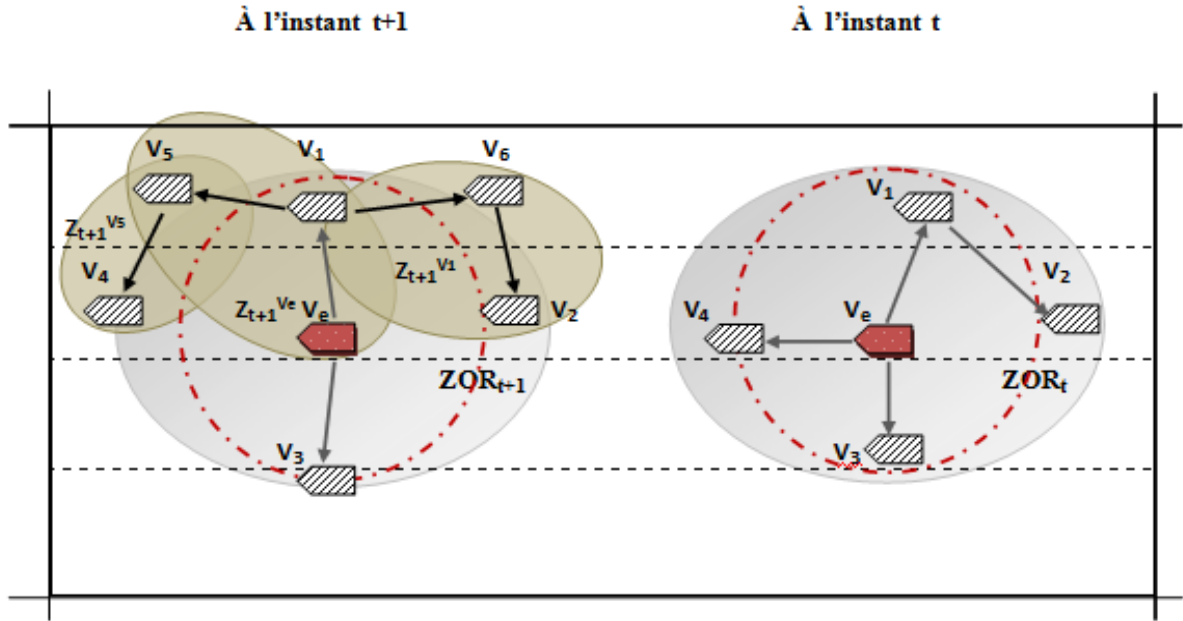


FIGURE 2.4 – Exemple de protocole Mobicast

A l'instant $t+1$, V_2 et V_4 ne peuvent pas recevoir directement le message "le problème de la fragmentation interne du réseau", pour cela, V_e, V_5 et V_1 calculent respectivement Z_{t+1}^{ve} , Z_{t+1}^{v5} , et Z_{t+1}^{v1} pour transmettre le message Mobicast aux V_2 et V_4 , ce qui conduit à :

$$ZOF_{t+1} = ZOR_{t+1} \cup Z_{t+1}^{ve} \cup Z_{t+1}^{v5} \cup Z_{t+1}^{v1}$$

Avantage :

- ✓ Mobicast est la première méthode qui est adaptée pour les applications de confort.

Inconvénients :

- Mobicast ne peut pas remédier au problème de la fragmentation externe du réseau qui pourrait exister dans les applications de confort.

2.3.2.4 Robust Geocast Routing Protocol (RGRP-SA et RGRP-CA) [3]

Pour pallier aux problèmes mentionnés précédemment, deux protocoles de routage geocast ont été proposés, RGRP-SA (Robust Geocast Routing Protocol for Safety Applications) et RGRP-CA (Robust Geocast Routing Protocol for Comfort Applications). Ils consistent à acheminer des messages aux véhicules situés dans une zone géographique $ZT(t)$ (Zone de Transmission) au temps t , en considérant les deux facteurs spécifiques aux réseaux de véhicules (la forte mobilité des véhicules, et les fragmentations fréquentes interne et externe du réseau).

1. **Le premier protocole RGRP-SA**, supporte les applications de sécurité routière dans une autoroute ou environnement urbain, il est capable de vérifier la présence des véhicules voisins avant la retransmission du paquet geocast, afin d'éviter d'utiliser l'échange périodique des paquets, ce qui va diminuer le nombre des paquets échangés. Pour résoudre le problème de la fragmentation interne du réseau, RGRP-SA utilise un relai dynamique qui est situé dans la direction opposée pour router le paquet aux autres véhicules dans $ZT(t)$. Dans le cas négatif, RGRP-SA utilise la stratégie dénommée store-carry-and-forward dans laquelle les relais transportent les paquets jusqu'à se qu'ils trouvent d'autres véhicules dans $ZT(t)$. La figure 2.5 illustre un exemple de diffusion du paquet geocast à tous les véhicules dans la zone de risque $ZT(t)$ à travers les relais les plus proches de l'axe gauche A_L et l'axe droit A_R . Les véhicules $V_A \sim V_I$ sont situés dans $ZT(t)$ doivent recevoir le paquet de V_s .

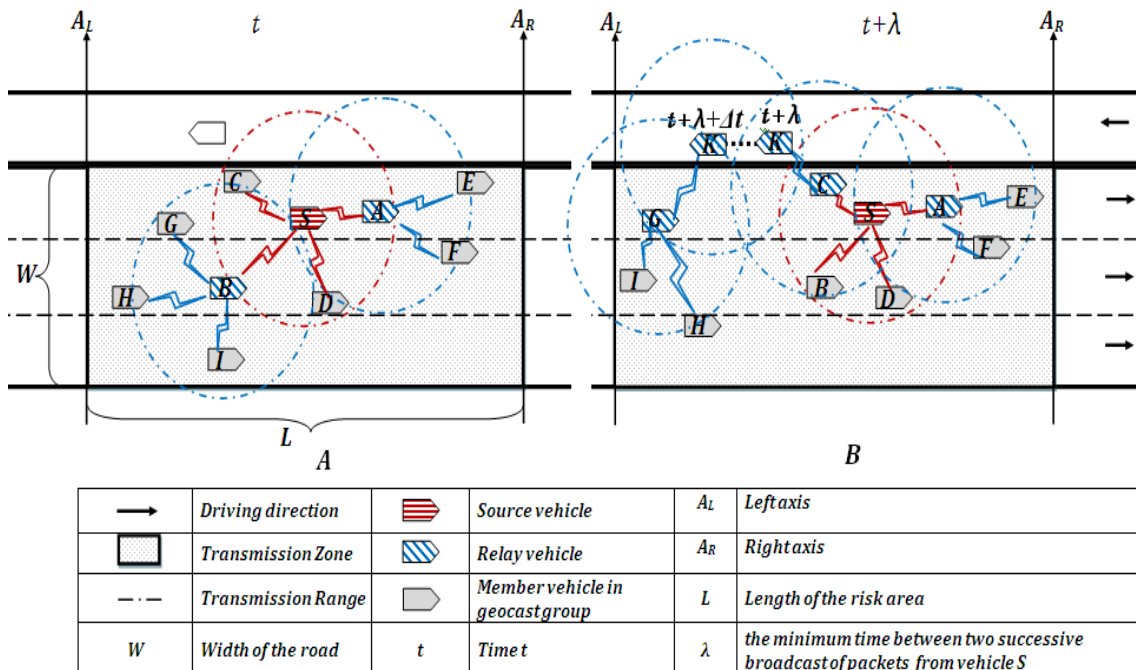


FIGURE 2.5 – (A) Dissémination de paquet dans $ZT(t)$, (B) Dissémination de paquet pour résoudre le problème de la fragmentation interne du réseau (cas d’isolement des véhicules : V_G , V_I et V_H).

A l’instant t (cf. fig 2.5. A), le véhicule V_s diffuse le paquet dans sa portée de transmission, V_A , V_B , V_C , et V_D , reçoivent ce message. Les véhicules V_A et V_B sont plus proches respectivement de A_R et A_L , donc ils retransmettent le paquet aux $V_E \sim V_I$.

La fragmentation interne du réseau se pose quand un noeud dans $ZT(t)$ ne peut pas recevoir le message à partir du V_s par exemple, le cas de V_G , V_H et V_I dans la figure 2.5. B. Pour résoudre ce problème, RGRP-SA utilise le relai V_K pour transporter le message au V_G , V_H et V_I .

Avantages

- ✓ RGRP-SA évite l’échange périodique de paquets afin de réduire la surcharge du réseau.
- ✓ RGRP-SA surmonte les problèmes de fragmentation interne du réseau.

2. Le deuxième protocole **RGRP-CA**, est une adaptation de RGRP-SA aux applications de confort. Il est basé sur le principe suivant : Tous les véhicules qui sont situés dans la zone de transmission forment un groupe geocast (cf. Fig 2.6. A), ces véhicules doivent conserver la connectivité pour assurer la communication le long de l'application. La connectivité d'un véhicule est perdue s'il sort de $ZT(t)$ après une accélération (cas de V_E dans la figure 2.6.(B)) ou décélération. Pour résoudre ce problème (fragmentation externe du réseau), la zone de transmission $ZT(t)$ est agrandie chaque fois qu'il est nécessaire.

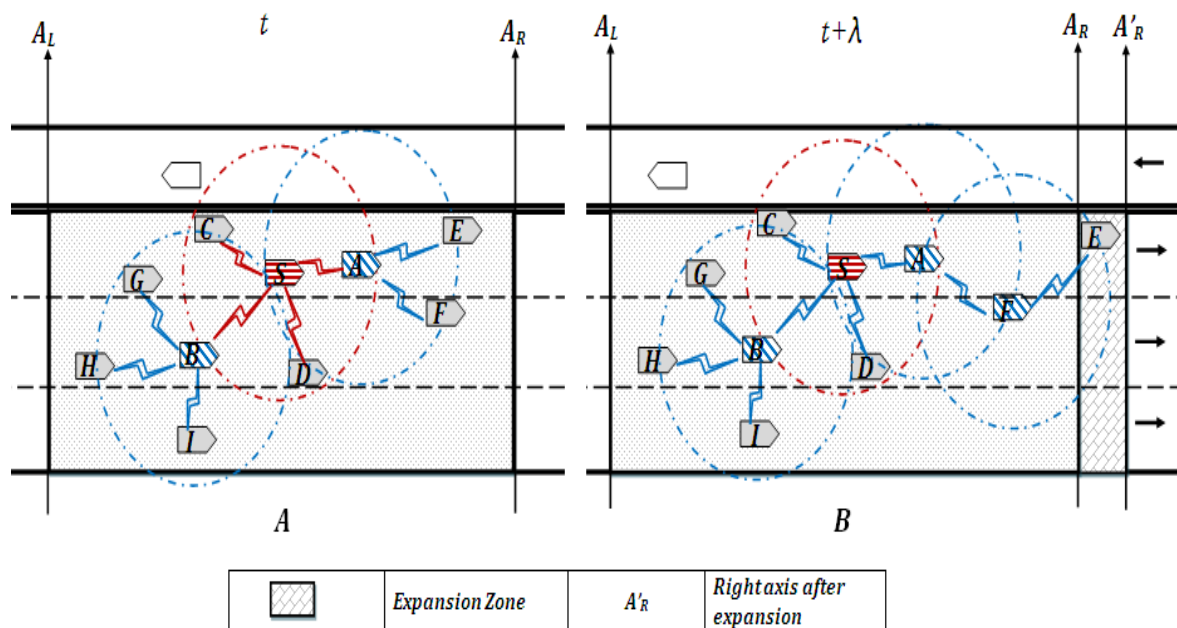


FIGURE 2.6 – (A) Dissémination de paquet dans $ZT(t)$, (B) Agrandissement de $ZT(t)$ pour résoudre le problème de la fragmentation externe du réseau.

Avantages :

- ✓ RGRP-CA surmonte à la fois la fragmentation interne (même principe de RGRP-SA) et la fragmentation externe du réseau.

Inconvénients de RGRP-CA :

- L'agrandissement illimité de la zone de transmission peut dégrader les performances de RGRP-CA [19].

2.4 Synthèse de l'étude théorique des protocoles de routage geocast dans les réseaux VANETs

Après avoir présenté quelques protocoles de routage geocast dans les réseaux VANETs ; leurs avantages et leurs inconvénients, nous pouvons résumer les principales caractéristiques des protocoles présentés (Tableau 2.1), en se basant sur les critères suivants : GPS, Exigence d'infrastructure, Scénario, Message périodique, Liste des voisins, liste des émetteurs, Méthode de transmission, Type d'application, Type de communication, Zone de transmission, Mobilité de véhicules, Fragmentation interne, Fragmentation externe.

Protocole Critère	DDT [16]	TRADE [16]	IVG [17]	Mobicast [18]	RGRP-SA [3]	RGRP-CA [3]
GPS	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Exigence d'infrastructure	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Scénario	Autoroute	Autoroute	Autoroute	Autoroute	Autoroute & urbain	Autoroute
Message périodique	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Listes des voisins	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Listes des émetteurs	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Méthode de transmission	Geocast	Geocast	Geocast	Geocast	Geocast	Geocast
Type d'application	Sécurité	Sécurité	Sécurité	confort	Sécurité	confort
Type de communication	V2V	V2V	V2V	V2V	V2V	V2V
Zone de transmission	Statique	Statique	Statique	Dynamique	Statique	Dynamique
Mobilité de véhicules	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Fragmentation interne	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Fragmentation externe	-	-	-	✗	-	✓

TABLE 2.1 – Principales caractéristiques des protocoles de routage geocast dans les réseaux VANETs.

2.5 Discussion

Dans cette partie, on va discuter des avantages et des inconvénients des différents protocoles geocast étudiés pour les VANETs.

TRADE et DDT ont été proposés afin d'améliorer la performance et la fiabilité de la diffusion dans les communications inter-véhicules. L'objectif de TRADE est de garantir une meilleure fiabilité de transmission des messages d'alerte, mais il génère une surcharge importante dans le réseau.

Pour résoudre les problèmes rencontrés dans TRADE, un autre algorithme appelé DDT a été proposé. DDT est un protocole retenu dans beaucoup de solutions, malheureusement, il ne traite pas les problèmes de la fragmentation interne du réseau qui pourrait exister dans les applications de sécurité.

Un autre protocole, appelé IVG, généralise les méthodes (TRADE et DDT). Cette méthode permet de surmonter le problème de la fragmentation interne du réseau. Des relais dynamiques sont introduits pour rediffuser périodiquement les messages d'alerte. Malheureusement, la rediffusion périodique des messages d'alerte génère un nombre important de messages, ce qui produit une surcharge dans le réseau.

Mobicast est la première méthode qui a été adaptée aux applications de confort, mais elle ne peut pas remédier à la fragmentation externe du réseau.

Bien que de nombreux protocoles de routage geocast ont été proposés, beaucoup de problèmes qui existent dans les réseaux VANETs n'étaient pas pris en compte (tel que la fragmentation interne, la fragmentation externe du réseau, . . . etc.). Pour cela, deux nouveaux protocoles de routage geocast ont été proposés, le premier appelé Robust Geocast Routing Protocol pour les applications de sécurité routière (RGRP-SA). RGRP-SA utilise un relai dans la direction opposée ou la stratégie de store-carry-and-forward pour relayer le message au $ZT(t)$ en cas d'isolement des véhicules. Le deuxième appelé Robust Geocast Routing Protocol pour les applications de confort (RGRP-CA). RGRP-CA utilise la même stratégie que RGRP-SA pour résoudre le problème de la fragmentation interne et adopte la notion d'agrandissement de la zone de transmission pour faire face au problème de la fragmentation externe du réseau. RGRP-CA offre beaucoup d'avantages, mais l'agrandissement illimité de la zone de transmission avec l'utilisation des communications multi-saut influent négativement sur les performances du protocole, pour cela, on doit

proposer une nouvelle approche pour faire face à ces problèmes.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques protocoles de routage geocast dans les réseaux VANETs. Nous avons mené une étude comparative afin de montrer les avantages et les inconvénients de chacune des solutions proposées. La conclusion qu'on peut tirer de l'étude des différents protocoles, est que la conception d'un nouveau protocole doit tenir compte tous les caractéristiques des réseaux VANETs et les limitations des protocoles proposés, tel que la fragmentation fréquente interne et externe du réseau.

Chapitre 3

Conception d'un nouveau protocole de routage geocast pour les VANETs

3.1 Introduction

Les véhicules doivent définir un protocole de routage pour pouvoir communiquer entre eux, ce qui consiste à disséminer une information d'une source vers une ou plusieurs destinations, en assurant une grande fiabilité, un délai d'acheminement réduit et une meilleure utilisation des ressources [21].

D'après l'analyse des services et des applications fournis au sein des VANETs, Nous pouvons constater que les applications de confort du conducteur et des passagers sont peu étudiées par rapport aux autres applications à cause des difficultés rencontrés et des problèmes posés tels que, la surcharge du réseau et la fragmentation externe du réseau. Le nombre très réduit des protocoles de routage geocast dans les applications de confort [3], nous a motivé à proposer une amélioration au protocole RGRP-CA [3].

Dans ce chapitre, nous détaillons cette amélioration qui s'appelle ERGRP-CA (Efficient RGRP-CA). Cette approche permet de résoudre le problème de l'agrandissement illimité (non borné) de la zone de transmission dans RGRP-CA par l'utilisation d'une nouvelle méthode d'ajustement de la zone de transmission.

3.2 Défis et objectifs de conception d'une nouvelle version du protocole RGRP-CA (version améliorée)

Lors de la conception d'une nouvelle solution de routage, il est important de prendre en considération de nombreux paramètres :

3.2.1 Les caractéristiques des applications ciblées

Comme on a vu précédemment, il existe trois types d'applications dans les réseaux véhiculaires, les applications de sécurité routière, les applications de gestion du trafic routier et les applications de confort. Les contraintes de chaque type sont différentes de l'autre, tel que dans le cas d'une application de sécurité le temps est critique alors que les applications gestion du trafic routier sont moins exigeantes en terme de temps que les applications de sécurité routière, mais dans une application de confort on n'a pas la même contrainte de temps, mais seulement il est important d'assurer l'acheminement des informations entre tous les véhicules dans la zone de transmission le long de l'application.

3.2.2 L'environnement de déplacement [22]

Les réseaux VANETS peuvent exister dans trois types d'environnement :

Environnement autoroutier : Le réseau autoroutier est par nature, adapté à la circulation de véhicules à grande vitesse de déplacement (avec des limites : vitesse min et vitesse max) dans des voies multiples.

Environnement urbain : Vitesse modérée avec une probabilité d'intersection plus grande. Il existe une densité de véhicules importante, des endroits d'arrêts aux feux, de nombreux bâtiments ou d'arbres et certaines routes plus fréquentées que d'autres (routes principales, endroit commercial ou touristique, ... etc.).

Environnement rural : caractérisé par des vitesses moins importantes avec une densité plus faible de voitures et les obstacles sont moins présents qu'en environnement urbain.

3.2.3 Les spécificités des réseaux de véhicules

Toute nouvelle solution doit faire face aux caractéristiques des réseaux VANETs, à savoir, la forte mobilité des véhicules qui est plus importante sur les autoroutes, les fragmentations fréquentes interne et externe du réseau , . . . etc.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux communications inter-véhicules dans un environnement autoroutier. Notre but est de proposer une amélioration du protocole RGRP-CA répondant aux besoins de confort inter-véhicules. La suite de ce chapitre décrit les détails de notre contribution.

3.3 Notre nouvelle approche ERGRP-CA (Efficient RGRP-CA)

3.3.1 Hypothèses

Dans cette approche, on suppose que tous les véhicules qui participent au routage soient équipés d'un microprocesseur, d'un système de localisation tel que le GPS, et d'une interface Wifi. Le système de localisation GPS est généralement équipé d'une cartographie qui permet aux véhicules de se localiser dans l'autoroute, et il permet aussi de connaître la position de ses voisins circulant sur la même voie [5].

3.3.2 Principe

L'approche ERGRP-CA est une version améliorée du protocole RGRP-CA [3], elle est conçu généralement pour pouvoir router des informations à tous les véhicules situant dans une zone géographique à un instant donné t ($ZT(t)$, zone de transmission), en prenant compte les deux principales spécificités des réseaux VANETs à savoir, La forte mobilité des véhicules et les fragmentations fréquentes du réseau (interne et externe).

Cette méthode est basée sur le principe suivant : Les véhicules qui sont situés dans la zone de transmission représentent un groupe geocast. La connectivité entre les véhicules doit être conservée dans la zone de transmission le long de l'application (l'application peut être un partage des informations entre un groupe de touristes qu'ils déplacent vers la même destination), donc, si un véhicule V_i a le risque de quitter la zone $ZT(t)$ à cause d'une

accélération ou une décélération, $ZT(t)$ est agrandie si la vitesse de V_i appartient à un intervalle de vitesse défini selon la vitesse moyenne de véhicule source. L'agrandissement de $ZT(t)$ est ajustée selon l'estimation de la longueur de $ZT(t)$ qui ne doit pas dépasser une longueur déterminée. Dans ce qui suit, nous décrivons les changements dans chaque phase du protocole.

3.3.3 Description détaillée du protocole

Ce protocole est composé de trois phases :

- 1 - La création de $ZT(t)$.
- 2 - La dissémination de paquet.
- 3 - L'agrandissement de $ZT(t)$ si nécessaire.

Dans ce qui suit, on va expliquer en détail les différentes phases :

1. La création de la zone $ZT(t)$

- Initialement, le véhicule source V_s est situé au centre de $ZT(t)$, par conséquent $ZT(t)$ se déplace à la même vitesse et dans la même direction que V_s .
- La forme de $ZT(t)$ pour un véhicule V_s est un rectangle, la longueur L de $ZT(t)$ doit être supérieure ou égale $2R$ ($L \geq 2R$), où R est la portée de transmission, la largeur W est définie comme étant la largeur de la route.
- Chaque véhicule V_i peut acquérir sa position $(x_i(t), y_i(t))$ à l'instant t à partir de son GPS.
- A_L (left axis) et A_R (right axis) sont les deux axes passant par les extrémités de $ZT(t)$. Ce protocole assure la dissémination d'un paquet vers un véhicule virtuelle dans $A_x, x = \{L \text{ ou } R\}$.

- La procédure de la création de $ZT(t)$ est réalisé en trois étapes :

étape 1 : le véhicule source V_s acquiert sa position $(x_s(t), y_s(t))$ à partir de son GPS.

étape 2 : $ZT(t)$ est déterminée selon la largeur W de la route et la valeur initiale de L .

étape 3 : V_s envoie le premier paquet geocast G_p .

Le format de G_p est représenté dans le tableau 3.1 :

V_s	$ZT_s(t)$	v_{min}	v_{max}	\mathbf{m}
V_s : l'identité de véhicule source.				
$ZT(t)$: les coordonnées de $ZT(t)$ du V_s à l'instant t .				
v_{min} : la valeur minimale de vitesse dans $ZT(t)$ $v_{min} = moyenne(v_S) - \Delta v$.				
v_{max} : la valeur maximale de vitesse dans $ZT(t)$ $v_{max} = moyenne(v_S) + \Delta v$.				
\mathbf{m} : le contenu du message geocast.				

TABLE 3.1 – Le format de paquet geocast G_p .

2. La dissémination de paquet dans $ZT(t)$:

Lorsqu'un véhicule V_j reçoit le paquet geocast G_p de V_i , il vérifie la pertinence du G_p . Un paquet G_p est « pertinent » si et seulement si :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_j \text{ dans } ZT(t) \\ V_j \text{ reçoit } G_p \text{ pour la première fois} \end{array} \right.$$

Si G_p n'est pas pertinent, V_j rejette G_p . Sinon V_j vérifie sa position par rapport à V_i , s'il est avant V_i , $A_x = A_R$ (l'acheminement de paquet est orienté vers A_R), sinon $A_x = A_L$, ensuite V_j attend un certain temps T_w (wait time) pour prendre une décision, tel que :

$$T_w = \frac{D(V_j, A_x)}{D(V_i, A_x)} * T_r$$

T_r : random time (valeur aléatoire uniformément choisie dans $[0,1]$). $D(V_j, A_x)$ est la distance qui sépare V_j et A_x .

Une fois T_w expire, si G_p reste pertinent, V_j déduit qu'il est le relai le plus proche de A_x (Ceci est de favoriser le véhicule le plus proche de A_x attendre moins de temps et de retransmettre plus rapide), Donc, il doit s'auto-désigner comme relai, et rediffuse le message après la vérification de l'existence de(s) voisin(s) plus proche de A_x .

Pour résoudre le problème de la fragmentation fréquente interne (en cas d'isolement de véhicule(s)), un relai situé dans la direction opposée est utilisé pour acheminer

le paquet aux autres véhicules dans $ZT(t)$. Dans le cas négatif, la stratégie store-carry-and-forward est utilisée dans laquelle un relai transporte le paquet jusqu'à ce qu'il trouve d'autre(s) véhicule(s) plus proche de A_x .

Le paquet est rediffusé continuellement jusqu'à ce qu'il atteigne les deux axes A_R et A_L . la procédure de dissémination est décrite dans l'algorithme 1.

Algorithme 1 : Packet Dissemination in ZT(t)

```

1 while vehicle  $V_j$  receives packet  $P_g$  from  $V_i$  do
2   if ( $P_g$  is not relevant) then
3      $P_g$  is deleted
4   else
5     if  $D(V_j, A_R) < D(V_i, A_R)$  then
6        $A_x = A_R$ 
7     else
8        $A_x = A_L$ 
9      $V_j$  calculates a random wait time  $T_w$  such that
           
$$T_w = \frac{D(V_j, A_x)}{D(V_i, A_x)} * T_r$$

           //  $T_r$ : random time uniformly chosen in  $[0, 1]$ ;
10    When the timer expires;
11    if ( $P_g$  is not relevant) then
12       $P_g$  is deleted
13    else
14      if ( $\exists V_k$ , such that  $(D(V_k, A_x) < D(V_j, A_x))$  and  $(V_k$  in  $Z(t))$ ) then
15         $V_j$  broadcasts packet  $P_g$  ( $V_j$ ,  $ZT(t)$ ,  $v_{min}$ ,  $v_{max}$ ,  $m$ ) // avoid
           periodic exchange of packets;
16      else
17        if ( $\exists V_k$ , such that  $(D(V_k, A_x) < D(V_j, A_x))$  and  $(V_k$  outside  $Z(t))$ )
           then
18           $V_j$  selects the closest neighbor  $V_l$  to  $A_x$ 
19           $V_l$  sends packet  $P_g$  ( $V_j$ ,  $ZT(t)$ ,  $v_{min}$ ,  $v_{max}$ ,  $m$ ) by unicast to the
           closest neighbor in  $ZT(t)$  // solve internal network
           fragmentation;
20        else
21           $V_j$  repeats the same steps after waiting for a random time
    
```

3. L'agrandissement de $ZT(t)$:

Afin de résoudre le problème de la fragmentation externe du réseau, $ZT(t)$ est agrandie selon l'estimation de la nouvelle position de A_x après un temps λ , où : $x \in \{L, R\}$ et λ est le temps minimal qui sépare les diffusions des deux paquets G_p successives de V_s . Pour assurer la dissémination du paquet G_p vers A_x , l'agrandissement de $ZT(t)$ suit les étapes suivantes :

étape 1 : Le véhicule V_j calcule les distances entre ses voisins et A_x ;

étape 2 : Le véhicule V_j vérifie s'il y a un voisin V_k a le risque de sortir de $ZT(t)$. Soit v_s la vitesse du véhicule V_s , v_k et a_k soient la vitesse et l'accélération d'un véhicule V_k devant V_s (V_k est plus proche de A_R) et v_l et a_l soient la vitesse et la décélération pour un véhicule V_l derrière V_s (V_l est plus proche de A_L).

Un véhicule a le risque de quitter $ZT(t)$ après une accélération ou une décélération après un temps λ , peut être détectée par l'une des conditions suivantes :

- Si V_k situe avant V_s et $D(V_k, A_R) \leq (v_k - v_s)\lambda + 1/2a_k\lambda^2$ et $v_k > v_{max}$,
- Si V_l est derrière V_s et $D(V_l, A_L) \leq (v_s - v_l)\lambda + 1/2a_l\lambda^2$ et $v_l < v_{min}$.

Si l'un des deux conditions est vérifié, V_j envoi un paquet P_{AxNew} à V_s pour alerter le changement.

étape 3 : V_s change la position de A_x par A_{xNew} si la condition suivante est vérifiée :

$$Nb_{st}(V_s, A_{xNew}) \leq N$$

$Nb_{st}(V_s, A_{xNew})$: Nombre de sauts entre V_s et A_{xNew} .

Afin de garantir la bonne fiabilité d'acheminement des données avec les communications multi-saut dans $ZT(t)$. le nombre de sauts ne doit pas dépasser N sauts. Dans [19], $N = 7$ sauts, pour cela, nous choisissons $N \in [2 - 6]$. la procédure d'agrandissement de $ZT(t)$ est décrite dans l'algorithme 2.

Algorithme 2 : Expansion of $ZT(t)$

```

1 if  $A_x = A_R$  then
2   //  $V_j$  is closer to  $A_R$  than  $V_s$  (in front of  $V_s$ ) ;
3    $V_j$  calculates the distances between its neighbors and  $A_R$  if (one neighbor  $V_k$ 
   satisfying  $D(V_k, A_R) \leq (v_k - v_s)\lambda + \frac{1}{2}a_k\lambda^2$  and  $(v_k > v_{max})$  then
4     // if a vehicle leaves  $ZT(t)$  after an acceleration;
5      $V_j$  selects the fastest neighbor vehicle  $V_k$ 
6
7     
$$A_{RNew}(t + \lambda) = A_R(t + \lambda) + ((v_k - v_s)\lambda + \frac{1}{2}a_k\lambda^2)$$

8
9     //  $v_k$ : velocity of  $V_k$ ,  $a_k$ : acceleration of  $V_k$ ;
10
11 else
12   //  $V_j$  is closer to  $A_L$  than  $V_s$  (behind  $V_s$ ) ;
13    $V_j$  calculates the distances between its neighbors and  $A_L$  if (one neighbor  $V_l$ 
   satisfying  $D(V_l, A_L) \leq (v_s - v_l)\lambda + \frac{1}{2}a_l\lambda^2$  and  $(v_k < v_{min})$  then
14     // if a vehicle leaves  $ZT(t)$  after a deceleration;
15      $V_j$  selects the slowest neighbor vehicle  $V_l$ 
16
17     
$$A_{LNew}(t + \lambda) = A_L(t + \lambda) - ((v_s - v_l)\lambda + \frac{1}{2}a_l\lambda^2)$$

18
19     //  $v_l$ : velocity of  $V_l$ ,  $a_l$ : deceleration of  $V_l$ ;
20
21  $V_j$  sends a packet  $P_{A_xNew}$  by unicast to  $V_s$  to alert the change // solve external
   network fragmentation;
22 if ( $Nb_{st}(V_s, A_{xNew}) \leq N$ ) then
23
24     
$$A_x = A_{xNew}$$

25
26   // solve unlimited Expansion of  $ZT(t)$ ;

```

3.3.4 Exemple de déroulement du protocole

Un exemple explicatif est montré dans la figure 3.1, un véhicule source V_s veut envoyer un message dans la zone $ZT(t)$:

A l'instant t , (cf. fig 3.1.a). Tous les véhicules $V_A \sim V_I$ sont situés dans $ZT(t)$ doivent recevoir le paquet du véhicule source V_s , initialement V_s transmet le paquet dans sa portée de transmission, V_A, V_B, V_C , et V_D , reçoivent ce message, V_A, V_B sont les plus proches respectivement de A_R et A_L , donc ils retransmettent le paquet aux $V_E \sim V_I$.

Le véhicule V_F estime que V_E à l'instant $t + \lambda$ a le risque de quitter la zone de transmission (après une accélération), donc il déclenche la procédure de l'agrandissement de $ZT(t + \lambda)$, car $v_E \in [v_{min} - v_{max}]$ et $Nb_{st}(V_s, A_{RNew} = A'_R) = 3$.

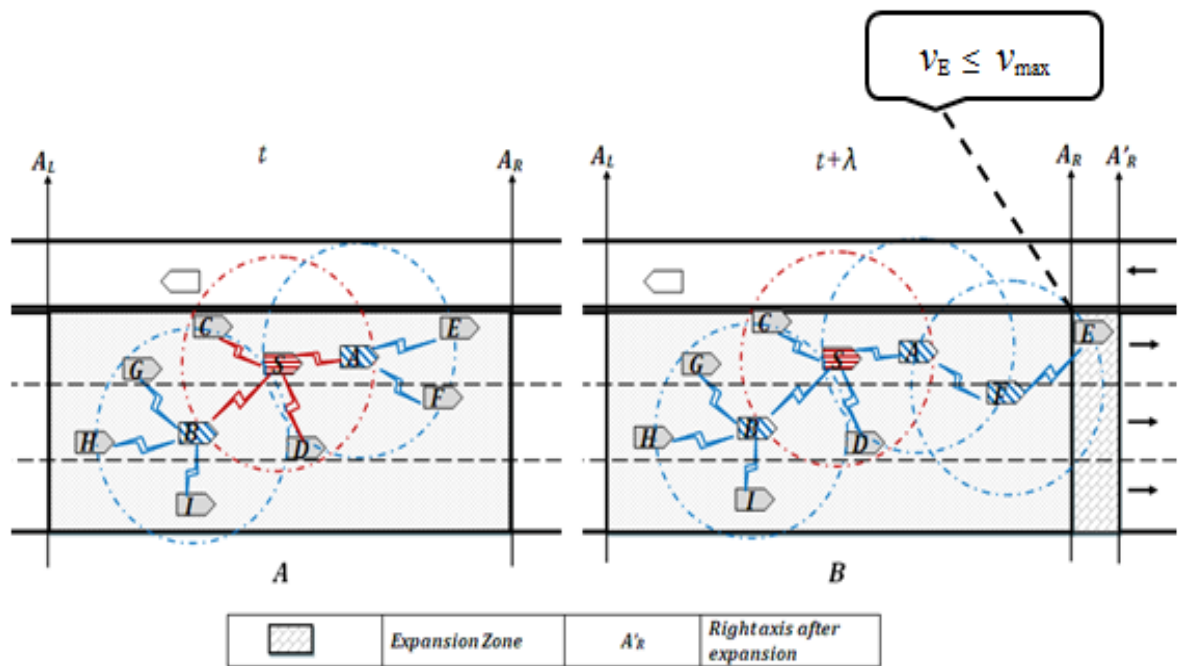


FIGURE 3.1 – Exemple de protocole E-RGRP-CA .

3.4 Synthèse

D'après l'étude qu'on a effectuée sur les protocoles de routage geocast existants, on constate que les phénomènes très courants et répandus dans les VANETs sont la forte mobilité et les fragmentations interne et externe du réseau. Pour cela, toute solution proposée devra offrir un mécanisme qui permet de gérer la mobilité et le partitionnement fréquent du réseau. Cependant, les différentes solutions proposées dans les VANET ont résolu partiellement ces problèmes. C'est pour cela nous avons proposé une nouvelle approche de routage geocast appelée ERGRP-CA qui permet de résoudre l'agrandissement illimité de la zone de transmission en cas de fragmentation externe du réseau dans le protocole RGRP-CA [3].

Dans la conception de ce protocole, on a essayé d'éviter les inconvénients et les points faibles des protocoles existants.

Notre approche permet de :

- ✓ Réduire le nombre de messages échangés périodiquement.
- ✓ Agrandir la zone de transmission pour faire face au problème de forte mobilité des véhicules.
- ✓ Ajuster la zone de transmission pour résoudre le problème de l'agrandissement illimité de la zone de transmission.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un nouveau protocole de routage geocast pour les VANETs appelé ERGRP-CA, ce dernier prend en considération les principales caractéristiques des VANETs, à savoir la forte mobilité, la fragmentation interne et la fragmentation externe du réseau. Les mécanismes qu'on a proposé permettent de pallier aux inconvénients déjà mentionnés. Les simulations présentées dans le prochain chapitre vont mettre en évidence ces caractéristiques.

Chapitre 4

Résultats et interprétations des simulations

4.1 Introduction

La simulation connaît de nos jours un essor considérable. Ceci est dû aussi bien à l'intérêt théorique que présente la modélisation des systèmes simulés, que par les besoins croissants de simuler par ordinateur des réalisations de plus en plus complexes, très coûteuses et leurs résultats prennent beaucoup de temps. Donc, la simulation joue un rôle important en mettant à la disposition de l'utilisateur un environnement d'expérimentation où on peut faire varier plusieurs paramètres, mais pour qu'elle soit utile, elle doit être réaliste le plus possible.

Pour évaluer les performances de notre nouvelle technique nous avons effectué des simulations avec le simulateur **NS-2 (Network Simulator)** et le modèle de mobilité **Freeway**.

Ce chapitre commence par une présentation générale des deux outils utilisés dans la simulation, et puis, la présentation des paramètres et des métriques utilisés pour l'évaluation de la solution proposée, ensuite, l'analyse des résultats obtenus à l'issue de cette simulation, et finalement, une conclusion.

4.2 Présentation du simulateur réseaux NS2 :

Le simulateur NS-2 est un outil logiciel de simulation de réseaux informatiques, il est parmi les simulateurs les plus utilisés dans les laboratoires de recherche, afin de simuler et étudier les performances des protocoles réseau. Il offre une plateforme de développement de nouveaux protocoles et permet de les tester. NS-2 est Open Source et gratuit, développé à Berkeley dans le cadre du projet VINT, ce dernier est un projet en cours de développement avec la collaboration de plusieurs acteurs (USC/ISI, Xerox parc, LBNL et UCB) dans l'objectif principal de construire un simulateur multiprotocole pour faciliter l'étude de l'interaction entre les protocoles et le comportement d'un réseau à différentes échelles. Le projet contient des bibliothèques pour la génération de topologies réseau, des trafics ainsi que des outils de visualisation tels que l'animateur réseau NAM (network animator) [23].

4.2.1 L'architecture de simulation avec NS-2 :

NS-2 est un logiciel de simulation de réseaux orienté objet par événements discrets, il est très largement utilisé dans la recherche académique et dans l'industrie. NS-2 se base sur deux langages de programmation, C++ qui est un langage compilé très efficace pour l'implémentation des protocoles, et OTCL (Object Tools Command Language) qui représente l'extension orienté objet du langage interprété TCL (Tool Command Language). Ce dernier a deux fonctions fondamentales : il se comporte comme un langage de programmation autonome interprété et comme une interface permettant de contrôler la simulation des protocoles via les commandes du script [24].

La simulation est contrôlée par un script OTCL écrit par l'utilisateur. Pour cela, il faut qu'il y ait un lien entre l'interpréteur OTCL et la bibliothèque du simulateur NS-2 qui contient les protocoles avec leurs variables, (cf. Fig 4.1). NS-2 ne permet pas de visualiser le résultat des expérimentations. Il permet uniquement de stocker une trace de la simulation, de sorte qu'elle puisse être exploitée par un autre logiciel, comme le NAM. Ce dernier est un outil de visualisation qui présente deux intérêts principaux : représenter la topologie d'un réseau décrit avec NS-2, et afficher temporellement les résultats d'une trace d'exécution NS-2 [25].

Pour réaliser les simulations, un modèle de mobilité des nœuds et un modèle de trafic de données générés dans le réseau, sont nécessaires.

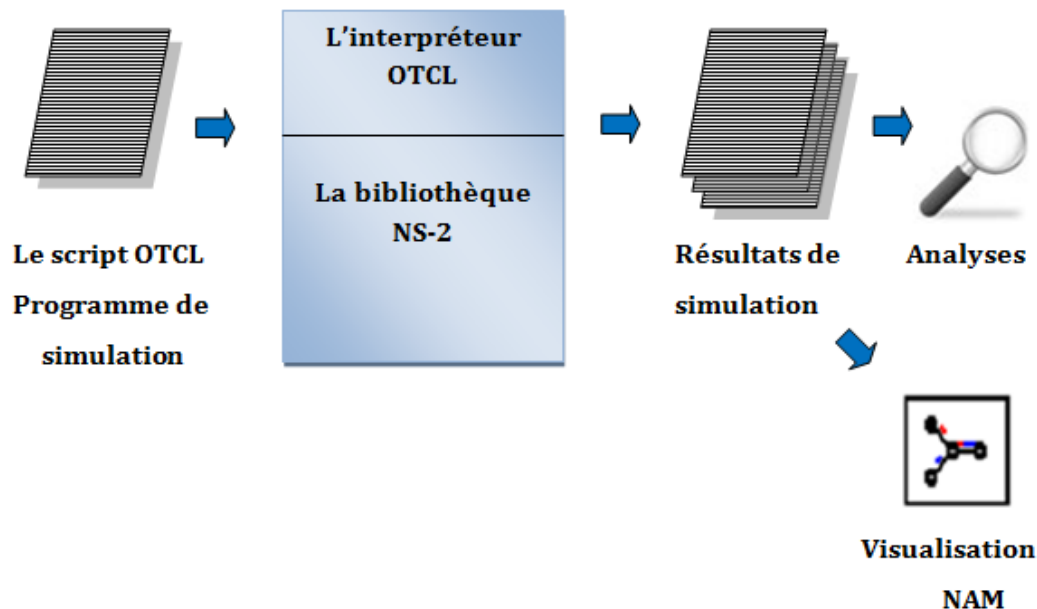


FIGURE 4.1 – L’architecture de simulation avec NS-2

4.3 Modèle de mobilité

Le modèle de mobilité est un facteur très important pour déterminer la performance d’un protocole dans les réseaux mobiles. Il définit les mouvements des noeuds lors d’une simulation d’un réseau Ad Hoc. Ces modèles peuvent définir des mouvements libres ou restreints par des contraintes de mobilité (vitesse limitée, présence d’obstacles, contraintes de réalisme, ... etc.) [23].

Les modèles spécifiques aux VANETs sont plus gourmands en temps et en mémoire que les modèles généraux mais sont plus adaptés aux déplacements véhiculaires car les déplacements des véhicules sont structurés par les routes et les rues. Le mode de mobilité des réseaux VANETs est affecté par la vitesse des véhicules et leurs déplacements aléatoires, qui peuvent réduire considérablement les durées de communications et leurs comportements face à des obstacles.

4.3.1 Modèle de mobilité Freeway

Le modèle de mobilité Freeway [?] est l'un des modèles qui peut être généré par IMPORTANT, il est utilisé pour émuler le comportement de mouvement des noeuds véhicules sur une autoroute. Il peut être aussi utilisé dans l'échange de trafic ou dans le suivi d'un véhicule sur une autoroute.

Dans ce modèle, nous utilisons des cartes qui comportent généralement plusieurs autoroutes et chaque autoroute se compose d'une ou plusieurs voies permettant de circuler dans les deux directions [?] (figure 4.2).

Au début de la simulation, les noeuds sont placés aléatoirement sur les voies et circulent avec des vitesses qui dépendent d'un historique :

$$V(t + 1) = V(t) + random * a(t).$$

$V(t)$: la vitesse du noeud à l'instant t .

random : Valeur aléatoire uniformément choisie dans l'intervalle $[-1,1]$.

$a(t)$: Accélération d'un noeud à l'instant t .

Une distance de sécurité est également définie pour ce modèle entre deux véhicules qui se suivent sur la même voie. Ainsi, si un noeud A suit un autre noeud B, il doit se déplacer à une vitesse inférieure ou égale à celle de B. Cette règle peut être modélisée par la formule suivante :

$$\forall i, \forall j, \forall t : D_{i,j}(t) < SD \Rightarrow V_i(t) \leq V_j(t)$$

$D_{i,j}(t)$: Distance entre les noeuds i et j à l'instant t .

SD : Distance de sécurité entre les noeuds.

$V_i(t)$: Vitesse d'un noeud i à l'instant t .

Remarque :

Ce modèle impose des restrictions géographiques strictes sur le mouvement des noeuds en ne permettant pas à un noeud de changer sa voie. Donc si un noeud sort de la zone de simulation, une nouvelle voie lui est choisie aléatoirement parmi les voies disponibles [22].

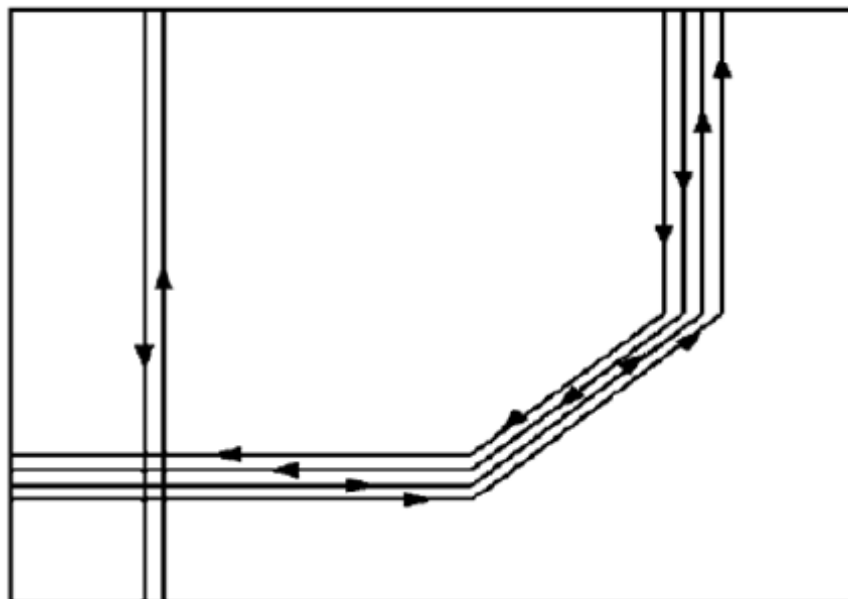


FIGURE 4.2 – Déplacements dans le modèle Freeway [22]

4.4 Evaluation des performances de notre approche

Dans cette section, nous allons étudier les performances de notre protocole de routage en réalisant des simulations. Pour ce faire, nous avons utilisé l'outil NS-2 et le modèle de mobilité Freeway. Les performances de notre approche sont comparées avec les performances des deux protocoles similaires MCF [18] et RGRP-CA [3] comme références des protocoles de routage geocast adaptés aux applications de confort.

4.4.1 Scénarios et paramètres de simulations

Nous avons considéré une autoroute de 8000m de longueur ayant quatre voies unidirectionnelles, avec une zone de transmission de 2000m de longueur. Chaque véhicule participant au scénario a une portée de 300m, et se déplace avec une vitesse qui varie de 80 à 140 km/h. La durée de simulation est 300s, au cours de ces simulations, on a fait varier le nombre total de véhicules (véhicules de l'autoroute) : (50, 100, 150, 200, 250, 300,...,500) pour augmenter graduellement la densité et la charge du réseau respectivement.

Les résultats obtenus sont les moyenne de 10 simulations en changeant a chaque fois la position du véhicule source.

- Le tableau 4.1 résume la configuration de notre simulation et les paramètres utilisés :

Paramètre	Valeur
Simulateur	NS-2
Modèle de mobilité	Freeway
Longueur de l'autoroute	8000m
Nombre de voies	4
Longueur de ZT	2000m
Nombre de noeuds	50, 100, 150,..., 500
Portée de transmission	300 m
Vitesse de déplacement[Vitesse Min-Vitesse Max]	[80-140] km/h
Vitesse de déplacement dans ZT [Vitesse Min-Vitesse Max]	$[(v_s-15) - (v_s + 15)]$ km/h
Temps de simulation	300 secondes

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

4.4.2 Métriques de performances

Une métrique est un moyen permettant de mesurer la performance d'un objet spécifique. Dans notre simulation, les métriques permettent d'analyser les performances de notre approche par rapport aux autres protocoles de routage utilisés, et permettent aussi de déterminer l'efficacité du protocole proposé. Dans cet objectif, nous sommes intéressés par les indicateurs de performance suivants :

– **Nombre de paquets envoyés (Number of Sent Packets, NSP) :**

Cette métrique définit le nombre de messages nécessaires pour acheminer un paquet à tous les membres d'un groupe geocast.

– **Taux de délivrance des paquets (Packets Delivery Ratio, PDR) :**

Cette métrique mesure l'efficacité du protocole de routage pendant l'envoi des paquets de données d'une source vers un groupe geocast. Cette mesure est compris dans l'intervalle $[0, 1]$. Plus le PDR converge vers 1, plus le protocole est efficace. La réciproque $(1 - \text{PDR})$ représente le taux de perte de paquets de données pendant la transmission. Cette mesure est calculée en divisant Le nombre de paquets bien reçus par le nombre de paquets transmis.

– **Délai moyen de bout en bout (End-to-End Delay, EED) :**

Le délai de bout en bout est le temps moyen (en secondes) nécessaire à un paquet pour atteindre sa destination.

– **throughput (TH) :**

Le Throughput représente "le nombre total de paquets de données transmis dans $ZT(t)$ avec succès" divisé par "le temps de simulation". C'est un paramètre très important, surtout pour les applications temps réel.

– **Protocol Overhead (PO) :**

Cette métrique représente "le nombre total de paquets transmis (pas la taille parce que nous utilisons le même format des messages pour l'agrandissement de $ZT(t)$) avec l'agrandissement de $ZT(t)$ " divisé par "le nombre total de paquets transmis sans agrandissement de $ZT(t)$ ".

4.4.3 Résultats de simulation et analyse des performances

4.4.3.1 Nombre de paquets envoyés (NSP)

Le nombre de paquets envoyés pendant la durée de simulation est un paramètre important qui permet d'avoir une idée sur le taux de consommation de la bande passante. Les courbes de la figure 4.3 montrent que le nombre de paquets envoyés (NSP) augmente à l'augmentation du nombre total de véhicules pour les trois protocoles. La comparaison des performances de MCF et RGRP-CA montrent que RGRP-CA peut réduire jusqu'à 24% de nombre de paquets échangés. Ceci s'explique par la méthode de la retransmission des

paquets en cas d'isolement de véhicules. Pour RGRP-CA, la retransmission de paquets se fait par une prévision de l'existence d'un seul relai $\notin ZT(t)$ plus proche de $A_x, x \in \{R, L\}$. Tandis que dans MCF les paquets sont retransmis en utilisant plusieurs relais $\notin ZOR_t$. Par conséquent, certains paquets sont rediffusés plusieurs fois, ce qui augmente la surcharge du réseau. Les courbes montrent aussi que notre approche ERGRP-CA permet de réduire le nombre de paquets échangés (jusqu'à 15%) par rapport à RGRP-CA. Ceci s'explique par la limitation de la zone de transmission lors de l'agrandissement dans ERGRP-CA, tel que la forte mobilité des véhicules engendre des fragmentations externe, ce qui nécessite l'agrandissement de la zone de transmission pour assurer une bonne connectivité au sein du réseau. Pour ERGRP-CA, l'agrandissement est limité (la zone de transmission est ajustée) contrairement aux deux autres protocoles, donc, le nombre de paquets échangés sera réduit.

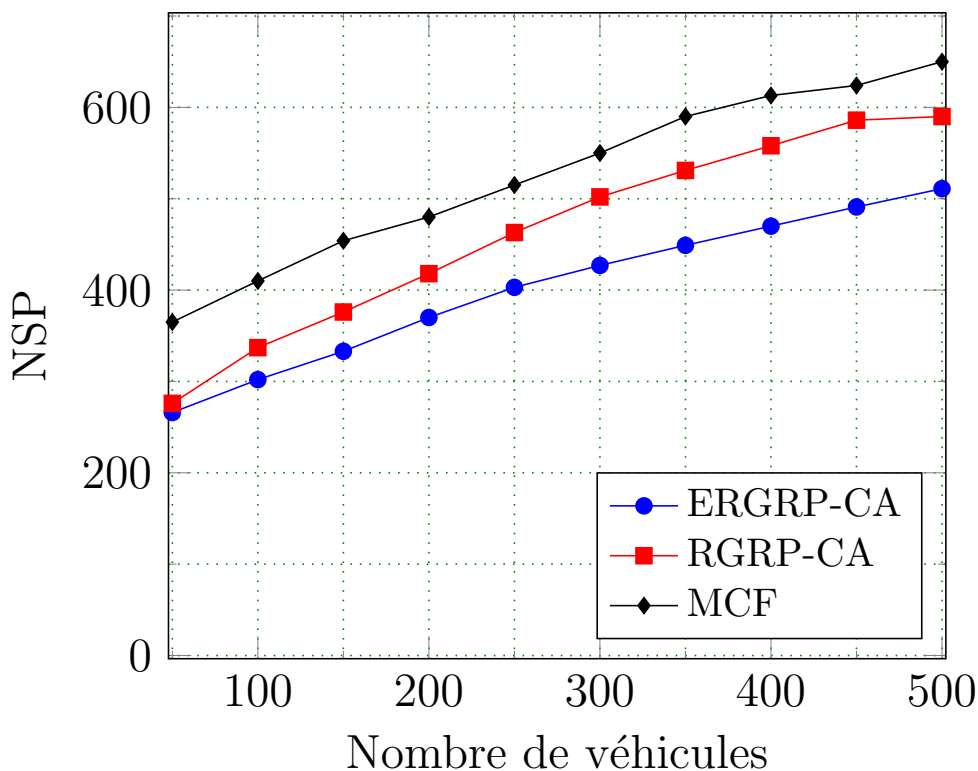


FIGURE 4.3 – Nombre de paquets envoyés en fonction de densité du réseau

4.4.3.2 Taux de délivrance des paquets (PDR)

Dans cette section, nous avons choisi de comparer la performance d'ERGRP-CA avec MCF et RGRP-CA en terme de PDR. La figure 4.4 montre que le taux de délivrance des paquets d'ERGRP-CA est supérieur aux deux autres protocoles pour toutes les densités du réseau. Notre proposition offre de meilleurs résultats ($PDR \in [83\% - 96\%]$), l'efficacité de délivrance de paquets est plus observée avec ERGRP-CA ($> 7\%$) par rapport aux RGRP-CA et MCF. Ce qui s'explique par l'utilisation de mécanisme de limitation de nombre de sauts (Algorithme 2 : ligne 12) en cas de déconnexions de l'un des noeuds de groupe geocast, Donc on peut dire qu'ERGRP-CA permet de surmonter le problème de la fragmentation externe du réseau et assure que les paquets envoyés par la source atteignent la majorité des noeuds du groupe geocast.

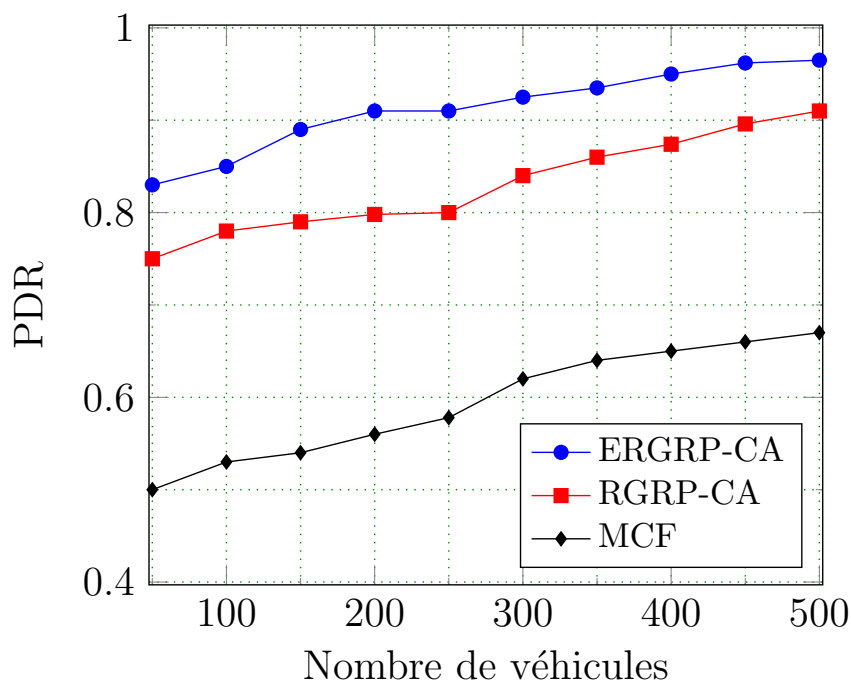


FIGURE 4.4 – Taux de délivrance de paquets en fonction de densité du réseau

4.4.3.3 Délai moyen de bout en bout (EED)

Dans cette partie, nous nous intéressons aux performances des protocoles étudiés en terme de délai moyen de bout en bout. La figure 4.5 montre bien que le délai de bout en bout est plus petit dans ERGRP-CA et RGRP-CA par rapport à MCF, ce qui s'explique par le bon choix de T_w (le temps d'attente pour qu'un véhicule retransmet un paquet, Algorithme 1 : lignes 5 ~ 8) et la méthode d'orientation de transmission de messages (Algorithme 1 : ligne 9) qui permet de réduire le nombre de sauts, donc, le délai moyen de bout en bout diminue. Les courbes montrent aussi que le délai de bout en bout est plus petit dans notre approche ERGRP-CA par rapport à RGRP-CA, et il décroît chaque fois qu'on augmente la densité du réseau. Ceci est dû, non seulement à la bonne connectivité de réseau d'une forte densité, mais aussi au ajustement de la zone de transmission.

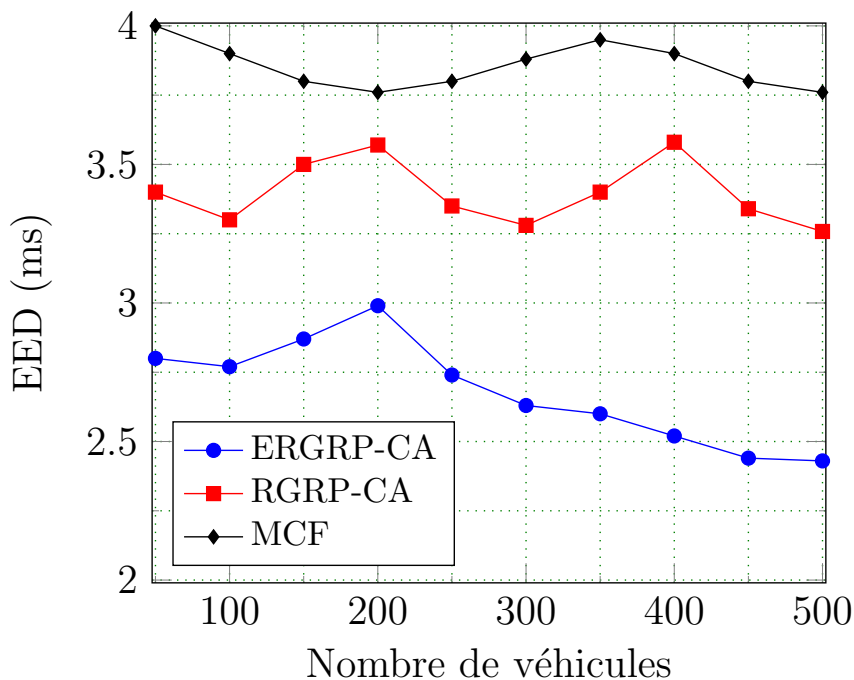


FIGURE 4.5 – Délai moyen de bout en bout en fonction de densité du réseau

4.4.3.4 Throughput (Th)

L'analyse des courbes représentées sur la figure 4.6 montrent bien que pour les trois protocoles le nombre d'octets bien reçus par seconde augmente à l'augmentation du nombre total de véhicules. Plus précisément, avec notre approche, on obtient de bonnes performances en terme de throughput par rapport aux deux autres protocoles, tel que le Th d'ERGRP-CA est supérieur (jusqu'à 32 kbps) à celui de RGRP-CA et MCF, malgré RGRP-CA et MCF génèrent un nombre plus important de paquets (cf. Fig 4.3), ce qui confirme la fiabilité de notre approche, surtout dans les applications temps réel (par exemple, partage des vidéos) qui nécessite la transmission d'une grande quantité de données.

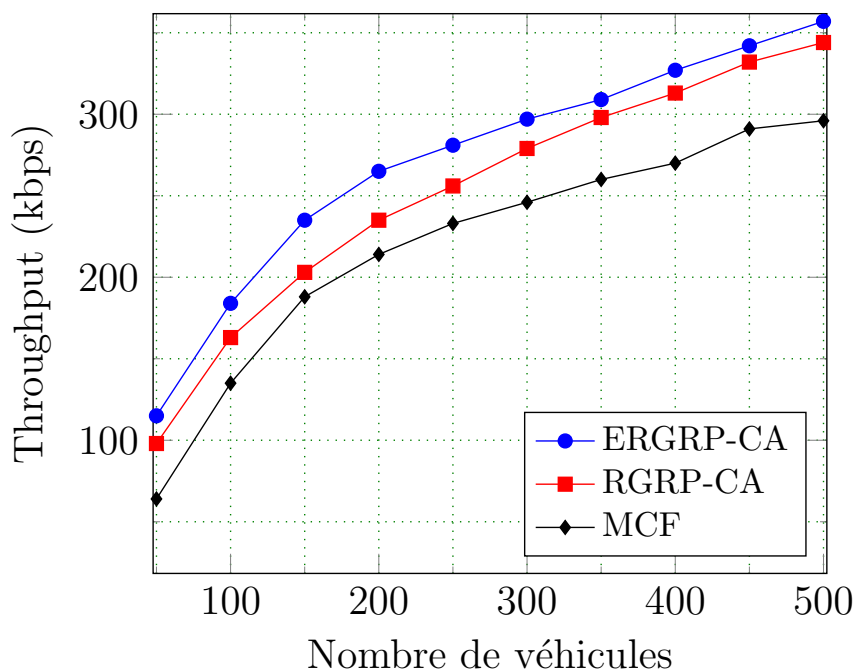


FIGURE 4.6 – Throughput en fonction de densité du réseau

4.4.3.5 Protocol Overhead (PO)

La figure 4.7 illustre que le PO des trois protocoles tend à diminuer fortement à chaque fois que la densité du réseau augmente, mais en particulier, le PO du MCF est supérieur par rapport aux deux autres protocoles dans une faible densité, ce qui s'explique par l'utilisation de mécanisme de l'agrandissement de la zone de transmission en cas de fragmentation interne qui est très fréquents dans un réseau peu dense, MCF génère un nombre important de paquets pour assurer la bonne connectivité, ce qui augmente la surcharge du réseau et influe négativement sur PO de MCF. Les courbes montrent aussi que PO du RGRP-CA et d'ERGRP-CA sont très proches tant que la densité des véhicules est faible, et lorsque la densité est forte, le PO d'ERGRP-CA est inférieur au PO du RGRP-CA, ceci explique que la fragmentation externe du réseau est très fréquentes dans un réseau a forte densité, ce qui nécessite d'agrandir la zone de transmission dans les deux protocoles RGRP-CA et ERGRP-CA, mais l'agrandissement limité de $ZT(t)$ permet de réduire la surcharge du réseau, ce qui confirme le bon fonctionnement de notre protocole.

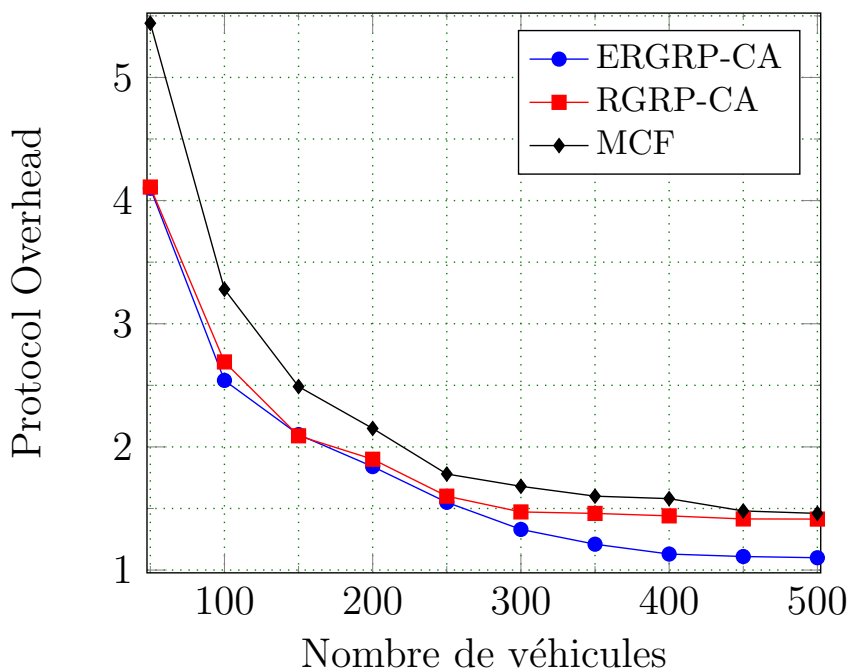


FIGURE 4.7 – Protocol overhead en fonction de densité du réseau

4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons comparé les performances de notre approche ERGRP-CA qui est destiné aux applications de confort avec les performances des deux protocoles similaires à savoir RGRP-CA et MCF. D'après les résultats de simulations présentés précédemment, nous pouvons dire que les performances d'ERGRP-CA qui permet de surmonter le problème de la fragmentation interne et externe du réseau en ajustant la zone de transmission, sont très satisfaisantes en terme :

D'augmenter : le taux moyen de délivrance des paquets, et le throughput.

De réduire : le nombre de paquets échangés, le délai de bout en bout et le Protocole Overhead. Donc, notre approche ERGRP-CA est la plus adaptée aux applications de confort.

Conclusion générale

Le progrès actuel dans le domaine des réseaux VANETs est dû à l'évolution rapide des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports (ITS). Cette évolution vise à rendre les réseaux plus sûrs, plus fiables, et plus efficaces. Les principaux objectifs d'un système de transport intelligent concernent : (i) les applications de sécurité routière, (ii) les applications de gestion du trafic routier et (iii) les applications de confort du l'utilisateur en lui fournissant une multitude de services d'information, d'aide à la décision, de guidage, et d'accès à Internet. Les protocoles de routage proposés auparavant offrent plusieurs avantages qui sont effectivement meilleurs pour différents types d'applications de sécurité et de gestion du trafic routier, mais restent insuffisants par rapport aux applications de confort, car certaines techniques ne peuvent pas surmonter totalement, à savoir le problème de la fragmentation fréquente du réseau (fragmentation interne et fragmentation externe). C'est pourquoi nous proposons une nouvelle approche de routage geocast, qui prend en considération la plupart des restrictions des solutions proposées, et qu'il ne dégrade pas les performances des protocoles de routage.

Dans ce mémoire, nous avons présenté les principaux concepts et les spécificités liées aux réseaux VANETs, ainsi les architectures et les applications de ce type de réseaux, ce qui permet d'avoir une vue générale sur cette nouvelle technologie de réseaux pour pouvoir comprendre le fonctionnement et les mécanismes de bases des VANETs.

Ensuite, nous avons vu le problème de routage geocast dans les réseaux de véhicules. Et puis, nous avons étudié un ensemble de solutions liées à ce problème. Nous avons proposé une amélioration au protocole RGRP-CA, en se basant sur une technique de limitation de la zone geocast. L'amélioration permet au véhicule source de définir un intervalle de vitesse dans sa zone de transmission et de limiter le nombre de sauts

dans cette zone, pour garantir une meilleur fiabilité de routage geocast. L'amélioration est adapté aux applications de confort (par exemple, l'échange de messages entre les passagers de véhicules proches) de réseaux véhiculaires dans une autoroute. L'étude des performances de la nouvelle solution montre son efficacité en termes de nombre de paquets échangés, taux moyen de bout en bout, fiabilité et throughput, comparée avec d'autres protocoles.

Ce modeste travail est loin d'être parfait, mais il peut être considéré comme une petite ouverture vers l'implémentation réelle d'un protocole de routage geocast au sein des applications de confort d'un réseau VANET. Comme extensions futures à notre travail nous proposons :

- L'amélioration de l'approche ERGRP-CA pour qu'elle minimise le nombre de relais et le nombre total de paquets échangés ;
- L'utilisation d'autres nouvelles techniques pour surmonter le problème de la fragmentation externe qui pourrait exister dans les application de confort.

Bibliographie

- [1] F.Z. BOUSBAA, Etude des protocoles de multicast dans les réseaux de véhicules, Mémoire de Magister en Informatique, Université Amar Telidji de Laghouat (UATL), 2011.
- [2] M.F. MEZGHANI, La dissémination de contenus dans les réseaux Véhiculaires, Thèse de doctorat en Informatique, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2015.
- [3] FZ. BOUSBAA, F. ZHOU N. LAGRAA & MB. YAAGOUBI, Robust geocast routing protocols for safety and comfort applications in VANETs, Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com), P. 1-17, 2015.
- [4] J. HUBAUX, Vehicular Networks : How to Secure Them, MiNeMa Summer School, Klagenfurt, 2005.
- [5] M. B. FARAH, Méthodes utilisant des fonctions de croyance pour la gestion des informations imparfaites dans les réseaux de véhicules, Thèse de doctorat en Informatique, Université d'Artois, 2014.
- [6] M. JERBI, Protocoles pour les communications dans les réseaux de véhicules en environnement urbain : Routage et GeoCast bases sur les intersections. Thèse de doctorat en Informatique, Université D'EVRY VAL D'ESSONNE, 2008.
- [7] A. ADIGUN, Gestion de l'anonymat et de la traçabilité dans les réseaux véhiculaires sans fil, Thèse de doctorat en Informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2014.
- [8] J. P. HUBAUX, S. CAPKUN, & J. LUO, The security and privacy of smart vehicles, IEEE Security & Privacy, pp. 49-55, 2004.
- [9] A. BENSLIMANE, Localization in Vehicular Ad-hoc networks, Proceedings of the 2005 Systems Communications (ICW'05), 2005.

-
- [10] S. KAMBOJ & S. CHAWLA, Geocast Routing in Vehicular Ad Hoc Networks, (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5(4), P. (5365-5370), 2014.
- [11] P. MARLIER, Communications optimisées dans un réseau véhiculaire Ad Hoc multi-sauts, Rapport de stage TN10 / Mémoire de Master ST02, Université de Technologie de Compiègne, France, 2007.
- [12] Y.C. TSENQ, S.Y. NI, Y.S. CHEN & J.P. SHEU, The broadcast storm problem in a mobile Ad Hoc network, *Wireless Networks*, 8(2-3), P. 153-167, 2002.
- [13] C. MAIHOFER, A survey on geocast routing protocols, *IEEE communications Surveys and Tutorials*, 2nd quarter, 2004.
- [14] H.P. JOSHI, Distributed Robust Geocast : A Multicast Protocol for Inter-Vehicle Communication, Thèse de doctorat en Informatique, North Carolina State University (NCSU), 2006.
- [15] Intelligent Transport System (ITS) ; Vehicular Communications ; Basic Set of Applications, Definition, ETSI TR 102 638 V1.1.1, 1-81, 2009.
- [16] M. SUN, GPS-Based Message Broadcast for Adaptive Inter-vehicle Communications, *Proc. Of IEEE VTC Fall 2000*. Boston. MA. 6 :2685-2692, 2000.
- [17] A. BACHIR & A. BENSLIMANE, A Multicast Protocol in Ad-hoc Networks : Inter-Vehicles Geocast , *IEEE VTC-spring 2003*, Jeju, Korea, Vol. 4, P. 2456-2460, 2003.
- [18] Y. CHEN , Y. LIN & S. LEE, A Mobicast Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks. *ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET)*, p. 20-35, 2010.
- [19] FZ. BOUSBAA, F. ZHOU N. LAGRAA, MB. YAAGOUBI, & A. BENSLIMANE, Reducing Transmission Interferences for Safety Message Dissemination in VANETs, *IEEE International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, P. 1205-1210, 2015.
- [20] N. WISITPONQPHAN, O. TONQUZ, J. PARIKH, F. BAI, P. MUDALIQE, & V. SADEKAR, On the Broadcast Storm Problem in Ad Hoc Wireless Network *IEEE Wireless Communications*, 2007.

- [21] F.KAISSER , Communications dans les réseaux fortement dynamiques, Thèse de doctorat en Informatique, Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes d'Orsay, 2010.
- [22] Y. BADDI, Introduction au simulateur réseau NS2, [en ligne] : <http://y-baddi.developpez.com/tutoriels/ns2/>, consulté le 12/03/2016.
- [23] K. FALL & K. VARADHAN, The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation). Multimedia Networking Group, the Department of Computer Science, UVA, 2010.
- [24] The Network Simulator Project Ns-2, [en ligne] : <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, consulté le 14/03/2016.
- [25] S. BENKOUDEK, Etude du problème de localisation dans les réseaux VANET, Mémoire de Magister en Informatique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), 2009.

Annexe

Les étapes de création d'un fichier de mobilité

Une fois le programme *freeway.ccp* est compilé et exécuté, il demande à l'utilisateur d'entrer les informations suivantes :

- Le nombre de véhicules participant à la simulation.
- L'accélération de la vitesse des véhicules (par exemple si cette valeur est égale e 10% de la vitesse, donc :

$$Acceleration = vitesse_Max * 0.1$$

- Le chemin du fichier qui décrit la carte de l'autoroute.
- le chemin du fichier qui va être créée pour contenir le modèle de mobilité, ce fichier va être utilisé par *NS-2* ;

Le format du fichier map

Le fichier map est un composant très important dans la détermination de la topologie du réseau. Il contient les autoroutes utilisées dans la simulation. Ce qui fait, que nous pouvons modéliser n'importe quelle autoroute en fournissant les données nécessaires au programme *Freeway* et tout en suivant le format du fichier map [25].

La figure suivante décrit le format du fichier map :

```

FREEWAY
FREEWAY_NUM <nombre_total_des_autoroutes>
LANE_NUM <nombre_total_des_voies>
LANE_BEGIN <ID_autoroute> <ID_voies_dans_cette_autoroute>
<ID_voie_dans_toutes_les_autoroutes> <direction> <nombre_de_phases_dans_cette_voie >
PHASE <ID_phase > (<début_phase_x, début_phase_y>)
(<fin_phase_x,fin_phase_y>) <Vitesse_min> <vitesse_max>
PHASE <ID_phase > (<début_phase_x, début_phase_y>)
(<fin_phase_x,fin_phase_y>) <Vitesse_min> <vitesse_max>
...
LANE_BEGIN <ID_autoroute> <ID_voies_dans_cette_autoroute>
<ID_voie_dans_toutes_les_autoroutes> <direction> <nombre_de_phases_dans_cette_voie >
PHASE <ID_phase > (<début_phase_x, début_phase_y>)
(<fin_phase_x,fin_phase_y>) <Vitesse_min> <vitesse_max>
PHASE <ID_phase > (<début_phase_x, début_phase_y>)
(<fin_phase_x,fin_phase_y>) <Vitesse_min> <vitesse_max>
...

```

FIG. A.1 : Format du fichier MAP

Le fichier map commence par l'identifiant du modèle *Freeway*, pour le différencier des autres modèles comme le modèle *MANHATTAN*. Ensuite, chaque mot clé à au minimum un seul paramètre, le mot clé *FREEWAY_NUM* désigne le nombre total des autoroutes que la topographie peut comporter. *LANE_NUM* désigne le nombre total des voies de toutes les autoroutes, Pour identifier chaque voie, le mot clé *LANE_BEGIN* est utilisé, il a un ensemble des paramètres très qui sont respectivement : l'identifiant de l'autoroute dont il fait partie, l'identifiant local de la voie dans cette autoroute, et puis l'identifiant global de la voie par rapport à toutes les voies de la topographie, la direction de la voie qui prend la valeur (1) ou (-1). et finalement, la voie est constituée d'un ensemble de phases, chaque phase est désignée par un identifiant de la voie dont il fait partie, elle peut être créée grâce aux deux point de début et de fin, par exemple la phase (i) a le point début (x_i, y_i) et le point fin (x_{i+1}, y_{i+1}) , pour que les phases soient attachés l'une à l'autre, le point fin de la phase (i) doit être le point début de la phase (i+1), alors cette dernière a comme point de début (x_{i+1}, y_{i+1}) et comme point de fin (x_{i+2}, y_{i+2}) , et ainsi de suite. Les deux derniers paramètres très sont la vitesse minimale et maximale que la phase peut

supporter, à noter que l'unité de distance est le mètre et l'unité de vitesse est le mètre par seconde.

Voici un exemple qui décrit un fichier map (cf. Fig.A.2) permettant de créer une autoroute comportant quatre voies, chaque voie est constituée d'une phase et chaque phase a une longueur de 2Km avec une vitesse entre 80-140 km/h (22-39 m/s).

```
FREEWAY  
FREEWAY_NUM 1  
LANE_NUM 4  
LANE_BEGIN 0 0 0 1 1  
PHASE 0 (0.0, 0.0) (5.0, 2000.0) 22.0 39.0  
LANE_BEGIN 0 1 1 1 1  
PHASE 0 (5.0, 0.0) (10.0, 2000.0) 22.0 39.0  
LANE_BEGIN 0 2 2 -1 1  
PHASE 0 (10.0, 0.0) (15.0, 2000.0) 22.0 39.0  
LANE_BEGIN 0 3 3 -1 1  
PHASE 0 (15.0, 0.0) (20.0, 2000.0) 22.0 39.0
```

FIG. A.2 : Exemple d'un fichier MAP

Le format du fichier de mobilité

Après la création du fichier map, ce dernier sera utilisé par le programme *Freeway* comme un fichier d'entrée. L'exécution de ce programme va générer le fichier contenant le modèle de mobilité, la figure.A.3 décrit le format du fichier :

```

Snode_(0) set X_ 7.889340
Snode_(0) set Y_ 1155.735962
Snode_(0) set Z_ 0.000000
Snode_(1) set X_ 10.524003
Snode_(1) set Y_ 209.601120
Snode_(1) set Z_ 0.000000
Snode_(2) set X_ 15.732749
Snode_(2) set Y_ 293.099762
Snode_(2) set Z_ 0.000000
Snode_(3) set X_ 19.606464
Snode_(3) set Y_ 1842.585571
Snode_(3) set Z_ 0.000000
...
Sns_at 0.000000 "Snode_(0) setdest 7.966975 1186.789673 31.053835"
Sns_at 0.000000 "Snode_(1) setdest 10.600468 240.186890 30.585863"
Sns_at 0.000000 "Snode_(2) setdest 15.793066 317.226318 24.126621"
Sns_at 0.000000 "Snode_(3) setdest 19.689692 1875.876465 33.290962"
...

```

FIG. A.3 : Exemple d'un fichier de mobilité

Le fichier `mobilite.txt` commence par l'initialisation des positions des véhicules, la position est déterminée par les trois coordonnées X, Y, et Z.

Le programme *Freeway* exécute une procédure pour déterminer les positions des noeuds à chaque instant.

La commande suivante, indique qu'à l'instant $t = 1s$, le noeud (0) se déplace vers la destination $(X, Y) = (8.031884, 1212.753296)$ avec la vitesse 25.963654 m/s :

```
Sns_at 1.000000 "Snode_(0) setdest 8.031884 1212.753296 25.963654"
```