



*Thèse présentée pour obtenir le grade de*  
**Docteur de l'Université Paris 13**  
**en Sciences de l'ingénieur**  
**Mention Réseaux et Techniques Informatiques**

Optimisation des échanges dans le routage géocast pour  
les réseaux de Véhicules Ad Hoc VANETs

*Par*  
**SALIM ALLAL**

*Devant le jury composé de :*

---

<b>Sidi Mohammed SENOUCI</b>	Rapporteur	Professeur, Université de Bourgogne
<b>Anthony BUSSON</b>	Rapporteur	Professeur, Université Lyon 1
<b>Laure PETRUCCI</b>	Examinateur	Professeur, Université Paris 13
<b>Lila BOUKHATEM</b>	Examinateur	MDC/HDR, Université Paris 11
<b>Anis LAOUITI</b>	Examinateur	MDC, Télécom Sud-Paris
<b>Saadi BOUDJIT</b>	Co-encadrant	MDC, Université Paris 13
<b>Jalel BEN-OTHTMAN</b>	Directeur de thèse	Professeur, Université Paris 13

---

LABORATOIRE DE TRAITEMENT ET TRANSPORT DE L'INFORMATION  
Institut Galilée, Université Paris 13, Villetaneuse, 93430, France  
10 Décembre 2014

# *Abstract*

---

*Vehicular ad hoc networks (VANETs) are a part of intelligent transportation systems (ITS). These latter attempt to answer the question of how to equip vehicles with wireless communication means to avoid accidents, better manage congestion and have positive impacts on economics, energy and environment. Indeed, with wireless communication mechanisms such as IEEE 802.11p, a vehicle may exchange information with its near neighbors at one hop or at two or further hops through relaying messages technique across intermediate vehicles. Some of these messages may cover vehicles which are in a defined geographical area and spread throughout the network will consume bandwidth and penalize other vehicles. This is the case with information on the road traffic, for example. In the latter case, routing protocols said Geocast are used for the dissemination of these messages. These protocols are used to route a message from a unique source to multiple destination vehicles located in the same geographic area. In this thesis, we considered the case where we have several geographic areas of interest and have proposed a new Geocast routing mechanism, called GeoSUZ, for conveying a message optimally between a source and multiple destination areas. An optimized broadcasting mechanism within an area is also combined with GeoSUZ algorithm to ensure end-to-end routing with minimal overhead.*

**Key words :** Vehicular ad hoc networks, safety applications, dissemination protocols, geocast routing.

---

# Résumé

---

*Les réseaux de véhicules ad hoc (VANETs) sont une partie des systèmes de transports intelligents (ITS). Ces derniers essaient de répondre à la question de comment équiper les véhicules de moyens de communications sans fil pour éviter les accidents, mieux gérer les embouteillages et avoir des impacts économiques, énergétiques et environnementaux positifs. En effet, avec des mécanismes de communication sans fil tels que l'IEEE 802.11p, un véhicule peut échanger des informations avec ses voisins proches à un saut ou encore plus loin à deux sauts et plus grâce à la technique de relayage des messages à travers les véhicules intermédiaires. Certains de ces messages peuvent concerner des véhicules se trouvant dans une zone géographique bien définie et leur dissémination dans tout le réseau consommera de la bande passante et pénalisera les autres véhicules. C'est le cas des informations sur le trafic routier par exemple. Dans ce dernier cas, les protocoles de routage dits Geocast sont utilisés pour la dissémination de ces messages. Ces protocoles permettent d'acheminer un message d'un véhicule source vers plusieurs autres véhicules destination situés dans une même zone géographique. Dans cette thèse, nous avons considéré le cas où nous avons plusieurs zones géographiques d'intérêt et avons proposé un nouveau mécanisme de routage Geocast, appelé GeoSUZ, permettant d'acheminer un message de manière optimale entre une source et plusieurs zones de destination. Un mécanisme de diffusion optimisée à l'intérieur d'une zone est également combinée à l'algorithme GeoSUZ afin d'assurer un routage de bout en bout avec un overhead minimum.*

**Mots clés :** Réseaux véhiculaires, applications de sécurité routière, protocoles de dissémination d'information, routage géocast.

---

# Remerciements

*Tout au long de ma période de thèse au laboratoire L2TI, beaucoup de collègues m'ont gentiment proposés leur aide et leur soutien. Ça m'est un plaisir de leur transmettre à tous ma profonde gratitude et je suis particulièrement reconnaissant aux personnes suivantes :*

*Je veux tous d'abord exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse le Pr Jalel Bon-Othman.*

*Deuxièmement, je suis redevable à mon co-encadrant Mr Saadi Boudjit pour son accueil chaleureux et ses idées et suggestions pertinentes. Merci pour tout.*

*Je tiens à remercier également les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail. Mes remerciements vont particulièrement aux Professeurs Sidi Mohammed Senouci et Anthony Busson pour avoir accepté de rapporter ma thèse.*

*Salim ALLAL  
Paris, Décembre 2014*

# Dédicaces

## *À ma mère et mon père*

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

## *À ma sœur et mon frère*

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

## *En l'honneur de mes grands parents*

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

## *À mes amis*

Un grand merci à Michel, Béatrice et Khaled.

*Merci à tous :)*

*Salim ALLAL*

# Table des matières

<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>ii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Dédicaces</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>2</b>
1.1 Systèmes de transports intelligents . . . . .	3
1.2 Défis de la recherche . . . . .	5
1.2.1 Les inadéquations d'une zone de destination unique . .	6
1.2.2 Routage multi-sauts dans les réseaux VANETs . . . . .	7
1.3 Questions de recherche . . . . .	9
1.4 Contribution . . . . .	10
1.5 Organisation de la thèse . . . . .	10
<b>2 Systèmes de transports intelligents</b>	<b>12</b>
2.1 Les technologies actuelles au service des STIs . . . . .	13
2.1.1 Panneaux d'information . . . . .	14
2.1.2 Communication par satellite . . . . .	15
2.1.3 Communications courtes-distances sans fil . . . . .	15

2.2	Différents projets STIs . . . . .	18
2.3	Applications STI . . . . .	21
2.3.1	Sécurité des usagers . . . . .	21
2.3.2	Gestion du trafic . . . . .	21
2.3.3	Amélioration du confort de la conduite . . . . .	22
2.4	Réseaux véhiculaires . . . . .	22
2.4.1	Architecture des réseaux véhiculaires . . . . .	23
2.4.2	Propriétés des réseaux véhiculaires . . . . .	24
2.4.3	Propagation des ondes radio . . . . .	27
2.4.4	DSRC . . . . .	29
2.4.5	Norme IEEE 802.11p . . . . .	31
2.5	Simulation des réseaux véhiculaires . . . . .	35
2.5.1	Les métriques de performances . . . . .	36
2.6	Conclusion . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Routage dans les réseaux VANETs</b>	<b>39</b>
3.1	Routage dans les réseaux MANETs . . . . .	40
3.1.1	Protocoles de routage basés sur la topologie . . . . .	41
3.1.1.1	Protocoles de routage proactif ou Table-Driven	41
3.1.1.2	Protocoles de routage réactifs ou On-Demand	42
3.1.1.3	Protocoles de routage hybrides . . . . .	42
3.1.2	Apérçu des protocoles de routage OLSR et AODV . . . . .	42
3.1.2.1	OLSR (Optimized Link State Routing Proto- col) . . . . .	42
3.1.2.2	AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) . . . . .	43
3.1.2.3	Avantages et limites pour les VANETs . . . . .	44
3.2	Routage géographique . . . . .	46
3.2.1	Classification . . . . .	46
3.2.2	Routage géographique Unicast . . . . .	48
3.2.2.1	GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) .	48
3.2.2.2	GSR (Geographic Source Routing) . . . . .	51

3.2.2.3	GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing) . . . . .	52
3.2.3	Comparaison entre AODV et GPSR . . . . .	53
3.2.3.1	Premier scénario . . . . .	53
3.2.3.2	Deuxième scénario . . . . .	55
3.2.3.3	Troisième scénario . . . . .	57
3.2.3.4	Evaluation de GPSR . . . . .	58
3.3	Routage Géocast . . . . .	59
3.3.1	Protocoles géocast dans la littérature . . . . .	59
3.3.1.1	IVG (Inter-Vehicular Geocast) . . . . .	59
3.3.1.2	Cached Geocast . . . . .	60
3.3.1.3	Abiding Geocast . . . . .	61
3.3.1.4	DRG (Distributed Robust Geocast) . . . . .	62
3.3.1.5	ROVER . . . . .	62
3.3.1.6	DG-CastoR . . . . .	63
3.3.1.7	Routage Mobicast . . . . .	63
3.3.1.8	DTSG . . . . .	64
3.3.2	Étude de ces protocoles . . . . .	64
3.3.2.1	Classification selon la technique de découverte du voisinage . . . . .	64
3.3.2.2	Comparaison des protocoles de routage Geocast	65
3.4	Conclusion . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Protocole de routage GeoSUZ</b>	<b>68</b>
4.1	Questions de recherche . . . . .	69
4.2	La Forme d'une zone de destination . . . . .	70
4.3	Le ZOR est un ensemble de sous-ZORs . . . . .	73
4.4	Incidence du découpage d'un ZOR sur le routage . . . . .	74
4.4.1	Problématique . . . . .	74
4.5	Technique de Vision par angles . . . . .	75
4.5.1	Technique de vision par angles . . . . .	76
4.5.2	Structure du message géocast . . . . .	78
4.5.2.1	Le message pré-fragmenté . . . . .	79

4.5.2.2	Le Message fragmenté . . . . .	79
4.5.2.3	Le Message défragmenté . . . . .	80
4.6	Algorithme GeoSUZ . . . . .	81
4.7	Résultats numériques . . . . .	85
4.8	Conclusion . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Diffusion optimisée dans les sous-ZORs</b>	<b>90</b>
5.1	Diffusion dans un sous-ZOR . . . . .	91
5.2	OB-VAN . . . . .	93
5.2.1	Etapes du protocole OB-VAN . . . . .	93
5.2.2	Exemple du processus de sélection . . . . .	95
5.2.3	Résultats de simulation dans un sous-ZOR . . . . .	97
5.3	La fonction principale main() de GeoSUZ . . . . .	98
5.3.1	Diagramme de flux de l'algorithme . . . . .	98
5.4	Conclusion . . . . .	100
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>102</b>
	<b>Liste des publications</b>	<b>105</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>106</b>
	<b>Listes</b>	<b>117</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>117</b>
	<b>Table des tableaux</b>	<b>118</b>
	<b>Annexes</b>	<b>119</b>
	<b>A Les classes du protocole GPSR</b>	<b>119</b>
	<b>B Intégration de GPSR dans NS-3</b>	<b>121</b>
	<b>C Simulation d'un réseau VANET</b>	<b>123</b>

# Liste des abréviations

## Protocoles de routage

AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector Protocol
DG-CastoR	Direction-based Geocast Routing protocol for VANET
DRG	Distributed Robust Geocast
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector Routing
DSR	Dynamic Source Routing
DTSG	Dynamic Time-Stable Geocast routing in VANETs
Geocast	GEOgraphic broadCAST
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks
IVG	Inter-Vehicular Geocast
OLSR	Optimized Link State Routing protocol
ROVER	Reliable Geographical Multicast Routing in VANETs

## Réseaux véhiculaires

AC	Access Category
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
ITS	Intelligent Transportation System
OBU	On-Board Unit

RSU	Road Side Unit
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2R	Vehicle to Road side
V2V	Vehicle to Vehicle
VANET	Vehicle Ad-hoc Network
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
ZOF	Zone Of Forwarding
ZOR	Zone Of Relevance

## **Réseaux sans fil**

ACK	Acknowledgment
AP	Access point
CTS	Clear To Send
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
IP	Internet Protocol
LLC	Logical link control
LTE	Long Term Evolution
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MAC	Medium Access Control
RTS	Request To Send
SNR	Signal-to-noise Ratio
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Network

## **Autres**

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NTIC	Nouvelle Technologie de l'Information et de la Communication
OSI	Open Systems Interconnection

# Chapitre 1

## Introduction

Les systèmes de transport intelligents (STIs) sont des systèmes de transport qui utilisent les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTICs) pour améliorer la sécurité routière, l'efficacité du trafic, le confort des usagers de la route et réduire l'impact écologique négatif causé par les émissions de gaz et polluons générés par le trafic routier. L'une des principales forces des STIs est de permettre un niveau de coopération entre les participants du réseau routier en équipant les véhicules de systèmes de communication sans fil. Ce type de réseaux sans fil se réfère aux réseaux véhiculaires.

Les principaux objectifs des réseaux véhiculaires est de disséminer les informations en rapport avec le trafic routier et toute-autre sorte d'information. La nature des informations du trafic routier est limitée à une zone géographique spécifique, comme exemple : les informations sur les accidents dans la ville de Paris n'intéresserait que les véhicules situés dans cette région en général. Les informations sur le trafic sont cependant relayées en utilisant des techniques de routage géographique, une forme de routage basé sur la position (localisation géographique), où l'information est adressée à une zone de destination géographique bien définie.

Le sujet de cette thèse porte sur les réseaux véhiculaires, en particulier, sur la dissémination des informations dans un réseau de véhicules sans fil sans infrastructure (Ad hoc) en utilisant des techniques de routage géographique

de type géocast. Le but de ce premier chapitre est d'introduire à la fois le domaine de recherche en relation avec les réseaux véhiculaires ainsi que le sujet de notre recherche.

Le plan de ce chapitre est comme suit : la section 1.1 apporte une introduction générale aux systèmes de transports intelligents, la section 1.2 définit un bref aperçu des défis de la recherche en rapport avec le routage des messages dans les STIs. Dans la section 1.3 nous posons quelques questions de recherche pour lesquelles nous tenterons d'apporter des solutions. La section 1.4 comporte la liste de nos contributions que nous avons pu réaliser tout au long de cette thèse. Dans la section 1.5, une vue globale sur l'organisation de la suite des chapitres de ce manuscrit est donnée.

## 1.1 Systèmes de transports intelligents

Les systèmes de transports intelligents (STIs) utilisent les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTICs) pour rendre les transports plus automatisés, permettant ainsi d'augmenter les performances de ces systèmes au-delà des limites sensorielles des conducteurs humains. Un STI a la possibilité d'accroître la sécurité du trafic, son efficacité, le confort de conduite et de réduire l'impact négatif des transports sur l'environnement. Grâce à ces différents avantages, le développement des STIs est activement poussé par les gouvernements, les constructeurs d'automobiles et les organismes mondiaux de réglementation et de standardisation. Un exemple d'application STI est l'alerte des usagers de la route sur un événement critique survenu sur la voie (accident, panne, chaussée impraticable, travaux sur la voie, etc). D'autres exemples sont les péages électroniques, les systèmes d'informations sur le trafic et les systèmes de navigation. Dans tous ces cas, la technologie la plus importante permettant de répondre à ces besoins est la communication sans fil. Celle-ci, permettant aux usagers de la route de partager des informations et de gérer leurs comportements de manière coopérative.

Le domaine des réseaux sans fil qui permet ce type d'applications se réfère aux réseaux véhiculaires. Un réseau véhiculaire est constitué de véhicules (nœuds mobiles) et nœuds d'infrastructure fixes qui accomplissent différentes

techniques de communication, les communications courtes-distances (jusqu'à une centaine de mètres) et longue distance (plusieurs kilomètres). Dans cette thèse nous nous intéressons aux réseaux véhiculaires qui se basent sur des communications courtes-distances uniquement. Dans ce type de réseaux les véhicules et les nœuds d'infrastructure peuvent communiquer directement avec d'autres nœuds qui appartiennent à leur zone de couverture. Pour disséminer les informations au-delà de la zone de couverture, des communications multi-sauts sont utilisées.

L'un des principaux objectifs des réseaux véhiculaires est la dissémination des informations concernant les événements de la route. Comme les informations concernant le trafic restent pertinentes dans une zone géographique spécifique : les informations concernant un état de la route dégradé par exemple n'intéresserait que les véhicules qui sont susceptibles de l'emprunter, aussi, un véhicule sur le point de tomber en panne est censé alerter les véhicules qui le précèdent et non pas ceux qui le succèdent de la raison de son immobilisation sur la voie ou sur le bas-côté. Le routage géographique est par conséquent utilisé pour disséminer les informations du trafic dans les réseaux de véhicules et pas seulement, il permet également d'acheminer d'autres informations comme de la publicité ou des flux multimédia comme la radio, la télévision, etc. Le routage géographique est une forme de routage basé sur la localisation où l'information est adressée à une zone de destination géographique bien définie, comme une section spécifique de la route par exemple. L'information est relayée à la destination en utilisant certains protocoles de routages basés sur la localisation et est délivrée à tous les nœuds (véhicules) situés dans cette zone de destination au moment où l'information l'atteint, voir figure 1.1. Le relayage basé sur la localisation en général et dans le routage géographique en particulier est rendu possible grâce aux équipements et techniques de positionnement comme le GPS (Global Positioning System). C'est un type de routage qui est totalement différent des formes de routage traditionnel dans lesquels l'information est envoyée à une destination spécifique, sans prendre en considération la localisation des nœuds. Avec le routage géographique, la source ne saura pas quels nœuds vont recevoir l'information.

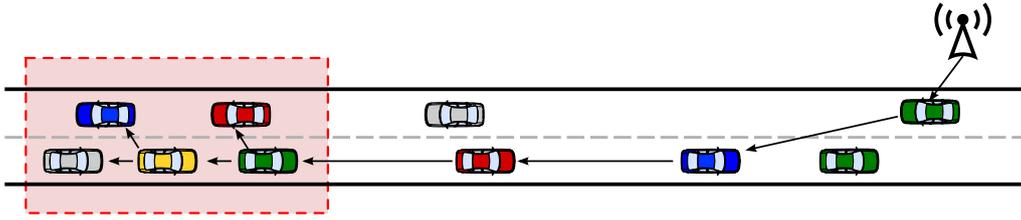


FIGURE 1.1 – Un exemple de routage géocast : un nœud d’infrastructure initie la transmission. Le message est relayé puis délivré à tous les nœuds situés dans la zone de destination (en rouge).

## 1.2 Défis de la recherche

Les réseaux véhiculaires sont un nouveau champ de recherche qui apportent un lot intéressant de problèmes de recherche restés non solutionnés. Dans cette section nous discuterons trois défis spécifiques qui restent encore ouverts. Ces trois défis seront des points d’intérêt pour la suite de notre thèse. Pour chaque défi nous argumenterons pourquoi l’état actuel de la recherche n’est pas adéquat et présenterons comment le travail de cette thèse essaie d’aborder ces défis. Le premier défi est en relation avec les formes des zones de destinations. Dans la littérature les zones de destinations ont dans la majorité des cas des formes circulaires alors que les formes des routes varient selon le terrain de lignes droites dans le cas des voies rapides à des formes diverses dans le reste des cas. Afin d’affiner au mieux la délimitation d’une route quelconque comme zone de destination, il faudrait soit, la définir par une succession de points la délimitant ou la découper en petites zones de destination plus facile à représenter, à transmettre et à manipuler (calculer).

Le deuxième défis concerne l’efficacité du routage géocast : de la manière par laquelle une information est adressée à une partie du réseau qui n’en a pas besoin, comme dans le cas d’un véhicule en panne qui signale sa présence aux véhicules situés dans son entourage. Ceci est réalisé dans la littérature en attirant l’attention de tous les usagers de la route situés dans la zone de destination circulaire autour du véhicule en panne, alors que les seuls véhicules qui sont censés être informés sont les véhicules proches en amont (précédants) le véhicule en question et loin qui sont susceptibles d’empreinter la voie sur laquelle est survenu l’évènement. Alors que les véhicules en aval ne

sont pas censés recevoir cette information. Ce défi suppose un confinement de la zone de destination en sous-zones de destination plus petites et plus adéquates ainsi que la gestion optimisée des échanges entre la source de l'information et ces sous-zones de destination sensées la recevoir. Dans ce point nous proposons une technique qui permet d'optimiser les frais généraux engendrés par la découpe de la zone de destination en sous-zones.

Le troisième défi a trait à l'optimisation de la diffusion à l'intérieur de chaque sous-zone de destination. Bien que plusieurs travaux sur le sujet existent et que quelques protocoles de routage broadcast aient atteint un niveau avancé de standardisation, il reste néanmoins beaucoup de lacunes dans la compréhension de l'impact qu'ont les réseaux et les paramètres des protocoles sur les performances de chaque protocole.

### **1.2.1 Les inadéquations d'une zone de destination unique**

La technique de dissémination des informations concernant le trafic dans les réseaux véhiculaires est nommée routage géographique. Avec les coordonnées géographiques d'un nœud, on peut déterminer si ce nœud est censé recevoir un message (paquet d'information) ou non. Cette méthode d'adressage utilisant les coordonnées spatiales se réfère au routage géocast. Le but du routage géocast est de router les messages d'un véhicule source unique à tous les véhicules situés dans une zone de destination géographique bien définie. Plus tard nous présenterons comment une zone de destination géographique est censée être découpée et confinée en sous-zones plus petites qui soient adéquates à la réception des messages de type géocast. Et d'éviter ainsi le risque d'attirer l'attention de certains usagers de la route sur des informations non-pertinentes. Nous proposons une représentation géométrique de ces sous-zones qui s'adapte mieux aux formes des routes dans les réseaux routiers réels. Avec cette technique, une source est sensée adresser le même message non à une seule zone de destination géographique mais, à toutes les sous-zones qui forment la zone de destination globale.

Typiquement, l'information contenue dans les messages destinés aux différentes sous-zones est identique, comme l'envoi d'images ou de flux vidéo

d'un évènement de la route (accident, panne, travaux, etc.) ou d'un message publicitaire sur un service rendu (disponibilité de places de parking ou de tables à réserver dans un restaurant, etc.), nous nous retrouvons alors face à un problème d'utilisation de la bande passante excessive.



FIGURE 1.2 – Réseau routier de la ville de Paris avec les axes principaux et secondaires. Prise du projet Open Street Map.

On considère l'exemple du réseau routier de la ville de Paris comme illustré par la figure 1.2. Les axes principaux sont représentés en couleur orange, la vitesse des véhicules y est limitée à 50km/h. Les axes secondaires sont représentés en couleur blanche ; la vitesse des véhicules est fixée entre 30km/h et 50km/h.

### 1.2.2 Routage multi-sauts dans les réseaux VANETs

Bien que des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de la diffusion à un seul saut des paquets, le niveau de compréhension est toujours manquant en ce qui concerne le relayage multi-sauts de paquets basé sur la localisation, même si un nombre croissant de ces protocoles sont en cours de normalisation [1]. Cette thèse aborde cette lacune en présentant un certain nombre de protocoles de transmission basés sur la localisation multi-sauts.

Ci-dessous, nous discutons brièvement l'état actuel de ces protocoles, leurs limites et comment nous nous efforçons de les améliorer.

Les recherches existantes sur les protocoles de transfert multi-sauts basés sur la localisation dans les réseaux de véhicules sont principalement basées sur la simulation. La simulation est un outil puissant qui avec une relative facilité, les protocoles réseaux peuvent être évalués en détail; ceci en raison du degré de précision des modèles de simulation. Cependant, l'interprétation des résultats d'une telle étude peut être assez difficile. Les idées fournies dans ces études peuvent donc être limitées et les résultats obtenus ne peuvent être valables que pour l'ensemble des paramètres spécifiques qui ont été simulés. En outre, afin d'obtenir des résultats fiables, des simulations extrêmement longues sont nécessaires; dépendant du scénario et pouvant prendre des heures, des jours, voir des semaines.

Les modèles analytiques ont dans de nombreux cas des avantages importants par rapport aux modèles de simulation, en particulier en ce qui concerne la vision qu'ils fournissent et leur vitesse relative par rapport à la simulation : les modèles analytiques fournissent généralement des résultats en quelques secondes à quelques minutes. Les modèles analytiques peuvent également permettre des simulations rapides des applications STIs, par exemple, en remplaçant les (très exigeantes) communications du modèle de simulation par des modèles analytiques. Le nombre de modèles analytiques existants est limité, cependant et pour l'instant ne donnent pas un niveau satisfaisant de compréhension des protocoles qu'ils modélisent. Les hypothèses de ces modèles sont souvent trop simplistes et les résultats se concentrent souvent sur des indicateurs de performance spécifiques tels que la connectivité du réseau, plutôt que sur le comportement du protocole dans son ensemble.

Afin de mieux comprendre la performance des transmissions multi-sauts dans un réseau véhiculaire, il est important que nous puissions analytiquement modéliser le comportement de ces protocoles d'une manière qui soit réaliste et qui donne un aperçu plus complet des performances que c'est le cas actuellement. Nous tentons de répondre à ce besoin dans cette thèse en présentant une approche de modélisation que nous appliquons à quelques protocoles de transfert multi-sauts basés sur la localisation. Notre approche

s'appuie sur des hypothèses très réalistes et exprime la performance des protocoles dans un haut niveau de détail, tels que le nombre de messages échangés sur le réseau. Un tel niveau de détail est important pour évaluer les performances des applications de niveau supérieur, surtout que les messages sont souvent appelés à être livrés dans un certain interval de temps pour être pertinent, voir figure 1.3.

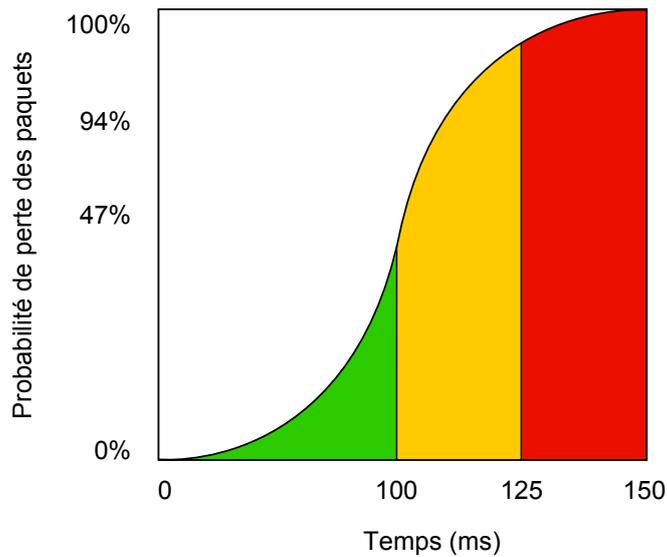


FIGURE 1.3 – Exemple de distribution du délais de bout-en-bout des messages de sureté, divisé en intervalles de temps

### 1.3 Questions de recherche

Dans la section précédente, nous avons abordé un certain nombre de défis en matière de recherche ouverts dans le domaine des réseaux de véhicules sur lesquels nous nous concentrons dans cette thèse. Dans cette section, nous formulons un certain nombre de questions de recherche spécifiques concernant ces défis. Le reste de notre thèse essayera d'apporter des réponses à ces questions de recherche. Nous avons organisé nos questions en trois sujets : le premier traitant la contrainte d'avoir une zone de destination unique et le deuxième concernant l'optimisation des échanges multi-sauts entre la source et plusieurs sous-zones de destination et le troisième gérant le problème de

diffusion à l'intérieur de chaque sous-zone. Dans la suite de ce manuscrit, nous abrégeons une zone de destination par ZOR (pour "Zone Of Relevance") et une sous-zone de destination par sous-ZOR (pour "Sub-Zone Of Relevance").

## 1.4 Contribution

Les contributions de notre thèse se partagent les chapitres : 3, 4 et 5.

La contribution principale du chapitre 3 est de donner d'un état de l'art détaillé sur les réseaux véhiculaires sans fil sans infrastructure VANETs (Vehicular Ad hoc Networks), des protocoles de routage en rapport à ce type de réseaux en général et des protocoles de routage de type géocast en particulier, ainsi que l'apport d'une étude taxonomique de ces protocoles selon plusieurs critères. Les deux contributions principales du chapitre 4 sont l'introduction de notre hypothèse sur le besoin de scinder la zone de destination géographique en plusieurs sous-zones et la technique de géométrie de vision par angles qui est la base de notre protocole GeoSUZ (Geocast routing protocol in Sub-Zones for VANETs) qui permet d'améliorer significativement les échanges de messages entre une source et ces zones de destination. La contribution principale du chapitre 5 a permis de traiter un deuxième aspect du routage géocast qui est la diffusion des messages à tous les véhicules situés dans les différentes sous-zones de destination.

## 1.5 Organisation de la thèse

Cette thèse comporte cinq chapitres. Dans ce chapitre, Chapitre 1, une brève introduction des domaines de recherche dans les STIs est donnée. Ceci explique notre motivation pour ce sujet de thèse. Ce chapitre formule également les problématiques de recherche auxquels s'adresse cette thèse et résume nos contributions. Dans le Chapitre 2, un état de l'art détaillé des STIs en général et des réseaux véhiculaires en particulier est fourni avant d'établir le contexte de notre recherche. Le Chapitre 3 sert à présenter à la fois le contexte des réseaux véhiculaires et un état de l'art en rapport avec notre

domaine de recherche. Dans le chapitre 4, nous avons rédigé d'ensemble du protocole de routage GeoSUZ qui permet l'acheminement des messages entre une source et plusieurs zones de destination géographiques. Nous décrivons dans ce chapitre également en détail un exemple d'une application STI qui a servi de motivation pour nos travaux de recherche. Cet exemple est bien sûr générique et permet à d'autres exemples de se rapporter au même scénario. Le chapitre 5 apporte une amélioration au protocole GeoSUZ pour lui permettre de réaliser une diffusion optimisée du message géocast à l'intérieur de chaque zone de destination.

## Chapitre 2

# Systemes de transports intelligents

Les Systemes de Transports Intelligents (STIs) sont une nouvelle technologie de l'information et de la communication qui fournit principalement des solutions pour les reseaux de transports traditionnels (routier, ferroviaire, naval, aerien, etc.) afin d'ameliorer l'efficacite et les performances de ces systemes. Ils sont en developpement depuis les annees 80 dans trois grands poles mondiaux : l'Europe, les Etats Unis d'Amelique (USA) et le Japon.

Malgre que des solutions STIs adoptant des approches de systemes embarques autonomes pour recueillir des informations sur l'environnement immediat des vehicules sont apparues. La plupart des solutions STIs utilisent une approche cooperative, ou les informations en rapport avec le trafic sont communiquees entre les vehicules et/ou avec les infrastructures en bordures de routes.

Me-me-si l'approche autonome possede l'avantage de ne pas dependre d'autres participants, elle possede neanmoins des limites evidentes en termes de vision et de plages de detection. Alors que l'approche cooperative basee sur la communication inter-vehiculaire (CIV) a un-saut ou a plusieurs sauts peut aller au bout des limites des plages de detection et fournit des solutions STIs plus flexibles. Tout les travaux de recherche presentes dans cette these ont ete realises dans le contexte des STIs appliques aux reseaux vehiculaires ;

le but de ce chapitre est de fournir un tour d’horizon sur le sujet.

Ce chapitre est organisé comme suit. La section 2.1 aborde les services rendus par les STIs qui sont basés sur les nouvelles technologies de l’information et de la communication. À savoir les panneaux d’information, les communications par satellites dites de longues distances et celles de courte distance ad hoc et cellulaires. La section 2.2 liste un grand nombre de projets STIs entamés ou en cours. Dans la section 2.3 nous donnons une classification des applications STIs. La section 2.4 fournit un aperçu détaillé des technologies mises à disposition des réseaux véhiculaires, à savoir, les canaux de transmission qui leur sont dédiés ainsi que les techniques d’accès à ces canaux. La section 2.5 apporte une comparaison détaillée de quelques simulateurs de réseaux véhiculaires et présente quelques métriques d’évaluation des performances. Pour finir, la section 2.6 conclut ce chapitre.

## **2.1 Les technologies actuelles au service des STIs**

Le terme STI englobe tout type de systèmes de transports (routier, ferroviaire, naval, aérien, etc.) dans lequel les technologies de l’information et de la communication (NTICs) sont utilisées dans le but d’améliorer leurs performances. On précise que la suite de ce manuscrit est dédiée exclusivement aux STIs appliqués aux réseaux de transports routiers. En effet, les STIs promettent de fournir aux usagers de la route divers services de communication augmentant ainsi leur attrait envers les communautés de chercheurs et les industries automobiles. Les gouvernements et les organismes de standardisation montrent aussi un grand intérêt envers ce type de réseaux en dédiant exclusivement un ensemble de bandes de fréquences à l’usage des systèmes de transports intelligents, subventionnant des projets et proposant des standards.

Les technologies qui peuvent être utilisés sont diverses ; elles peuvent aller des systèmes de communication sans fil (pour gérer les bornes de péages électroniques ou les systèmes de navigation intégrés) à la reconnaissance des



FIGURE 2.1 – Panneau à messages variables annonçant des travaux

plaques d'immatriculation en utilisant des caméras vidéo.

### 2.1.1 Panneaux d'information

Sur les routes principales des grandes agglomérations, on voit de plus en plus de panneaux à messages variables (PMVs) diffuser des renseignements en temps réel, voir figure 2.1. Ces messages sont adaptés à un lieu, un type de conducteurs ou une situation particulière à 1) caractère événementiel (incidents, accidents, travaux, météo, etc.), 2) de sureté (adapter sa vitesse aux intempéries, attacher sa ceinture, faire des pauses toutes les deux heures, etc.) ou 3) de prescription (incitation ou obligation d'utiliser des itinéraires de substitution, etc.). Ces panneaux sont en général situés au-dessus des voies de circulation, on en compte un tous les 15 km environ. Sur certains axes, si le trafic devient dense, un message d'alerte invite les usagers de la route à ralentir et affiche la vitesse maximale autorisée. Pour offrir des informations correctes et en temps réel, des équipements de surveillance (stations de comptage, agents de surveillance, péages, gendarmes, fibre optique, caméras vidéos, stations météo, détecteurs automatiques d'incidents, etc.) sont installés le long des voies à surveiller. Les informations collectées sont envoyées à des centres autoroutiers de gestion de la sécurité et de la sureté (appelés postes de contrôle de circulation - PC) des réseaux routiers pour être traitées et affichées sur les panneaux d'information PMVs [2].

### **2.1.2 Communication par satellite**

Depuis quelques années, les techniques de communication longue-distances par le biais des satellites sont utilisées pour des connexions Internet à haut débit. C'est surtout très utile pour des utilisateurs très isolés qui ne peuvent pas être connectés à Internet (par exemple, via ADSL, le réseau téléphonique ou de la fibre optique). Ces techniques servent aussi pour des entreprises ou des organisations implantées mondialement qui ne souhaitent pas dépendre d'un opérateur de télécommunication local pas toujours fiable et qui veulent que tous leurs réseaux soient gérés par le même opérateur. Enfin l'utilisation d'un satellite pour l'échange de données permet de se passer des Fournisseurs d'Accès à Internet FAI locaux, censurés et espionnés la plupart du temps, quand ils ne tombent pas "en panne" en cas de manifestations.

L'application des communications par satellites aux réseaux VANETs est à l'étude [3, 4, 5]. Ce type de communication exige que chaque véhicule soit en mesure de transmettre et de recevoir des données relayées par les satellites. Ceci suppose que chaque véhicule soit équipé d'un moyen de communication adéquat.

En plus du service de relaying des informations, un service bien connu du grand public et utilisé au quotidien permet la géolocalisation d'un équipement ; c'est le système de géolocalisation global GPS (Global positioning system). À l'aide de cet équipement, il est facile de connaître la localisation et la vitesse d'un véhicule.

### **2.1.3 Communications courtes-distances sans fil**

Une connexion réseau de type CIV doit être établie et authentifiée très rapidement dans les applications STI, spécialement quand il s'agit d'alerter d'un danger ou de conduite coopérative (où la variation de vitesse et le freinage doivent être signalés rapidement à tous les véhicules du convoi). Plusieurs techniques sans fil actuelles au niveau de la couche Physique (PHY) et de la couche de contrôle d'accès au canal (MAC) ne répondent pas aux exigences des vitesses élevées des véhicules.

Nom	Portée maximale	Débit de données maximal	Bande de fréquence autorisée	Profil de mobilité	Nécessité d'infrastructure	Applications typiques
<b>Bluetooth</b>	10m	723Kbps	Non	Très bas	Non	- ETC - Intra-véhicule
<b>RFID</b>	10m	500Kbps	Non	Bas	Non	- ETC - Identification
<b>WLAN : Wifi</b>	100m (extérieur)	11 ou 54Mbps	Non	Moyen	Non	- Faible exigences - Pas chère
<b>WPAN : Zigbee</b>	300m (extérieur)	250Kbps	Non	Moyen	Non	- Usages polyvalents
<b>DSRC</b>	1km	27Mbps	Oui	Très rapide	Réglable	- Sécurité - Efficacité énergétique et du trafic - Confort de conduite
<b>3G : UTRA-TDD</b>	1km	144Kbps (véhiculaire) 384Kbps (extérieur) 2Mbps (intérieur)	Non	Rapide	Oui	- Efficacité énergétique et du trafic - Confort de conduite
<b>4G : WiMAX</b>	50km	40Mbps (statique) 14Mbps (mobile)	Réglable	Rapide	Oui	
<b>4G : LTE</b>	100km	100Mbps (statique ou mobile)	Réglable	Très rapide	Oui	

TABLE 2.1 – Différentes technologies de communication sans fil

En 2003, le système DSRC (Dedicated Short-Range Communications) apparait en Amérique du Nord, où une longueur du spectre de 75 Mhz a été allouée par la commission fédérale des communications des États Unis (FCC)

aux communications au sein des réseaux véhiculaires [6]. Le Tableau 2.1 liste les différentes technologies de communication sans fil qui peuvent répondre aux besoins des STIs selon le type d'application pour lesquelles elles peuvent s'appliquer.

En se basant sur la norme ASTM E2213-02 de la FCC [7], l'IEEE a commencée à créer des groupes de travail depuis 2004 pour développer des normes qui couvriront les couches PHY et MAC pour les STIs. Ces normes sont toujours en développement. Les nouvelles solutions sont les spécifications IEEE 802.11p [8] et la famille de normes IEEE 1609 [9, 10, 11, 12] qui sont appelées ensemble WAVE pour Wireless Access in Vehicular Environments.

La couche MAC de la norme IEEE 802.11p est une modification approuvée (en 2011) de la norme IEEE 802.11a [13]. La bande de fréquences et la modulation sont très similaires. D'ailleurs la couche MAC de la norme WAVE adopte les mécanismes CSMA/CA.

La famille de normes IEEE 1609 est construite au-dessus de la norme IEEE 802.11p pour ajouter des définitions à l'architecture, aux modèles de communications, aux structures de gestions, aux mécanismes de sécurité et aux accès physiques.

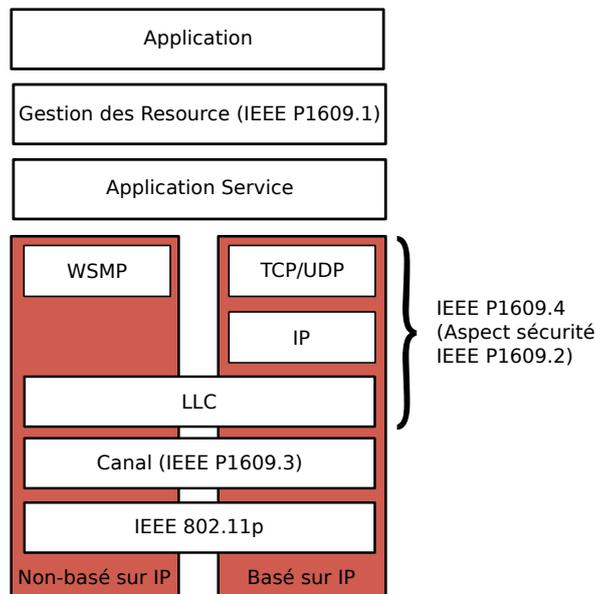


FIGURE 2.2 – Architecture WAVE

## 2.2 Différents projets STIs

Depuis les années 80, des projets de durées plus ou moins longues ont été subventionnés par différents états pour répondre à plusieurs problématiques en rapport avec les réseaux routiers. Le Tableau 2.3 liste et résume une grande partie d'entre eux.

Période	Projets	Pays	Objectifs
1980-1995	JSK (Jidosha Soko densi gijyutsu Kyokai)	Japon	Conduite coopérative avec association des technologies de l'électronique pour le trafic automobile et la conduite [14, 15]
1986 à 2008	PATH : California Partners for Advanced Transportation Technology	USA	Enquêter sur les questions de contrôle des pelotons de véhicules [16]
1990	CHAUFFEUR	UE	Développement de nouveaux systèmes électroniques pour l'attelage des camions à des distances rapprochées [17]
2000 à 2003	FleetNet	Allemagne	Développer une plateforme de communication multi-sauts sans fil basée sur les données de positions pour améliorer la sécurité et le confort des usagers de la route [18, 20, 19]
2001 à 2003	CarTALK2000	UE	Système coopératif d'assistance au conducteur, réseau radio ad hoc auto-configurable, préparation et établissement d'une norme futur[22, 21, 24]

2001 à maintenant	eSafety Working Group	UE	Accélérer le développement et augmenter l'utilisation de la sécurité des routes intelligentes et des technologies d'éco-conduite
2002 à maintenant	C2C-CC	UE	Amélioration de la sécurité et l'efficacité du trafic routier avec les STIs coopératifs et les CIVs supportés par les communications V2I [24]
2003 à 2011	DSSS	Japon	Réduire le nombre d'accidents de la route, relayage d'informations des équipements en bordure de routes aux véhicules, avertissement des conducteurs de l'approche des feux de signalisation ou de l'arrivée d'un autre véhicule ou d'un piéton [25]
2003 à maintenant	DOT puis VII puis renommé IntelliDriveSM en 2005	USA	Développer un environnement réseau supportant des échanges entre véhicules V2V roulant à très grandes vitesses, et entre les véhicules et l'infrastructure V2I ou avec des appareils portatifs V2D (Vehicle-to-device) pour permettre de nombreuses applications de sécurité et de mobilité [26, 27]

TABLE 2.3 – Liste des projets STIs dans le monde

La figure 2.3 liste un grand nombre de projets entamés et d'autres en cours et qui ne cesse d'augmenter. Ceci montre un attrait grandissant aux

STIs au regard des états, des chercheurs, des organismes de standardisation et des industriels.

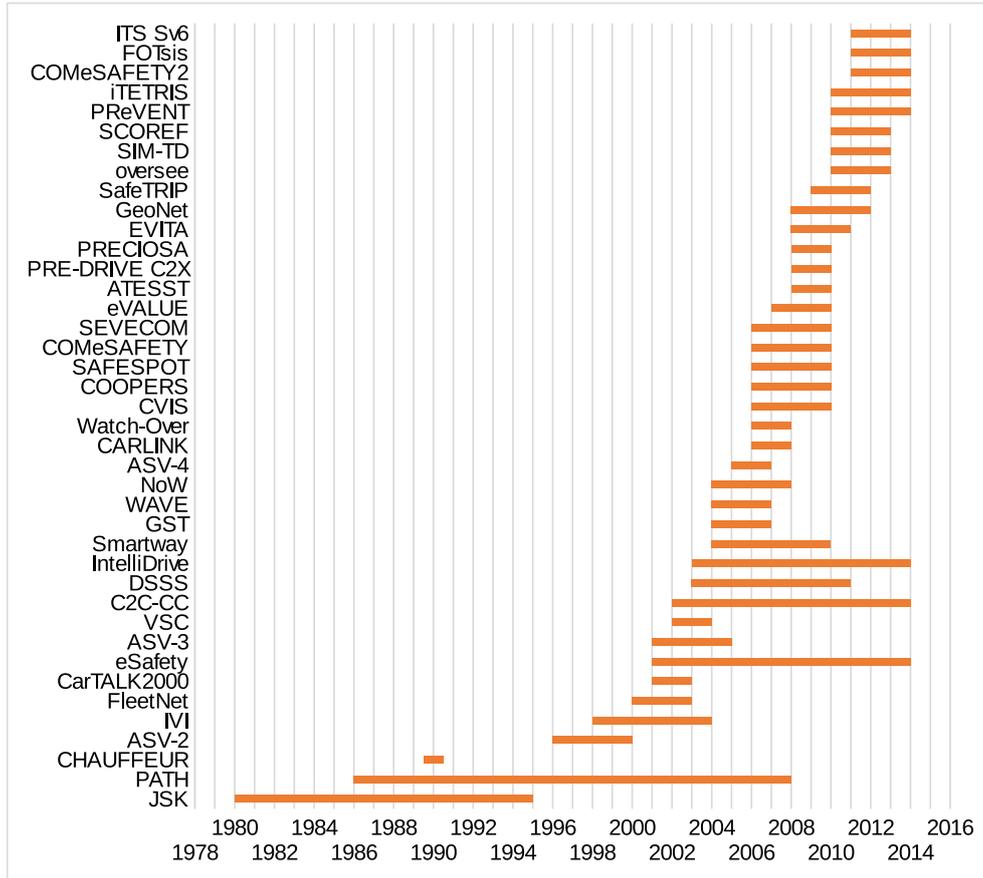


FIGURE 2.3 – Diagramme des durées des projets STIs dans le monde

Il en existe d'autres pour lesquels nous n'avons pas trouvé de date de début et/ou de fin comme : DIRICOM Project (Intelligent Design of Wireless Communication Networks), SEISCIENTOS (Providing adaptive ubiquitous services in vehicular contexts), WiSafeCar (Wireless traffic Safety network between Cars), MARTA (Mobility and Automotion through Advanced Transport Networks), Network on Wheels, aktiv, AutoNomos, Drive-In, etc.

## 2.3 Applications STI

Dans un premier temps, les STIs sont venus répondre à des problématiques liées à la sécurité des usagers de la route et à l'amélioration des performances (sûreté, sécurité, fiabilité, efficacité et flexibilité) des réseaux routiers suite à l'augmentation constante du nombre de véhicules les empreintant. Pour se tourner par la suite vers différents autres domaines d'applications comme l'amélioration du confort de conduite, le divertissement, la publicité, etc.

Les applications STIs se décomposent en trois grandes catégories :

### 2.3.1 Sécurité des usagers

Les applications de sécurité des usagers sont le besoin primaire des ITSs. Elles permettent de gérer la communication autour d'un point de danger (accident, panne, risque météo, etc.) pour prévenir à la fois, les autorités compétentes et les autres usagers de la route de l'existence de ce danger. Les exemples de ce type d'applications sont nombreux :

- Relayage coopératif des alertes de collision
- Notification V2V de la localisation des dangers
- Avertissement de l'approche des véhicules d'urgence
- Localisation des véhicules volés
- Avertissement de panne/pré-collision
- Détections pré-collisions
- Services d'urgence SOS
- Avertissement de zones de travaux
- Avertissement du conducteur d'erreur de direction
- Inspection de la sécurité du véhicule
- Information sur les piétons
- Avertissement de violation des feux de circulation

### 2.3.2 Gestion du trafic

Ce type d'application permet d'améliorer les performances du réseau routier en gérant de manière optimale les flux de véhicules. Ceci permet

de réduire les temps de parcours et de diminuer ainsi les émissions de gaz d'échappement tout en évitant les embouteillages. Quelques exemples sont :

- Amélioration des guidages d'itinéraires/navigation
- Signalement de la vitesse recommandée au niveau des feux verts
- Conduite coopérative
- Assistance d'insertion sur une autoroute

### **2.3.3 Amélioration du confort de la conduite**

Ce type d'applications permet d'améliorer le confort des usagers de la route pour mieux tirer profit de l'habitacle des véhicules, de prévenir la fatigue des conducteurs, etc. Plusieurs exemples sont listés ci-dessous :

- Amélioration de la visibilité
- Localisation de place de stationnement
- Amélioration de guidage et de navigation
- Téléchargement des cartes/ mises à jour / correction GPS
- Amélioration coopérative de position
- Messagerie instantanée entre les véhicules
- Notification des points d'intérêts
- Accès mobile aux données du véhicule
- Maintenance
  - Avis de rappel de sécurité
  - Notification de réparation juste-à-temps
  - Diagnostiques sans fil à distance
  - Mise à jour des logiciels
- Divertissement et autres
  - Access à Internet dans les véhicules
  - Publicité ciblée

## **2.4 Réseaux véhiculaires**

Les réseaux véhiculaires sont une nouvelle classe de réseaux sans fil qui a émergé grâce aux avancées des technologies sans fil et de l'industrie automo-

bile. Les réseaux véhiculaires sont formés spontanément entre les véhicules en mouvement équipés d'interfaces de communication sans fil. Ces réseaux, aussi connus sous l'acronyme VANET pour Vehicular Ad hoc NETworks, sont considérés comme l'application à la vie courante des travaux de recherche menés sur les réseaux sans fil ad hoc MANETs (Mobile Ad hoc NETworks). Les VANETs permettent d'établir des communications entre les véhicules de voisinage immédiat V2V (Vehicle-To-Vehicle) ou entre les véhicules et les équipements d'infrastructures V2I (Vehicle-To-Infrastructure) dans le voisinage immédiat (décrits usuellement comme les équipements en bordure de routes, RSU- RoadSide Units). Les véhicules pouvant être privés, appartenant à des particuliers ou à des entreprises privées ou publiques comme les véhicules de transports en commun, les véhicules d'urgences, de police, etc. Les infrastructures en bordure de routes quant-à-elles peuvent appartenir à l'état, aux opérateurs réseaux, aux fournisseurs de services ou à une intégration entre ses acteurs.

### 2.4.1 Architecture des réseaux véhiculaires

Les avancées récentes dans le domaine des technologies sans fil permettent le déploiement d'architectures dédiées aux réseaux véhiculaires (sur les autoroutes, dans les villes, etc). Ces architectures permettent des communications entre les véhicules dotés d'équipements de communication adéquats. Plusieurs alternatives apparaissent (voir figure 2.4) :

- V2V Vehicle-to-Vehicle, une approche purement ad hoc pour des communications véhicule-à-véhicule à un-saut ou à plusieurs sauts.
- V2I Vehicle-to-Infrastructure, une approche purement centralisée pour des communications de véhicule-à-infrastructure uniquement à un-saut.
- V2R Vehicle-to-Road, une approche hybride permettant à un véhicule de communiquer avec un autre véhicule et/ou avec une infrastructure à un-saut ou à multi-sauts, incluant les V2V et V2I.
- V2D Vehicle-to-device, une approche nouvelle permettant d'accéder depuis un équipement personnel (smartphone, tablette, ordinateur

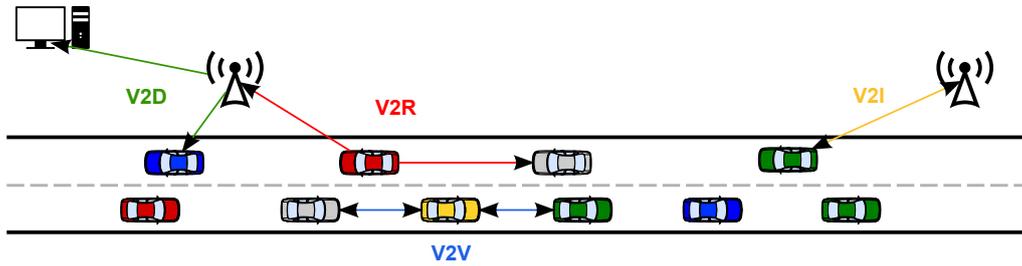


FIGURE 2.4 – Exemple de réseau VANET

personnel, etc) au contenu de la voiture à distance ou à un-saut et vice versa.

## 2.4.2 Propriétés des réseaux véhiculaires

Un réseau véhiculaire est un réseau sans fil dont les nœuds principaux sont des véhicules, soutenu par des entités d'infrastructures. Les interfaces de communication supportées incluent les standards IEEE 802.11p [8], Wifi [13], UMTS [31], LTE [32], WiMAX [33] et les communications satellites. Les nœuds d'infrastructures incluent des unités de bordures de routes (RSUs, RoadSide Units), des stations de base pour cellulaire et satellites. Les véhicules utilisent des interfaces OBU (On-Board Units) permettant à l'utilisateur de voir l'information reçue et d'interagir avec le système. Les RSU sont des entités placées en bordure des routes et utilisent des communications à courtes-distances comme IEEE 802.11p. Les véhicules et les RSUs peuvent communiquer directement via les communications cellulaires comme UMTS, LTE ou la WiMAX. Les satellites sont principalement utilisés (GPS [28], GALILEO [29]) pour les diffusions.

Dans cette thèse nous nous intéressons aux communications inter-véhicules (V2V, vehicle-to-vehicle) et véhicules-à-infrastructure (V2I, vehicle-to-infrastructure) utilisant la norme IEEE 802.11p; les nœuds considérés sont les véhicules. Les réseaux véhiculaires qui incluent uniquement des véhicules et des communications à courte-distance en mode ad hoc sont appelés VANETs (vehicular ad hoc networks).

Les nœuds peuvent communiquer directement avec n'importe quel autre nœud qui se situe dans leurs zone de couverture sans avoir recours à aucune initialisation (authentification, association, etc). À cause de la limite de distance (jusqu'à 1 km) dans les communications IEEE 802.11p et la vitesse de déplacement des véhicules, les communications entre les nœuds sont de type meilleur effort (Best effort) et de nature instable. Les propriétés du canal de transmission changent constamment à cause du mouvement des nœuds et de leur entourage, ainsi que les conditions environnementales comme les grands immeubles qui diminuent la qualité du canal. Les véhicules qui roulent dans le sens opposé de la circulation peuvent avoir des temps de connexion inférieurs à 10s. L'ensemble des voisins avec lesquels un véhicule peut communiquer directement est cependant très dynamique, rendant le routage multi-sauts un vrai défi.

La topologie du réseau est limitée à la topologie de la route. Les RSUs sont placés statiquement sur les bords des routes, alors que les véhicules évoluent sur les routes selon les règles de la circulation routière. Deux environnements distincts sont souvent considérés : urbain et autoroutier. Dans l'environnement urbain, le réseau routier est dense, la vitesse des véhicules est basse et l'espace entre les routes comprend des immeubles, arbres, panneaux de circulation et des obstacles variés. À cause de ces obstacles, les communications sont limitées au réseau routier du fait que le signal sans fil a des difficultés à les traverser. Dans une autoroute par contre, uniquement une seule route (droite à plusieurs voies) est considérée, un tremplin-central sépare souvent les deux directions. Les vitesses sont grandes et il n'y a presque aucun obstacle urbain. Une distinction est toutefois faite pour les régions forestières et celles de dense végétation qui affectent les canaux de transmission.

On suppose que tous les nœuds dans les VANETs connaissent leurs positions avec une précision de moins d'un mètre, donnant la possibilité aux véhicules de connaître leur position à même la voie de circulation qu'elle empreinte [30]. Le positionnement est réalisé en utilisant les systèmes de navigation par satellites (GNSS, Global Navigation Satellite System), comme le GPS et le GALILEO, en combinaison avec d'autres technologies de positionnement comme les gyroscopes intégrés aux véhicules. En ce qui concerne

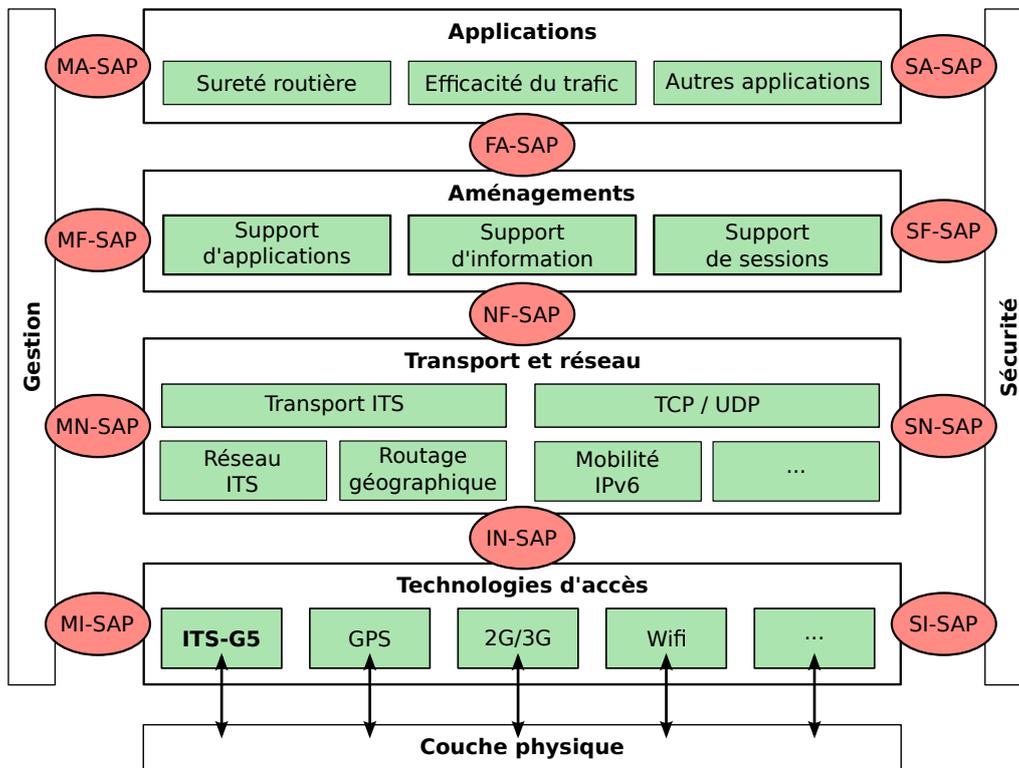


FIGURE 2.5 – Architecture CALM ISO

les RSUs, ils possèdent un emplacement fixe et une connaissance exacte de leurs positions respectives, ce qui pourrait aider les véhicules dans leur positionnement. En outre, les véhicules sont censés avoir une connaissance de la topologie de la route. La synchronisation du temps est également basée sur le GNSS et possède une précision de 10 à 15 ns [34]. En utilisant des capteurs à bord, les véhicules sont capables de connaître leur vitesse, accélération, position et les propriétés liées à leur mobilité.

Les réseaux véhiculaires englobent une grande variété de préoccupations à différents niveaux du modèle OSI. Bien que la normalisation des technologies employées au niveau des couches inférieures a été finalisée, celle des couches supérieures est toujours en cours. Cette thèse suit la piste de la normalisation menée en Europe, qui a adopté l'architecture CALM [35] proposée par l'organisation internationale de normalisation (ISO), figure 2.5. Comme on peut voir sur la figure 2.5, les fonctionnalités sont divisées en différentes

couches ressemblant au modèle OSI. Dans cette thèse, nous nous intéressons au routage géographique utilisant la norme IEEE 80211.p comme couche de liaison de données. Dans la figure 2.5 elle est introduite comme ITS-G5.

### 2.4.3 Propagation des ondes radio

Au niveau de la couche physique, la propagation des ondes radio est le comportement d'un signal une fois qu'il a été transmis par un nœud. Il s'agit d'un facteur essentiel dans la performance des systèmes de communication sans fil. IEEE 802.11p transmet dans la bande de fréquences 5,9 GHz avec des longueurs d'onde d'environ 5 cm. La propagation de ces ondes radio est influencée par de nombreux facteurs environnementaux tels que les obstructions de bâtiments, le feuillage ou des véhicules ainsi que la vitesse des nœuds respectifs. Dans cette section, nous discutons de ces effets de propagation qui ont le plus grand impact sur le comportement de propagation dans un réseau véhiculaire. Notre discussion est principalement basée sur [36].

Les effets de la propagation sont généralement divisés en deux catégories : les effets à grande échelle et les effets à petite échelle. Les effets à grande échelle comprennent la réflexion, diffraction et la dispersion ; ils peuvent être vu sur la figure 2.6. Ils se rapportent tous aux différents chemins qu'un signal peut prendre lorsqu'il se déplace de l'émetteur au récepteur. En raison de ces effets un récepteur peut recevoir plusieurs versions du même signal, tous avec des valeurs différentes en terme de phases d'amplitudes, de fréquence et d'estampillage temporel. Combinées, ces vagues de propagation par trajets multiples peuvent fluctuer rapidement sur de courtes périodes de temps et d'espace. Ces effets à petite échelle sont considérés comme de l'affaiblissement du signal (fading). Un autre effet à petite échelle est le décalage de Doppler. Ci-dessous, nous décrivons brièvement les effets de la propagation mentionnée.

La réflexion se produit lorsqu'une onde radio rencontre une surface beaucoup plus grande que sa longueur d'onde, tel que le sol, des bâtiments, ou

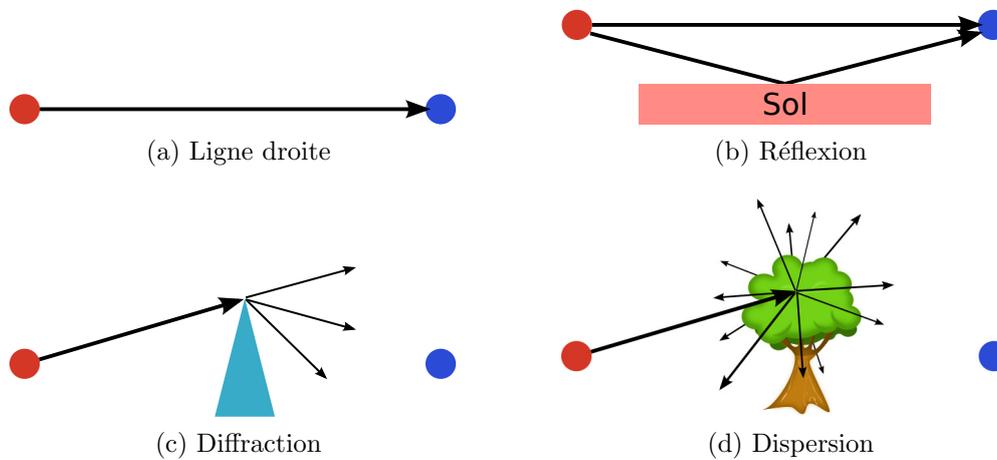


FIGURE 2.6 – Effets de propagation

d'autres véhicules. La quantité d'énergie que l'onde réfléchié contient dépend de la permittivité et de la conductivité des matériaux impliqués, l'angle d'incidence de l'onde et la fréquence d'émission.

Lorsque la trajectoire d'une onde est obstruée par une arête vive, un front d'ondes secondaire est généré à ce stade, appelé diffraction. Ce front secondaire se propage à travers l'espace dans le sens d'origine, mais aussi dans l'autre sens.

La dispersion se produit lorsqu'une onde radio rencontre un objet qui est petit par rapport à sa longueur d'onde, ou possède une surface rugueuse. Lorsque cela arrive, les ondes d'un signal sont reflétés dans des directions aléatoires. Les sources de dispersion peuvent être le feuillage, les plaques de signalisation ou les lampadaires.

Le décalage de Doppler est le décalage de la fréquence d'un signal dû à un déplacement soit de l'émetteur, du récepteur, ou de l'un des objets dans la trajectoire du signal. Dans le cas de trajets multiples, différentes versions du même signal peuvent avoir différents décalages de Doppler, ce qui provoque l'augmentation de la largeur de la bande passante du signal. C'est ce qu'on appelle l'étalement de Doppler.

En raison des effets décrits ci-dessus un récepteur reçoit souvent plusieurs versions d'un même signal, chacun avec des amplitudes différentes,

des décalages de fréquence, des déphasages et des retards. Ces différentes versions sont combinées au niveau du récepteur et peuvent fausser ou faire disparaître le signal résultant. Ceci est appelé évanouissement par trajets multiples. L'évanouissement par trajets multiples peut entraîner des fluctuations rapides malgré des déplacements que sur une courte distance des nœuds. Même si la paire d'émetteur-récepteur est statique, le mouvement des objets sur le trajet du signal peut engendrer sa dégradation.

#### **2.4.4 DSRC**

La norme DSRC (Dedicated Short-Range Communications) est un ensemble de techniques des couches PHY et MAC destinés spécifiquement pour les solutions des STIs non tolérantes au délai. Cette norme IEEE permet d'avoir des canaux de communication sans fil à un-sens ou à double-sens sur un périmètre de 1000m avec un débit de données brute allant jusqu'à 27Mbps. Elle fonctionne sur une bande de fréquences autorisée, par contre, ces bandes ne sont pas compatibles d'un pays à un autre.

##### **a. Au Japon**

Les premières études sur DSRC ont commencées au courant de l'année 1993 au sein du groupe de conduite coopérative du projet JSK. La bande de fréquence des 5.8GHz était utilisée pour la transmission des données.

##### **b. Aux États-Unis d'Amérique**

Depuis 1995, la FCC a adopté la norme ASTM E2213-02 pour les communications et les échanges entre les véhicules et les équipements en bordures de routes. En 1999, la commission fédérale des communications FCC a établi une autorisation et des règles de service pour la norme DSRC en allouant une bande passante de 75MHz sur la bande de fréquence des 5.9GHz. En 2003, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) approuve la norme DSRC basée sur la couche PHY IEEE 802.11a et la couche MAC IEEE 802.11 et le publie plus tard sous la norme ASTM E2213-03, voir la figure 2.7.



FIGURE 2.7 – Distribution du spectre DSRC en canaux aux USA

### c. En Europe

L’Institut Européen des normes de télécommunications ETSI a alloué en 2008 une bande passante de 30 MHz sur la bande de fréquences des 5.9GHz aux STIs.

Le tableau 2.4 résume les différentes caractéristiques de DSRC dans chacun des trois pôles précédents.

	<b>Japon (ARIB)</b>	<b>Europe (CEN)</b>	<b>America (ASTM)</b>
<b>Duplexage</b>	OBU : Half-duplex RSU : Full-duplex	Half-duplex	Half-duplex
<b>Système de communication</b>	Actif	Passif	Actif
<b>Bande de fréquence radio</b>	5.8GHz	5.8GHz	5.9GHz
<b>Bande passante</b>	80MHz	20MHz	75MHz
<b>Canaux</b>	Descendant : 7 Montant : 7	4	7
<b>Séparation des canaux</b>	5MHz	5MHz	10MHz
<b>Taux de transmission des données</b>	Descendant / Montant : 1 ou 4Mbps	Descendant : 500kbps Montant : 250kbps	Descendant / Montant : 3 à 27Mbps
<b>Portée</b>	30m	15 à 20m	1000m
<b>Modulation</b>	2-ASK (1Mbps) 4-PSK (4Mbps)	RSU : 2-ASK OBU : 4-PSK	OFDM

TABLE 2.4 – Comparaison de DSRC au Japon, Europe et EUA

- ARIB : Association of Radio Industries and Businesses
- CEN : European Committee for Standardization
- ASTM : American Society for Testing and Materials
- OBU : Onboard Unit
- RSU : Roadside Unit
- ASK : Amplitude Shift Keying
- PSK : Phase Shift Keying
- OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

### 2.4.5 Norme IEEE 802.11p

La norme IEEE 802.11p est un amendement/modification du standard IEEE 802.11 connu sous l'appellation Wifi. Elle est spécifiquement conçue pour être utilisée dans un environnement véhiculaire. Tous les amendements

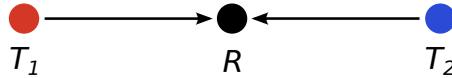


FIGURE 2.8 – Le problème de nœud caché. Deux émetteurs qui sont hors de leur zones de couvertures respectives transmettent simultanément un message à un récepteur situé au milieu, provoquant une collision au niveau de la couche de liaison.

sont spécifiés dans [37]. Le standard ITS-G5 [38] se base sur le IEEE 802.11p et donne principalement des détails sur le mode de fonctionnement de IEEE 802.11p dans un réseau véhiculaire, comme le nombre de canaux à utiliser. Dans la suite de cette thèse, nous nous référerons uniquement à la norme IEEE 802.11p.

L'amendement IEEE 802.11p se concentre principalement sur la capacité à faire face à la grande vitesse de nœuds. La couche physique, par exemple, a été rendue plus robuste pour être en mesure de faire face aux problèmes générés par le mouvement des nœuds. En outre, seul le mode ad-hoc est pris en charge, c'est-à-dire, les nœuds communiquent directement entre eux sans utilisation d'un point d'accès (AP) intermédiaire. Puisque les temps de connexion entre les nœuds sont généralement très courts, aucune authentification ou association n'est nécessaire, car cela prendrait trop de temps. Un nœud peut donc échanger des messages directement avec un autre nœud situé dans sa zone de couverture.

Les nœuds accèdent au support sans fil en utilisant le mécanisme EDCA (Enhanced Distributed Channel Access). Dans le standard IEEE 802.11 il existe aussi le mécanisme DCF (Distributed Coordination Function) et le PCF (Point Coordination Function) mais ils ne sont pas utilisés dans le IEEE 802.11p. Le mécanisme Request-To-Send/Clear-To-Send (RTS / CTS) a été abandonnée, car son efficacité est limitée lorsque le mouvement de nœud est élevé. IEEE 802.11p est donc vulnérable au problème des nœuds cachés, c'est-à-dire, un nœud recevant une transmission à partir d'un expéditeur peut être entravé par une transmission à partir d'un second émetteur qui est hors de la



FIGURE 2.9 – Mécanisme d'accès EDCA pour trois diffusions

zone de couverture du premier. Comme les deux émetteurs sont hors de leurs zones de couvertures respectives, ils ne sont pas conscients du problème, mais la collision résultant de deux transmissions peuvent empêcher le récepteur de recevoir des données. Le problème de nœud caché est illustré sur la figure 2.8. Il est une source majeure de dégradation des performances dans les VANETs [39].

Le mécanisme de contrôle d'accès au canal EDCA fonctionne comme suit. Le temps est divisé en slots de  $13\mu s$ . Les slots time sont non synchronisés même si les nœuds ont tendance à synchroniser mutuellement leurs intervalles de temps en raison de la circulation [40]. Quand un nœud possède un message à envoyer, il commence d'abord par écouter si le canal est occupé ou libre. Dans le cas où le canal est libre, le nœud s'assure de la disponibilité du canal en attendant encore durant un intervalle de temps défini, appelé AIFS (Arbitrary Inter-Frame Space), si le canal est toujours libre alors il commence immédiatement à transmettre. Si le canal est occupé, le nœud choisi un nombre aléatoire à partir d'un intervalle défini et commence le décompte une fois que le canal devient libre pour au moins une durée équivalent à un AIFS. Si le décompte atteint Zero, le nœud commence à transmettre au

début du prochain slot time. Dans le cas où la transmission est en diffusion (broadcast), le nœud aura terminé la communication après la fin de la transmission. Dans le cas où la transmission est en unicast, le nœud devra attendre la réception de l'acquittement ACK durant un temps définis. S'il ne reçoit pas d'acquittement, il devra encore rentrer en décompte d'un nombre aléatoire tiré dans un intervalle plus grand. La figure 2.9 illustre à la fois les mécanismes de transmission unicast et broadcast. La station A trouve le canal libre pour une durée de AIFS en secondes et commence à transmettre immédiatement. Les stations B et C écoutent le canal au moment où A transmet ; le trouvant occupé, elles tirent chacune un nombre aléatoire et commencent le décompte une fois que le canal devient libre pour une durée de AIFS en secondes. La station B a tirée un nombre aléatoire inférieur, son décompte arrive alors à zéro et commence à transmettre tant-dis que la station C arrête le décompte vu que le canal est maintenant occupé par la transmission de B.

Le mécanisme EDCA supporte les messages prioritaires dans quatre différentes catégories d'accès (AC). Chaque catégorie de plus haute priorité possède un AIFS plus court et un intervalle de décompte plus petit. Les messages prioritaires ont ainsi plus de probabilité d'accès au canal.

Différents canaux ont été alloués à la norme IEEE 802.11p en Europe et aux USA. La figure 2.10 présente les bandes de fréquences allouées pour les deux régions. Dans les deux cas un seul canal d'accès et plusieurs canaux de services sont définis. Le canal de contrôle est utilisé pour les messages de hautes priorités comme les messages de sécurité et est régulièrement écouté par chaque nœud [41]. Les standards actuels supposent l'utilisation d'un seul émetteur-récepteur radio et poussent ainsi le nœud à basculer entre les canaux de services et le canal de contrôle. Des travaux de recherche sont en cours pour la conception d'un équipement supportant plusieurs émetteur-récepteurs. Dans ce cas un émetteur-récepteur est dédié au canal de contrôle et l'autre pour basculer entre les canaux de services.

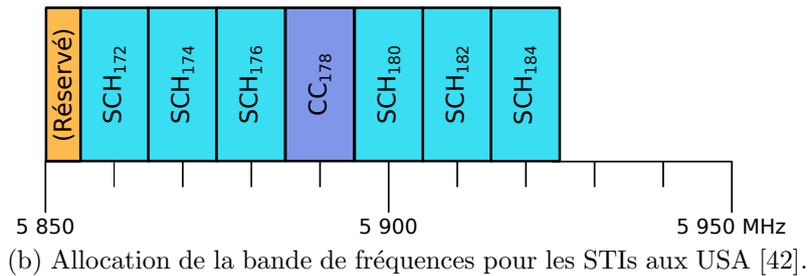
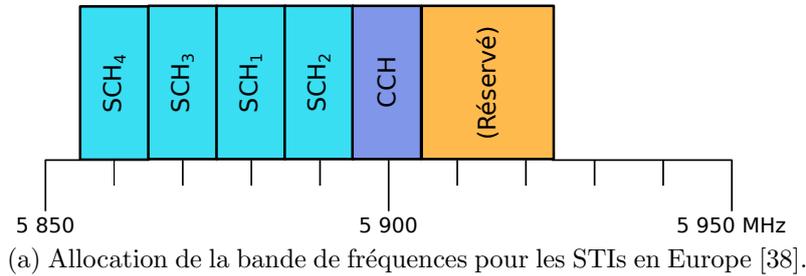


FIGURE 2.10 – Les bandes de fréquences allouées pour l’usage de la norme IEEE 802.11p pour les applications ITS en Europe et aux USA.

## 2.5 Simulation des réseaux véhiculaires

Il existe deux types de simulateurs pour les réseaux véhiculaires, les simulateurs de réseaux et les simulateurs de trafic. Ils sont tous les deux nécessaires pour réaliser des simulations réalistes ou du moins proches des conditions de simulations qu’on pourrait souhaiter.

Un simulateur de trafic permet de traiter tout ce qui est en rapport avec le mouvement des véhicules sur un réseau routier donné. Souvent, ce type de simulateur offre tous les outils nécessaires pour la réalisation des cartes routières (spécification des lignes d’une voie de circulation et sa direction, le placement des feux de signalisation et des passages piétons, ajout d’un rond-point, la vitesse admise sur chaque tronçon de route, etc) et permet de gérer également la mobilité des véhicules sur le réseau routier créé (spécification des caractéristiques des véhicules comme la longueur et la vitesse maximum, le départ et l’arrivée selon des modèles de mobilité précis, générer des accidents, etc). Un exemple de simulateur de trafic le plus utilisé est SUMO [43, 44, 45, 46].

Le simulateur de réseau quant-à-lui permet de gérer les communications

entre les nœuds (véhicules) du réseau. Il permet également d'évaluer les protocoles de communication dans un scénario donnée selon des paramètres plus ou moins définis par l'utilisateur. Dans la littérature, il existe plusieurs simulateurs réseaux, propriétaires et libres. Le tableau 2.5 dresse un comparatif des trois simulateurs réseau libre les plus utilisés pour la simulation des réseaux véhiculaires.

Caractéristiques	NS-3	NS-2	OMNET++
Modifiabilité et extensibilité	Bon	Moyen	Bon
Modules représentant la couche OSI	Bon	Moyen	Moyen
Représentation de la topologie	Bon	Moyen	Bon
Observabilité	Bon	Faible	Bon
Modèle de mobilité	Bon	Bon	Moyen
Passage à l'échelle	Bon	Moyen	Bon
Facilité d'utilisation	Bon	Faible	Bon
Stabilité	Bon	Moyen	Moyen
Performances du moteur de simulation	Bon	Moyen	Moyen
Simulation en temps réel	Bon	Bon	Moyen
Mémoire en fonction de la taille du réseau	Bon	Moyen	Moyen
Mémoire en fonction de la file d'attente	Bon	Moyen	Moyen

TABLE 2.5 – Tableau comparatif de trois simulateurs VANETs

Pour finir, afin de réaliser une simulation d'un réseau véhiculaire, il est nécessaire de coupler un simulateur de trafic à un simulateur réseau. Dans notre cas, nous avons travaillé dans le cadre de cette thèse avec la combinaison SUMO et NS-3.

## 2.5.1 Les métriques de performances

### Taux de livraison de paquet (Packet delivery ratio)

C'est un facteur très important pour évaluer les performances d'un protocole de routage dans n'importe quel type de réseau. Ces performances dépendent de différents paramètres choisis lors de la simulation. Les facteurs les plus importants sont la taille du paquet, le nombre de nœuds, la portée de communication et la structure du réseau. On peut obtenir le taux de livraison

de paquet "PDR" à partir du nombre total de paquets de données reçus par le destinataire divisé par le nombre total émis par la source. Plus le résultat obtenu par l'équation 2.1 est grand, plus les performances sont meilleures.

$$PDR = \frac{\sum(\text{nbr de paquets reçus par la destination})}{\sum(\text{nbr de paquets envoyés par tous les noeuds sources})} \quad (2.1)$$

### **Le délai moyen de bout-en-bout (End-to-end delay)**

Le délai moyen de bout-en-bout est le temps moyen qu'il faut pour qu'un paquet de données atteigne la destination. Il est obtenu en comptant les délais de messages reçus de bout-en-bout avec succès. Cela inclue tous les retards éventuels causés par la mise en mémoire tampon pendant la latence de découverte de route, faisant la queue à la file d'attente de l'interface, les retards de retransmission, la propagation et les temps de transfert. Plus le délai moyen est petit plus les performances augmentent. L'équation 2.2 illustre mathématiquement comment calculer ce temps.

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Tr_i - Ts_i) \times 1000 [ms] \quad (2.2)$$

Où  $n$  est le nombre total de paquets reçus,  $Tr$  et  $Ts$  sont respectivement les temps de réception et de transmission du paquet courant.

### **Paquets perdus**

C'est le nombre de paquets qui n'ont pas atteint la destination par rapport aux nombre de paquets générés par la source, cela est traduit mathématiquement par l'équation 2.3.

$$D = \frac{\text{nbr paquets envoyés} - \text{nbr paquets reçus}}{\text{nbr paquets envoyés}} \quad (2.3)$$

### Le débit moyen

L'unité de mesure de cette métrique est paquet/unité TIL Time Interval Length, où TIL est la longueur de l'intervalle de temps. Cela est traduit mathématiquement par l'équation 2.4.

$$\text{débit moyen} = \frac{\text{taille reçue}}{(\text{temps final} - \text{temps initial})} \times \frac{8}{1000} \quad (2.4)$$

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté ce qu'est un système de transport intelligent STI. Nous avons vu que les STIs emploient différents moyens pour augmenter les performances des réseaux véhiculaires, comme l'usage actuel des panneaux d'information à messages variables PMVs. Dans un futur proche, les STIs permettront des communications inter-véhiculaires CIVs pour l'échange d'informations comme des informations sur le trafic ou sur l'état de la route. Un véhicule sera équipé de systèmes de communication sans fil qui lui permettront de communiquer avec un autre véhicule (V2V) ou avec une infrastructure en bordure de route (V2I). Un réseau de véhicules permettant des communications V2V ou V2I est appelé VANET pour Vehicular Ad hoc Network. Par la suite, nous avons présenté dans ce chapitre les propriétés des VANETs, à savoir, la propagation des ondes, les canaux de transmission mis à disposition des réseaux véhiculaires sous l'appellation DSRC pour permettre une mise en place d'expérimentations réelles. Nous avons présenté également la couche MAC IEEE 802.11p qui permet de gérer l'accès au canal pour chaque équipement de communication. Pour finir, nous avons proposé une étude comparative des simulateurs réseaux libre les plus utilisés dans la recherche, ce qui nous a permis de choisir NS-3 pour réaliser nos simulations à la suite de nos travaux.

## Chapitre 3

# Routage dans les réseaux VANETs

Dans ce chapitre, nous passons en revue le routage dans les réseaux sans fil. L'objectif principal du routage est d'assurer le relayage des paquets de la source à la destination en respectant un minimum de conditions comme le délais de bout-en-bout ou l'utilisation des ressources du réseau. Plusieurs protocoles de routage dédiés aux réseaux mobiles sans fil ad hoc MANETs ont été adaptés aux réseaux de véhicules sans fil ad-hoc VANETs. Cependant, les vitesses élevées des véhicules et les informations dynamiques qu'ils s'échangent conduisent à de faibles performances. Par exemple, la nature dynamique de la topologie dans les réseaux VANETs rend le processus de recherche et de maintien des routes très contraignant. Ceci a poussé les chercheurs à proposer des solutions plus adaptées aux réseaux VANETs. L'une des catégories des protocoles de routage les plus prometteuses dans les réseaux VANETs est le routage géographique qui suppose que chaque véhicule est en mesure de connaître sa position géographique à tout moment. Ceci permettra de le joindre à tout moment sans avoir à maintenir des tables de routage volumineuses.

Pour approfondir nos connaissances concernant le routage dans les réseaux véhiculaires VANETs, nous allons passer en revue le routage basé sur la topologie pour les réseaux MANETs dans la section 3.1. Nous allons ensuite

introduire le routage géographique pour les réseaux VANETs dans la section 3.2, où nous allons présenter les résultats de comparaison entre deux protocoles, un basé sur la topologie et l'autre géographique. Ceci nous a permis de conforter notre choix de travailler sur le routage géographique. La section 3.3 présente le routage géographique de type géocast dans le détail, liste plusieurs protocoles existants dans la littérature et apporte une comparaison à ces protocoles. La section 3.4 conclut ce chapitre.

### **3.1 Routage dans les réseaux MANETs**

L'une des caractéristiques majeures des réseaux mobiles sans infrastructure (MANETs - Mobile ad hoc Networks) est que chaque nœud (station) de ce réseau joue le rôle de routeur ou de relais pour acheminer les données vers un nœud destinataire. Dans ce type de réseaux, les nœuds sont mobiles, changent constamment de position et passent d'un réseau à un autre. Les exemples d'applications de ces réseaux sont nombreux. Ils sont déployés par exemple en situations d'urgence comme les catastrophes naturelles ou en temps de guerre, lors des missions d'exploration ou simplement pour du divertissement pour une partie de jeux en réseau non improvisée. Ils sont déployés dans des endroits où il n'existe pas d'infrastructure ou que celle en place n'est plus en mesure d'assurer son service. De ce type de réseau découlent d'autres réseaux à usages spécifiques comme les réseaux de capteurs sans fil WSN utilisés également lors de situations d'urgences et de supervision et les réseaux véhiculaires VANETs qui sont le sujet de cette thèse.

Beaucoup de protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux MANETs. Ils sont classifiés dans la littérature en trois grandes classes : protocoles de routage proactifs, réactifs et hybrides, voir figure 3.1.

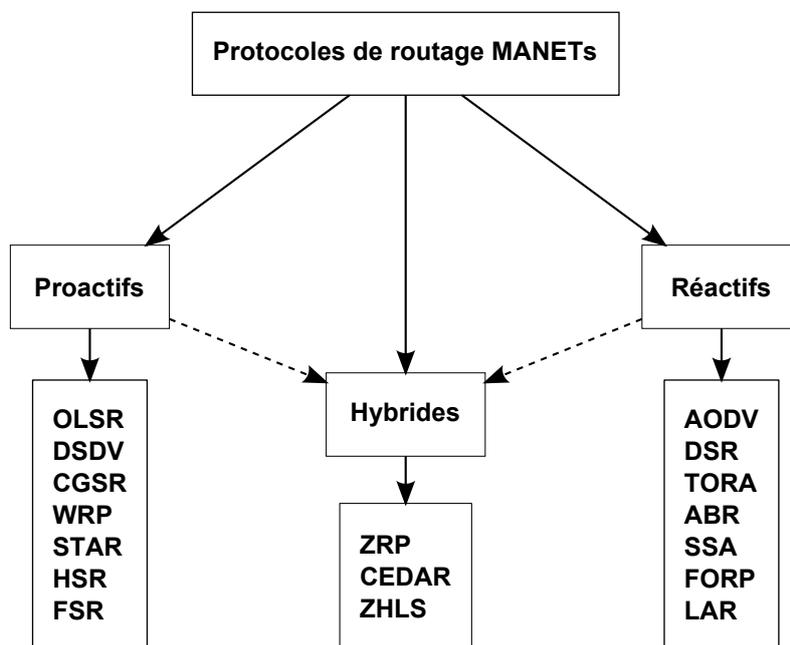


FIGURE 3.1 – Protocoles de routage MANETs

### 3.1.1 Protocoles de routage basés sur la topologie

#### 3.1.1.1 Protocoles de routage proactif ou Table-Driven

Dans cette classe de protocoles, la liste des destinations et leurs chemins sont maintenues à jour par des échanges périodiques des tables de routage à travers le réseau. Cette catégorie de protocoles s’efforce toujours de conserver des informations de routage cohérentes et mises à jour sur chaque nœud du réseau [47]. Les protocoles de routage proactifs utilisent des algorithmes dits à état de liens pour diffuser les informations concernant les liens vers les voisins. Le principal inconvénient des protocoles de routage proactifs est que tous les nœuds du réseau doivent maintenir constamment leurs tables de routage à jour. Ce qui les rend peut performants dans des réseaux à forte mobilité des nœuds ou à topologie variable. Quelques exemples de ces protocoles sont : OLSR (Optimized Link-State Routing Protocol) [48] et DSDV (Distance-Vector Routing Protocol) [49].

### **3.1.1.2 Protocoles de routage réactifs ou On-Demand**

Ce type de routage est souvent connu comme le routage à la demande où le routage est initié par la source au moment où celle-ci souhaite transmettre des paquets. Le principal avantage des protocoles réactifs est qu'ils imposent moins de frais généraux pour router les paquets dans un réseau, mais en même temps, ils sont également confrontés à un temps de latence élevé lors des processus de recherche de routes. Les diffusions excessives des paquets de contrôle peut parfois conduire à une surcharge, voir blocage du réseau. Contrairement aux protocoles proactifs, tous les nœuds ne doivent pas tenir à jour leurs informations de routage. AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing) [48], DSR (Dynamic Source Routing) [50] ou TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm) [51] sont des exemples de protocoles de routage réactifs.

### **3.1.1.3 Protocoles de routage hybrides**

Les protocoles de routage hybrides combinent les avantages des deux protocoles de routage proactifs et réactifs. Le routage est établi initialement avec des itinéraires réalisés au préalable de manière proactive puis répond à la demande et de manière réactive aux autres nœuds. Un des protocoles de routage hybrides est ZRP (Zone Routing Protocol) [52].

## **3.1.2 Aperçu des protocoles de routage OLSR et AODV**

### **3.1.2.1 OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)**

OLSR [53] est un protocole proactif dans lequel chaque nœud diffuse périodiquement sa table de routage. Ceci permet à chaque nœud de construire une vision globale de la topologie du réseau. La nature épisodique de ce protocole crée une grande quantité de frais généraux. Afin d'y remédier, il limite le nombre de nœuds mobiles qui relaient le trafic. Pour ce faire, il utilise des nœuds MPRs (Multi Point Relays) qui relaient les messages et permettent d'optimiser la procédure de diffusion. Les nœuds mobiles qui sont sélectionnés en tant que MPRs peuvent relayer les messages de contrôle

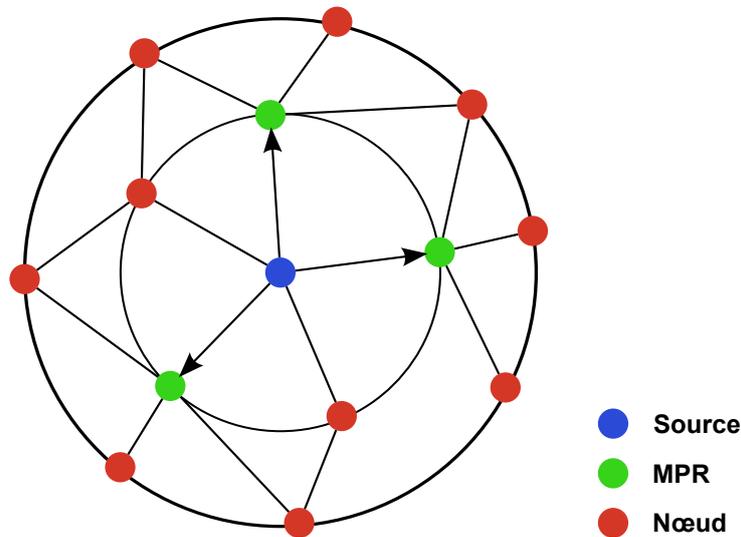


FIGURE 3.2 – Sélection des MPRs

et réduire ainsi les frais généraux. Les MPRs sont choisis par un nœud de sorte qu'il puisse atteindre chaque voisin à deux sauts par au moins un MPR. La figure 3.2 illustre un exemple de réseau avec un nœud source central qui a entamé son processus de sélection des nœuds MPRs parmi ses voisins à un saut. Ceux-ci lui permettent d'accéder de manière optimisée à ses voisins à deux sauts.

La mobilité des nœuds génère une modification dans la topologie du réseau, les routes sont ainsi modifiées. Des messages de contrôle de topologie (TC) sont diffusés à travers le réseau. Tous les nœuds mobiles maintiennent une table de routage qui contient les routes à tous les nœuds de destination accessibles. Un nœud prend connaissance de la rupture d'un lien quand un nœud intermédiaire diffuse ses prochains paquets.

### 3.1.2.2 AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing)

AODV est un protocole de routage qui adopte une approche purement réactive et capable à la fois de routage unicast et multicast. Il met en place une requête de demande de route au début d'une session de communication

au moment où un nœud source souhaite envoyer des données à un nœud destination. Une fois trouvée, la route est maintenue tout au long de la communication. Si une route est détectée comme étant rompue, un nouveau processus de demande de route est initié. AODV adopte un mécanisme très différent de OLSR pour maintenir les informations de routage. Il utilise des tables de routage traditionnelles avec une entrée pour chaque destination [54, 55].

Le processus de recherche de route est réalisé grâce aux requêtes de demande de route Route-Request RREQ et Route-Reply RREP. Quand un nœud source a besoin d'une route vers une destination pour laquelle il ne possède pas encore de route, il diffuse le RREQ dans le réseau. Les nœuds qui reçoivent ce paquet mettent à jour leurs informations concernant la source (mettent à jours leurs tables de routage). Si un nœud qui reçoit le paquet est la destination ou qui connaît une route vers la destination, il envoie un RREP (avec un numéro de séquence supérieure ou égal à celui du RREQ) en unicast à la source. En même temps que le RREP se propage pour atteindre la source, les nœuds qui le reçoivent ajoutent une entrée vers cette destination dans leurs tables de routage. Dans le cas contraire il rediffuse le RREQ.

Une route est considérée active s'il y a des paquets qui la traversent périodiquement. Une fois que la source termine d'envoyer ses paquets et qu'un temporisateur de maintien de route expire, la route est effacée des tables de routage des nœuds intermédiaires. Si une route rompt quand elle est active, le nœud qui détecte la rupture envoie un Request-Error RERR vers la source pour l'informer. Après réception du RERR, si la source désire toujours envoyer des paquets, elle réinitie la procédure de découverte de route.

### 3.1.2.3 Avantages et limites pour les VANETs

OLSR est un protocole de routage à plat, il n'a pas besoin de système de gestion central pour gérer le processus de routage. Les liens sont fiables pour les messages de contrôle, puisque les messages sont envoyés périodiquement. Ce protocole est le mieux adapté aux réseaux haute densité et à faible mobilité des nœuds et permet d'éviter la latence d'une procédure de recherche

de route ponctuelle lors de la transmission des paquets.

Cependant, une des limites de ce protocole est qu'il nécessite que chaque nœud envoie périodiquement des informations de mise à jour de la topologie tout au sein de l'ensemble du réseau, ceci génère une augmentation de l'utilisation des ressources du réseau (de la bande passante). Cependant, le processus de maintien à jour des tables de routage est minimisé par l'utilisation des MPRs.

Le principal avantage du protocole AODV est que les routes sont établies à la demande et que des numéros de séquences sont utilisés pour trouver la dernière route vers la destination. Il prend également en charge les transmissions de paquets unicast et multicast même pour les nœuds en mouvement constant. Il répond rapidement aux changements de topologie du réseau et permet la mise à jour uniquement des nœuds qui peuvent être affectés par ce changement, en utilisant le message RERR. Les messages Hello, qui sont responsables de l'entretien de la route sont également limités pour qu'ils ne créent pas de surcharge inutile sur le réseau.

Les limites du protocole AODV est qu'il est possible qu'une route valide soit expirée et la détermination d'un temps d'expiration raisonnable est difficile. La raison derrière cela est que les nœuds sont en mobilité et que leur taux d'envoi peuvent être très différents. Une route découverte avec AODV peut ne pas être la meilleure après un certain temps. Cette situation peut se produire en raison de la congestion du réseau ou des caractéristiques fluctuantes de liaisons sans fil.

La nature très dynamique de la topologie des réseaux VANETs rend le routage proactif inefficace à cause du nombre de messages de maintien des tables de routage que le déplacement des véhicules génère. Les protocoles de routage réactifs restent une solution pour assurer le routage dans les réseaux VANETs, mais ne répondent pas exactement aux exigences des applications de ce type de réseau. Il existe néanmoins une catégorie de protocoles de routage dits géographiques qui permet de remédier au problème de la position des nœuds dans le réseau et à celui de la déconnexion fréquente.

## 3.2 Routage géographique

Le routage géographique est plus récent que le routage topologique (réactif ou proactif). Il a reçu une attention particulière en raison de l'amélioration significative que peut produire l'information géographique sur les performances du routage. Dans le routage géographique, il n'est pas nécessaire qu'un nœud exécute des fonctions de maintien de la topologie au-delà de son voisinage à un saut [56]. Par conséquent, le routage géographique est plus adéquat pour des réseaux à large-échelle. De plus, il est caractérisé par la faible utilisation de la mémoire sur les nœuds du fait que l'information est maintenue localement.

En général, le routage géographique est composé de deux éléments principaux : un service de localisation et un processus de transfert géographique. Le service de localisation détermine la position de la destination du paquet, afin d'améliorer le processus de calcul d'itinéraire pour créer le chemin d'accès au nœud source, ceci en utilisant les nœuds intermédiaires. Par conséquent, la position de la destination du paquet peut être ajoutée dans l'en-tête du paquet de telle sorte que les nœuds intermédiaires puissent savoir vers quel endroit le paquet est destiné [57].

### 3.2.1 Classification

La meilleure manière de classer les protocoles de routage géographiques est par type de routage (unicast, broadcast ou Geocast). Une autre façon de les classer est l'utilisation que fait le protocole des informations de position (transmission de paquets, sélection de la route, formation de convois, formation de cellules ou transmission d'une requête de route). Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons la classification par type de routage et pour chaque protocole nous présenterons la façon dont le protocole utilise l'information géographique.

Le routage géographique est une forme d'adressage bien adapté aux réseaux véhiculaires parce que les données (telles que les informations du trafic) sont souvent utiles dans une région spécifique. La forme de la zone de destination peut être un cercle, une ellipse ou un carré [58].

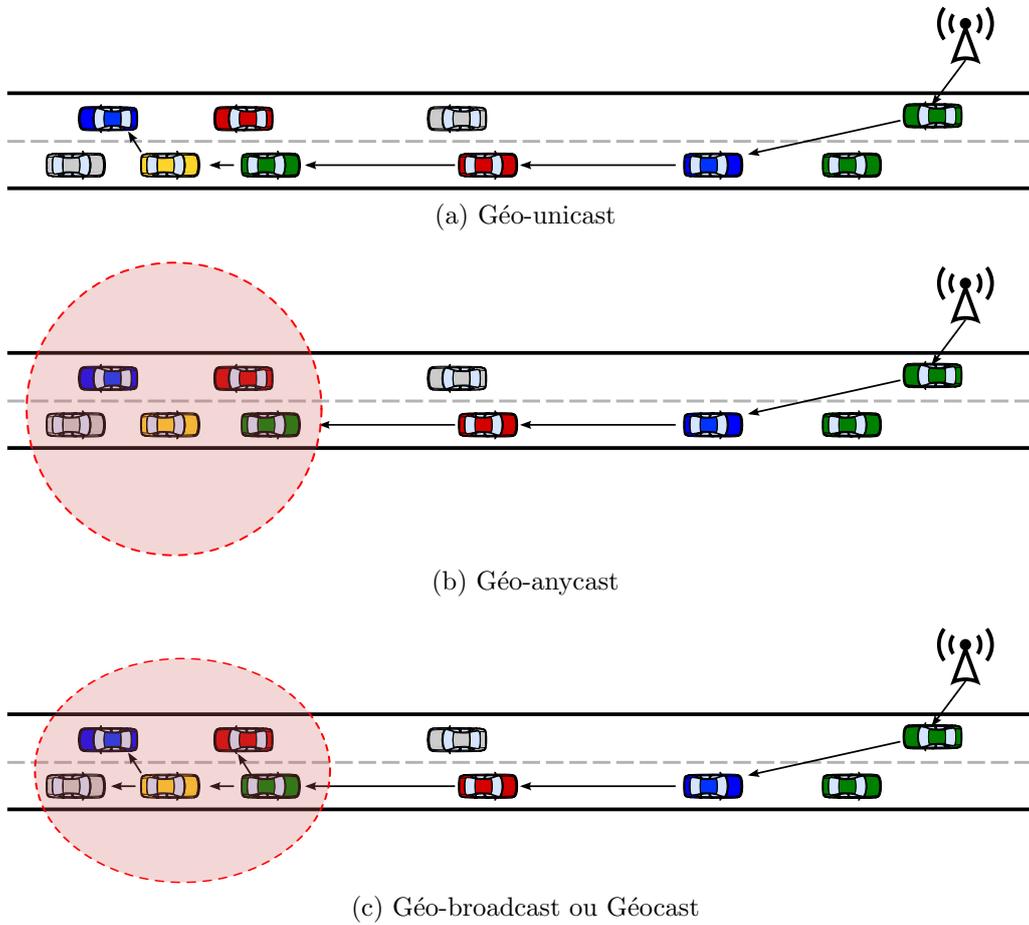


FIGURE 3.3 – Catégories de routage géographique

Dans le contexte des réseaux véhiculaires, quatre catégories de routage géographique existent : géo-unicast (Geo-unicast, figure 3.3a), géo-multicast (Geo-anycast, figure 3.3b), Géocast (Geo-broadcast, figure 3.3c) et le géocast temporel (abiding Geo-broadcast) [59]. Les trois premiers types de géocast ont été standardisés par l'institut Européen de normalisation des télécommunications (ETSI, European Telecommunications Standards Institute) [1]. Dans les trois premières catégories, l'adressage est défini comme la combinaison de la zone de destination géographique et l'identifiant du nœud ; pour le géocast temporel l'information du temps est aussi utilisée [60]. Avec Geo-unicast, l'information est envoyée à un nœud spécifique situé dans une zone de desti-

nation au moment où l'information arrive à cette zone de destination. Dans le Géo-anycast, l'information est destinée à n'importe quel nœud situé dans la zone de destination au moment où le message y arrive. Pour le géo-broadcast appelé également Géocast, l'information est envoyée à tous les nœuds situés dans la zone de destination au moment où le message y arrive. Avec le géo-broadcast temporel, l'information est envoyée à tous les nœuds situés dans la zone de destination pendant une certaine période de temps. La figure 3.3 illustre ces différentes catégories de routage.

Le nœud source peut ou pas être dans la zone de destination au moment de l'envoi de son message. Si n'y est pas, alors le message doit être acheminé jusqu'à la zone de destination en utilisant une technique de routage géographique multi-sauts. Ceux-ci sont présentés dans la prochaine section.

## **3.2.2 Routage géographique Unicast**

### **3.2.2.1 GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)**

GPSR est probablement le protocole de routage géographique le plus connu pour les VANETs. Il utilise les positions des relais et de la destination contenue dans un paquet pour prendre des décisions lors du processus de relaiage. La position de la destination et les positions du nœud relais à un saut sont suffisantes pour prendre des décisions de relaiage correctes, sans aucune autre information de la topologie du réseau. Dans ce protocole [61], les auteurs supposent que tous les nœuds mobiles connaissent leurs positions respectives à tout moment, soit à partir d'un appareil de géolocalisation comme GPS ou prochainement Galileo, si à l'extérieur, ou par d'autres moyens comme les stations de base dans le cas de tunnels, etc. Elles supposent également l'accessibilité d'un canal radio bidirectionnelle. Enfin, ils supposent qu'une source est capable de déterminer l'emplacement de la destination d'un paquet, pour être en mesure de lui adresser des paquets.

La transmission des paquets dans GPSR se fait grâce à deux méthodes : le greedy forwarding, qui est utilisée à chaque fois que possible et le perimeter forwarding, qui est utilisé dans les régions où la première méthode ne peut pas être appliquée.

### a. Greedy forwarding

Un nœud de retransmission/relayage peut faire localement un choix gourmand (greedy) optimal dans le choix du prochain saut pour un paquet. Le choix localement optimal du prochain saut est le voisin le plus proche géographiquement à la destination du paquet. Cette technique est répétée de manière récursive jusqu'à ce que la destination soit atteinte.

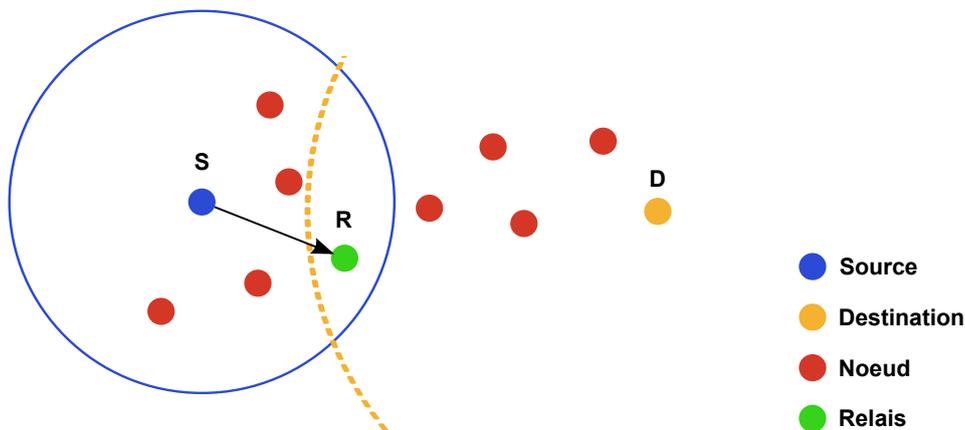


FIGURE 3.4 – Technique du Greedy Forwarding

La figure 3.4 ci-dessus représente un exemple de choix gourmand du prochain saut. Ici, le nœud S reçoit ou génère un paquet destiné à D. La zone de couverture de S est désignée par le cercle plein de couleur bleue autour de S et l'arc dont le rayon est égal à la distance entre R et D est représenté par une ligne discontinue. S relaye le paquet à R, car la distance entre R et D est inférieure à celle entre D et n'importe quel autres voisins de S. Ce processus de transfert gourmand se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne D.

Périodiquement, chaque nœud transmet un signal (beacon) sur l'adresse MAC de diffusion, ne contenant que son propre identifiant et sa position. Ce processus fournit pour tous les nœuds les positions de leurs voisins. Il existe des topologies dans lesquelles la seule voie qu'un paquet peut empreinter vers une destination nécessite un chemin temporairement plus loin en terme de distance géométrique de la destination. Un exemple d'une telle topologie est représenté dans la figure 3.5 suivante.

Sur cette figure, S est plus proche de D que son voisin y. Ainsi le chemin

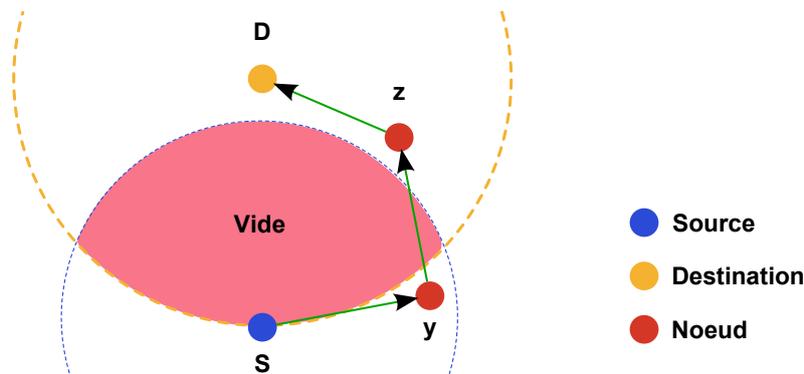


FIGURE 3.5 – Scénario d'un maximum local

$(x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow D)$  existe vers  $D$ ,  $S$  ne choisira pas de transmettre à  $y$  avec la technique du greedy forwarding, mais comme  $S$  est le maximum local dans son entourage par rapport à  $D$ , un autre mécanisme doit être utilisé pour transmettre les paquets dans ce genre de situations.

### b. Perimeter forwarding ou règle de la main droite (Right-hand rule)

Lorsqu'un paquet arrive à un nœud  $S$ , le chemin à suivre est le prochain qui se trouve dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en partant de  $S$  et par rapport au segment  $[SD]$  tout en évitant les liens déjà parcourut. La figure 3.6 montre un exemple plus précis de ce mode.

Il est important de rappeler que tous les nœuds maintiennent une table de voisinage, qui stocke les adresses et les positions de leurs voisins à un-saut.

Lorsqu'un nœud relais reçoit un paquet en mode greedy forwarding, il recherche dans sa table de voisinage le voisin le plus proche géographiquement de la destination du paquet. Si ce voisin est plus proche de la destination, le nœud transmet le paquet vers ce voisin. Lorsque aucun voisin n'est plus proche, le nœud marque le paquet en mode périmètre.

GPSR fonctionne mieux dans un scénario d'espace ouvert avec des nœuds répartis uniformément. Il souffre de plusieurs problèmes. Tout d'abord, dans

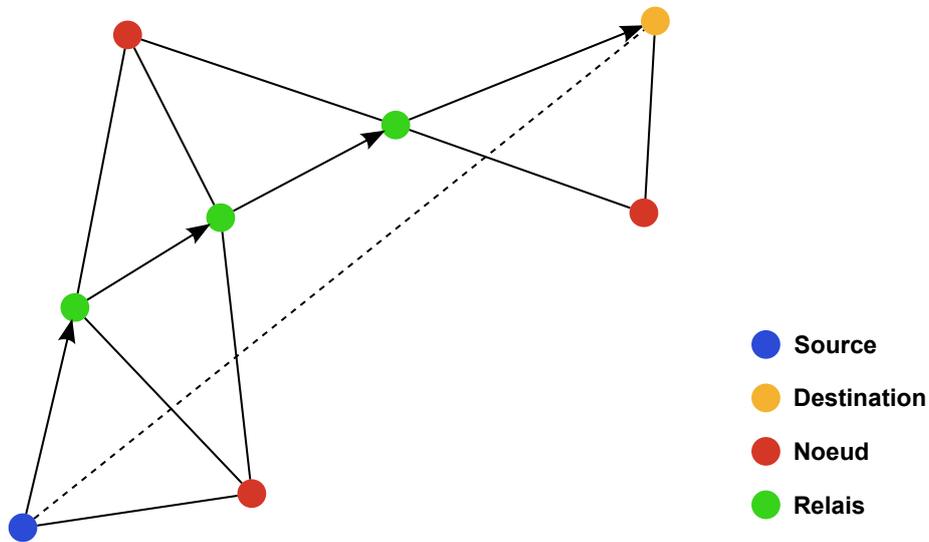


FIGURE 3.6 – Règle de la main droite

les scénarios urbains (en ville), le mode greedy est souvent limité parce que les communications directes entre les nœuds ne peuvent pas exister en raison des différents obstacles tels que les autres véhicules, les bâtiments, les arbres, etc. Deuxièmement, la mobilité peut également générer des boucles dans le routage.

### 3.2.2.2 GSR (Geographic Source Routing)

GSR [62] est un autre protocole de routage basé sur la localisation pour les VANETs. GSR suppose l'existence d'une carte numérique du réseau routier. Cette carte est utilisée pour connaître la topologie de la ville. GSR utilise un mécanisme appelé Reactive Location Service RLS pour avoir la position d'une destination. GSR combine le routage géographique avec la connaissance de la topologie : l'émetteur détermine les intersections qui doivent être traversées par le paquet et ce dernier est acheminé entre chaque deux intersections avec du routage basé sur la localisation. Le protocole est destiné aux environnements urbains.

### 3.2.2.3 GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing)

GPCR [63] est un autre protocole de routage unicast pour les VANETs. L'idée principale de GPCR est d'utiliser les routes et les intersections. Il consiste en l'utilisation dans un premier temps d'une procédure de greedy forwarding restreinte puis d'une stratégie de réparation basée sur la topologie réelle du réseau routier.

#### a. Routage greedy restreint

Une forme spéciale de greedy forwarding est utilisée pour acheminer le paquet d'information vers sa destination. Et comme les obstacles bloquent les signaux radio, les paquets sont sensés être acheminés le long des routes. Les intersections sont donc les seuls endroits où les décisions de routage sont prises. Par-contre, les paquets sont censés être relayés vers un nœud (véhicule) dans une intersection et non pas uniquement traverser l'intersection. Ceci est illustré dans la figure 3.7 où le nœud  $u$  désire relayer un paquet à travers l'intersection au nœud  $1a$  si la technique du greedy forwarding simple est utilisée. En relayant le paquet au nœud  $2a$ , un autre chemin vers la destination pourra être trouvé. Les auteurs ont appelé un nœud situé dans une intersection, un coordinateur.

#### b. Stratégie de réparation

La stratégie de réparation de GPCR évite d'utiliser les graphes planaires par la prise de décisions de routage sur la base des routes et des intersections au lieu des nœuds individuels et de leurs connectivités. En conséquence, la stratégie de réparation de GPCR se scinde en deux parties :

- Dans chaque intersection, il est nécessaire de décider quelle route est censée suivre le paquet.
- Entre les intersections, le routage greedy vers la prochaine intersection peut être utilisé.

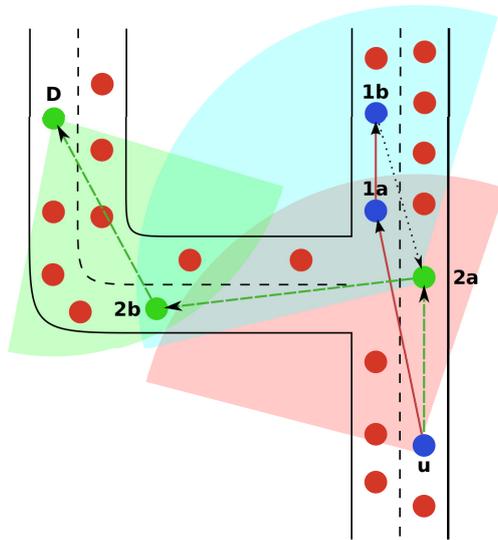


FIGURE 3.7 – Routage greedy restreint dans GPCR

### 3.2.3 Comparaison entre AODV et GPSR

Le modèle de mobilité à utiliser est défini dans la carte du réseau routier de la ville de Paris. L'application définie pour les deux premiers scénarios consiste à faire des échanges de paquets entre deux véhicules qui se trouvent dans la zone Sud-Ouest de la carte, suivant le modèle client/serveur. Pour le troisième scénario, l'échange se fait entre plusieurs véhicules. Ceci pour tester d'éventuelles collisions. Les différents paramètres sont illustrés dans le tableau 3.1.

#### 3.2.3.1 Premier scénario

Dans ce scénario, le nombre de nœuds connectés dans le réseau varie. Par conséquent, le nombre de connexions varie également. Nous avons obtenu les résultats de la figure 3.8.

#### Interprétation des graphes :

- **Le débit** : pour le protocole GPSR, on constate que le débit est inversement proportionnel au nombre de nœuds. Par contre, le débit

Paramètre	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Nombre de nœuds	30, 50, 150, 295	200	200
Temps de simulation	600 sec	1000 sec	600 sec
Porté de communication	250 m	250 m	250 m
Mobilité et vitesse	Selon la carte	Selon la carte	Selon la carte
Surface de simulation	4262*4940 m	4262*4940 m	4262*4940 m
Temps pause	3 sec	1, 2, 4, 6, 8, 10 sec	3 sec
Le protocole MAC	802.11p	802.11p	802.11p
Taille d'un paquet	1024 ko	1024 ko	1024 ko
Nombre émetteur/récepteur	1	1	1, 4, 7, 9 et 12
Nombre de paquet par nœud	100	100	100
Longueur de la Queue	50	64	64
Modèle de propagation radio	Two ray Ground	Two ray Ground	Two ray Ground

TABLE 3.1 – Les paramètres utilisés dans les différents scénarios

présenté par le protocole AODV varie d'une manière proportionnelle au nombre de nœuds. Cependant, la courbe du GPSR reste au-dessus de la courbe de AODV, comme le montre la figure 3.8a.

- **Le taux de livraison des paquets** : le taux de paquets délivrés par le protocole GPSR est nettement meilleur que celui de AODV. En observant le graphe de la figure 3.8b, on remarque que le PDR varie de la même manière dans les deux protocoles. Cela peut être interprété par la présence de nœuds intermédiaires qui coopèrent à la transmission des paquets au destinataire. De ce fait, la perte sur un réseau “moins dense” est plus significative par rapport à un réseau contenant de plus en plus de nœuds, quel que soit le protocole utilisé (GPSR, AODV).
- **Le délai moyen de bout-en-bout** : les performances de AODV augmentent puis diminuent, tandis que les performances du protocole GPSR restent plus ou moins stables (figure 3.8c). La courbe de GPSR reste en dessous de la courbe de AODV, cela est expliqué par le fait que le protocole AODV fait appel à une procédure de découverte de route avant la transmission des paquets. Tandis que le protocole GPSR utilise les messages Hello pour rafraîchir périodiquement sa table de

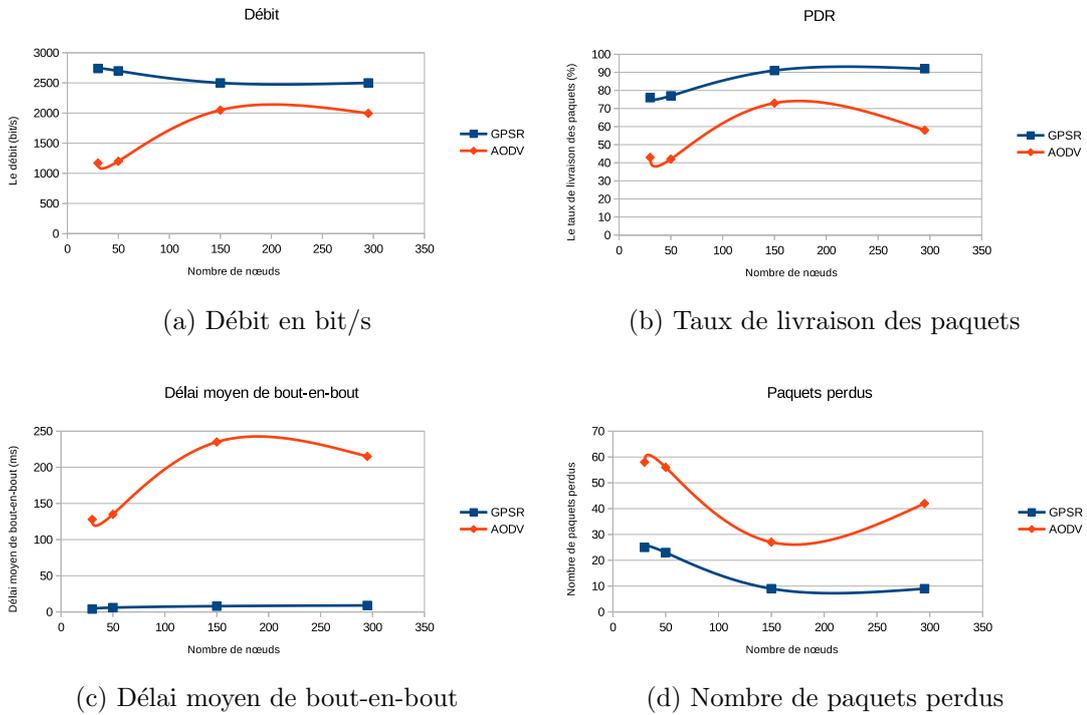


FIGURE 3.8 – Résultats du premier scénario

voisinage.

- **Paquets perdus** : on constate que GPSR présente moins de perte que le protocole AODV, figure 3.8d.

Il s'avère que le protocole GPSR est plus performant que le protocole AODV pour ce premier scénario.

### 3.2.3.2 Deuxième scénario

Dans ce scénario, le nombre total de véhicules dans le réseau est fixé et les temps de pause varient (voir tableau 3.1). Le temps de pause est l'intervalle de temps qui sépare deux transmissions de paquets successives. Pour ce scénario, nous avons obtenu les graphes présentés dans la figure 3.9.

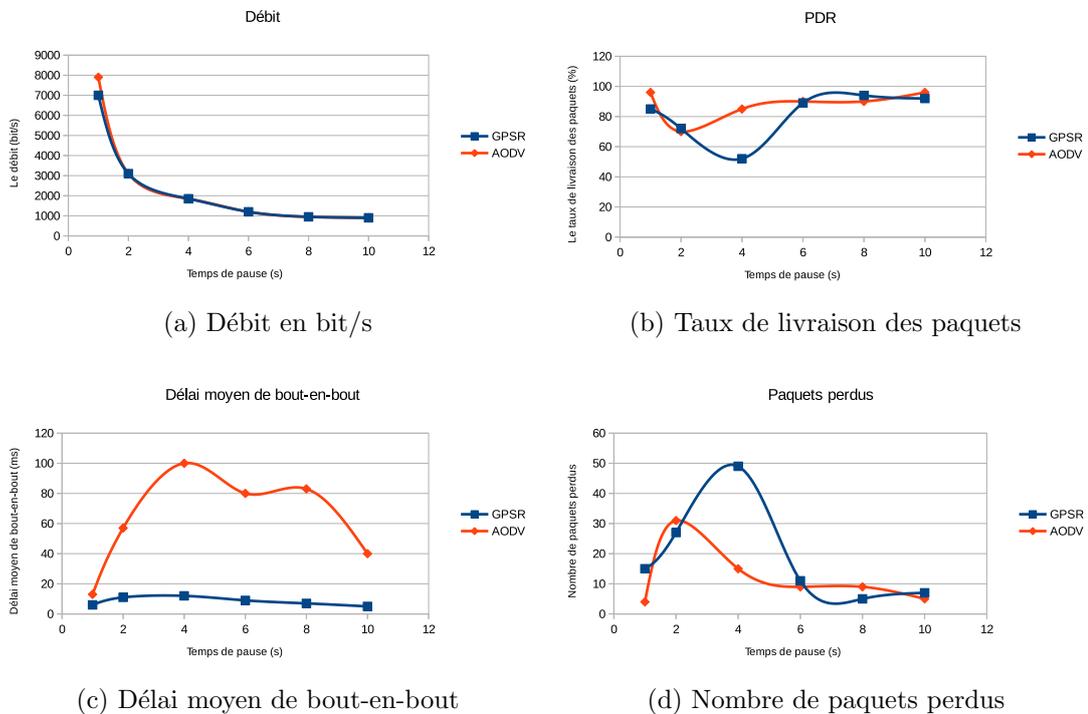


FIGURE 3.9 – Résultats du deuxième scénario

### Interprétation des graphes :

- **Le débit :** depuis la figure 3.9a, on constate que le débit est inversement proportionnel aux temps de pauses pour les deux protocoles.
- **Le taux de livraison des paquets :** le protocole AODV présente un taux de livraison de paquets plus élevé que celui de GPSR, figure 3.9b.
- **Le délai moyen de bout-en-bout :** le délai que présente le GPSR reste plus ou moins stable, alors que celui rendu par AODV augmente puis diminue en augmentant le temps de pause. Il s'avère que GPSR est plus performant que AODV, voir figure 3.9c.
- **Paquets perdus :** la figure 3.9d montre que GPSR présente plus de perte que AODV.

Dans ce deuxième scénario, le protocole GPSR est plus performant que le protocole AODV. Excepté pour le nombre de paquets perdus où le temps

de pause est autour de 4ms quand GPSR fait du routage géographique avec les techniques du greedy forwarding et du perimeter mode au moment où AODV trouve un chemin qui reste actif le temps de quelques transmissions successives. On remarque que GPSR reprend le dessus par la suite au moment où les chemins trouvés par AODV expirent.

### 3.2.3.3 Troisième scénario

Dans ce troisième scénario, nous avons varié le nombre d'émetteurs et de récepteurs qui s'échangent des données. Pour ce scénario, nous avons obtenu les résultats de la figure 3.10.

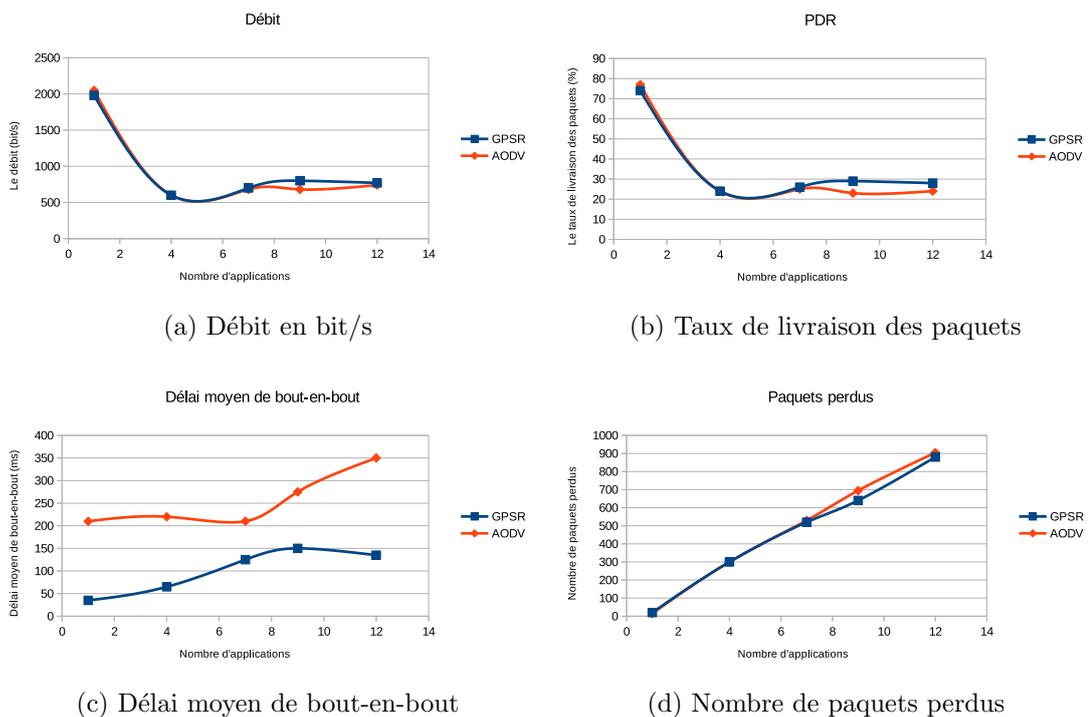


FIGURE 3.10 – Résultats du troisième scénario

### Interprétation des graphes :

- **Le débit** : à travers la figure 3.10a, on remarque que GPSR présente une légère augmentation par rapport à AODV à partir de la septième application.
- **Le taux de livraison des paquets** : à travers la figure 3.10b, on remarque que le GPSR présente une légère augmentation par rapport au protocole AODV à partir de la septième application.
- **Délais moyen de bout-en-bout** : à travers la figure 3.10c, on constate que le délai rendu par GPSR est nettement meilleur que celui présenté par le protocole AODV.
- **Paquets perdus** : à travers la figure 3.10d, on remarque que GPSR présente une légère augmentation par rapport au protocole AODV à partir de la septième application.

Dans ce troisième scénario, le protocole GPSR a rendu des performances pratiquement similaires à celles de AODV, il se démarque néanmoins par une performance significative au niveau du délai de bout-en-bout montré par la figure 3.10c.

#### 3.2.3.4 Evaluation de GPSR

Suite à notre étude comparative entre AODV et GPSR, nous avons constaté que le protocole GPSR offre de meilleurs résultats en terme de délai moyen de bout-en-bout et en terme de PDR surtout en zone à forte densité de trafic (zone urbaine). Cependant, nous avons remarqué que le débit qu'offre le GPSR est relativement faible. Cela est dû aux caractéristiques des VANETs (changement de topologie rapide et fréquente) et aux atténuations du signal. Nous considérons que les résultats présentés dans notre étude sont conformes à la réalité à travers les différents paramètres que nous avons simulé. De ce fait, il s'avère que le GPSR est un protocole géographique adapté pour les réseaux VANETs dont les applications exigent des communications temps réel. Ceci nous a confirmé la robustesse du routage géographique par rapport au routage par topologie et nous a permis de consolider notre choix de travail sur les protocoles de routage géographiques.

Après étude détaillée de quelques exemples d'applications dans la littérature, nous avons constaté que la catégorie des protocoles la plus prometteuse les différentes catégories cités dans la classification (section 3.2.1) est le géocast qui regroupe les deux techniques d'unicast et de broadcast. Cette catégorie est la base de nos contributions réalisés dans cette thèse et fait l'objet de la suite de ce manuscrit.

### 3.3 Routage Géocast

Les protocoles de routage géocast (Geographic Broadcast) offrent des communications multi-sauts sans fil à travers un réseau autonome de mobiles (l'utilisation d'une infrastructure fixe n'est pas obligatoire). Initialement proposé pour les réseaux MANETs [64], il a rapidement trouvé des adaptations pour d'autres réseaux comme les réseaux Mesh, les réseaux de capteurs sans fil et notamment les réseaux de véhicules sans fil ad hoc (VANETs). Les protocoles de routage géocast dans les réseaux VANETs suivent le principe du routage des paquets depuis une source unique (véhicule ou nœud d'infrastructure) vers tous les véhicules situés dans une zone de destination bien définie géographiquement, appelée région d'intérêt (ZOR - Zone Of Relevance) [65, 66]. Les paquets sont souvent acheminés d'abord en unicast pour éviter la surcharge du réseau. Une fois que les paquets arrivent dans le ZOR, ils sont diffusés (en broadcast) à tous les véhicules qui s'y trouvent.

La suite de ce chapitre fait l'objet de notre première publication.

#### 3.3.1 Protocoles géocast dans la littérature

Ci-dessous sont listés et résumés plusieurs protocoles de routage géocast dédiés aux réseaux VANETs.

##### 3.3.1.1 IVG (Inter-Vehicular Geocast)

Le protocole IVG (Inter-Vehicular Geocast) [67] a comme objectif d'informer les véhicules situés dans une région à risque appelée groupe multicast à propos d'un certain danger survenu sur une autoroute (ex. accident). Pour

atteindre cet objectif, la région à risque est définie en considérant l’emplacement précis de l’obstacle sur la route et les directions qui peuvent être affectées. Le véhicule endommagé diffuse un message d’alerte sur les régions à risque (figure 3.11). Les voisins recevant ce message testent sa pertinence selon leurs localisations par rapport à la zone à risque. Tous les voisins appartenant à la zone à risque calculent un intervalle de différence de temps (Differ time backoff) de réception d’une réponse ce ses voisins à un saut qui permettra au voisin le plus loin d’être un relais pour la transmission selon le principe “le plus loin est le plus favorable”. On note que l’utilisation des messages périodiques Hello dans ce mode de choix des relais n’est pas obligatoire.

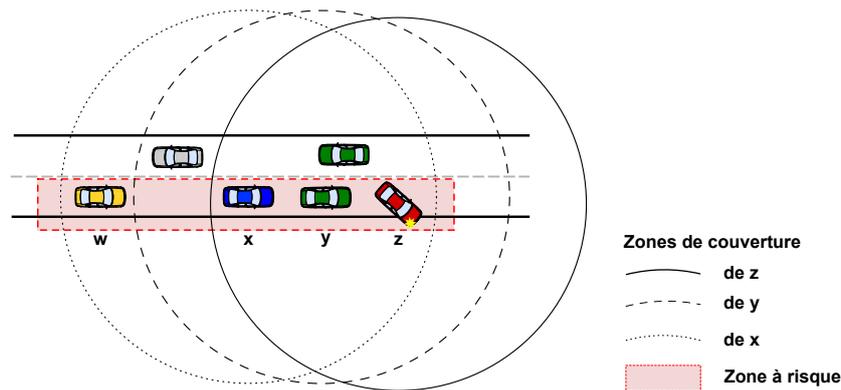


FIGURE 3.11 – Sélection de relais dans IVG :  $x$  est le voisin le plus loin de  $z$  par rapport à  $y$ .  $x$  devient relais.  $x$  permet d’atteindre  $w$  alors que  $y$  ne le peut pas.

### 3.3.1.2 Cached Geocast

Le principe du Cached Geocast [68] est l’ajout d’une mémoire cache à la couche de routage du protocole qui sauvegarde les messages Geocast issus du problème du *maximum local* où un paquet atteint un nœud où la technique de routage de proche en proche Greedy-forwarding ne peut plus être appliquée suite à un obstacle ; par exemple, un immeuble, une montagne,

etc. La cache est alimentée par les messages qui ne peuvent plus être routés appelés *LocalMaxCache* et vérifiée périodiquement pour trouver les paquets routables quand de nouveaux voisins sont découverts ou que d'autres soient partis. L'utilisation d'un système d'envoi de *messages Hello* périodiques est nécessaire pour la découverte du voisinage.

Le protocole propose aussi une technique de relayage restreinte (ranged forwarding) pour résoudre le problème de la grande vitesse des nœuds. Il consiste en une zone de transmission dynamique basée sur la zone de transmission réelle et sur la vitesse des nœuds. À ce niveau, les véhicules les plus loin qui se rapprochent de la limite de la zone de transmission fixée dynamiquement sont choisis comme relais.

### 3.3.1.3 Abiding Geocast

Le Abiding Geocast [59] est une approche qui permet une retransmission périodique du message Geocast dans un réseau Ad-Hoc. Ce protocole fait partie de la quatrième catégorie de routage de la classification de la section 3.2.1, à savoir du routage temporel. Trois solutions sont fournies.

La première consiste en l'utilisation d'un serveur qui sauvegarde le message Geocast (unicasté à partir de la source). Celui-ci s'occupe de la retransmission périodique du message vers la zone de destination. Dans les VANETs, on trouve des applications à ce type d'approche dans les services d'information sur l'état des routes et le divertissement.

La deuxième consiste à élire un nœud dans la zone de destination qui jouera le rôle du serveur en enregistrant le message et en le retransmettant périodiquement ou par notification (c-à-d quand un nœud rejoint le réseau VANET).

La troisième est que tous les voisins sont habilités à enregistrer le message Geocast. La délivrance du message est effectuée par notification.

Dans les VANETs, ces deux dernières approches sont plus adaptées pour les applications de sécurité (avertir un usager de la route d'un accident survenu plus loin sur son itinéraire). On note que l'échange de beacons périodiques n'est pas obligatoire puisque les messages sont périodiquement

retransmis. Dans le cas de retransmission par notification, cela s'avère obligatoire.

#### 3.3.1.4 DRG (Distributed Robust Geocast)

Le protocole DRG (Distributed Robust Geocast) [69] définit une zone d'intérêts ZOR comme étant l'ensemble des véhicules qui partagent les mêmes critères géographiques et où le message Geocast reste pertinent; et une zone de relaiage ZOF (pour Zone Of Relevance) représentant l'ensemble des nœuds éligibles à relayer le message Geocast. Le protocole se base lors du choix du relai sur la technique du Greedy-forwarding utilisant le principe "le plus loin des voisins d'un véhicule source ou relai en direction de la destination est le plus favorable". Dans DRG, le message Geocast est relayé à partir de la source vers la destination à travers le ZOF, puis délivré à tous les véhicules appartenant au ZOR. Dans DRG, l'échange périodique des *messages Hello* est nécessaire.

#### 3.3.1.5 ROVER

Le protocole ROVER (Reliable Geographical Multicast Routing in Vehicular Ad-Hoc Networks) [70] possède des similitudes avec la technique de routage utilisée dans AODV (Ad-Hoc On Demand Distance Vector) qui consiste à diffuser uniquement les messages de contrôle alors que les paquets de données sont toujours unicastés (un système d'échange de beacons est utilisé pour connaître son voisinage). Le protocole ROVER suppose que :

- chaque véhicule est identifié par un numéro d'identification unique,
- chaque véhicule est équipé d'un récepteur GPS qui lui permet de connaître sa position géographique à tout moment,
- les véhicules ont accès à une carte numérique du réseau routier,
- les ZORs sont de formes rectangulaires,
- les ZOFs incluent la source et le ZOR.

Le but de ROVER est de délivrer le message géocast généré par une application au niveau de la source vers tous les véhicules situés dans le ZOR et définit le message comme un triplet [Application, Message, ZOR].

### 3.3.1.6 DG-CastoR

DG-CastoR [71] est un protocole basé sur l'estimation de la disponibilité des liens. L'idée principale du protocole est d'estimer les véhicules qui sont susceptibles d'avoir la même trajectoire et ayant la possibilité de communiquer avec l'émetteur durant une certaine période de temps basée sur des mesures de similarité spatiotemporelles entre les véhicules. Dans DG-CastoR, la *rendez-vous region* représente la zone de diffusion du message et la *rendez-vous group* la trajectoire du convoie pour lequel l'estimation de la disponibilité du lien a été calculée.

### 3.3.1.7 Routage Mobicast

Le routage Mobicast [72] est un protocole de routage Geocast spatiotemporel multicast/Geocast. Il considère en plus de l'espace le facteur temps dans le routage Geocast. Son but est de transmettre le message mobicast à partir de la source vers tous les véhicules situés dans le ZOR au temps  $t$  appelé  $ZOR_t$ . Pour atteindre ce but, le protocole mobicast propose une méthode pour estimer le meilleur ZOF pour éviter le problème de la fragmentation temporelle du réseau, ceci en utilisant des zones d'approche (ZOA - Zone Of Approching) pour générer des ZOF flexibles pour ainsi disséminer le message mobicast dans le ZOR au temps approprié. La figure 3.12 illustre l'envoi d'une invitation à un jeu par le véhicule  $V_1$  dans le ZOR rectangulaire au temps  $t$ .

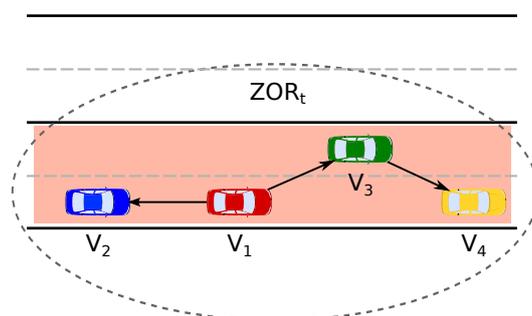


FIGURE 3.12 – Application de jeu Mobicast, l'invitation est initiée par le véhicule  $V_1$

### 3.3.1.8 DTSG

Le but du protocole DTSG (Dynamic Time-Stable Geocast routing in Vehicular Ad Hoc Networks) [73] est d'informer les véhicules situés dans une région spécifique sur une autoroute à propos d'un évènement pour une durée de temps déterminée. Le protocole suppose que les véhicules ont la même vitesse sur l'autoroute, que les véhicules se dépassent rarement et que les véhicules roulent en pelotons. Ainsi, DTSG profite des véhicules qui roulent dans la direction opposée appelés *Helping vehicles* pour disséminer le message Geocast aux différents groupes de véhicules. Il procède en deux phases, la première appelée la *période pré-stable* commençant lorsque la source commence à diffuser le message Geocast jusqu'à ce que le message atteigne la région de terminaison grâce au *helping vehicles*. La seconde, appelée *période stable* qui permet au protocole de se stabiliser à l'intérieur de la région (faire une diffusion pendant un temps déterminé).

## 3.3.2 Étude de ces protocoles

### 3.3.2.1 Classification selon la technique de découverte du voisinage

Dans la littérature, certains protocoles de routage classiques ont besoin d'effectuer une phase de découverte de voisinage nécessaire pour la phase de recherche de route entre la source et la destination qui se traduit par une technique de sélection des nœuds les plus appropriés pour la phase de relayage (meilleure bande passante, plus courte distance, meilleure qualité du signal, etc.) qui constitueront le chemin vers la destination, ex. protocoles à état de liens, à vecteurs de distances, etc. Cette technique de découverte du voisinage-proche à un ou deux sauts ou à large échelle permet une connaissance globale de la topologie du réseau et se base sur le mécanisme de diffusion périodique des messages de contrôles courts (Beacons) appelés *Messages Hello*. Les protocoles qui utilisent cette technique sont connus sous le nom

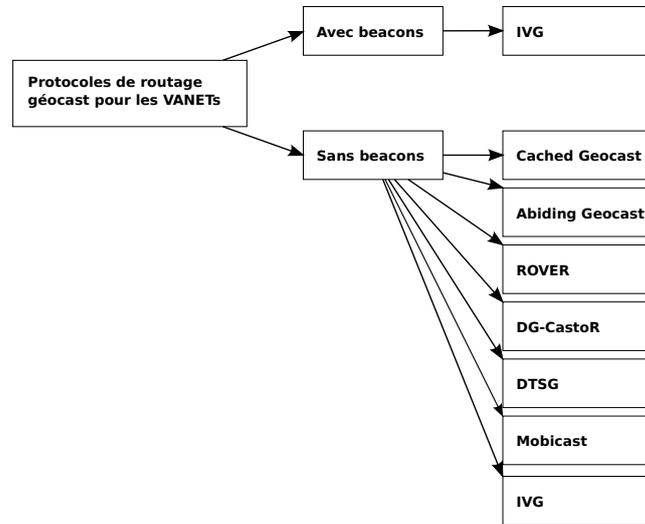


FIGURE 3.13 – Classification des protocoles de routage géocast selon la technique de découverte du voisinage

de *beacon-based protocols*.

D'autres protocoles n'utilisant pas ce système d'échange périodique existent. Ils sont appelés *Beaconless-based protocols*. Ces protocoles tirent profit d'autres paramètres comme la position géographique des nœuds ou du rapport signal à bruit SNR (Signal to Noise Ratio).

La figure 3.13 illustre notre classification des protocoles de routages Geocast décrits précédemment pour les réseaux véhiculaires VANETs.

### 3.3.2.2 Comparaison des protocoles de routage Geocast

Dans le tableau 3.2, nous proposons une comparaison des différents protocoles présentés précédemment selon plusieurs critères : utilisation d'un mécanisme de beacons périodique, la stratégie de relayage utilisée, la technique de maintenance de la route utilisée, pour quels scénarios sont-ils le mieux adaptés, le besoin d'utiliser une infrastructure du réseau routier, la mobilité de la zone de destination ZOR ou pas, le besoin d'utiliser une carte numérique du réseau routier, le nombre de messages de contrôles que génère le protocole et s'il prend en considération le facteur temps et espace.

	IVG	Cached Geocast	Abiding Geocast	DRG	ROVER	DG-CastoR	Mobicast	DTSG
<b>Periodic Beacons</b>	No	Yes	Yes/No	No				
<b>Forwarding Strategy</b>	Greedy Forwarding	Store and Forward	Greedy Forwarding	Greedy Forwarding	Multi hop			Multi hop
<b>Routing Maintenance</b>	Reactive	Reactive		Reactive	Reactive			Reactive
<b>Scenario</b>	Highway	Highway & Ubran	Highway & Ubran	Highway	Ubran	Ubran	Highway & Ubran	Highway (sparse)
<b>Recovery strategy</b>	Flooding	Ranged Forwarding	Store and Forward	Flooding	Flooding			Flooding
<b>Infrastructure Requirement</b>	No	No	Yes/No	No	No	No	No	No
<b>Mobility of destination zone</b>	No	No	No	No			Yes	
<b>Digital map</b>	No	No	No	No	No	No	No	No
<b>Control Packet overhead</b>	Low	Low			High			Moderate
<b>Spatial relevance</b>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<b>Time constraint</b>	No	No		No			Yes	
<b>Year</b>	2003	2004	2005	2007	2007	2008	2009	2010

TABLE 3.2 – Comparaison des protocoles de routage Geocast

## 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue le routage dans les réseaux VANETs. Nous avons commencé par présenter le routage basé sur la topologie utilisée principalement dans les réseaux MANETs et souvent la base des adaptations pour le routage dans les VANETs. Ensuite, nous avons présenté le routage géographique qui permet à l'instar du routage basé sur la topologie d'utiliser les données de géolocalisation des véhicules lors de son processus de routage. Pour comparer les deux techniques de routage et faire ressortir celle qui permet de mieux répondre aux exigences des applications des réseaux véhiculaires, nous avons réalisé quelques simulations qui nous ont permis d'affirmer que le routage géographique est le plus adéquat pour le routage des paquets dans un réseau VANET. À partir de ce point, nous nous sommes intéressés plus en détail au routage géocast qui combine deux autres techniques de routage géographique, à savoir, unicast et broadcast. Nous avons présenté ainsi un état de l'art détaillé de plusieurs protocoles géocast trouvés dans la littérature et avons proposé une taxonomie à ces protocoles.

L'étude que nous avons réalisée dans ce chapitre nous a permis de faire ressortir quelques problématiques liées au routage géocast dans les VANETs. Dans le prochain chapitre, nous présentons ces problématiques et tentons d'y apporter des solutions.

## Chapitre 4

# Protocole de routage GeoSUZ

À travers l'étude bibliographique détaillée sur le routage géocast dans les réseaux VANETs, réalisée précédemment, nous avons pu faire ressortir plusieurs contraintes liées à ce type de routage. Ces contraintes nous ont permis d'étayer notre problématique avec des questions de recherche actuelles et de confirmer nos soupçons concernant la nécessité d'adapter la forme de la zone de destination au contexte applicatif exigé par ce type de réseaux. Dans ce chapitre, nous détaillons les questions qui nous ont mené à rédiger notre problématique principale dans la section 4.1 de par laquelle en découlent plusieurs sous problèmes pour lesquels nous avons tenté d'y apporter des solutions dans la suite de ce manuscrit.

Le fait de découper une zone de destination en plusieurs sous-zones permet de confiner les portions de routes dans lesquelles l'information est pertinente. En d'autres termes, cibler les usagers de la route qui sont susceptible d'être intéressés par une information critique (accident, embouteillage, etc.). Cette technique génère néanmoins des frais généraux considérables sur le réseau.

Dans ce chapitre nous présentons les contraintes rencontrées dans plusieurs scénarios lorsqu'il s'agit du routage géocast. Des scénarios allant de la gestion des évènements critiques de la route (accidents, inondations, éboulement, affaissement, etc) à la publicité et le divertissement en passant par la gestion des déplacements des véhicules d'urgence (ambulances, police, convois, etc.).

## 4.1 Questions de recherche

Dans l'état de l'art, la forme des ZORs, leurs origines et leurs techniques de positionnement restent arbitraires et choisies selon les scénarios et les besoins qui motivent les travaux des chercheurs [67, 59, 69, 70, 71, 72, 73]. Dans nos travaux actuels nous avons tenté d'aller au-delà des suppositions pour proposer une technique permettant d'identifier et de couvrir au mieux ces zones.

### **Question 1 : Comment savoir quelles sections de routes seraient affectées par un évènement ?**

Dans nos travaux en cours, nous déléguons l'affectation des zones géographiques ZORs aux autorités compétentes (services de la sûreté des réseaux routiers ou à la préfecture de police). Ces organismes sont en mesure de fournir les sections des routes qui seront susceptibles d'être affectées par un évènement, ceci à travers des études appropriées (statistiques sur les accidents de la route, surveillance de la vitesse, etc.). On suppose ainsi qu'ils fourniront dans le cas d'un évènement critique les coordonnées et désignations des tronçons des routes qui seront affectées par cet évènement au véhicule qui déclare l'évènement.

**Remarque :** Nous laissons en perspective la proposition d'un algorithme de génération des ZORs se basant sur la connaissance de la carte du réseau. Ceci pour nous intéresser à d'autres questions d'ordre de routage géocast qui est l'objectif principale de notre thèse. Cet algorithme se basera sur la topologie du réseau routier (carte), les règles de circulation et les statistiques des accidents et aura en entrée le lieu de l'évènement et sa nature.

### **Question 2 : Comment définir ou représenter une zone de destination ?**

Nous répondons à cette question dans la section 4.2 suivante.

## 4.2 La Forme d'une zone de destination

Dans les réseaux routiers, les formes des routes sont de différentes formes avec une tendance à être de simples formes géométriques comme des lignes droites ou des virages en arcs elliptiques ou circulaires. Dans le but de couvrir toutes les formes des routes, nous considérons pour le moment que le réseau routier est représenté sur un plan Euclidien à deux dimensions. Ainsi, on choisie pour ces ZORs des formes à la fois simple à représenter mathématiquement et à implémenter (qui génère moins de traitements).

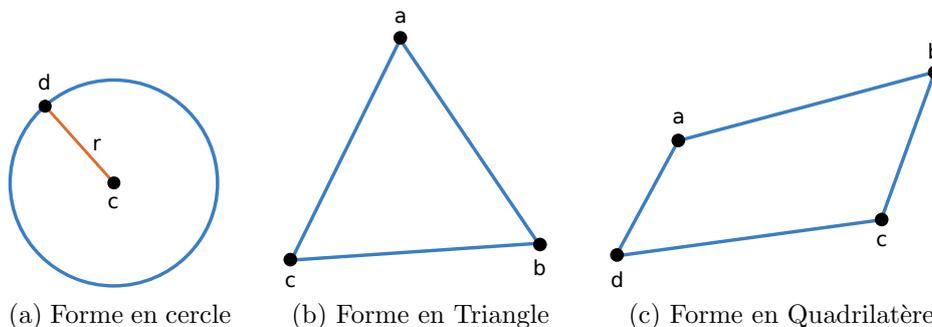


FIGURE 4.1 – Formes des ZORs

### Forme en cercle

Le cercle est une forme géométrique simple représentée par la connaissance de deux informations : les coordonnées du centre et son rayon.

Par souci d'implémentation, nous souhaitons représenter toutes les formes des ZORs par leurs coordonnées. On représentera ainsi le cercle par les coordonnées du centre et celles d'un point quelconque de sa circonférence.

Dans la figure 4.1a, le cercle  $C$  est représenté par les coordonnées de son centre  $c$  et du point  $d$ , où  $r$  est son rayon. On représente le cercle  $C$  par  $\{(x_c, y_c), (x_d, y_d)\}$ .

## Forme en triangle

Tel qu'illustré sur la figure 4.1b, le triangle quelconque  $T$  est représenté par les coordonnées de ses trois sommets :  $\{(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c)\}$ .

## Forme en quadrilatère

Un quadrilatère est un polygone à quatre côtés et quatre sommets. La figure 4.1c représente le quadrilatère  $Q$ . On le représente par les coordonnées de ses sommets :  $\{(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c), (x_d, y_d)\}$ . On exigera l'utilisation des quadrilatères de formes concaves et convexes uniquement, la forme complexe dans notre démarche pouvant être représentée par deux triangles.

### Remarque :

- Le nommage des sommets des différentes formes suit arbitrairement le sens horaire. À l'exception du cercle où on commence par les coordonnées du centre.
- Le choix de ces formes est motivé par leur simplicité de représentation et leur différenciation par le nombre de leurs coordonnées.
- Il est possible d'élargir l'ensemble des formes à l'infini pour mieux couvrir certaines formes des routes (ZORs) et pour se rapprocher ainsi le plus de la réalité. Mais en implémentation, plus une forme est représentée par plusieurs points, plus le temps de traitement de ces formes devient long et complexe. Pour cette raison, on s'est limité à l'utilisation de ces trois formes géométriques simples.

### Question 3 : Est ce que ces trois formes simples suffisent pour représenter n'importe quelle trançon de route ?

Les trois formes considérées peuvent couvrir plusieurs endroits et peuvent être utilisées dans le cas des virages tel qu'illustré dans la figure 4.2.

La figure 4.3 présente la Place Charles-de-Gaulle, une large intersection située au Nord-Ouest de Paris. On remarque que par l'utilisation de formes

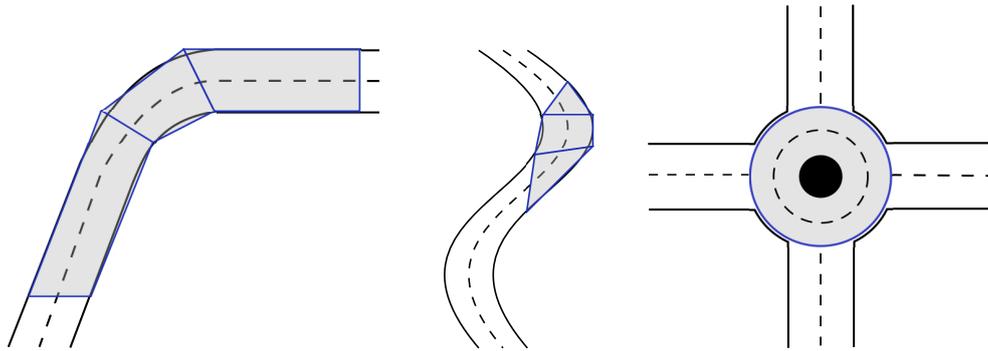


FIGURE 4.2 – Les formes simples permettent de couvrir les virages

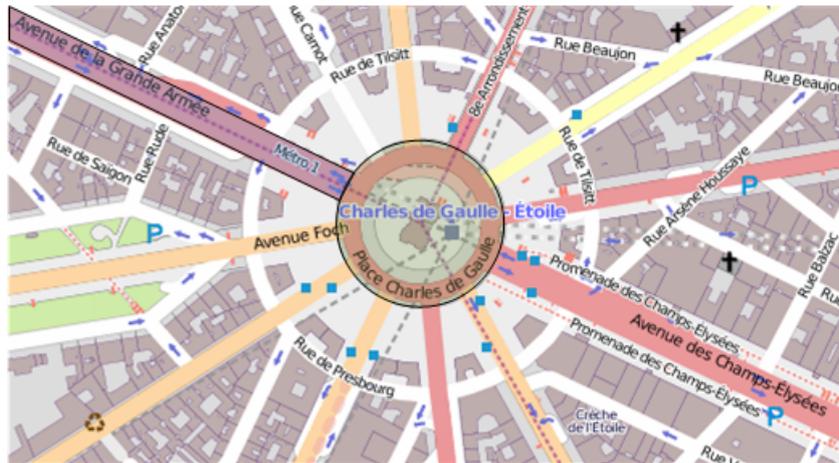


FIGURE 4.3 – Couvrir les véhicules situés sur l’avenue de la Grande Armée et au niveau du rond-point Charles de Gaulle

simples comme le cercle ou le quadrilatère, on arrive à couvrir différentes zones.

Nous signifions néanmoins que dans la réalité, les routes sont représentées dans un plan à trois dimensions. Nous gardons le travail d’adapter notre modèle actuel à un plan sur trois dimensions en perspective.

**Question 4 : Est ce que pour chaque évènement il existe un seul ZOR confiné dans une seule région géographique ?**

Nous répondons à cette question dans la section 4.3 suivante.

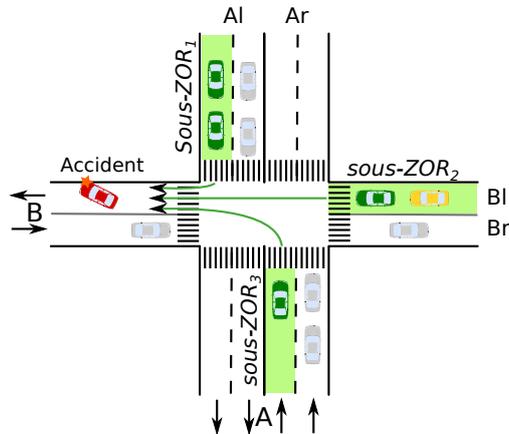


FIGURE 4.4 – Le ZOR est un ensemble de Sous-ZORs

### 4.3 Le ZOR est un ensemble de sous-ZORs

On considère le scénario de la figure 4.4. Si le véhicule rouge présente un accident qui s'est produit sur la ligne gauche  $B_l$  de la route  $B$  après l'intersection, les véhicules appartenant aux tronçons des routes  $A_l$ ,  $A_r$  et  $B_l$  en direction de l'intersection ont besoin d'être informés de l'évènement. Ainsi, les véhicules qui souhaitaient emprunter la section de la route sur laquelle est survenu l'accident peuvent agir pour contourner le problème. Ceci facilitera la gestion du flux au niveau de l'intersection. On remarque que dans ce scénario, le ZOR total est constitué de 3 sous-ZORs  $sous - ZOR_1$ ,  $sous - ZOR_2$  et  $sous - ZOR_3$ .

**Remarque :** Dans le routage Geocast, si on définit  $S$  comme le véhicule source et  $ZOR$  comme la zone de destination composée de deux sous-ZORs  $sous - ZOR_1$  et  $sous - ZOR_2$ . On peut énumérer deux cas pour positionner la source  $S$  dans le réseau :  $S$  est soit à l'intérieur du ZOR (de l'un des sous-ZORs, figure 4.5a) ou à l'extérieur du ZOR comme l'illustre la figure 4.5b.

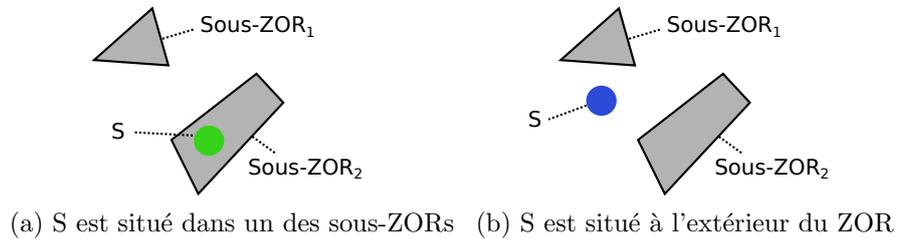


FIGURE 4.5 – Positions de  $S$  par rapport au  $ZOR$

**Question 5 : Quel serait l'impact généré par le découpage d'une zone de destination sur le routage géocast dans les réseaux VANETs ?**

Nous répondons à cette question dans la section 4.4 suivante.

## 4.4 Incidence du découpage d'un ZOR sur le routage

Sachant que les formes des sous-ZORs peuvent être de trois types, comme défini précédemment (cercle, triangle ou quadrilatère), on est amenés à acheminer le message Geocast généré par la source  $S$  vers tous les sous-ZORs constituant le ZOR total (englobant tous les sous-ZORs).

### 4.4.1 Problématique

Dans l'état de l'art, nous avons constaté que la technique de routage la plus utilisée dans les VANETs et principalement dans les protocoles de routage Geocast était le Greedy-forwarding qui consiste à envoyer le message transmis par la source en direction de la destination en choisissant comme relais le voisin le plus proche de la destination. Ceci suppose que chaque nœud connaît sa position géographique et celle de ses voisins à un saut.

En appliquant la technique du Greedy-forwarding sur notre scénario illustré par la figure 4.6 où  $S$  est le véhicule source et  $A$ ,  $B$  et  $C$  les sous-ZORs qui composent le ZOR total. On remarque que le même message Geocast généré

par  $S$  empruntera le même chemin pour atteindre les sous-ZORs  $A$ ,  $B$  et  $C$  à travers les véhicules de relayage  $p$  et  $q$ .

Dans le cas où  $S$  génère un nombre de message faible et peu couteux en terme de bande passante, le problème ne se pose pas. Par contre, dans le cas où  $S$  génère une quantité de données considérable comme par exemple de la vidéo, de l'audio ou des annonces publicitaires ; l'utilisation de la technique du Greedy-forwarding va générer trois-fois le même flux de données destiné à  $A$ ,  $B$  et  $C$  au niveau du véhicule  $p$  et deux-fois le même flux destiné à  $B$  et  $C$  au niveau du véhicule  $q$ .

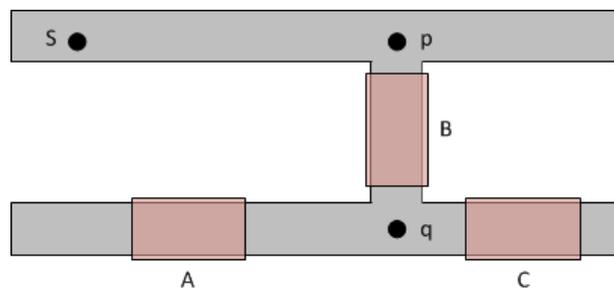


FIGURE 4.6 – Scénario illustrant la problématique

**Question 4 : Comment optimiser le flux des données sur le réseau dans ce cas ?**

Nous répondons à cette question dans la section 4.5 suivante.

## 4.5 Technique de Vision par angles

Avant qu'une source  $S$  n'envoie un message de type géocast, elle calcule la distance entre sa position et celle du point le plus proche du ZOR ou des différents sous-ZORs en question.

Dans un plan à deux dimensions, la distance entre deux points  $A(x_A, y_A)$  et  $B(x_B, y_B)$  est définie dans 4.1.

$$d_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (4.1)$$

Dépendant de la forme du sous-ZOR de destination, la distance entre la source  $S$  et le sous-ZOR est calculée comme suit :

### Sous-ZOR Circulaire $C$

$$d_{SC} = d_{Sc} - d_{dc} \quad (4.2)$$

Où  $c$ ,  $r$  et  $d$  sont respectivement le centre du sous-ZOR de forme circulaire  $C$ , son rayon et le point de la circonférence du sous-ZOR le plus proche de la source  $S$ . Le rayon  $r = d_{dc}$ .

### Sous-ZOR Triangulaire $T$

$$d_{ST} = \min(d_{Sa}, d_{Sb}, d_{Sc}) \quad (4.3)$$

Où  $a$ ,  $b$  and  $c$  sont les trois coins du sous-ZOR de forme triangulaire  $T$ .

### Sous-ZOR Quadrilatère $Q$

$$d_{SQ} = \min(d_{Sa}, d_{Sb}, d_{Sc}, d_{Sd}) \quad (4.4)$$

Où  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $d$  sont les coins du sous-ZOR de forme quadrilatérale  $Q$ .

#### 4.5.1 Technique de vision par angles

La figure 4.7 illustre notre technique de vision par angles basée sur la distance entre la source et les différents sous-ZORs. On considère  $S$  comme la source du message géocast  $M$ .  $A$  et  $B$  sont deux sous-ZORs constituant le ZOR total (ensemble de la zone de destination). Quand  $S$  a besoin d'informer les sous-ZORs  $A$  et  $B$  d'un évènement, il calcule d'abord les distances  $d_{Sa}$  et  $d_{Sb}$ . Dans notre cas, le sous-ZOR  $A$  est plus proche de  $S$  que le sous-ZOR

$B$  ( $d_{Sa} < d_{Sb}$ ). Donc,  $S$  a besoin de savoir si le sous-ZOR  $B$  est dans la même direction que le sous-ZOR  $A$ . En d'autres termes, si le sous-ZOR  $B$  est accessible via le sous-ZOR  $A$  ou est-ce que  $B$  appartient à l'angle de vision de  $S$  à travers  $A$ ?

L'angle  $\theta$  représente l'angle  $\hat{S}ab$  du triangle  $Sab$ . L'angle  $\gamma$  est un angle de vision fixé arbitrairement selon différents paramètres (vitesse des véhicules, densité du réseau, etc.). En appliquant la formule 4.5 au scénario précédent, on conclue que le sous-ZOR  $B$  n'est pas dans la même direction que le sous-ZOR  $A$ . Alors, la source  $S$  envoie deux occurrences du message géocast destinés à  $A$  et  $B$  respectivement.

$$\frac{Sa^2 + ab^2 - Sb^2}{2 * Sa * ab} \geq \cos(\gamma) \quad (4.5)$$

Où  $\frac{Sa^2 + ab^2 - Sb^2}{2 * Sa * ab} = \cos(\theta)$  là loi des cosinus en trigonométrie.

Si  $\theta \leq 90^\circ$ , la source  $S$  envoie deux messages pour les sous-ZORs  $A$  et  $B$ . Si  $\theta \in ]90^\circ, 180^\circ]$ ,  $S$  envoie un message unique destiné au sous-ZORs  $A$  et  $B$  (via  $A$ ).

Afin d'optimiser le nombre des messages circulant sur le réseau,  $S$  peut envoyer un seul exemplaire du message Geocast destiné aux trois sous-ZORs  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Ceci à travers les véhicules intermédiaires jusqu'à atteindre  $p$ . À ce niveau,  $p$  relaye à son tour un seul exemplaire du message Geocast à travers les véhicules du sous-ZOR  $B$  jusqu'à atteindre  $q$ , celui-ci génèrera deux exemplaires du message destinés aux sous-ZORs  $A$  et  $C$ . Cette technique nous permet un échange de messages optimal sur le réseau.

On note que le premier véhicule appartenant à un sous-ZOR est celui qui est chargé d'initier la diffusion d'une copie du message Geocast à tous les véhicules situés dans le même sous-ZOR.

La mise en œuvre de cette technique revient à déterminer si les sous-ZORs sont dans la même direction par rapport à la source. Pour ce faire, nous présentons notre contribution illustrée par la figure 4.7 où  $S$  est la source et  $a$  et  $b$  les coins des sous-ZORs les plus proches de la source,  $\theta$  l'angle au

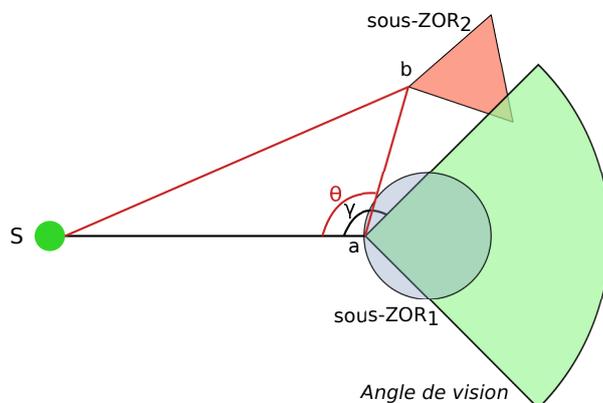


FIGURE 4.7 – Technique de détection des sous-ZORs situés dans la même direction par angles de visions

niveau du sous-ZOR le plus proche formé par les deux segments  $Sa$  et  $ab$  et  $\gamma$  un angle imaginaire qu'on nommera *angle de vision de  $S$  à travers  $a$*  que la source adapte et compare avec  $\theta$  pour savoir si le prochain sous-ZOR est dans la même direction que le premier sous-ZOR le plus proche.

Dans le travail présenté dans ce manuscrit, nous n'avons pas présenté les moyens qui permettent de fixer au mieux l'angle  $\gamma$ . Nous avons néanmoins quelques travaux qui vont dans ce sens pour permettre d'adapter cet angle de manière dynamique en plein processus de routage, ceci en prenant compte de différents paramètres (vitesse, densité, nombre de sous-ZORs, etc.). Nous supposons dans la suite de ce manuscrit que  $\gamma = 135^\circ$ .

## Question 6 : Comment représenter les sous-ZORs à l'intérieur des paquets ?

### 4.5.2 Structure du message géocast

Le message géocast  $M$  est définie comme un triplet :

$$M[m, S, Z] \tag{4.6}$$

Où  $M[m]$  est le contenu du message (l'information à envoyer),  $M[S]$  l'identifiant de la source et  $M[Z]$  les coordonnées de la zone de destination.

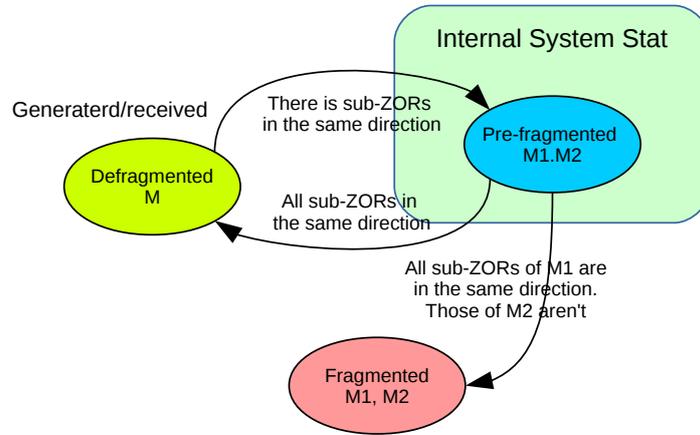


FIGURE 4.8 – Etat du message géocast dans le système

#### 4.5.2.1 Le message pré-fragmenté

Le message pré-fragmenté représente le message dans notre système. C'est un état du message en attente soit d'une fragmentation ou d'une défragmentation.

$$M_1[m, S, \{Z_1\}].M_2[m, S, \{Z_2\}] \quad (4.7)$$

L'état interne de notre système peut être défini tel qu'illustré par la figure 4.8.

#### 4.5.2.2 Le Message fragmenté

Quand le nœud actuel trouve ses nœuds relais, si ceux-ci sont plusieurs, il fragmente le message initial en sous-messages ayant le même contenu que le message initial, mais destinés aux différents sous-ZORs. La formule (4.7) devient :

$$M_1[m, S, \{Z_1\}], M_2[m, S, \{Z_2\}] \quad (4.8)$$

Ici, on note que les messages  $M_1$  et  $M_2$  sont relayés séparément.

L'algorithme 4.1 illustre le cas de la fragmentation d'un message.

---

**Algorithme 4.1** Fragment du message en  $(M_1[m, S, \{Z_1\}], M_2[m, S, \{Z_2\}])$

---

**Fonction** Fragmenter(M)

**begin**

**if**  $([GF(Z_1) \text{ and } GF(Z_2) \text{ and } GF(Z_1) \neq GF(Z_2)] \text{ or}$   
 $[not(GF(Z_1)) \text{ and } GF(Z_2) \text{ and } RM(Z_1) \neq GF(Z_2)] \text{ or}$   
 $[GF(Z_1) \text{ and } not(GF(Z_2)) \text{ and } GF(Z_1) \neq RM(Z_2)] \text{ or}$   
 $[not(GF(Z_1)) \text{ and } not(GF(Z_2)) \text{ and } RM(Z_1) \neq RM(Z_2)])$  **then**  
**return**  $(M_1[m, S, \{Z_1\}], M_2[m, S, \{Z_2\}]);$

**endif**

**end**

---

#### 4.5.2.3 Le Message défragmenté

Quand le message géocast est destiné à deux sous-ZORs différents  $Z_1$  et  $Z_2$  (ou plus), il est relayé par le même voisin en utilisant la technique du greedy forwarding ou la règle de la main droite, le message  $M$  est défragmenté et est défini comme suit :

$$M[m, S, \{Z_1, Z_2\}] \quad (4.9)$$

---

**Algorithme 4.2** Défragmentation du message en  $(M[m, S, \{Z_1, Z_2\}])$

---

**Fonction** Derfragmenter(M)

**begin**

**if**  $([GF(Z_1) \text{ and } GF(Z_2) \text{ and } GF(Z_1) \neq GF(Z_2)] \text{ or}$   
 $[not(GF(Z_1)) \text{ and } GF(Z_2) \text{ and } RM(Z_1) \neq GF(Z_2)] \text{ or}$   
 $[GF(Z_1) \text{ and } not(GF(Z_2)) \text{ and } GF(Z_1) \neq RM(Z_2)] \text{ or}$   
 $[not(GF(Z_1)) \text{ and } not(GF(Z_2)) \text{ and } RM(Z_1) \neq RM(Z_2)])$  **then**  
**return**  $(M[m, S, \{Z_1, Z_2\}]);$

**endif**

**endfunction**

---

Le cas de défragmentation est donné par l'algorithme 4.2 où  $RM(Z_1)$  est l'application de la règle de la main droite (RM : Recovery Mode) au sous-ZOR  $Z_1$ , et  $GF(Z_2)$  l'application de la procedure greedy forwarding au sous-ZOR  $Z_2$ . On peut lire le premier test ainsi :

S'il n'est pas possible d'avancer en utilisant le mode greedy pour atteindre le sous-ZOR  $Z_1$  depuis le nœud local et qu'il est possible d'avancer avec du greedy forwarding pour atteindre le sous-ZOR  $Z_2$ , et que le mode recovery vers le sous-ZOR  $Z_1$  fourni le même résultat (nœud relais) que celui fourni par le greedy forwarding vers le sous-ZOR  $Z_2$ , alors on pré-fragmente le message  $M$ .

## 4.6 Algorithme GeoSUZ

Nous avons formalisé notre solution dans l'algorithme GeoSUZ (Geocast routing in Sub-ZORs) dont la fonction principale est présentée dans l'algorithme 4.3. Le véhicule source (ou les véhicules relais intermédiaires) définissent leur angle de vision  $\gamma$ . Il calcule ensuite les distances entre sa position et les différents sous-ZORs auxquels le message initial est destiné puis les tris par ordre des distances du plus proche au plus loin. Ensuite, il génère le message géocast vide  $M$  censé contenir le message à destination des sous-ZORs. Désormais, le nœud teste son appartenance ou pas à un quelconque sous-ZOR. Si c'est le cas, il effectue une diffusion du message  $M$  dans le sous-ZOR en question (la technique de diffusion dans un sous-ZOR fait l'objet du chapitre 5), supprime ce dernier de la liste des sous-ZOR de  $M$  et commence le test de la technique de géométrie de vision par angles. À l'issue de celle-ci, deux messages sont générés. Le premier  $M_1$  est le message qui est destiné à être envoyé à plusieurs sous-ZORs situés dans la même direction que le sous-ZOR le plus proche. Ce message est envoyé au sous-ZOR le plus proche à la fin de cette étape.

Le deuxième message  $M_2$  est destiné au reste des sous-ZORs. On réitère la procédure précédente de manière récursive sur  $M_2$  (pour s'assurer qu'il ne reste pas de sous-ZOR dans la même direction) jusqu'à avoir un seul sous-ZOR comme destination à  $M_2$  ou que  $M_2[Z]$  soit vide.

---

**Algorithme 4.3** La fonction GeoSUZ

---

**Function** GeoSUZ()**begin**Define  $\gamma$ Calculate all  $D_{SZ_i}$  where  $Z_i$  the sub-ZOR  $i : i = 1, 2, \dots, n$ Ascending order of  $D_{SZ_i}$  into  $D_{SZ_k}$  where  $k = 1, 2, \dots, n$ Generate( $M[m, S, Z_k]$ ); //  $S$  génère ou reçoit  $M$ **if** (Current\_Node in  $M[Z[1]]$ ) **then**GeoBroadcast( $M[m, S, Z[1]]$ );

// utiliser OB-VAN (voir chapitre 5)

SUB( $Z[1], M$ ); //  $M[m, S, Z \setminus \text{Current\_subZOR}]$ Pre-fragment( $M$ ); //  $M_1[m, S, Z].M_2[m, S, Z]$ **end****if** (size( $M[Z]$ ) > 1) **then**Vision\_par\_angles( $M$ );

// définie dans l'algorithme 4.4

**endif****endfunction**

---

Les caractéristiques de notre protocole sont présentées dans le tableau 4.1.

Caractéristiques	GeoSUZ
Periodic beacons	Yes
Forwarding strategy	Greedy forwarding
Routing maintenance	Reactive
Scenario	Urban
Recovery strategy	-
Infrastructure requirement	No
Mobility of destination zone	Yes
Digital map	No
Control packet overhead	Low
Spatial relevance	Yes
Temporal relevance	-

TABLE 4.1 – Caractéristiques du protocole

L'algorithme 4.4 montre la procédure assimilée à la technique de géométrie de vision par angles.

---

**Algorithme 4.4** Pre-fragment vision angle based procedure

---

**Function** Vision\_par\_angles( $M$ )  
**begin**  
 $h = 1$ ; //  $Z_h$  le sous-ZOR le plus proche  
 $M_1[Z] = Z_h$ ;  
 $M_2[Z] = \phi$ ;  
 $j = 1$ ;  
**while**  $j < k$  **then**  
  **if**  $S\hat{Z}_h Z_{j+1} \geq \gamma$  **then**  
    ADD( $Z_{j+1}, M_1$ ); //  $M_1[m, S, \{Z_h, Z_{j+1}\}]$   
  **else** //  $S\hat{Z}_h Z_{j+1} < \gamma$   
    ADD( $Z_{j+1}, M_2$ );  
  **endif**  
   $j = j + 1$ ;  
**endwhile**  
GeoUnicast( $M_1$ );  
**if** (size( $M_2[Z]$ ))= 1) **then**  
  GeoUnicast( $M_2$ );  
**else**  
  **if** (size( $M_2[Z]$ ) < 1) **then**  
    break(); // fin de la récursivité  
  **else**  
    Vision\_par\_angles( $M_2$ ); // Fonction récursive  
  **endif**  
  **endif**  
**endif**  
**endfunction**

---

Le diagramme de flux de la figure 4.9 résume les règles de routage unicast du protocole GEOSUZ. Le nœud source génère le message  $M[S, D, Z]$  où  $S$  est l'identifiant de la source,  $D$  le message à transmettre (information) et  $Z$  la zone de destination du message géocast représentant l'ensemble des sous-ZORs  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ .

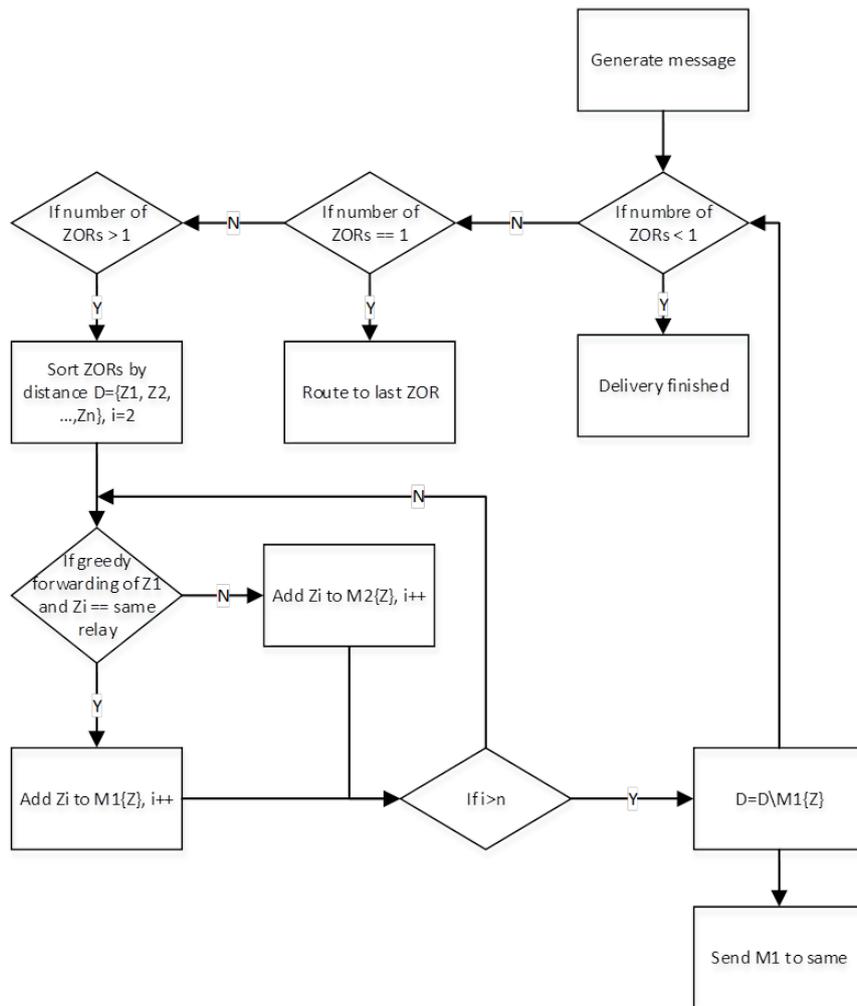


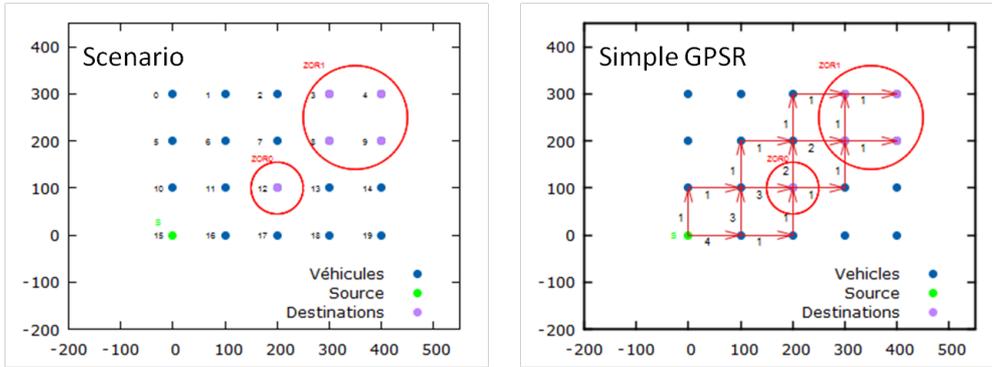
FIGURE 4.9 – Diagramme de flux Unicast dans GeoSUZ

## 4.7 Résultats numériques

Nous avons appliqué notre algorithme GeoSUZ au scénario présenté dans la figure 4.10a représentant un réseau VANET d'une densité moyenne et stable et à mobilité réduite, ceci pour le tester dans des conditions optimales. Ce réseau comporte 20 véhicules placés sur une grille droite. La distance entre chaque véhicule est fixée à 100m pour forcer les transmissions à se faire uniquement de manière horizontale ou verticale. Ceci élimine les transmissions en diagonale et permet de mieux voir le comportement de notre algorithme et les techniques de greedy forwarding et du perimeter mode qu'il emploie. Ce scénario comporte un véhicule source placé dans le coin bas-gauche de la grille et deux sous-ZOR nommés ZOR0 et ZOR1. Nous avons placé ces deux sous-ZORs de manière à ce que le sous-ZOR ZOR1 le plus loin de la source soit dans l'angle de vision de la source à travers le sous-ZOR le plus plus ZOR0.

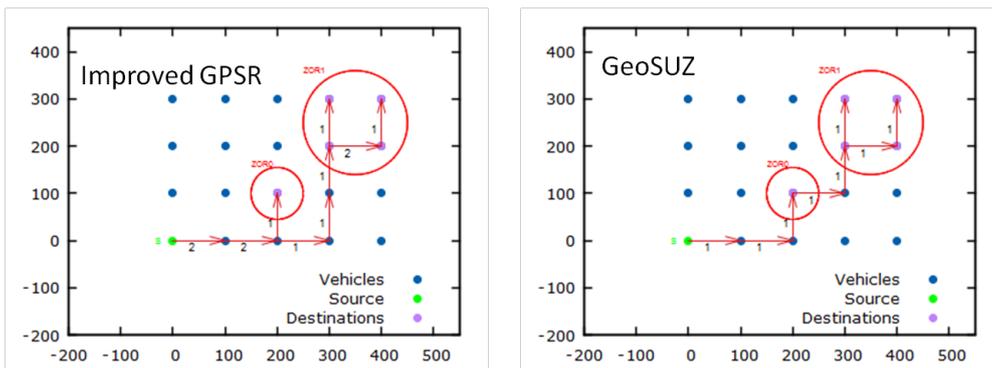
Ces résultats sont comparés avec ceux du protocole GPSR simple présenté dans la section 3.2 et ceux du protocole GPSR amélioré, une adaptation que nous avons fait au protocole GPSR simple pour considérer les sous-ZORs comme étant des nœuds uniques dans le but de les comparer avec notre algorithme GeoSUZ. Ceci est dû au manque de protocoles de routage géocast qui traitent le multi-zones de destinations.

Les résultats de la figure 4.12 montrent que l'algorithme GeoSUZ réduit de manière significative le nombre de messages échangés sur le réseau en comparaison avec le protocole GPSR simple et GPSR amélioré (une adaptation que nous avons réalisée pour permettre à GPSR de manipuler des zones géographiques au lieu des nœuds). Et comme GeoSUZ emploie les mêmes techniques que GPSR, nous pouvons affirmer que GeoSUZ fait une meilleure utilisation de la bande-passante comparé à GPSR simple et GPSR amélioré. Nous avons considéré que le véhicule source envoie 3000 messages géocast à tous les véhicules situés dans les sous-ZORs ZOR0 et ZOR1.



(a) Scénario d'un réseau VANET à densité moyenne et stable et mobilité réduite (b) Exécution du protocole GPSR Simple

FIGURE 4.10 – Scénarios de test et application de GPSR simple



(a) Exécution du protocole GPSR Amélioré (b) Exécution de l'algorithme GeoSUZ

FIGURE 4.11 – Scénarios d'application de GPSR amélioré et de GeoSUZ

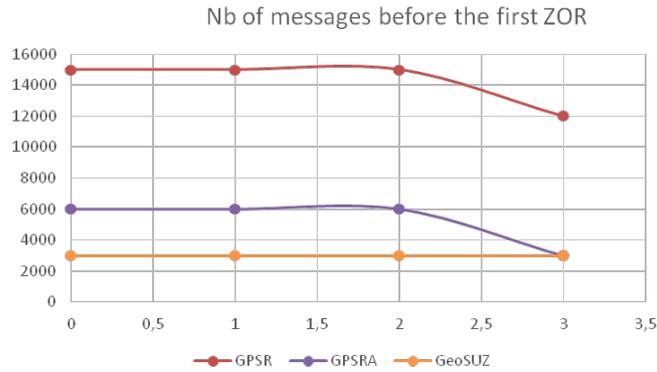


FIGURE 4.12 – Courbe des résultats : Taux de messages générés avant le premier sous-ZOR

La figure 4.13 montre les résultats d’application numérique de notre algorithme GeoSUZ à l’intérieur des deux sous-ZORs du scénario précédent. Celui-ci affiche également des résultats meilleurs que ceux des deux autres protocoles. Nous considérons pour ce test que chaque véhicule dans un sous-ZOR connaît les positions de tous les véhicules qui s’y trouvent au moment où il reçoit le message à diffuser. Ceci est moins pratique dans la réalité, comme les véhicules avancent sur les routes et ne font que traverser différents ZORs. Donc, les véhicules connaissent au plus leur voisinage à un saut.

Nous conseillons tout de même l’application de notre algorithme à un scénario de diffusion dans un convoi (cluster) où le cluster-head connaît les positions de l’ensemble des véhicules de son convoi. Notre thèse ne portant pas sur le routage dans les clusters, nous laissons ce travail en perspective.

La figure 4.14 présente les résultats numériques de l’application de notre algorithme GeoSUZ (algorithme 4.3) au scénario illustrant notre problématique présentée dans la figure 4.6. Ces résultats sont comparés avec ceux du protocole GPSR amélioré.

Dans ce scénario, nous avons supposé que la source  $S$  veut envoyer 3000 paquets différents à destination des sous-ZORs  $A$ ,  $B$  et  $C$ . Sachant que ces

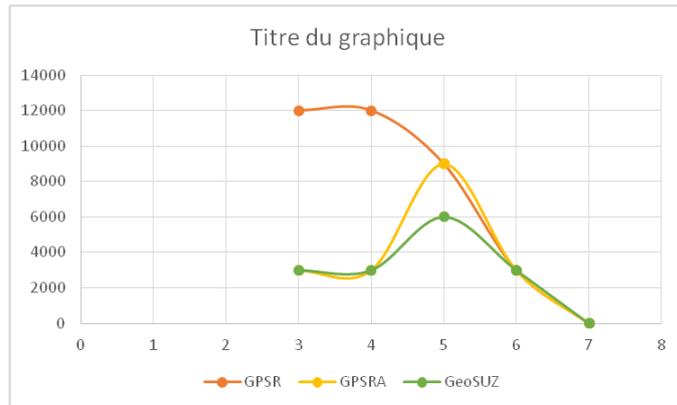


FIGURE 4.13 – Courbe des résultats : Taux de messages générés après le premier sous-ZOR

sous-ZORs sont dans la même direction et que les messages qui leur seront destinés passeront par  $p$  et  $q$ . Nous remarquons que notre algorithme GeoSUZ permet d'économiser considérablement la bande passante en diminuant le nombre de messages envoyés sur le réseau.

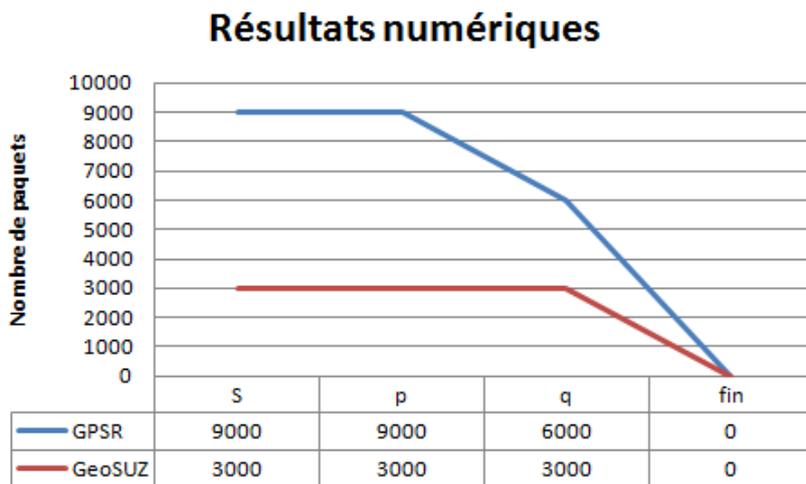


FIGURE 4.14 – Résultats numériques

## 4.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la problématique liée à l'utilisation d'une seule zone de destination pour le routage géocast dans les réseaux VANETs. Nous avons démontré que la zone de destination pour ce type de réseaux doit être confinée à certains tronçons de routes où l'information est susceptible d'avoir un intérêt pour les usagers de la route qui s'y trouveront. Nous avons montré que le fait de découper une zone de destination en plusieurs sous-zones affecte les performances des protocoles de routage existants. Ceci nous a mené à proposer la technique de géométrie de vision par angles qui permet de diminuer considérablement le nombre de messages échangés sur le réseau. Nous avons également proposé l'algorithme GeoSUZ qui permet d'acheminer le message géocast de la source vers les différents sous-ZORs. Pour prouver l'efficacité de l'algorithme GeoSUZ nous l'avons comparé avec le protocole GPSR qui implémente les fonctions de base du routage géographique, à savoir, le greedy forwarding et le perimeter mode.

# Chapitre 5

## Diffusion optimisée dans les sous-ZORs

Dans ce chapitre, nous traitons la partie liée à la diffusion du message géocast à l'intérieur d'un sous-ZOR. Les protocoles de routage de type broadcast sont très souvent utilisés dans les réseaux VANETs pour la diffusion de diverses informations en rapport avec l'état de la circulation (trafic, météo, conditions de la route, divertissement et publicités). Le broadcast est utilisé par un véhicule quand il souhaite envoyer un paquet à destination de tous ses voisins directs ou dans un rayon délimité par le nombre de sauts ou par des coordonnées géographiques. L'utilisation de l'inondation (flooding) permet d'assurer la délivrance du message à tous les véhicules du réseau, mais génère une perte de bande passante considérable. Dans les réseaux VANETs, plus le nombre de véhicules est petit plus la technique d'inondation donne un meilleur rendement.

Nous commençons dans ce chapitre par la section 5.1 qui liste quelques protocoles de diffusion dédiés aux réseaux VANETs à travers lesquels nous avons fait ressortir le protocole OB-VAN qui offre de très bonnes performances face à la technique d'inondation. Cette section présente les étapes de ce protocole ainsi que quelques résultats de simulation. Dans la section 5.3, nous avons synthétisé notre travail réalisé dans le chapitre 4 pour y intégrer la technique de diffusion présentée dans 5.1. La section 5.4 conclut ce chapitre.

## 5.1 Diffusion dans un sous-ZOR

Il existe dans la littérature plusieurs protocoles de diffusion dédiés aux réseaux VANETs. Une liste non exhaustive de ces protocoles que nous avons pu trouver sont : BROADCAST [74], UMB [75], DV-CAST [76], V-TRADE [77], EAEP [78], SRB [79], PBSM [80], PGB [81], DECA [82] et OB-VAN [83].

BROADCAST est utilisé dans le contexte d'autoroutes. Il décompose chaque autoroute en petites cellules virtuelles qui se déplacent dans le même sens des véhicules. Il utilise une hiérarchie à deux niveaux, la première représentant tout les véhicules d'une cellule et la deuxième représentant quelques véhicules qui se situent à proximité du centre de chaque cellule appelés *cell reflectors*. Un cell reflector joue pendant un certain laps de temps le rôle d'un cluster-head où il se charge des messages d'urgence en provenance des membres de sa cellule ou vers ceux-ci [74].

Le protocole UMB (Urban Multihop Broadcast protocol) choisi comme relais parmi les voisins d'un nœud source le nœud/véhicule le plus loin dans le sens de la diffusion. Il essaie de répondre également au problème du nœud caché, à la collision des paquets et à l'interférence [75].

Le protocole DV-CAST (Distributed vehicular broadcast protocol) utilise les messages Hello périodiques dans son processus de diffusion. Les messages Hello lui permettent d'entretenir des informations sur la topologie du réseau. Les véhicules sont classés en trois catégories : *well connected*, *totally connected* et *disconnected* [76].

V-TRADE (Vector Based Tracing Detection) est un protocole de diffusion qui utilise le système GPS. L'idée principale ressemble à celle du protocole ZRP (Zone Routing Protocol) [52]. Il classe les voisins en plusieurs groupes de relayage selon leurs positions et les informations sur leurs déplacements. Pour chaque groupe, seulement un petit sous-ensemble de véhicules sont sélectionnés pour rediffuser le message [77].

EAEP (Edge-aware epidemic protocol) est un protocole de diffusion fiable pour les réseaux VANETs fortement dynamiques. Il réduit le nombre de paquets de contrôle échangés sur le réseau. Chaque véhicule ajoute sa position

géographique aux messages de diffusion. Ceci permet de diminuer le nombre de messages beacons. Dès la réception d'un nouveau message de diffusion, EAEP utilise le champ "numéro de retransmission" des nœuds situés devant et derrière pendant une certaine durée de temps pour calculer la probabilité de prise de décision sur la possibilité que les nœuds vont rediffuser le message ou non. EAEP pali au problème de l'inondation simple mais se caractérise par de grandes latences lors de la dissémination des données [78].

SRB(Secure Ring Broadcasting) permet de diminuer le nombre de retransmissions des messages et permet d'avoir des routes stables. Il classe les nœuds en trois catégories basées sur leur puissance de réception comme *Inner nodes* (proche du nœud source), *Outer nodes* (très loin du nœud source) et *Secure Ring Nodes* (nœuds situés à une distance optimale du nœud source). Il restreint la rediffusion uniquement aux nœuds de la catégorie Secure Ring Nodes pour minimiser le nombre de retransmissions [79].

PBSM (Parameter less broadcasting in static to highly mobile wireless ad Hoc) est un protocole de diffusion adaptatif. Il utilise des ensembles de connexions dominantes CDS (Connected Dominating Sets) et des concepts d'élimination des voisins pour éliminer les diffusions redondantes. Il utilise les informations des voisins à deux-sauts obtenues par l'échange des messages périodiques pour construire les CDS. Un véhicule A maintient deux tables des voisins : R et NR, R contenant les voisins qui ont déjà reçu le paquet de diffusion et NR les autres. Après expiration d'un temporisateur, le véhicule A rediffuse le paquet si la table NR n'est pas vide [80].

PGB (Preferred group broadcast) n'est pas un protocole de diffusion fiable mais apporte une solution qui permet de prévenir le problème de diffusion *Storm* des requêtes de recherche de routes RREQ. Chaque nœud PGB détecte le niveau de l'intensité du signal depuis les voisins qui réalisent des diffusions. Cette métrique permet de calculer un temporisateur. Les nœuds situés en bordure de la diffusion généreront un temporisateur plus petit. Uniquement les nœuds avec un temporisateur petit pourront rediffuser le message. PGB peut diminuer le nombre de rediffusions des messages RREQ mais rencontre des problèmes dans les régions à faibles densités [81].

DECA (Density-aware reliable broadcasting protocol) ne nécessite pas la

connaissance de la position. DECA utilise uniquement les informations sur la densité à un-saut obtenue par l'échange périodique des beacons. Avant la diffusion, un nœud sélectionne le nœud qui possède une densité local importante pour être le prochain nœud de rediffusion. Les autres nœuds génèrent aléatoirement des temporisateurs. S'il détectent qu'il n'y a pas de rediffusion après expiration de leur temporisateurs, il rediffuse le message [82].

OB-VAN (Opportunistic broadcast in vanets using active signaling for relays selection) [83] est un protocole de diffusion opportuniste<sup>1</sup> basé sur la position. Il permet de sélectionner les meilleurs relais qui offrent une meilleure progression au paquet à diffuser dans un ZOR. La technique de diffusion utilisée par OB-VAN lui permet d'avoir de très bonnes performances face à la technique d'inondation.

Dans notre étude, nous avons opté pour l'intégration d'OB-VAN dans GeoSUZ pour assurer la phase de diffusion du message géocast au sein des différents sous-ZORs.

## 5.2 OB-VAN

Dans la suite de cette section nous présentons les étapes du protocole OB-VAN, un exemple du processus de sélection des nœuds relais pour la diffusion dans un sous-ZOR et quelques résultats de simulation.

### 5.2.1 Étapes du protocole OB-VAN

- Dans un sous-ZOR supposé linéaire dans l'axe orienté (source - sous-ZOR), on peut envisager un broadcast unidirectionnel.
- Dans les protocoles opportunistes basés sur un timer, plus la distance entre la source et le relais est grande, plus petit est le backoff.
- OB-VAN utilise une sélection logarithmique sur la base de la distance entre les relais potentiels dans le but de trouver le plus loin.

---

1. Un protocole de routage opportuniste est un protocole de routage géographique qui permet de sélectionner dynamiquement un ou plusieurs relais parmi tous les véhicules qui ont reçu le paquet (de sélection de relais) correctement.

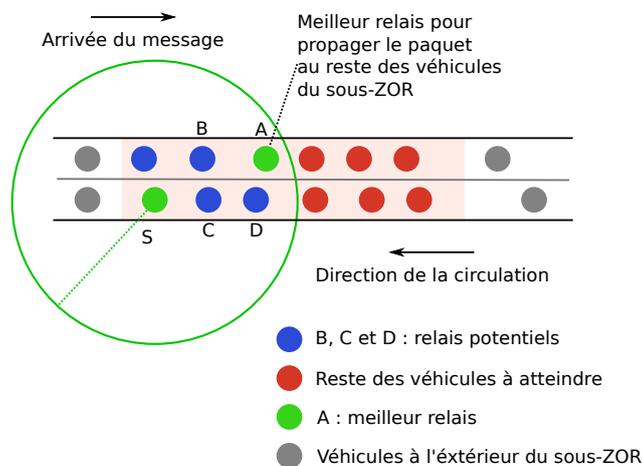


FIGURE 5.1 – Sous-ZOR liéaire

- Cette technique profite des avantages du signalement par bursts présentée dans [84] pour sélectionner le meilleur relais. Elle a été proposée pour le standard HiPERLAN type 1.
- Dans OB-VAN, les acquittements sont utilisés pour sélectionner les relais potentiels (voir figure 5.1).
- Les nœuds qui ont reçu le paquet transmettent un ACK de signalement de bursts juste à la fin de la réception du paquet diffusé.
- Utilité de cet ACK :
  - La source saura qu'il y a des relais potentiels à son paquet
  - Permet au meilleur relais d'être sélectionné
- Ce burst est une séquence d'intervalles de la même longueur dans lesquels un récepteur potentiel pourrait transmettre ou écouter
- Durant cette étape active de signalement : chaque récepteur applique les règles suivantes :
  - S'il détecte un signal durant n'importe quel intervalle d'écoute, il quitte le processus de sélection (arrête de transmettre durant tout le temps restant de la phase de signalement actif). La détection d'une transmission durant l'intervalle d'écoute signifie qu'un meilleur relais a également reçu le paquet à diffuser (dans la première par-

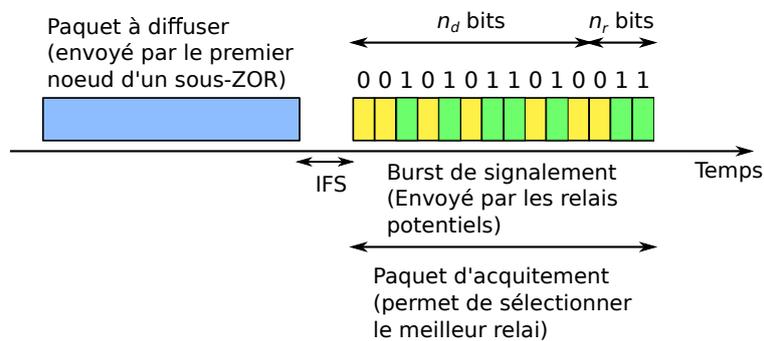


FIGURE 5.2 – Structure de l’acquittement servant dans le processus de sélection du meilleur relais

tie du slot). C’est l’idée de CSMA en modifiant le backoff par le schéma de signalement actif.

- Ces bursts de signalement peuvent être mieux représentés en séquence binaire
  - ★ 0 : intervalle d’écoute
  - ★ 1 : intervalle de transmission
- Cette séquence binaire peut être calculée par chaque nœud récepteur comme ceci :
  - ★ Les  $n_d$  premiers bits sont calculés par le récepteur comme une fonction de critères souhaités pour un meilleur relais. Il est codé en base 2 (voir figure 5.2).
  - ★ Le critère doit satisfaire la règle du : meilleur est le relais, plus large est le critère.

### 5.2.2 Exemple du processus de sélection

Nous présentons un exemple d’application de OB-VAN dans un sous-ZOR où nous supposons que la valeur  $n_d = 10$  permet de coder des distances jusqu’à 1km avec une précision d’1m. On peut vérifier facilement que le mécanisme de sélection va toujours sélectionner le relais avec le meilleur paramètre du moment qu’il y a toujours un intervalle dans lequel un autre relais avec un plus petit paramètre écoute quand le relais avec un grand paramètre envoie.

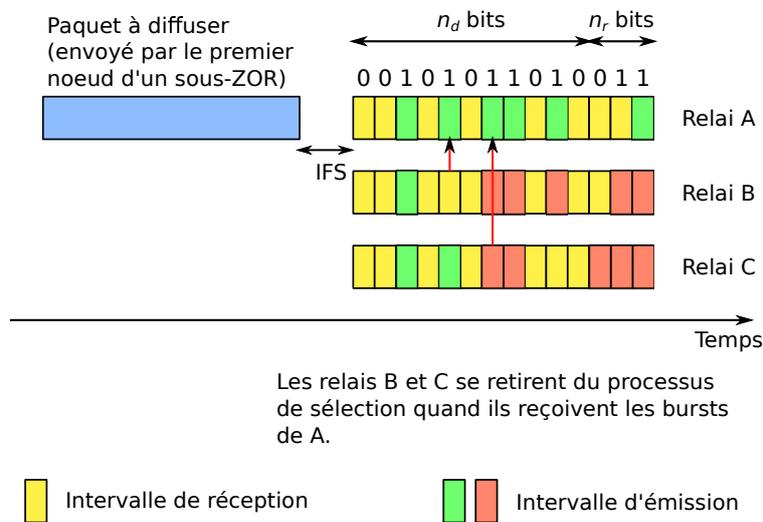


FIGURE 5.3 – Exemple du processus de sélection d'un relais dans OB-VAN

- On ajoute également des bits générés aléatoirement pour différencier entre les relais qui offrent une même progression.
- Le dernier bit de  $n_r$  est fixé à 1. Ceci pour s'assurer d'éliminer les récepteurs qui risquent de rester indéfiniment dans le processus de sélection.

À partir de la figure 5.3, A offre la meilleure progression sur la route, il gagne le processus de sélection.

- Pour faire face à de possibles interférences, les bursts sont envoyés avec CSMA spreading code.
- Le code qui doit être utilisé par les relais potentiels est généré aléatoirement et mis dans le paquet broadcast par la source. Ce qui implique que les relais potentiels connaîtront ce code.
- Dans le cas d'une transmission bidirectionnelle, deux codes doivent être envoyés. Dans ce cas, le relais dans le sens de la circulation utilisera le premier code.
- Le paquet broadcast doit contenir la position du noeud source, la position du relais et un numéro de séquence.

- La position du nœud source permet de stopper la diffusion du paquet quand la zone de destination est atteinte.
- Le numéro de séquence et la position du relais permettent de se débarrasser des paquets doublons.
- Une liste des paquets relayés est maintenu sur chaque nœud pour vérifier les doublons.

### 5.2.3 Résultats de simulation dans un sous-ZOR

La figure 5.4 montre des résultats de simulation similaires à ceux auxquels on pourrait s'attendre dans un sous-ZOR en comparant OB-VAN à la technique d'inondation. Le scénario simulé est un sous-ZOR de forme rectangulaire de 1km de long sur 50m de large.

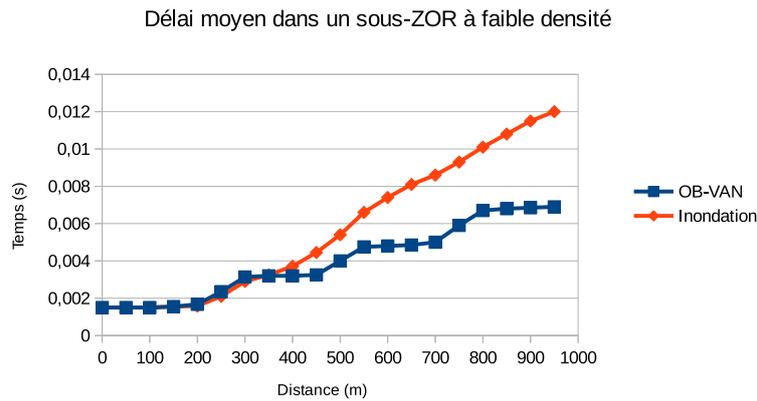


FIGURE 5.4 – Résultats de la diffusion du message GeoSUZ dans un sous-ZOR

Les véhicules arrivent de manière aléatoire pendant les 10 premières secondes sur 30 secondes de simulation totale. Le réseau est faiblement chargé dans le sous-ZOR, les messages à diffuser arrivent au premier nœud S du sous-ZOR à hauteur de 20 paquets par seconde. A 10 secondes de simulation, le nœud S reçoit son premier paquet et commence sa diffusion. Chaque paquet individuel [85] possède une taille de 100 octets.

Paramètre	Valeur
Couverture de la transmission	250m
Débit de données	11Mb/s
Débit de base	2Mb/s
Longueur du préambule	72
Mécanisme RTS/CTS	Désactivé
Longueur de la file	50

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation de OB-VAN dans un sous-ZOR

Les paramètres de simulation présentés dans le tableau 5.1 ont été appliqués.

## 5.3 La fonction principale `main()` de GeoSUZ

Dans la section 4.6, nous avons présenté la première partie de l'algorithme GeoSUZ basé sur la technique de géométrie de vision par angles. Cette première partie permet d'acheminer le message GeoSUZ de la source vers les différents sous-ZORs. Dans la section 5.1 précédente, nous avons présenté l'algorithme OB-VAN [83] qui permet de diffuser le message GeoSUZ à l'intérieur de chaque sous ZOR. À travers ces deux sections, nous présentons dans l'algorithme 5.1 la fonction principale « `main()` » de l'algorithme GeoSUZ, où nous avons ajouté à la structure du message GeoSUZ. Le champ « Type » qui prend deux valeurs (UM pour Unicast Message et BM pour Broadcast Message) permet de différencier entre le message à relayer à un autre sous-ZOR d'un message à diffuser à l'intérieur d'un sous-ZOR.

### 5.3.1 Diagramme de flux de l'algorithme

Le diagramme de flux de la Figure 5.5 résume les règles de routage du protocole GeoSUZ. Le nœud source génère le message  $M[S, D, Z, T]$  où S est l'identifiant de la source, D le message à transmettre (Data), Z la zone

---

**Algorithme 5.1** La fonction principale de l'algorithme GeoSUZ

---

```
define structure Message[Source, Data, ZOR, Type]
Message.ZOR={sub - ZOR1, sub - ZOR2,...,sub - ZORn}
Message.Type={UM or BM}
//UM : Unicast_message, BM : Broadcast_message

begin main()
  if (Message.stat = received) then
    if (Vehicle.Position ∈ Message.ZOR) then
      Relay(Message); // Fonction présentée plus bas
    else
      Ignore(Message); // Ignorer le message
  end // fin de la fonction main()

function Relay(_Message)
begin
  if (Message.Type = UM) then
    Unicast_Message(_Message);
    // Fonction GeoSUZ décrite dans la section 4.6
  else
    Broadcast_Message(_Message);
    // Fonction OB-VAN décrite dans la section 5.1
  end // fin de la fonction Relay()
```

---

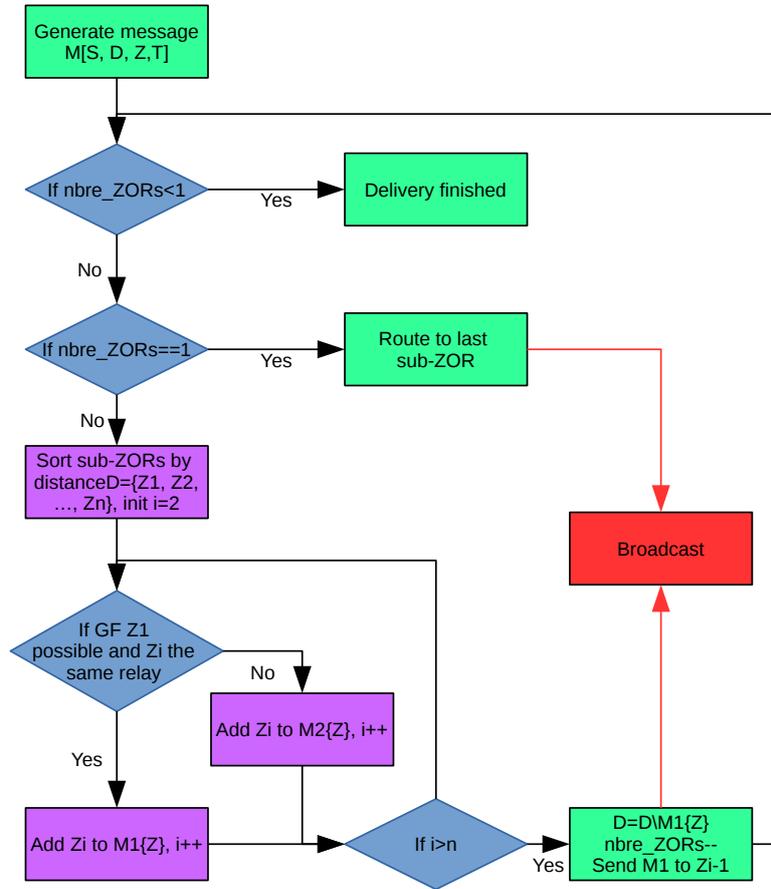


FIGURE 5.5 – Diagramme de flux de l’algorithme GeoSUZ

de destination du message géocast représentant l’ensemble des sous-ZORs  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  et  $T$  le type du message qui peut prendre deux valeurs UM pour Unicast Message et BM pour Broadcast Message.

## 5.4 Conclusion

Dans le chapitre précédent, nous avons vu comment un message est envoyé de manière optimisée de la source aux différents sous-ZORs. Dans ce chapitre, nous avons présenté la technique OB-VAN que nous avons choisie pour la phase de diffusion dans les sous-ZOR. Nous avons pu démontrer à travers

les simulations qu'elle offre de meilleurs résultats comparés à ceux d'une inondation simple.

Nous avons présenté dans ce chapitre la fonction principale de notre protocole qui permet de finaliser l'écriture de l'algorithme GeoSUZ. Cette fonction apporte un détail au paquet géocast. Elle ajoute le champ "*type de message*" dans chaque paquet pour permettre de différencier le paquet à unicaster de celui à diffuser.

# Conclusion générale

À travers ce manuscrit de thèse, nous avons dans un premier lieu élaborer un état de l'art complet sur les systèmes de transport intelligents dédiés aux réseaux véhiculaires. Nous avons ensuite présenté les catégories des protocoles de routage existants. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux protocoles de routage basés sur la position, ceux-ci étant les plus adaptés à la nature variable de la topologie des réseaux VANETs et à la vitesse élevée des véhicules qui rendent les autres type de routage inefficaces. Puis, notre choix s'est porté sur le routage géocast qui suscite un grand attrait pour beaucoup d'exemples d'applications VANETs, tel que la gestion d'un accident survenu sur la route, de prévenir les embouteillages, ou le simple envoi simplement de la publicité aux usagers de la route.

Dans la suite du manuscrit, nous avons tenté d'apporter des améliorations au niveau du routage géocast pour les applications VANETs. Notre idée principale consiste à remettre en question la nécessité d'une seule zone de destination dans le routage géocast destiné aux réseaux VANETs. Nous avons donc proposé de découper la zone de destination en sous-zones et nous avons étayé notre argumentaire avec un scénario générique pouvant s'appliquer à un grand nombre de scénarios concrets. Pour confiner une zone de destination à plusieurs portions de la route, nous avons dû proposer trois formes géométriques simples à travers lesquelles il est possible de couvrir n'importe quelle forme de route. Ce découpage qui apporte l'avantage de n'attirer que l'attention des usagers de la route susceptibles d'être intéressés par une information, génère au niveau du routage un problème d'utilisation excessive de la bande passante entre la source et les différentes sous-zones de destination. Pour aller au bout de ce problème, nous avons proposé le protocole GeoSUZ

basé sur une technique de géométrie de vision par angles qui permet de diminuer considérablement le nombre de messages échangés dans le réseau lors du routage.

Une fois que nous avons pu faire acheminer le message géocast à chaque sous-zone de destination, nous avons proposé d'utiliser le protocole OB-VAN pour assurer la diffusion du message dans chaque sous-ZOR.

Pour finir, nous avons présenté la fonction principale du protocole GeOSUZ.

# Perspectives

Les résultats de cette thèse ouvrent de très nombreuses perspectives, aussi bien dans la continuité du travail déjà réalisé que dans des directions plus ambitieuses à plus long terme. Nous présentons ci-dessous celles qui nous semblent les plus prometteuses.

Dans un premier temps, il est primordial de comprendre l'impact des différents paramètres du réseau et de la circulation sur l'angle de vision de notre technique de vision par angles.

Il est possible de proposer également une solution pour la génération automatique des zones de destination en se basant sur les règles de circulation et la carte numérique du réseau routier.

Il est souhaitable également d'adapter les formes géométriques proposées dans cette thèse à un plan à trois-dimensions qui est le plus adéquat pour les réseaux routiers.

La dissémination temporelle est à envisager également.

# Liste des publications

## Papiers journaux

1. **S. ALLAL**, S. Boudjit, “*Geocast Routing Protocols for VANETs : Survey and Geometry-Driven Scheme Proposal*”, in Proceedings of Journal of Internet Services and Information Security, Volume 3, Issue 1/2, February 2013.
2. **S. ALLAL**, S. Boudjit, A. Laouiti, P. Muhlethaler, “*GeoSUZ : Advanced broadcasting management in sub-ZORs*”. (En cours de soumission)

## Papiers conférences

1. **S. ALLAL**, S. Boudjit, “*GeoSUZ : Geocast Routing Protocol in Sub-ZORs for VANETs*”, in Proceedings of The 5th IEEE International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT’12), July, 2012, Paris, France.
2. **S. ALLAL**, S. Boudjit, “*Geocast Routing Protocols for VANETs : Survey and Guidelines*”, in Proceedings of 2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS 2012), July, 2012, Palermo, Italy.
3. S. Boudjit, N. Chelghoum, **S. ALLAL**, M. Otsmani, “*Multi-Sensors’ Data Gathering Management System for a Wireless Health Monitoring Platform*”, in Proceedings of the First ACM MobiHoc Workshop on Pervasive Wireless Healthcare, May, 2011, Paris.

# Bibliographie

- [1] “Intelligent Transport Systems (ITS) – Vehicular Communications – Geonetworking – Part 4 : Geographical Addressing and Forwarding for Point-to-Point and Point-to-Multipoint Communications – Sub-Part 1 : Media-Independent Functionality,” *European Telecommunications Standards Institute*, Technical Specification 102 636-4-1, 2011.
- [2] “Changeable Message Sign Operation and Messaging Handbook,” *Operations Office of Travel Management*, Federal Highway Administration, August 2004. Retrieved 2009-12-07.
- [3] Yilin Zhao, “Mobile phone location determination and its impact on intelligent transportation systems,” *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Transactions on , vol.1, no.1, pages 55-4, Mars 2000.
- [4] Mintsis, G. & Basbas, S. & Papaioannou, P. & Taxiltaris, C. & Tziavos, I. N., “Applications of GPS technology in the land transportation system,” *European Journal of Operational Research*, Elsevier, vol. 152(2), pages 399-409, January 2004.
- [5] Nour-Eddin El Faouzi, Henry Leung, Ajeesh Kurian, “Data fusion in intelligent transportation systems : Progress and challenges – A survey,” *Information Fusion*, Volume 12, Issue 1, Pages 4-10, January 2011.
- [6] Jiang D., Taliwal V., Meier A., Holfelder W., Herrtwich R., “Design of 5.9 ghz dsrc-based vehicular safety communication,” *Wireless Communications*, IEEE , vol.13, no.5, pages 36-43, October 2006.
- [7] ASTM E22-13, “Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange between Roadside and Vehicle Systems — 5GHz

- Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” 2002.
- [8] IEEE P802.11p/D3.0, “Draft Amendment to Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements — Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 7 : Wireless Access in Vehicular Environment,” 2007.
  - [9] IEEE P1609.1, “Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Resource Manager,” 2006.
  - [10] IEEE P1609.2, “Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Security Services for Applications and Management Messages,” 2006.
  - [11] IEEE Std P1609.3, “IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-Networking Services,” 2007.
  - [12] IEEE P1609.4, “Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Multi-Channel Operation,” 2006.
  - [13] IEEE Std 802.11, “IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements — Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” 2007.
  - [14] Tsugawa, S., “An Introduction to Demo 2000 : The Cooperative Driving Scenario,” *IEEE Intelligent Systems*, 15 : pages 78-79, 2000.
  - [15] Shiraki Y., et al., “Development of an Inter-Vehicle Communications System,” *Special Edition on ITS*, 68 : pages 11-13, 2001.
  - [16] California PATH Annual Report website : <http://www.path.berkeley.edu/>, October 2014
  - [17] Benz T., et al. “CHAUFFEUR-TR 1009 - User safety and operational requirements,” 1999.

- [18] Hannes Hartenstein, Bernd Bochow, André Ebner, Matthias Lott, Markus Radimirsch and Dieter Vollmer, “Position-aware ad hoc wireless networks for inter-vehicle communications : the Fleetnet project,” *The 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing (MobiHoc '01)*. ACM, New York, NY, USA, pages 259-262.
- [19] Enkelmann Wilfried, “ FleetNet - applications for inter-vehicle communication,” *Intelligent Vehicles Symposium 2003*. IEEE , pages 162-167, 9-11 June 2003.
- [20] Festag Andreas, Füßler Holger, Hartenstein Hannes, Sarma Amardeo and Schmitz Ralf, “FleetNet : Bringing Car-to-Car Communication into the Real World,” *ITS for livable society : proceedings : 11th World Congress on ITS*, Nagoya, Aichi, Japan, 18-24 October 2004.
- [21] CarTALK2000 website : <http://www.cartalk2000.net/> , Octobre 2014.
- [22] Morsi nk P., and al. “CarTALK2000 : Development of a Cooperative ADAS based on Vehicle-to-Vehicle Communication,” *The 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, 2003.
- [23] eSafety website : [http://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/specialist/knowledge/esave/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/esave/index_en.htm), October 2014.
- [24] CAR 2 CAR Communication Consortium Manifesto, [https://www.car-2-car.org/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1412157074&hash=6c8eafde7ecf63ae6e7c8e036fd12240f3fa5ea4&file=fileadmin/downloads/C2C-CC\\_manifesto\\_v1.1.pdf](https://www.car-2-car.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1412157074&hash=6c8eafde7ecf63ae6e7c8e036fd12240f3fa5ea4&file=fileadmin/downloads/C2C-CC_manifesto_v1.1.pdf), October 2013.
- [25] “Introductions of Driving Safety Support System (DSSS),” Project Available from : <http://www2.toyota.co.jp/en/news/11/06/0629.html>, <http://global-sei.com/sn/2009/384/3.html>, Octobre 2014.
- [26] Farradyne P., “Vehicle Infrastructure Integration (VII) Architecture and Functional Requirements,” *ITS Joint Program Office*, 2005.
- [27] Ma Y., and al., “Real-time highway traffic condition assessment framework using vehicle-infrastructure integration (VII) with artificial intelligence (AI),” *Trans. Intell. Transport. Sys.*, 2009. 10 : pages 615-627.

- [28] J. Spilker, “The Global Positioning System : Theory and Applications,” *Aiaa*, 1996, vol. 2.
- [29] European GNSS Agency website : <http://www.gsa.europa.eu/>.
- [30] R. Schubert, M. Schlingelhof, H. Cramer, and G.Wanielik, “Accurate Positioning for Vehicular Safety Applications – The SAFESPOT Approach,” *Vehicular Technology Conference VTC2007-Spring*. IEEE 65th, 2007, pages 2506–2510.
- [31] Martin Sauter, “Communication Systems for the Mobile Information Society,” *John Wiley*, September 2006, ISBN 0-470-02676-6.
- [32] Stefania Sesia, Issam Toufik, and Matthew Baker, “LTE – The UMTS Long Term Evolution – From Theory to Practice,” *Second Edition including Release 10 for LTE-Advanced*, John Wiley & Sons, 2011, ISBN 978-0-470-66025-6.
- [33] K. Fazel and S. Kaiser, “Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems : From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX”, *2nd Edition*, *John Wiley & Sons*, 2008, ISBN 978-0-470-99821-2.
- [34] P. Papadimitratos, A. La Fortelle, K. Evenssen, R. Brignolo, and S. Cosenza, “Vehicular Communication Systems : Enabling Technologies, Applications, and Future Outlook on Intelligent Transportation,” *Communications Magazine*, IEEE, 2009, vol. 47, no. 11, pages 84–95.
- [35] “Intelligent Transport Systems - Communications Access for Land Mobiles (CALM) – Architecture,” *ISO Technical Committee 204 WG16*, Tech. Rep. ISO/DIS 21217, work in progress, September 2009.
- [36] T. Rappaport and al., “Wireless Communications : Principles and Practice,” *Prentice Hall PTR New Jersey*, 1996, vol. 207.
- [37] “IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area networks – Specific Requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Tech. Rep., March 2012.
- [38] “Intelligent transport systems (ITS) – European profile standard for the physical and medium access control layer of intelligent transport systems

- operating in the 5 ghz frequency band,” *European Telecommunications Standards Institute*, European Standard 202 663, January 2010.
- [39] M. Torrent-Moreno, D. Jiang, and H. Hartenstein, “Broadcast Reception Rates and Effects of Priority Access in 802.11-based Vehicular Ad-hoc Networks,” *The 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*. ACM, 2004, pages 10–18.
- [40] J. Blum and A. Eskandarian, “Avoiding Timeslot Boundary Synchronization for Multihop Message Broadcast in Vehicular Networks,” *Vehicular Technology Conference VTC Spring 2009*. IEEE 69th. IEEE, 2009, pages 1–5.
- [41] “Trial-use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Multi-Channel Operation (IEEE 1609.4),” IEEE, Tech. Rep., 2006.
- [42] U. F. C. Commission et al., “R&O FCC 03–324,” *Dedicated Short Range Communications Report and Order*, 2003.
- [43] Karnadi, F.K. ; Zhi Hai Mo ; Kun-chan Lan, “Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET,” *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2007*. IEEE, pages 2506-2511, 11-15 March 2007.
- [44] Kun-chan Lan ; Chien-Ming Chou, “Realistic mobility models for Vehicular Ad hoc Network (VANET) simulations,” *8th International Conference ITS Telecommunications, ITST 2008.*, pages 362-366, 24-24 Oct 2008.
- [45] Martinez, Francisco J. and Toh, Chai Keong and al., “A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs)”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Volume 11, John Wiley & Sons, Ltd., pages 813-828, 7 Number 2011.
- [46] Michael Behrisch, Laura Bieker, Jakob Erdmann, Daniel Krajzewicz, “SUMO-Simulation of Urban Mobility”, 2011.
- [47] Shah, R.C., Rabaey, J., “Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2002)*, vol. 1, pages 350–355, 2002.

- [48] Perkins, C.E., Bhagwat, P. Highly, “Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers,” *SIGCOMM 1994*, pages 234–244, August 1994.
- [49] Clausen, T., Jacquet, P. “Optimized link state routing protocol,” *IETF RFC 3626* (2003), <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [50] Perkins, C.E., Royer, E.M., “Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing,” *2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA 1999)*, pages 90–100, February 1999.
- [51] Z. J. Hass and M. R. Pearlman, “Zone Routing Protocol (ZRP)”, Internet draft available at [www.ietf.org](http://www.ietf.org), November 1997.
- [52] H. Ehsan and Z. A. Uzmi (2004), “Performance Comparison of Ad Hoc Wireless Network Routing Protocols,” *IEEE 8th International Multi topic Conference, Proceedings of INMIC*, pages 457–465, December 2004.
- [53] Open Link State Routing website : <http://www.olsr.org>, October 2014.
- [54] Perkins CE, Royer EM, Das SR. Ad Hoc on Demand Distance Vector (AODV) routing. Available from : <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-aodv-06>, IETF Internet Draft, work in progress, 2000.
- [55] Jaisankar N, Saravanan R., “An extended AODV protocol for multipath routing in MANETs,” *Int J Eng Technol* 2010 ; 2(40).
- [56] H. Cheng and J. Cao, “A design framework and taxonomy for hybrid routing protocols in mobile ad hoc networks,” *Communications Surveys Tutorials*, IEEE, vol. 10, no. 3, pages 62 –73, 2008.
- [57] D. Chen and P. Varshney, “A survey of void handling techniques for geographic routing in wireless networks,” *Communications Surveys Tutorials*, IEEE, vol. 9, no. 1, pages 50 –67, 2007.
- [58] “Intelligent Transport Systems (ITS) – Vehicular Communications – Geographical Area Definition,” *European Telecommunications Standards Institute*, European Standard (draft) 302 931, 2010.
- [59] Maihöfer, Christian, Tim Leinmüller, and Elmar Schoch. 2005. “Abiding geocast : time–stable geocast for ad hoc networks,” *The 2nd ACM in-*

- ternational workshop on Vehicular ad hoc networks*. ACM, 2005, pages 20–29. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1080754.1080758>.
- [60] A. Castro, G. Serugendo, and D. Konstantas, “Hovering information–self-organizing information that finds its own storage,” *Autonomic Communication*, pages 111–145, 2009.
- [61] Karp B. and Kung H. T. “GPSR : greedy perimeter stateless routing for wireless networks,” *The 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages, 243-254, 2000.
- [62] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, D. Herrmann, H. Füßler, and M. Mauve, “A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV2003*, pp. 156-161, June 2003.
- [63] C. Lochert, M. Mauve, H. Füßler, and H. Hartenstein, “,” *ACM SIG-MOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, vol. 9, no. 1, pages 69-72, January.
- [64] Z. Wenhui L., B. Roberto and al., “Geocast in vehicular networks,” *Vehicular Networks*. Pages 377-407, April 2009.
- [65] Kumar, Rakesh, and Mayank Dave. 2011. “A Comparative Study of Various Routing Protocols in VANET,” *Journal of Computer Science* 8, no. 4 : pages 6. <http://arxiv.org/abs/1108.2094>.
- [66] Kakarla, Jagadeesh, S Siva Sathya, B Govinda Laxmi, and Ramesh Babu B. 2011. “A Survey on Routing Protocols and its Issues in VANET,” *International Journal of Computer Applications* 28, no. 4 : 38-44. <http://www.ijcaonline.org/volume28/number4/pxc3874663.pdf>.
- [67] Bachir, A., and A. Benslimane. 2003. “A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast,” *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, VTC 2003-Spring*, 2003.
- [68] Maihofer C., and R. Eberhardt, “Geocast in vehicular environments : caching and transmission range control for improved efficiency,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2004.

- [69] H. P. Joshi, M. L. Sichitiu, and M. Kihl, “Distributed robust geocast multicast routing for inter-vehicle communication,” *WEIRD Workshop on WiMax, Wireless and Mobility*, pages 9-21, 2007.
- [70] Kihl, Maria, Mihail Sichitiu, Ted Ekeroth, and Michael Rozenberg, “Reliable geographical multicast routing in vehicular ad-hoc networks,” *Wired/Wireless Internet Communications*, pages 315–325. <http://www.springerlink.com/index/D617036141047J53.pdf>.
- [71] Atechian T., “DG-CastoR : Direction-based GeoCast Routing Protocol for query dissemination in VANET,” *4th International Workshop on Localized Communication and Topology Protocols for Ad hoc Networks*, 2008.
- [72] Chen Y. S., Lin Y. W. and Lee S. L. “A Mobicast Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks,” *ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET)*, vol. 15, no. 1, pages 2035, 2010.
- [73] Rahbar, Hamidreza, Kshirasagar Naik, and Amiya Nayak, “DTSG : Dynamic time-stable geocast routing in vehicular ad hoc networks,” *The 9th IFIP Annual Mediterranean : Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, 2010 .
- [74] M. Durrezi, “Emergency broadcast protocol for intervehicle communications,” 2005.
- [75] G. Korkmaz, “Urban multihop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems”.
- [76] O. K. Tonguz, N. Wisitpongphan, F. Bai, P. Mudalige and V. Sadekar, “Broadcasting in VANET”, Proc. IEEE INFOCOM MOVE Workshop 2007, Anchorage, USA, May, 2007.
- [77] M. Sum, “GPS-based message broadcasting for Intervehicle”, 2000.
- [78] M. Nekovee, B. Bjamibogason, “Reliable and efficient information dissemination in intermittently connected vehicular ad hoc networks”, IEEE the 65th VTC’07 spring, Dublin, Ireland, April 22-25, 2007.
- [79] Rainer Baumann, “Vehicular Ad hoc Networks”, Master’s Thesis in Computer Science, ETH Zurich 2004.

- [80] Adnan Afsar Khan, Ivan Stojmenovic, Nejb Zaguia, "Parameter less broadcasting in static to highly mobile wireless ad hoc, sensor and actuator networks", in Proc. ACM Int.Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Seattle, USA, August 1999.
- [81] V. Naumov, R. Baumann, and T. Gross, "An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces," Proc. ACM the 7th ACM MohiHoc'06, Florence, italy, May 22-25, 2006.
- [82] N. Na Nakom, and K. Rojviboonchai, "DECA : Density-Aware Reliable Broadcasting in Vehicular Ad-Hoc Networks," IEEE the 7th ECTI-CON2010, Chiang Mai, Thailand, May 19-21, 2010.
- [83] A. Laouti, P. Muhlethaler, and Y. Toor, "Opportunistic broadcast in vanets (ob-van) using active signaling for relays selection," 8th International Conference on ITS Telecommunications ITST'08, 2008.
- [84] P. Jaquet, P. Minet, P. Mühlethaler, and N. Rivierre, "Priority and collision detection with active signalling : The channel access mechanism of hiperlan," in Wireless Personal Communication., January 1997, pp.11-25.
- [85] N. Na Nakom, and K. Rojviboonchai, "Efficient Beacon Solution for Wireless Ad-Hoc Networks," The CSSnoJO, Bangkok, Thailand. May 12-14, 2010.
- [86] eWorld website : <http://www.eworld.github.com/>, October 2014.
- [87] NS-3 website : <http://www.nsnam.org>, October 2014.
- [88] OpenStreetMap website : <http://www.openstreetmap.org/>, October 2014.
- [89] Konstantinos Katsaros, Mehrdad Dianati, Long Le. "Effective Implementation of Location Services for VANETs in Hybrid Network Infrastructures," *IEEE ICC 2013 Workshop on Emerging Vehicular Networks : V2V/V2I and Railroad Communications*, 2013.

# Table des figures

1.1	Un exemple de routage géocast : un nœud d'infrastructure initie la transmission. Le message est relayé puis délivré à tous les nœuds situés dans la zone de destination (en rouge). . . . .	5
1.2	Réseau routier de la ville de Paris avec les axes principaux et secondaires. Prise du projet Open Street Map. . . . .	7
1.3	Exemple de distribution du délais de bout-en-bout des messages de sureté, divisé en intervalles de temps . . . . .	9
2.1	Panneau à messages variables annonçant des travaux . . . . .	14
2.2	Architecture WAVE . . . . .	17
2.3	Diagramme des durées des projets STIs dans le monde . . . . .	20
2.4	Exemple de réseau VANET . . . . .	24
2.5	Architecture CALM ISO . . . . .	26
2.6	Effets de propagation . . . . .	28
2.7	Distribution du spectre DSRC en canaux aux USA . . . . .	30
2.8	Le problème de nœud caché. Deux émetteurs qui sont hors de leur zones de couvertures respectives transmettent simultanément un message à un récepteur situé au milieu, provoquant une collision au niveau de la couche de liaison. . . . .	32
2.9	Mécanisme d'accès EDCA pour trois diffusions . . . . .	33
2.10	Les bandes de fréquences allouées pour l'usage de la norme IEEE 802.11p pour les applications ITS en Europe et aux USA. . . . .	35
3.1	Protocoles de routage MANETs . . . . .	41
3.2	Sélection des MPRs . . . . .	43
3.3	Catégories de routage géographique . . . . .	47

3.4	Technique du Greedy Forwarding . . . . .	49
3.5	Scénario d'un maximum local . . . . .	50
3.6	Règle de la main droite . . . . .	51
3.7	Routage greedy restreint dans GPCR . . . . .	53
3.8	Résultats du premier scénario . . . . .	55
3.9	Résultats du deuxième scénario . . . . .	56
3.10	Résultats du troisième scénario . . . . .	57
3.11	Sélection de relais dans IVG : $x$ est le voisin le plus loin de $z$ par rapport à $y$ . $x$ devient relais. $x$ permet d'atteindre $w$ alors que $y$ ne le peut pas. . . . .	60
3.12	Application de jeu Mobicast, l'invitation est initiée par le véhicule $V_1$ . . . . .	63
3.13	Classification des protocoles de routage géocast selon la tech- nique de découverte du voisinage . . . . .	65
4.1	Formes des ZORs . . . . .	70
4.2	Les formes simples permettent de couvrir les virages . . . . .	72
4.3	Couvrir les véhicules situés sur l'avenue de la Grande Armée et au niveau du rond-point Charles de Gaulle . . . . .	72
4.4	Le ZOR est un ensemble de Sous-ZORs . . . . .	73
4.5	Positions de $S$ par rapport au $ZOR$ . . . . .	74
4.6	Scénario illustrant la problématique . . . . .	75
4.7	Technique de détection des sous-ZORs situés dans la même direction par angles de visions . . . . .	78
4.8	Etat du message géocast dans le système . . . . .	79
4.9	Diagramme de flux Unicast dans GeoSUZ . . . . .	84
4.10	Scénarios de test et application de GPSR simple . . . . .	86
4.11	Scénarios d'application de GPSR amélioré et de GeoSUZ . . . . .	86
4.12	Courbe des résultats : Taux de messages générés avant le pre- mier sous-ZOR . . . . .	87
4.13	Courbe des résultats : Taux de messages générés après le pre- mier sous-ZOR . . . . .	88
4.14	Résultats numériques . . . . .	88

5.1	Sous-ZOR liéaire . . . . .	94
5.2	Structure de l’acquittement servant dans le processus de sélection du meilleur relais . . . . .	95
5.3	Exemple du processus de sélection d’un relais dans OB-VAN .	96
5.4	Résultats de la diffusion du message GeoSUZ dans un sous-ZOR	97
5.5	Diagramme de flux de l’algorithme GeoSUZ . . . . .	100
5.6	Les classes GPSR . . . . .	119
5.7	Schéma récapitulatif des étapes de simulation . . . . .	125

# Liste des tableaux

2.1	Différentes technologies de communication sans fil . . . . .	16
2.3	Liste des projets STIs dans le monde . . . . .	19
2.4	Comparaison de DSRC au Japan, Europe et EUA . . . . .	31
2.5	Tableau comparatif de trois simulateurs VANETs . . . . .	36
3.1	Les paramètres utilisés dans les différents scénarios . . . . .	54
3.2	Comparaison des protocoles de routage Geocast . . . . .	66
4.1	Caractéristiques du protocole . . . . .	82
5.1	Paramètres de simulation de OB-VAN dans un sous-ZOR . . . . .	98

# Annexe A : Les classes du protocole GPSR

Les principaux modules utilisés par GPSR sont schématisés dans la figure 5.6.

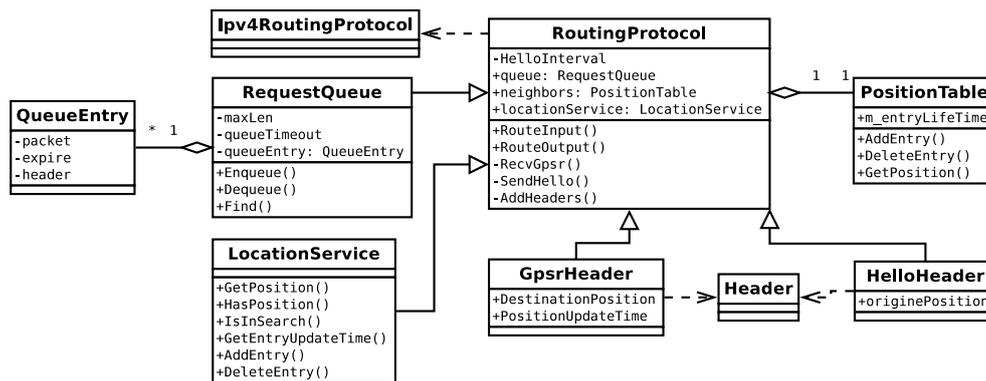


FIGURE 5.6 – Les classes GPSR

**PositionTable** La table de position possède une entrée pour chaque voisin. Chaque entrée comprend l'identifiant du voisin, ses coordonnées ainsi que le temps de réception du dernier message Hello.

**Header** Il y a deux types de message Header (Entête) : les messages Hello pour maintenir la liste des voisins à jour et les messages GPSR pour transmettre la position du nœud récepteur au nœud relais.

**Message Hello ns3 : :gpsr : :Header :** La longueur de ce message est de 8 octets. Le message contient la position du nœud émetteur.

La fréquence d'envoi de ces messages est paramétrable et prends la valeur 1 (second) par défaut.

**Message GPSR ns3 : :gpsr : :GpsrHeader :** La longueur de ce message est de 16 octets. Le message contient la position du nœud de destination et l'horodatage (stamp) pour vérifier et rafraichir la table de position.

**RequestQueue** Quand la route demandée pour transmettre un paquet n'est pas encore disponible, soit à cause de la position inconnue du destinataire, ou parce qu'aucun voisin n'est à portée de communication, le paquet est mis en file d'attente "RequestQueue" qui est consultée régulièrement pour vérifier s'il y a un paquet qui contient des informations pour répondre aux demandes en attentes.

**LocationService** C'est le protocole qui fournit le service de localisation.

# Annexe B : Intégration de GPSR dans NS-3

Le protocole GPSR ne fait pas partie des modules intégrés dans NS-3 et n'est disponible qu'en C++. Dans ce qui suit, nous allons montrer comment nous avons intégré le protocole GPSR au simulateur NS-3.

Dans un terminal, exécutez le script `.../ns-3.19/src/create-module.py` comme suit :

```
1 ./create-module.py gpsr
```

Pour télécharger la dernière version de GPSR et du protocole de localisation Location Service, il faut exécuter :

```
1 hg clone https://code.google.com/p/ns3-gpsr
```

Copiez les sous répertoires de `.../ns3-gpsr-e573bdf3980d.2/src/gpsr/*` dans le dossier créé précédemment avec `creat-module.py`. Faites de même pour le module `location-service`, car il est nécessaire pour le fonctionnement de GPSR. Afin d'inclure les modules ajoutés dans la compilation, il faut exécuter les commandes ci-dessous :

```
1 ./waf configure
```

```
2 ./waf build
```

Toutefois, nous avons rencontré des erreurs lors de cette opération, lors de l'utilisation de la version NS-3.19. Par conséquent, il faut procéder aux corrections des scripts dont le nom est `wscript` qui se trouvent dans les répertoires `src`, `gpsr` et `location-service`.

Il faut remplacer `headers=bld(features=['ns3header'])` par `headers=bld(features='ns3header')`.

Il faut copier le fichier `ipv4-l4-protocole.h` dans `.../ns-3.19/build/ns3` qui se trouve déjà dans `ns3-gpsr-e573bdf3980d.2/build/ns3/`.

Enfin, Supprimez la variable `addr` non utilisée du script `gpsr.cc` puis re-exécuter `./waf`.

# Annexe C : Simulation d'un réseau VANET

## 1 Outils de simulation

Dans les réseaux VANETs, deux types de simulateurs sont requises : Un simulateur de réseau d'une part et un simulateur du trafic routier d'autre part. Les simulateurs de réseaux sont utilisés pour l'évaluation des performances des protocoles de routage dans différentes conditions. Tandis que les simulateurs de trafic routier sont utilisés pour la préparation de la carte numérique du réseau routier et la configuration de la mobilité des véhicules.

Nous avons utilisé dans nos simulations deux simulateurs de trafic routier eWorld et SUMO et le simulateur de réseau NS-3.

### 1.1 eWorld

C'est un projet réalisé par des étudiants allemands de l'institut Hasso Plattner. C'est un outil qui permet d'importer des cartes proposées par des fournisseurs tels que (Open Street map), les visualiser, les éditer et les enrichir avec des événements, puis l'exporter vers un simulateur de trafic routier. [86]

### 1.2 SUMO (Simulator of Urban Mobility )

SUMO est développé par des employés de l'Institut de Systèmes de Transportation dans le Centre aéronautique Allemand. Il permet de simuler le trafic routier. Dans SUMO, chaque véhicule possède son propre routage dy-

namique. Le comportement du véhicule est vivant comme le changement de voie. Les routes dans SUMO sont présentées sous forme de plusieurs voies. Il y a des jonctions à base de règle de circulation et d'autres à priorité[46].

### **1.3 Le simulateur de réseau NS-3**

Un simulateur de réseau se compose d'une large gamme de technologies de réseau et de protocoles. Il est conçu pour aider les utilisateurs à créer des réseaux complexes à partir des classes représentant les modules de base pour construire un réseaux.

Nous avons choisi de faire notre simulation avec le simulateur de réseau NS-3 (Network Simulator 3) [87]. Les raisons de ce choix sont justifiées par la robustesse du simulateur NS-3. En effet, ce simulateur offre de meilleures performances en terme de rapidité de calcul et en temps de réponse. De plus, il garantit un passage à l'échelle jusqu'à 3000 nœuds.

## **2 Les étapes de la simulation**

La figure 5.7 présente les étapes de simulation qu'il est nécessaire de suivre pour réaliser des simulations de réseaux VANETs.

### **2.1 Simulation du trafic routier**

Pour une évaluation cohérente des performances d'un protocole de routage pour les réseaux véhiculaires, il est nécessaire de créer un scénario proche de la réalité selon un réseau routier déterminé. C'est dans cette optique que nous avons eu recours aux simulateurs présentés précédemment.

#### **2.1.1 Préparation de la carte avec eWorld**

Dans cette étape, nous avons importé une carte de la ville Paris du site officiel d'Open Street Map [88] vers eWorld où nous avons configuré les points de départ des véhicules et leurs points d'arrivée. Nous avons défini les types

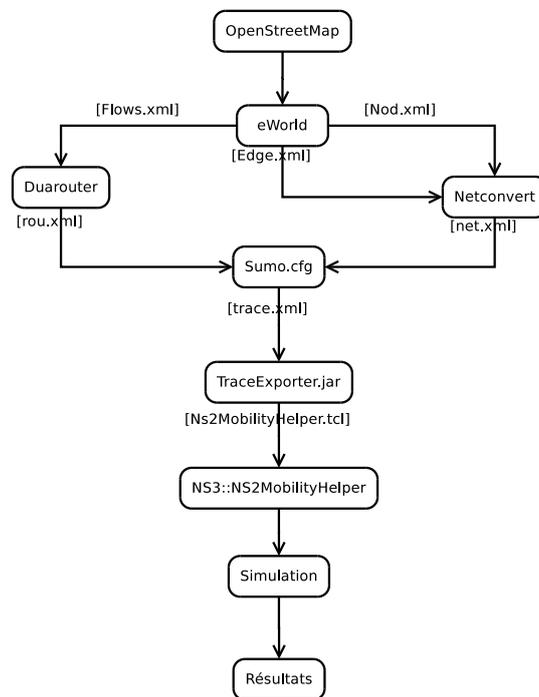


FIGURE 5.7 – Schéma récapitulatif des étapes de simulation

des véhicules et les nœuds (intersection) à feux de circulation et ceux à priorité.

Une fois la carte prête, nous l’avons exportée vers SUMO et nous avons obtenu les fichiers nod.xml, edg.xml et flow.xml.

### Récapitulatif des manipulation

1. Télécharger eWorld
2. ./eWorld.sh
3. Import : Import from OSM online...
4. Choisir la zone à télécharger
5. Ajouter des points de départ et d’arrivée
6. Export : Export to SUMO...
  - (a) Location : à spécifier
  - (b) Name : à spécifier

- (c) Case à cocher : Export traffic light system lo...
- (d) Case à cocher : Generate Net-File
- (e) Location of netconvert : /usr/bin/netconvert
- (f) Case à cocher : Generate routes with duarouter...
- (g) Location of duarouter : /usr/bin/duarouter
- (h) case à cocher : Generate scenarios
- (i) Export

### 2.1.2 Création de scénario avec SUMO

Pour créer un scénario dans SUMO, on a besoin des fichiers .xml générés lors du passage de eWorld à SUMO. En général, le simulateur SUMO a besoin de trois fichiers en entrée flow.xml, nod.xml et edg.xml qui contiennent les informations sur le réseau.

**Node file** : C'est le fichier qui définit les nœuds de la carte du réseau routier. Chaque nœud est défini par ses coordonnées x et y, et un identifiant (id) unique qu'on lui associe.

```
<nodes>
<node id="identifiant" x="cordonnee_x" y="cordonnee_y" />
</nodes>
```

**Edge file** : Ce fichier contient les connexions entre différents nœuds. Chaque connexion est définie par son propre et unique identifiant (id), le nœud source, le nœud destinataire, la priorité, le nombre de voies et la vitesse maximale autorisée.

```
<edges>
<edge id="identifiant_" from="le_nœud_source" to="le_nœud_
destination" priority="la_priorite" numLanes="nombre_de_voies
" speed="vitesse_maximal_autorisee" />
</edges>
```

**Net file** : Le fichier réseau (Network file) dans SUMO porte l'extension .net.xml. Ce dernier est généré en appliquant la commande NETCONVERT qui prend en arguments les deux fichiers edg.xml et nod.xml.

```
netconvert -n=exemple.nod.xml -e=exemple.edg.xml --output-file=exemple.net.xml
```

**Flow file :** Le fichier flow.xml définit le flux entre deux routes. Il spécifie le nœud de départ, le nœud d'arrivée et le nombre de véhicules. le fichier flow est illustré ci-après :

```
<flows>
<flow id="id" from="nœud_source" to="nœud_destination" begin="
    temps_de_debut" end="temps_de_fin" number="Nombre_de_
    vehicules" />
</flows>
```

**Route file :** Le fichier route rou.xml est généré via la commande DUAROUTER qui prend en arguments deux fichiers : net.xml et flow.xml. La commande DUAROUTER permet de définir les routes qui peuvent être empruntées par les véhicules en utilisant la méthode de chemin le plus court.

```
duarouter --flows=xx.flow.xml --net=xx.net.xml --output-file=
    newrou.rou.xml
```

**sumocfg file :** C'est le fichier de configuration de SUMO. Sumocfg utilise le fichier route et le fichier réseau en entrée pour la configuration de la simulation. Le fichier .sumo.cfg est illustré ci-dessous :

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<configurationxmlns : xsi =" http://www.w3.org/2001/XMLSchema-
    instance" xsi : noNamespaceSchemaLocation= " http://sumo.sf.
    net/xsd/\\sumoConfiguration.xsd">
<input>
<net-filevalue="xx.net.xml" /> // netfile
<route-filesvalue="newroute.rou.xml" /> // routefile
</input>
<time>
<beginvalue="0" /> // simulation start time
<end value="600" /> // simulation end time
</time>
</configuration>
```

## 2.2 Génération des fichiers traces de mobilité

La création des fichiers trace demeure l'étape la plus importante pour créer un scénario pour le simulateur de réseau, qui est NS3 dans notre cas. Pour générer le fichier trace, nous avons utilisé TraceExporter.jar qui est un utilitaire incluse par défaut dans sumo. L'exportation ce fait en deux étapes :

La première consiste à créer un fichier trace pour SUMO, à savoir trace.xml à l'aide de la commande suivante :

1. Dans maillot.flows.xml, Changer `no=" "` /> par `number="10"` /> dans toutes les occurences du fichier
  2. duarouter
- ```
1 duarouter --flows=maillot.flows.xml --net=maillot.net.xml
2 --output-file=maillotNew.rou.xml
```
3. Dans maillot.sumo.cfg, spécifier `<route-files value="maillotNew.rou.xml" />`
  4. Dans maillotNew.rou.xml, supprimer `type="DefaultVehicle"` dans toutes les occurences de `<vehicle id="0.0" type="DefaultVehicle" depart="0.00">`.
  5. Lancer sumo-gui et ouvrir le fichier de configuration maillot.sumo.cfg, mettre Delays (ms) à 350
  6. Démarrer la simulation
  7. Pour générer les traces
- ```
sumo -c mon-scenario.sumo.cfg --fcd-output sumoTrace.xml
```

La deuxième étape : on convertit le fichier trace généré précédemment en un format de fichier trace qui peut être utilisé par un simulateur réseau. Dans notre cas, nous avons besoin des fichiers .tcl qui sont spécifiques à NS-2.

La commande ci-dessous retourne trois fichiers en format .tcl : config.tcl, mobility.tcl et activity.tcl.

```
java -jar traceExporter.jar ns2 -n maillot.net.xml -t sumoTrace.xml
-a activity.tcl -m mobility.tcl -c config.tcl -b 0 -e 9630 -p 1
```

```
python traceExporter.py -i sumoTrace.xml -n maillot.net.xml
--ns2activity -output=activity.tcl --ns2config -output=config.tcl
--ns2mobility -output=mobility.tcl
```

où

-b : Le temps de début de la simulation

-e : Le temps de la fin de la simulation.

-a,-m et -c : pour spécifier les fichiers de sortie.

-p : Le nombre de véhicules participant à la simulation

## 2.3 Script de simulation NS-3

Après avoir configuré et généré le fichier de mobilité dédié à l'environnement des réseaux véhiculaires, nous pouvons à présent commencer à écrire notre script de simulation.

Un simple script dans NS-3 peut être écrit en C++ ou en Python. Dans le cadre de notre travail, nous utilisons le C++ car le protocole que nous évaluons n'est disponible qu'en C++ qui est d'ailleurs plus rapide que le Python.

Notre script pour évaluer le protocole GPSR comprend les étapes suivantes :

Importer les bibliothèques nécessaires : Ce sont les modules que nous devons ajouter à notre simulation. En effet, NS-3 fournit plusieurs HelperClass. Dans notre cas, nous utilisons gpsr-helper.h et bien entendu d'autres modules qui sont utiles au fonctionnement de ce dernier.

```
#include " ns3/core-module.h"
#include " ns3/network-module.h"
...
#include " ns3/stats-module.h"
```

Le corps du script : Ici, c'est le cœur de la simulation. Pour arriver à ce stade, il a fallu lire la documentation en anglais qui se trouve dans le site officiel de NS-3 [87]. De plus, nous avons consulté plusieurs exemples déjà intégrés dans NS-3 pour certains protocoles. C'est là que nous avons parvenu à configurer nos scénarios, notamment, définir les technologies à

utiliser ainsi que la configuration du protocole gprs. Les principales étapes sont les suivantes :

Configuration du canal Wifi : Premièrement, nous avons créé le canal Wifi. Dans NS-3, il existe plusieurs technologies pour configurer la couche liaison de données. Pour les VANETs, Comme nous l'avons déjà mentionné dans le Chapitre 1, le modèle WAVE est utilisé. Pour le faire nous nous sommes appuyés sur l'exemple qui se trouve dans le module WAVE de NS-3.

```
WifiHelper wifi;  
YansWifiPhyHelper wifiPhy=YansWifiPhyHelper::Default();
```

La prochaine étape consiste à définir le modèle de propagation pour le canal wifi. Nous avons choisi le modèle Two Ray Ground qui prend en compte le chemin directe et la réflexion de sol, tel qu'il a été défini dans les scénarios. Toutefois, ce modèle ne permet pas de spécifier la portée de communication des nœuds. Pour y remédier, nous utilisons le modèle Friis.

```
YansWifiChannelHelper wifiChannel;  
wifiChannel.SetPropagationDelay("ns3::  
    ConstantSpeedPropagationDelayModel");  
wifiChannel.AddPropagationLoss("ns3::FriisPropagationLossModel",  
    "MinDistance", DoubleValue(range));  
wifiChannel.AddPropagationLoss("ns3::  
    TwoRayGroundPropagationLossModel", "SystemLoss", DoubleValue  
    (1), "HeightAboveZ", DoubleValue(1.5));
```

Ensuite, nous avons configuré le protocole MAC 802.11p en s'appuyant toujours sur l'exemple du module WAVE.

```
NqosWaveMacHelper wifi80211pMac=NqosWaveMacHelper::Default();  
Wifi80211pHelper wifi80211p=Wifi80211pHelper::Default();  
wifi80211p.SetRemoteStationManager("ns3::ConstantRateWifiManager",  
    "DataMode", StringValue(phyMode), "ControlMode",  
    StringValue(phyMode));
```

Création des nœuds : Nous avons créé le canal Wifi. Maintenant, nous devons créer les nœuds puis définir la mobilité pour ces nœuds. NS-3 nous offre plusieurs modèles de mobilité. Nous utilisons la Classe Ns2MobilityHelper pour importer le fichier de mobilité en format .tcl, que nous avons généré

précédemment en utilisant SUMO, dans NS-3. La classe NetDeviceContainer permet de configurer tous les équipements utilisés dans la simulation.

ROUTAGE : Nous avons donc importé la mobilité configurée dans le simulateur externe (SUMO). Notez que le nombre de nœuds dans la simulation doit être inférieure ou égale au nombre de véhicules dans la configuration dans SUMO. Nous devons maintenant assigner un protocole de routage pour notre simulation suivie du protocole internet "IP". Dans notre cas, nous utilisons la classe (GpsrHelper) pour le protocole GPSR. La classe InternetStackHelper est utilisée pour installer la pile internet au niveau de chaque nœud.

```
GpsrHelper gpsr ;
InternetStackHelper internet ;
internet.SetRoutingHelper(gpsr);
internet.Install(c);
```

Configuration de GPSR Il s'agit d'activer le mode perimeter et le type de service pour la localisation GPSR LS GOD/GPSR LS RLS [89], ainsi que la fréquence des messages Hello.

```
gpsr.Set("HelloInterval", TimeValue(Seconds(1)));
gpsr.set("LocationServiceName", EnumValue(GPSR.LS_GOD));
gpsr.Set("PerimeterMode", BooleanValue(true));
```

Adressage IP : NS-3 supporte l'adressage IPv4 et IPv6. Nous avons choisi d'utiliser IPv4 car on est plus familier avec ce type d'adressage. La Classe à utiliser est Ipv4AddressHelper.

```
Ipv4AddressHelper ipv4 ;
ipv4.SetBase("10.1.0.0", "255.255.0.0");
Ipv4InterfaceContainer i=ipv4.Assign(devices);
```

Application : Nous jugeons que l'étape la plus importante, c'est d'écrire une application pour la simulation. Une application est associée à un nœud individuel. Chaque nœud contient une liste de référence à ses applications. Ces références sont données en utilisant un pointeur intelligent. NS-3 propose plusieurs applications telles que OnOff, PacketSink, UdpEcho, UdpClient-Server...etc. Toutes ces applications sont faciles à configurer en utilisant les HelperClass proposées. Pour les VANETs, nous avons choisi de faire la simulation avec l'application UdpClientServer. La raison de ce choix, c'est les

exemples que nous avons trouvés dans les protocoles déjà intégrés dans NS3 tels que DSR et OLSR.

Pour utiliser l'application `UdpClientServer`, nous avons défini un nœud source (émetteur) et un autre nœud récepteur. La tâche de la source, c'est d'ouvrir une socquette (socket) pour se connecter au récepteur en l'identifiant à l'aide des adresses IP assignées précédemment. La tâche du récepteur est d'accepter la demande entrante de la source pour se connecter avec elle. Pour la synchronisation, il faut que les numéros de port pour le client et le serveur soient identiques.

```
TypeId tid=TypeId::LookupByName(" ns3 :: UdpSocketFactory" );
Ptr<Socket> recvSink=Socket::CreateSocket(c.Get(sinkNode), tid);
InetSocketAddress local=InetSocketAddress(Ipv4Address::GetAny(),
    ,9);
recvSink->Bind(local);
recvSink->SetRecvCallback(MakeCallback(&ReceivePacket));

Ptr<Socket> source=Socket::CreateSocket(c.Get(sourceNode), tid);
InetSocketAddress remote=InetSocketAddress(i.GetAddress(sinkNode),
    ,0),9);
source->Connect(remote);
```

Exécution de la simulation : Une fois que tout est au point, la simulation peut commencer. Il faut que la durée de simulation soit spécifiée, c'est-à-dire, indiquer le temps de fin de simulation. Autrement, elle ne sera jamais achevée.

Collection et analyse des données : Le but ultime d'une simulation, c'est la collecte et l'analyse des informations sur les événements qui se produisent au sein du réseau.

NS-3 propose différentes méthodes pour collecter les informations.

- Le Flow Monitor.
- Méthode statique avec Framework.
- Méthode traditionnelle des fichiers traces.

Nous avons voulu utiliser la première méthode qui est plus fiable et plus facile à intégrer. Malheureusement, le problème de Flow Monitor est qu'il ne peut pas être utilisé avec des protocoles tels que GPSR et GPCR pour le moment.

La méthode traditionnelle consiste à générer des fichiers trace au format “.pcap” qu’on peut analyser en utilisant Wireshark ou tcpdump. Toutefois, on obtient autant de fichiers traces que le nombre de nœuds définis dans le script de simulation NS-3. Par conséquent, l’analyse de ces traces devient très longue. Il existe aussi un fichier trace dit ASCII au format “.tr”. Ce fichier peut être interprété de la même manière que le fichier trace de NS-2. Tout le trafic du réseau y compris les messages de contrôle sont enregistrés dans ce fichier. Ceci rend l’analyse assez compliquée.

C’est pour cela, que nous estimons que la meilleure méthode pour faire l’évaluation est la deuxième approche.

Nous aurions souhaité le faire avec les deux méthodes pour comparer et s’assurer de la fiabilité des résultats obtenus, mais par faute de temps, nous ne sommes pas parvenu à ce niveau.

Exécuter le script : Pour exécuter le script, nous utiliserons la commande suivante :

```
./waf --run <script> --visualiser
```

L’option `--visualiser` est utilisée pour visualiser la simulation en temps réel avec l’outil Pyviz.

Net-Anim permet de visualiser la simulation une fois achevée en utilisant un certain type de fichier trace. Pour plus de détails voir, la documentation [87].

## 2.4 Collecte d’informations

La simulation peut prendre plusieurs minutes pour GPSR, voir des heures pour le protocole AODV. Ceci dépend de la taille du réseau et du protocole à simuler.

Une fois que la simulation d’un scénario est achevée, les résultats sont affichés à l’écran. Pour cela, nous avons défini deux fonctions statiques. Une pour générer le trafic, une autre pour faire des calculs.

**La fonction de génération de trafic :** Dans le code de l’application `UdpClientServer`, on a fait appel à la fonction `GenerateTrafic` pour envoyer les paquets.

Le débit moyen : Pour calculer le débit moyen, il suffit de récupérer la taille des données reçues avec la fonction `GetSize()` de la classe `packet` et le temps entre le premier et le dernier paquet reçu.

**Le délai moyen de bout-en-bout :** Pour calculer le délai moyen de bout-en-bout, il suffit de calculer les délais cumulés entre l'envoi et la réception de chaque paquet. Pour le faire, on utilise la fonction `Simulator : :Now()` qui retourne le temps de l'événement actuel et la fonction `GetTs()` qui retourne le temps d'encapsulation de l'entête `SeqTsHeader`.

**Nombre de paquets reçus :** Pour calculer le nombre de paquets reçus, il suffit tout simplement d'incrémenter le nombre de paquets reçus dans la fonction `ReceivePacket ()`.

Pour les autres métriques d'évaluation, nous avons exploité les résultats précédents pour les calculer.